



Ministère
de l'Équipement
des Transports
et du Tourisme

12297



CARTOGRAPHIE DES ZONES INONDABLES

APPROCHE HYDROGÉOMORPHOLOGIQUE



Prévention des risques naturels

Direction de l'Architecture et de l'Urbanisme
Direction de l'Eau - Direction de la Prévention, des Pollutions et des Risques

CARTOGRAPHIE DES ZONES INONDABLES

APPROCHE HYDROGÉOMORPHOLOGIQUE

 **Ministère de l'Équipement
des Transports et du Tourisme**
Direction de l'Architecture et de l'Urbanisme
Sous direction du droit et du contentieux de l'urbanisme



Direction de l'Eau
Sous direction de la gestion
des eaux*

Direction de la Prévention,
des Pollutions et des Risques
Sous direction de la prévention
des risques majeurs

Cet ouvrage a été réalisé sous la direction de Gérard Garry, chargé de mission « Risques naturels » à la sous direction du droit de l'Urbanisme et du Contentieux, Direction de l'Architecture et de l'Urbanisme au ministère de l'Équipement, du Logement, des Transports et du Tourisme.

Il est publié avec le concours du ministère de l'Environnement :

- Direction de la Prévention des Pollutions et des Risques, sous direction de la Prévention des Risques Majeurs
- Direction de l'Eau, sous direction de la gestion des eaux.

RÉDACTION :

Marcel Masson

Géologue, CETE Méditerranée,

Gérard Garry

Géographe, DAU

Jean-Louis Ballais

Géographe, Institut de Géographie, Université de Provence

DESSINS :

Patrick Pentsch

Dessinateur à l'université de Provence

CARTES :

Laurent Crauchet

Michel Melio

Technicien au CETE Méditerranée.

MAQUETTE :

Hélène Allias Denis (DAU)

PHOTOGRAVURE, IMPRESSION :

Le Clavier - Paris

COUVERTURE :

Grafy'Studio - Paris

Introduction	5
<u>1</u>	
FONDEMENTS DE L'HYDROGÉOMORPHOLOGIE	7
<u>2</u>	
CARACTÉRISATION HYDROGÉOMORPHOLOGIQUE DES ZONES INONDABLES	27
<u>3</u>	
MISE EN ŒUVRE DE LA MÉTHODE HYDROGÉOMORPHOLOGIQUE	57
Conclusion	96
Glossaire	97
Références bibliographiques	98
Sigles	100
Sources photographiques	

Les inondations représentent un phénomène naturel largement répandu à la surface du globe. Elles sont à la fois les plus fréquentes et celles qui touchent le plus grand nombre d'individus. D'après les sources du Département des Affaires Humanitaires des Nations Unies (DHA), 339 millions de personnes en ont été victimes entre 1900 et 1980. De 1970 à 1981, elles ont constituées plus du tiers de l'ensemble des cataclysmes recensés.

Si les conséquences des inondations sont moins graves en France que dans certains pays en développement, elles concernent malgré tout environ 2 millions de riverains répartis dans 10 000 communes. Or, contrairement à certaines idées reçues, ce risque ne cesse de croître, en dépit de dispositions réglementaires et de travaux engagés sur les principaux cours d'eau depuis le siècle dernier, en raison notamment de l'extension de l'urbanisation dans les plaines alluviales. Aujourd'hui, le bilan est lourd. Outre les milliers de sinistrés et de personnes affectées psychologiquement, on a dénombré 250 morts en 25 ans. Les dommages ont atteint 2 milliards de francs à Nîmes en 1988, 1,6 milliards en 1992 à Vaison-la-Romaine et dans les départements du sud de la France, 4 milliards en décembre 1993 et 3 milliards au début de l'année 1995 dans l'ouest, le nord et l'est.

Cette situation résulte certainement en partie d'une trop grande confiance accordée par les aménageurs aux travaux de protection (digues, barrages...), à la défaillance de la mémoire collective qui tend à oublier rapidement les grandes crues passées et à la plus grande mobilité des hommes qui les conduit de plus en plus à s'installer dans des régions qui leur sont étrangères et dont ils ignorent les dangers.

Devant l'aggravation du processus et l'urgence de l'enrayer, l'Etat a entrepris en 1982 une politique active de prévention des risques naturels, initiée par la loi d'indemnisation des victimes des catastrophes naturelles et les Plans d'Exposition aux Risques (PER). Trois axes prioritaires se sont rapidement dégagés : développer la connaissance des phénomènes, informer la population des risques encourus et maîtriser l'occupation des sols.

La méthodologie élaborée en 1984 pour favoriser la connaissance des inondations a pu être précisée grâce à l'expérience acquise au cours des dernières années. Elle conduit aujourd'hui à définir plusieurs niveaux d'études hiérarchisés qui s'inscrivent dans un cadre géographique global, à différentes échelles (bassin versant ou sous bassin, plaine alluviale par tronçon homogène de cours d'eau), et qui s'appuient essentiellement sur les spécificités du terrain et les données disponibles en archive (Garry, 1993). La

nécessité d'intégrer l'ensemble des composantes de la problématique liée aux inondations dans une approche spatialisée et cohérente a déjà été évoquée par des géographes réputés (Tricart, 1958, 1974) qui n'ont pas toujours été suffisamment entendus par les responsables territoriaux et les aménageurs. Il est important désormais de réaffirmer cette idée fondamentale si l'on veut parvenir à contrôler plus efficacement l'urbanisation dans les zones submersibles, à préserver les champs d'expansion des crues et à réduire de façon significative les risques.

La méthode que nous proposons ici correspond à une première phase d'analyse des milieux naturels et anthropisés des vallées. Elle est basée sur une approche naturaliste, qui vise à mettre en évidence les différents lits des cours d'eau, les diverses implantations susceptibles de perturber les écoulements, en les accélérant ou en les ralentissant, et à en déduire les zones inondables ainsi que les valeurs approchées des paramètres physiques des inondations. Appuyée sur la photo-interprétation et sur une étude de terrain, elle est peu onéreuse et permet de traiter de grandes longueurs de cours d'eau dans un délai rapide. La cartographie qui en résulte, peut-être directement exploitée pour choisir des orientations en terme de planification et d'aménagement. Mais elle n'est pas exclusive et ne se substitue naturellement pas aux approches hydrologique et hydraulique. Dans les zones d'incertitude ou de forte pression urbaine, elle est un préalable incontournable pour saisir le fonctionnement global d'un cours d'eau et contribue à déterminer de façon rationnelle les secteurs où une éventuelle modélisation doit être envisagée.

Cette méthode constitue ainsi une aide utile à la mise en oeuvre des Plans de Prévention des Risques d'inondation (PPR) issus de la loi du 2 février 1995 sur le renforcement de la protection de l'environnement. Elle apporte également des éléments de réflexions indispensables pour la compréhension des hydro-systèmes qui devrait favoriser une meilleure prise en compte de l'écoulement des eaux dans les documents d'urbanisme et l'aménagement du territoire.

Le présent ouvrage n'a pas pour ambition de fournir des clefs rigides d'interprétation, mais de préciser les principes d'élaboration de la cartographie hydrogéomorphologique en montrant comment relier des informations d'ordre technique aux bases explicatives scientifiques, en l'occurrence celle de la géomorphologie. Il est destiné à informer largement les acteurs de la prévention du risque d'inondation des potentialités d'une méthode qui est actuellement opérationnelle et perfectible, mais qui requiert, pour être mise en oeuvre, des compétences en photo-interprétation et une formation spécifique à laquelle sont bien préparés les géographes, les géologues, et qui pourrait être dispensée aux ingénieurs hydrologues ou hydrauliciens.

L'ouvrage est organisé en trois parties. Il rappelle tout d'abord les fondements de l'hydrogéomorphologie, c'est à dire l'histoire géologique des vallées qui a façonné les plaines alluviales modernes. Il décrit ensuite les caractéristiques générales et particulières des milieux à étudier pour identifier et délimiter les zones inondables, en distinguant celles qui relèvent des facteurs naturels et celles qui sont consécutives à l'occupation humaine des territoires. Enfin, il explicite la méthode en décrivant les outils utiles au recueil des données, en développant l'analyse par entité géographique et en présentant plusieurs fiches de cas rédigées à partir d'expérimentations récentes menées dans plusieurs communes du sud-est de la France.

FONDEMENTS DE L'HYDROGÉOMORPHOLOGIE

<i>Éléments de géomorphologie</i>	8
<i>Définitions et échelles de la géomorphologie</i>	
<i>L'héritage du quaternaire</i>	
Les fluctuations des mers et des cours d'eau	
La modification des systèmes morphogéniques	
Le façonnement des dernières terrasses alluviales généralisées	
<i>Le fonctionnement des bassins versants</i>	14
<i>Organisation générale d'une vallée</i>	16
<i>Définitions</i>	
<i>Les versants</i>	
<i>La partie basse de la vallée</i>	
<i>Organisation et fonctionnement de la plaine alluviale moderne</i>	20
<i>Les unités géomorphologiques</i>	
<i>Les relations « transversales » entre les lits</i>	
<i>Le profil d'équilibre longitudinal</i>	
Le profil d'équilibre théorique et le profil d'équilibre réel	
L'équilibre dynamique	
<i>Conclusion : le bassin versant comme système</i>	26

Éléments de géomorphologie

Définitions et échelles de la géomorphologie

La géomorphologie est la science qui a pour objet la description et l'explication du relief terrestre (R. Coque, 1993), lui-même constitué par un système de pentes ou de versants.

Traditionnellement, en France, la géomorphologie se subdivise en trois domaines qui se différencient par l'objet d'étude et, par conséquent, par les échelles spatiales et temporelles utilisées : la géomorphologie structurale, la géomorphologie climatique et la géomorphologie dynamique.

La géomorphologie structurale étudie le relief structural, constitué de formes qui sont longues de plusieurs milliers à plusieurs dizaines de kilomètres, et vastes de plusieurs millions à plusieurs centaines de kilomètres carrés, comme les continents et les régions naturelles (chaînes de montagnes, plaines et plateaux). Elle recherche l'explication de l'existence et des caractéristiques du relief dans leurs rapports avec la structure géologique. Actuellement, la théorie de la tectonique des plaques lithosphériques est celle qui explique le mieux la répartition et les caractéristiques des reliefs à la surface de la Terre. L'évolution de ces formes de relief structural se mesure en millions d'années. *La formation et l'organisation des bassins versants s'inscrit dans ces échelles spatiales et temporelles.*

La géomorphologie climatique étudie le modelé hérité, constitué de formes de taille kilométrique à décimétrique, comme les moraines ou les terrasses alluviales. Elle recherche la cause de la mise en place de ce modelé dans la succession des systèmes morphogéniques (ou morphobioclimatiques) disparus. Même si cette recherche peut conduire à remonter très loin dans le passé géologique de la Terre, la genèse du modelé se mesure habituellement en quelques milliers à quelques dizaines d'années. *L'étude des vallées relève préférentiellement de cette géomorphologie climatique.*

La géomorphologie dynamique, enfin, étudie les processus morphogéniques actuels, à l'échelle de la dizaine de mètres au millimètre, voire au micron. Son échelle de temps va de quelques années à la seconde (ou moins). *La connaissance de la plaine alluviale moderne résulte de la géomorphologie dynamique.*

La géomorphologie "totale", articulant les trois domaines et les trois échelles spatiales et temporelles, permet de replacer la situation instantanée actuelle dans l'ensemble de l'évolution de l'histoire continentale, d'une part, et de l'histoire climatique, d'autre part. De ce point de vue, lorsqu'elle étudie les inondations et leurs effets, elle se distingue donc nettement de la méthode purement hydrologique qui est centrée sur la période actuelle (quelques dizaines d'années de connaissances statistiques) et sur l'histoire récente (au maximum, quelques siècles de données sur les crues).

L'héritage du Quaternaire

Le Quaternaire représente la dernière ère géologique, d'une durée d'environ 1,8 millions d'années, c'est-à-dire très peu à côté des 4,5 milliards d'années probables de la Terre. Cependant, cette période très courte a profondément marqué le modelé de la Terre et c'est, pour l'essentiel, au cours du Quaternaire, que se mettent en place les modelés qui constituent le cadre géomorphologique des plaines alluviales modernes. Ces dernières sont l'héritage de phases d'érosion ou d'accumulation de matériaux consécutives à des variations climatiques qui ont modifié le niveau des mers et les systèmes morphogéniques*.

Les fluctuations des mers et des cours d'eau

La principale caractéristique du Quaternaire est son instabilité climatique. Très tôt, au XIX^e siècle, les géologues et paléontologues ont reconnu l'existence de périodes plus froides que l'Actuel, nommées périodes glaciaires, et de périodes comparables à l'Actuel, nommées périodes interglaciaires. Au début du XX^e siècle, quatre glaciations ont d'abord été définies dans les Alpes bavaoises, nommées de la plus ancienne à la plus récente : Günz, Mindel, Riss et Würm. Les fluctuations climatiques ont pu être précisées depuis, au cours des dernières décennies, en particulier par l'utilisation des isotopes de l'oxygène et, plus précisément, par les rapports $^{18}O/^{16}O$ dans l'eau de mer (figure 1).

Ainsi, il a pu être mis en évidence, au cours du dernier million d'années, l'existence d'une dizaine de cycles glaciaires pendant lesquels les températures des eaux de surface des océans ont baissé d'environ 6 à 8°C dans la zone tempérée actuelle. Les recherches les plus récentes montrent, par l'étude des mêmes isotopes de l'oxygène dans les glaces du Groenland (Jouzel et al., 1994), que même pendant la dernière période interglaciaire semblable à la nôtre, des variations de température de

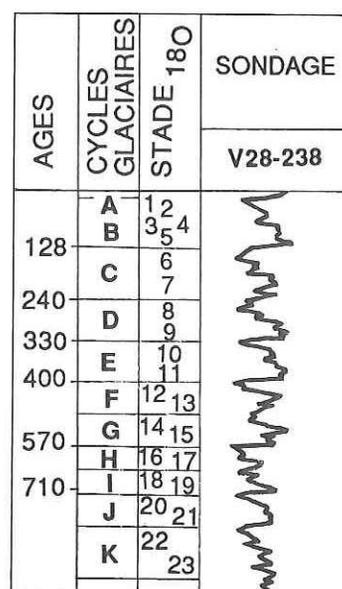
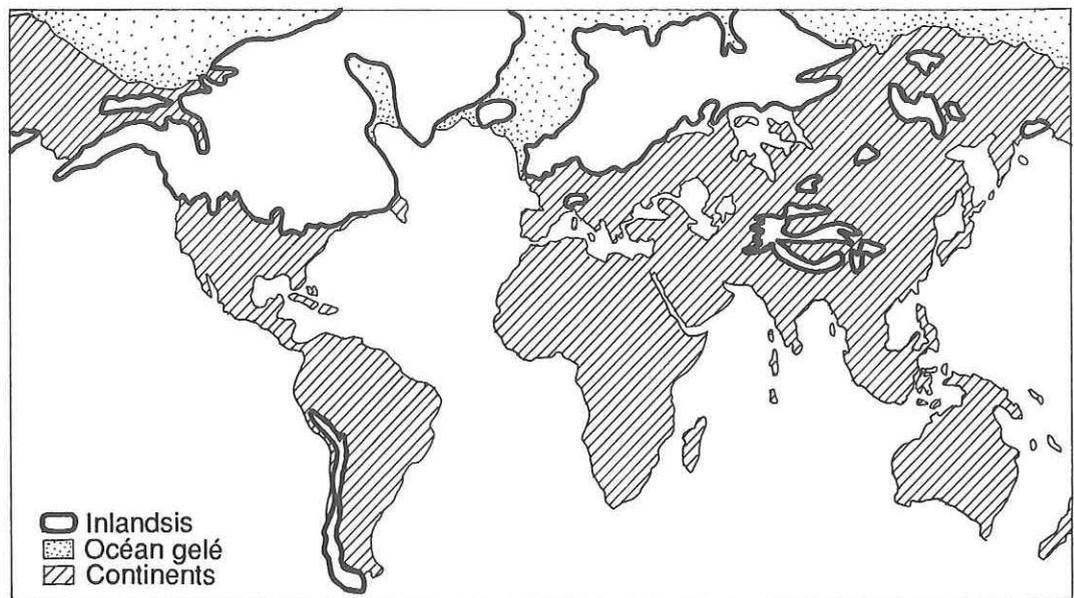


Figure 1 : Périodes glaciaires du Quaternaire : le sondage V28-238 dans l'océan Pacifique occidental. Les variations du rapport $^{18}O/^{16}O$ sont indiquées par la courbe de droite. Ces variations sont interprétées, de droite à gauche, en stades 0 et en cycles glaciaires. La colonne de gauche indique les âges obtenus par les méthodes isotopiques (d'après J. Chaline, 1985).

10°C se produisaient en quelques décennies. Cela prouve l'extrême instabilité du climat de la Terre et incite donc à la prudence concernant les prévisions sur le climat de notre planète.

Lors des périodes froides, les glaciers ont progressé sur les continents et les océans, à partir des inlandsis et des glaciers de l'Antarctique et, surtout, du Groenland, du Nord du Canada et de la Scandinavie. Lors du maximum de la dernière glaciation, il y a environ 18 000 ans, ils sont venus recouvrir tout le Nord de l'Europe, jusqu'aux sites actuels de Londres et de Berlin, et le Nord de l'Amérique, jusqu'à New York (figure 2). Ainsi, une partie des précipitations, beaucoup plus considérable qu'aujourd'hui, restait stockée sur le continent sous forme de glace et ne retournait pas à l'océan mondial.

Figure 2 :
Extension maximale
des glaciers lors de
la dernière période
glaciaire
(d'après N. Roberts,
1991, modifié)



La conséquence en a été une baisse spectaculaire du niveau des mers de l'ordre de 100 à 120 m. La majeure partie du plateau continental* a été alors exondée, l'étang de Berre, le bassin d'Arcachon, mais aussi la Manche tout entière ont disparu. A ce moment, tous les fleuves français qui se jettent actuellement dans la Manche, confluaient en un seul organisme fluvial qui passait au Nord de la péninsule actuelle du Cotentin. La mer du Nord avait aussi disparu et le Rhin et la Tamise y confluaient. Dans ces conditions, le cours des fleuves s'était allongé de plusieurs dizaines à quelques centaines de kilomètres, suivant la baisse du niveau de base*.

Inversement, lors de la déglaciation, achevée vers 10 000 ans avant l'Actuel, le niveau de l'océan mondial s'est relevé, et le niveau actuel n'a été atteint qu'il y a 5 à 6 000 ans (figure 3). Les fleuves ont donc dû s'adapter périodiquement à des abaissements et à des relèvements du niveau de base général, au moins une dizaine de fois au cours du Quaternaire. Dans le détail, les fluctuations ont été encore plus nombreuses car, au cours d'une même période, glaciaire comme interglaciaire, les températures, et le niveau des océans, varient fortement.

La modification des systèmes morphogéniques

Une autre conséquence majeure des fluctuations climatiques quaternaires a été la modification des systèmes morphogéniques. Pour se limiter à la zone tempérée, elles ont été radicales. En effet, en l'absence d'intervention des sociétés humaines, la zone tempérée se caractérise aujourd'hui par une inefficacité du système morpho-

génique due, pour l'essentiel, à la protection apportée aux sols par la forêt qui, à l'état naturel, couvre pratiquement toute la surface, à l'exception de quelques géosystèmes particuliers (montagnes, marécages). Les cours d'eau ne transportent ainsi généralement que des éléments fins (argiles, limons) en suspension.

La chute marquée des températures lors d'une période glaciaire provoque la disparition des forêts actuelles, remplacées par des formations végétales ouvertes (steppes, voire toundras) connues par l'étude des pollens* fossiles. Ces steppes sont alors fréquentées par des chevaux, des rennes, des mammoths, et les pingouins viennent jusqu'en Méditerranée (grotte Cosquer). La fragmentation des roches, principalement sous l'effet de la gélifraction*, fournit des masses de débris considérables. Ces débris sont mobilisés surtout lors des crues printanières, quand la neige et la glace fondent. Des débâcles saisonnières se produisent alors, à l'image des fleuves actuels de Sibérie ou du Nord canadien, qui transportent des masses considérables d'alluvions caillouteuses, dans un lit à chenaux anastomosés. Ces alluvions s'accumulent dans les vallées, sur plusieurs mètres d'épaisseur, jusqu'au niveau de base du moment : c'est ainsi qu'on repère très bien les alluvions caillouteuses de la Seine sous la Manche actuelle (Alduc et al., 1979).

Par ailleurs, l'abaissement du niveau marin a modifié la pente des fleuves principaux à l'aval de leur cours, favorisant ainsi une entaille locale, surtout dans les estuaires actuels. En d'autres termes, le contact alluvions - substratum a souvent une pente plus forte que le lit actuel des fleuves. Lors de la période interglaciaire suivante, la forêt ayant recolonisé le continent, les cours d'eau retrouvent un lit à chenal plus étroit, souvent à méandres. Ils ont tendance à entailler les alluvions caillouteuses qui sont mises peu à peu hors d'eau et constituent une terrasse, c'est-à-dire une surface subhorizontale hors d'atteinte des crues actuelles. La répétition des cycles période glaciaire - période interglaciaire a multiplié les nappes alluviales et les terrasses fluvia-

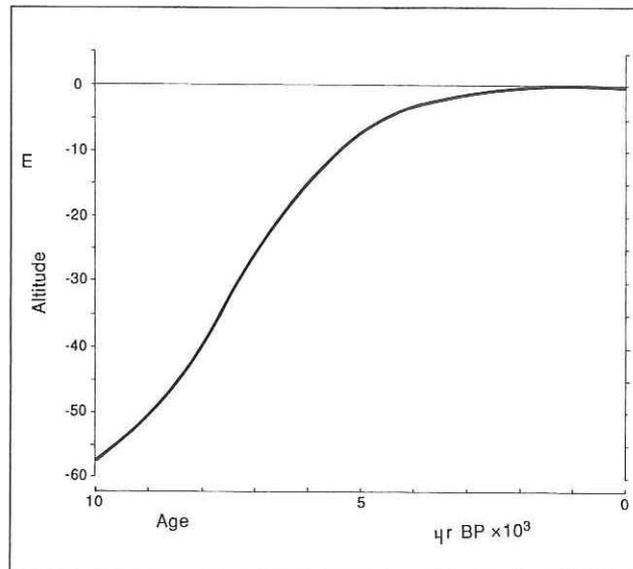


Figure 3 :
Remontée du
niveau de la mer
Méditerranée
après la dernière
glaciation
(d'après PP.
Pirazzoli, 1991,
modifié)

tiles, particulièrement dans les grandes vallées comme celle de la Garonne (figure 4). Dans le détail, et du fait des variations de température et d'humidité, plusieurs terrasses ont pu s'accumuler au cours d'une même phase glaciaire.

Le façonnement des dernières terrasses alluviales généralisées

Les dernières terrasses généralisées, dans la zone tempérée et le domaine méditerranéen, se sont donc accumulées pendant la dernière période froide (appelée Würm dans les Alpes et Weichselien dans le Nord de la France), en particulier vers la fin de cette période, entre 30 000 et 15 000 ans avant le présent). A l'exception du cours inférieur des fleuves, à proximité de la mer, la dernière accumulation alluviale caillouteuse würmienne a été entaillée au passage de la période glaciaire à la période interglaciaire, devenant ainsi une terrasse. C'est dans cette entaille que, très généralement, se sont développées les plaines alluviales modernes des cours d'eau français.

Pendant la période interglaciaire actuelle, appelée *Holocène* et qui dure depuis 10 000 ans, il faut distinguer à nouveau, et ce ne sera pas la dernière fois, entre la zone tempérée et le domaine méditerranéen.

Rappelons que la zone tempérée, dans laquelle se situe la majorité du territoire français, se caractérise par des pluies assez abondantes (600 à plus de 1 000 mm/an), peu intenses (souvent de l'ordre de 1 mm/h) et bien réparties sur l'ensemble de l'année et par des températures moyennes mensuelles comprises entre environ 0 et 20°C particulièrement dans la variante océanique, comme à Brest (figure 5).

Le domaine méditerranéen, qui n'intéresse que le Sud-Sud-Est de la France, est un peu plus chaud (les températures moyennes mensuelles d'été dépassent 20°C) et, surtout, l'été y est sec (exemple de Marseille, figure 5) et les pluies intenses (plusieurs millimètres par heure et jusqu'à 50 mm/h voire 100 mm/h et plus en automne).

Dans la zone tempérée, l'évolution des cours d'eau paraît très faible, en dehors des embouchures. Mais, certaines études comme celle du Rhône à Vienne (Bravard, 1990), montrent une évolution parfois rapide, lors de la période historique. En domaine méditerranéen, globalement, de nombreuses grandes rivières, telles le Gardon d'Anduze ou la Durance, ont évolué comme les rivières tempérées. Cependant, de nombreuses autres (Aude, Medjerda) ont eu le même comportement complexe que les petites rivières. Ces dernières se sont caractérisées par l'accumulation d'une seule terrasse, pré-historique, ou de deux terrasses, dont une historique (Ouvèze à Vaison-la-Romaine, Bayon à l'Est d'Aix-en-Provence). Indépendamment de ce fonctionnement passé, actuellement, et à l'exclusion des niveaux de base, tous

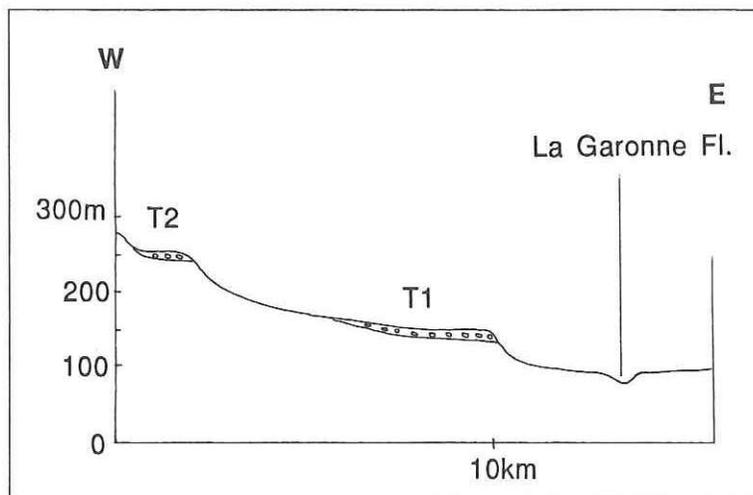


Figure 4 :
Coupe schématique
des terrasses de la
Garonne à Grenade

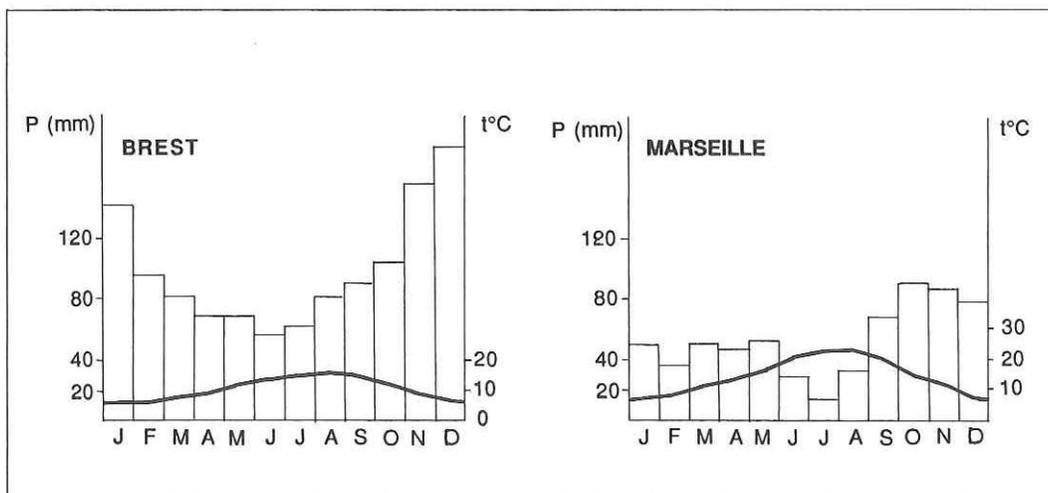


Figure 5 :
Diagrammes
ombrothermiques
de Brest et de
Marseille

les cours d'eau ont tendance à creuser, tout spécialement en domaine méditerranéen, ce qui a priori est très favorable à la lutte contre les inondations. Mais cet effet positif reste pourtant limité voire annulé par les conséquences de l'occupation humaine.

Le fonctionnement des bassins versants

Le bassin versant ou bassin hydrographique est une portion d'espace délimitée par des lignes de partage des eaux, où toutes les précipitations sont drainées vers un organisme d'écoulement linéaire, hiérarchisé et structuré. On peut distinguer le bassin versant théorique, qui englobe la totalité des drains, y compris les vallées sans écoulement, et le bassin versant ruisselant, restreint à la partie parcourue par les seules artères fonctionnelles. Lorsque le bassin versant est largement ou totalement constitué de roches perméables, ses limites deviennent très floues, voire impossibles à préciser. En effet, les eaux infiltrées dans le bassin versant réapparaissent quelquefois dans un autre qui pouvait sembler indépendant, exemple très fréquent en régions karstiques (pertes du Doubs alimentant la Loue, pertes de la Loire alimentant le Loiret).

En théorie, dans une lithologie homogène, en zone suffisamment humide, les bassins versants affectent la forme d'une poire renversée, l'amont étant parcouru par de nombreux ruisseaux de premier ordre*, confluant en ruisseaux de second ordre et ainsi de suite jusqu'à la rivière, organisme unique d'aval. En réalité, par suite de l'hétérogénéité très fréquente de la lithologie et de l'histoire souvent longue et complexe des réseaux hydrographiques, les formes sont très diverses : le schéma théorique peut encore être perceptible, dans le cas d'un réseau dendritique comme celui de la Loire ou de la Seine (figure 6 a). Par contre, il s'efface totalement sous une très forte influence de la structure géologique et du relief (figure 7). Une situation intermédiaire est représentée par le type digité, dans lequel les branches convergent au même point. Dans le type penné, où les affluents se rattachent à l'axe principal en formant un angle aigu ouvert vers l'amont, ou encore lorsque les branches sont peu hiérarchisées, elles déterminent des réseaux parallèles (figure 6 b).

Les conséquences sont évidemment très différentes en ce qui concerne les crues. En particulier, la concentration des confluences sur une distance courte (réseau de la Seine aux environs de Paris, réseau de l'Ouvèze immédiatement à l'amont de Vaison-la-Romaine – Arnaud-Fassetta et al., 1993), favorise la conjugaison des ondes de crue et une montée très rapide des eaux juste à l'aval de cette concentration. A l'inverse, un réseau comme celui de la Garonne favorise plutôt la formation de fortes crues tout à l'aval.

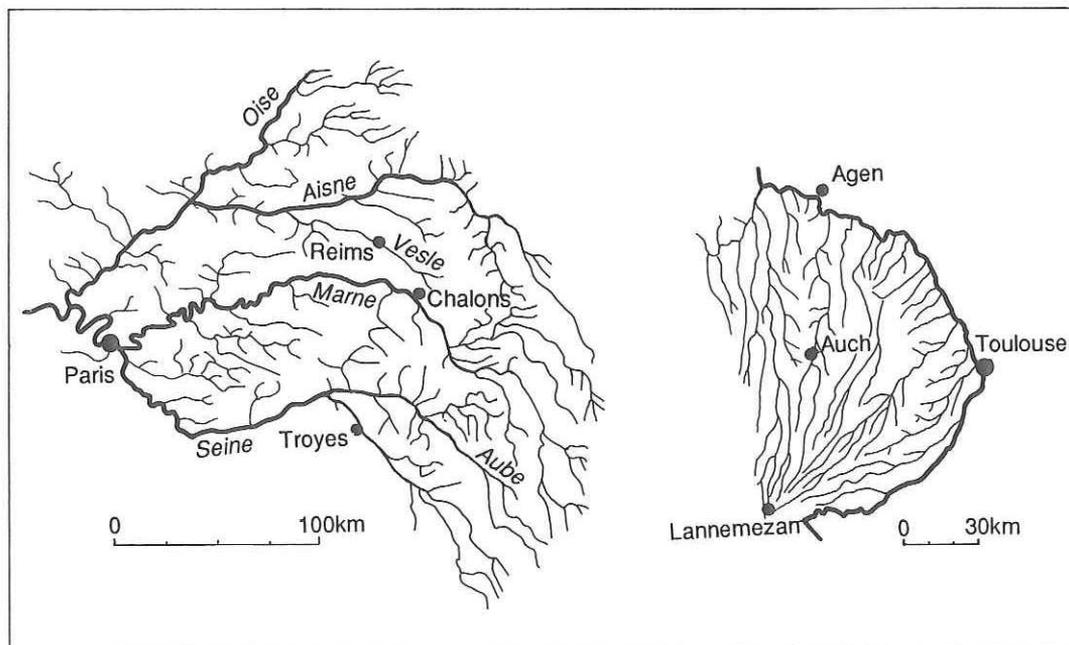


Figure 6 (a-b) :
Réseaux hydro-
graphiques de la
Seine et de la
Garonne (d'après
M. Derruau, 1986)

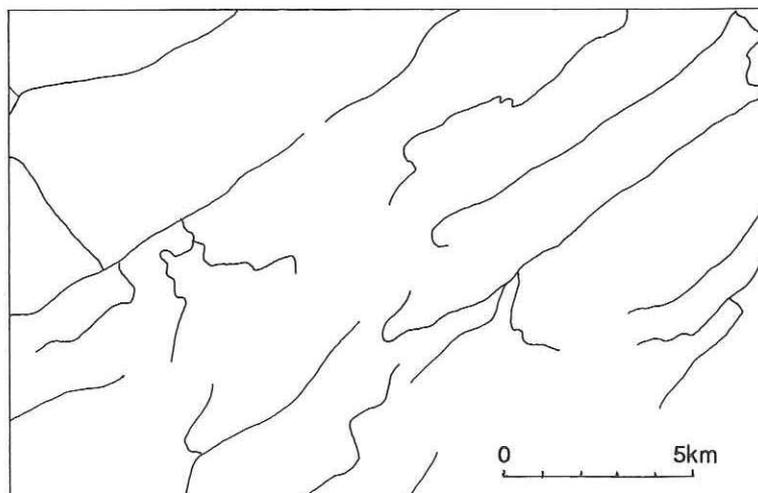


Figure 7 :
Réseau hydrogra-
phique "appala-
chien" du massif des
Ardennes (Belgique)
(d'après G. Viers,
1990)

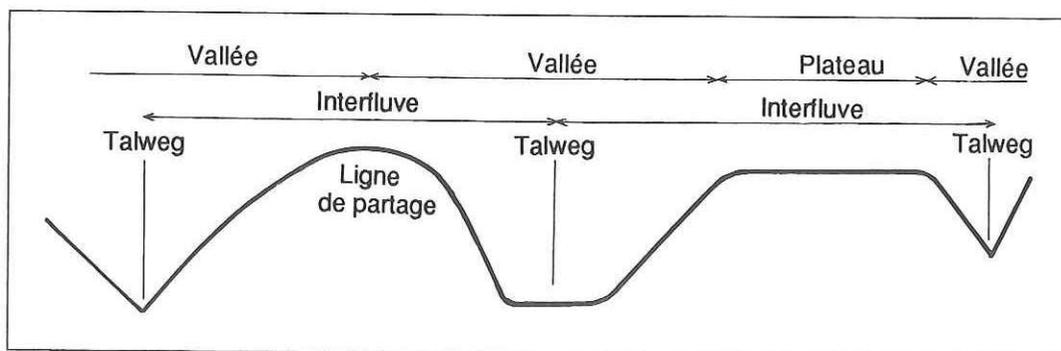
Ces organismes hydrographiques sont d'autant plus complexes que leurs dimensions sont considérables. De plus, ils sont restreints aux zones où l'alimentation de l'écoulement se fait par le ruissellement superficiel et par les eaux souterraines (nappes phréatiques et profondes) capables de soutenir les débits dans l'intervalle des pluies. Dès la marge du domaine méditerranéen, en particulier, le régime des ruisseaux d'ordre 1 à 2, voire 3, devient saisonnier.

Organisation générale d'une vallée

Définitions

D'un certain point de vue, tout relief, tout modelé, peut être décomposé en talwegs et interfluves (figure 8). On appelle talweg la ligne qui relie les points les plus bas d'une vallée. Sauf exceptions, le lit d'un cours d'eau suit ce talweg. On appelle interfluve tout ce qui n'est pas talweg, c'est-à-dire toute l'étendue entre deux talwegs. Les interfluves représentent la majeure partie du relief terrestre, puisque les talwegs ont une largeur relativement faible. La distinction entre talweg et interfluve est le plus souvent facile ; cependant, dans un espace où le lit du cours d'eau est instable et se dépla-

Figure 8 :
Coupe théorique des
talwegs et interfluves
(d'après
M. Derruau,
1986, modifié)



ce latéralement, un talweg peut venir occuper partiellement un interfluve et inversement. En fait, le plus souvent, on décompose les interfluves en versants de vallée, en pente vers le talweg, et interfluves stricto sensu, à pentes faibles à nulles entre les versants. Ainsi, la vallée est constituée d'un talweg encadré par deux versants.

Les versants

Sur ces interfluves, la morphogenèse dominante est l'érosion aréolaire, qui agit en surface, latéralement, par opposition à l'érosion linéaire, verticale, caractéristique de l'action du cours d'eau sur le fond de son lit. Les agents de l'érosion aréolaire sont multiples : agents atmosphériques, agents biologiques, ruissellement diffus. Ils sont contrôlés par le climat régional, mais

aussi par l'orientation, la pente et la lithologie. En montagne, où les pentes sont fortes, les précipitations (pluie et neige) plus abondantes, la gélifraction plus efficace, l'instabilité des versants peut devenir forte. Des masses de plusieurs centaines de milliers de mètres cubes peuvent ainsi rester en équilibre instable, menaçant les vallées en contrebas (Séchilienne en Savoie, La Clapière dans les Alpes-Maritimes). L'érosion aréolaire se définit donc plus par l'aire sur laquelle elle s'exerce que par son processus.

La partie basse de la vallée

L'action de l'érosion aréolaire récente n'est pas suffisante, dans les vallées larges, pour faire disparaître toute trace de modelé antérieur, en particulier divers types d'accumulation. Nous l'avons vu, des nappes alluviales grossières, qui se sont mises en place lors des phases froides du Quaternaire, sont devenues des terrasses par suite de l'entaille linéaire postérieure. En fonction de différents facteurs (lithologiques, tectoniques, morphogéniques), ces terrasses se sont plus ou moins bien conservées. Il en reste cependant des lambeaux, situés en général sur les bords des vallées, qui peuvent dominer la plaine alluviale moderne de plusieurs dizaines de mètres.

Un bon exemple de conservation de ces vestiges s'observe dans la basse vallée de la Durance, à Lauris (figure 9) : une terrasse du Pléistocène moyen a tronqué les affleurements de molasse* tertiaire. La co-

hérence de ce substrat lui a permis de résister aux entailles et ablations successives de la Durance, si bien qu'aujourd'hui, cette terrasse constitue le sommet d'une butte d'environ 50 m d'altitude, qui a localisé le site de l'agglomération et du château de Lauris.

Des apports non plus longitudinaux, mais latéraux, sont aussi fréquemment conservés. Les plus spectaculaires sont constitués par les cônes alluviaux, appelés également cônes de déjection. Ils se construisent lorsqu'un cours d'eau torrentiel affluent rejoint la vallée principale. Cette vallée a une pente longitudinale plus faible que celle du torrent, même en haute montagne.

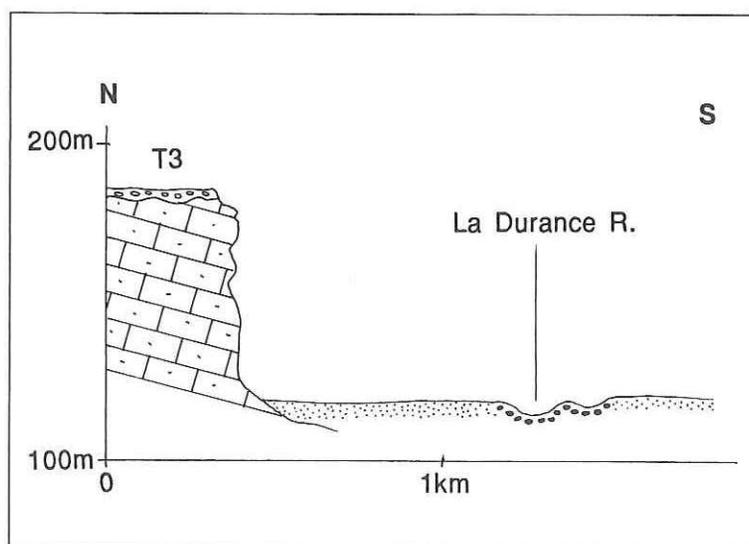
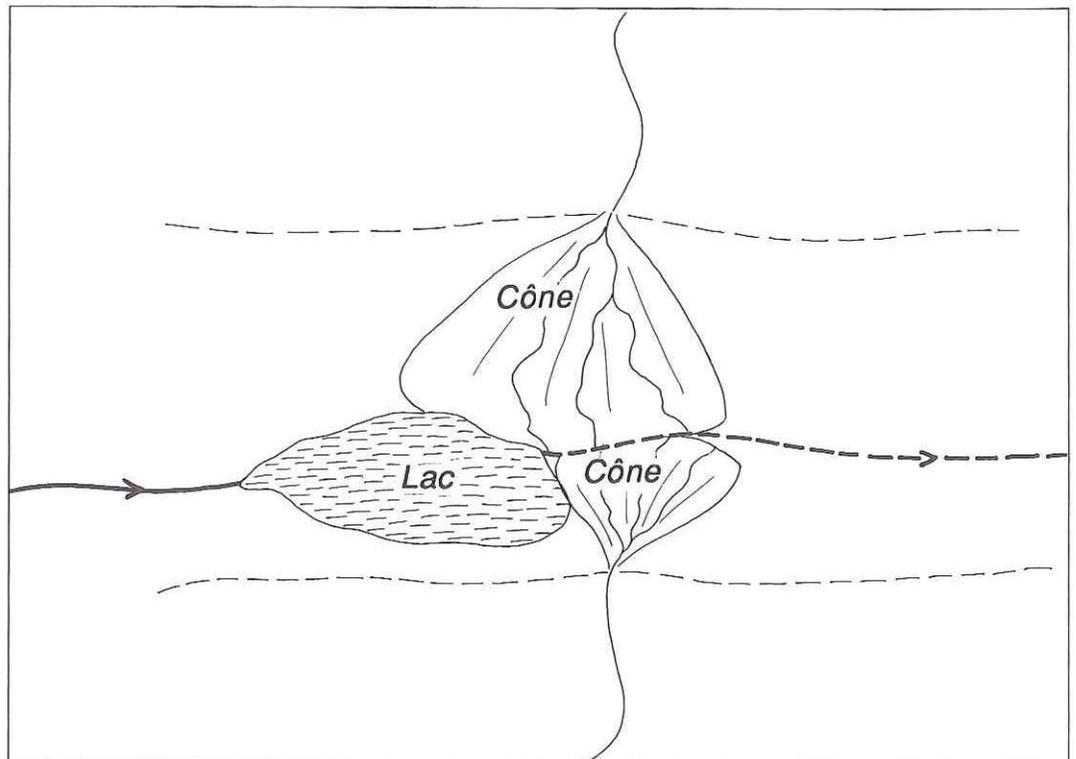


Figure 9 :
La terrasse T3
(Pléistocène
moyen ?) de la
Durance tronquant
la molasse à Lauris
(Vaucluse)

C'est cette brusque diminution de la pente qui provoque l'accumulation des alluvions grossières du torrent sous la forme d'un cône. Les cônes, dont la pente dépasse, en général, 5 %, peuvent repousser la rivière principale contre le versant opposé de la vallée, et même des cours d'eau puissants comme le Rhône, dans sa partie valaisanne (Derruau, 1974). A la limite, deux cônes alluviaux qui s'accumulent en face l'un de l'autre peuvent arriver à barrer la vallée, provoquant ainsi la formation d'un lac (figure 10), comme ce fut le cas sur la Romanche à Bourg d'Oisans, en Savoie. Du fait de la dynamique torrentielle, souvent encore spectaculaire, particulièrement dans les Alpes du Sud, ces cônes sont très exposés aux risques d'inondation (Tricart, 1958, 1974).

Figure 10 :
Schéma théorique
de cônes alluviaux
latéraux barrant
l'écoulement
du cours d'eau
principal.



Les apports transversaux les plus fréquents sont des colluvions, formations hétérométriques produites par l'érosion aréolaire sur les versants, et qui viennent s'accumuler sur le bord externe des terrasses ou au fond de la vallée. Les processus les plus efficaces depuis le début de l'Holocène ont été liés à la mise en culture, notamment en domaine méditerranéen (Ballais et al., 1993) mais aussi en zone tempérée. L'épaisseur des colluvions est souvent métrique, parfois plus importante encore. Si les colluvions peuvent venir adoucir, parfois même effacer le rebord d'une terrasse, par exemple au contact du lit majeur, elles ne peuvent être confondues avec les alluvions dont elles n'ont ni l'organisation structurée en lits ou en lentilles, ni le façonnement, l'arrondi fluvial.

La plaine alluviale moderne, plus ou moins large, est en général emboîtée dans ces accumulations variées, souvent au centre de la vallée. Elle s'indivi-

dualise nettement pour des grands fleuves et rivières comme la Seine ou la Durance (figure 11). En ce qui concerne les cours d'eau de plus petite taille, telle la Touloubre au Nord d'Aix-en-Provence, elle existe également, mais elle est plus délicate à mettre en évidence et nécessite des études de terrain plus approfondies.

Cette plaine alluviale moderne n'est absente que dans deux cas. Le premier correspond aux vallées de petits cours d'eau, d'ordre 1 ou 2, qui s'entaillent directement dans les terrasses récentes, würmienne ou, le plus souvent, holocène, en domaine méditerranéen, comme le ravin de l'Aurigon, à l'Est d'Aix-en-Provence (Ballais, Crambes, 1992). Le second, qui nous intéresse plus, est constitué par des cours d'eau abondants qui s'écoulent directement dans le substratum cohérent, formant des gorges ou des canyons* dont le type est celui du Colorado, dans le Sud-Ouest des Etats-Unis, mais qui est bien représenté aussi en France par le Verdon et le Tarn, par exemple. Si localement, des esquisses de lit moyen ou majeur apparaissent, le plus souvent, seul le lit mineur est individualisé.

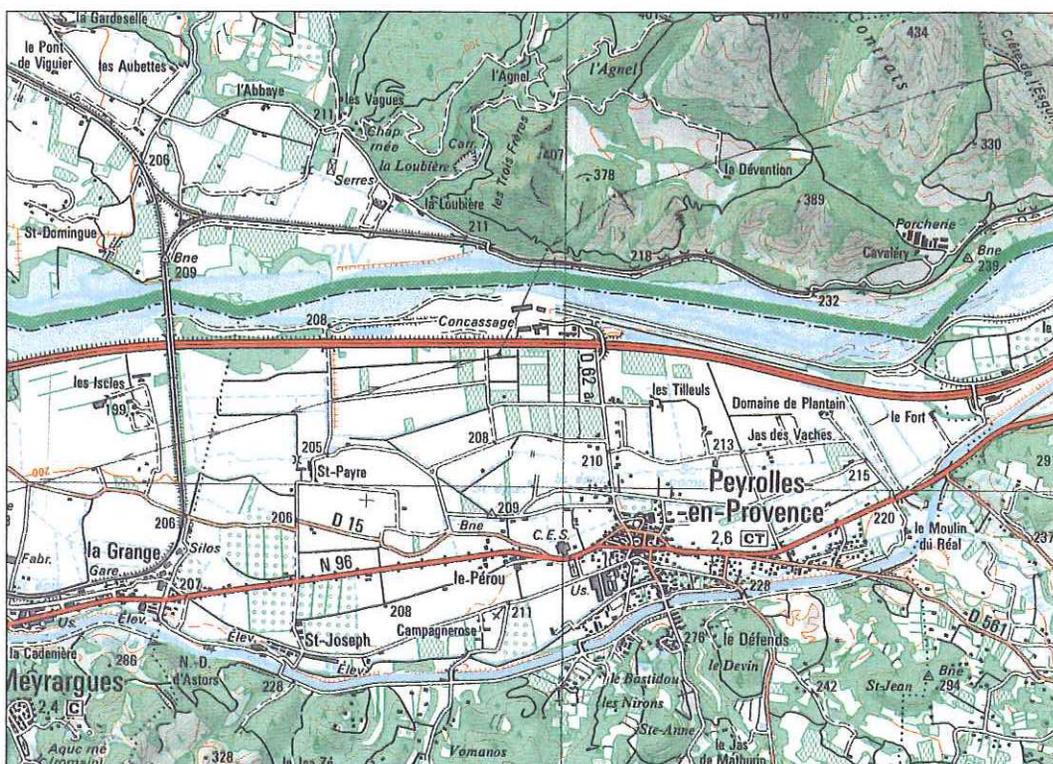


Figure 11 :
La plaine alluviale
moderne de la
Durance à Peyrolles
(Bouches-du-Rhône)
(carte topogra-
phique IGN
au 1 : 50 000)

Organisation et fonctionnement de la plaine alluviale moderne

Les unités géomorphologiques

Très souvent, le profil transversal d'une plaine alluviale moderne montre l'emboîtement de lits dénommés (Coque, 1993) : d'étiage, mineur, moyen, majeur.

• ***Le lit mineur*** est normalement bien délimité entre des berges abruptes, plus ou moins élevées et continues. En France, en général, le lit mineur, comme le chenal d'étiage, est dépourvu de végétation aérienne.

• ***Le lit d'étiage ou chenal d'étiage***, étroit, est compris à l'intérieur du lit mineur dans lequel il forme souvent des sinuosités. Son profil longitudinal est très irrégulier avec des seuils qui forment de petits rapides à la traversée de bancs d'alluvions, et des mouilles, mares stagnantes à très faible écoulement, riches en algues et en insectes.

Le chenal d'étiage est utilisé par l'écoulement des basses eaux saisonnières et peut être presque à sec en été, dans le domaine méditerranéen.

• ***Le lit moyen, appelé aussi lit majeur périodique***, est souvent séparé du précédent par un bourrelet de berge. Il est couvert d'une végétation plus ou moins hygrophile (aulnes, saules, peupliers).

• ***Le lit majeur, appelé aussi lit majeur épisodique ou lit majeur exceptionnel***, est le plus large. Il est souvent colonisé par une formation végétale moins hygrophile (ripisilve*) et couvert d'alluvions fines (limons et argiles), en plaine ou dans les larges vallées. La limite externe de ce lit majeur est constituée par un raccord progressif à une terrasse alluviale caillouteuse.

Le lit mineur est peu ou pas colonisé par la végétation aérienne en raison de la fréquence de l'écoulement des eaux. La principale rugosité est constituée par celle des alluvions du fond du lit, d'une part, et par celle des berges, d'autre part. Le courant est donc relativement rapide et sa compétence* élevée, ce qui permet le transport de particules grossières comme les galets qui,

bien souvent, ne sont remuées et déplacées qu'en période de crue, pour des débits légèrement inférieurs au débit à pleins bords*.

Dans les cours d'eau à régime très contrasté et à fréquentes variations de débit, le débit à pleins bords est plus fréquemment réalisé et les efforts auxquels les berges sont soumises sont maximaux. Lorsque ces dernières libèrent un matériel trop grossier pour être transporté au loin, des galets par exemple, une grande partie des débris qu'elles fournissent est abandonnée à courte distance. Ce mécanisme commande le type de lit mineur. Si les sapements sont localisés, notamment du fait d'une bonne résistance de la végétation des berges, les déplacements de matériel sont peu volumineux et il se forme des méandres. Si au contraire, la fourniture de débris est plus massive, soit du fait d'une torrencialité plus grande, soit d'une mauvaise protection des berges, il apparaît un type de lit à chenaux anastomosés. Selon Jean Tricart (1960), certains cours d'eau torrentiels des Alpes du Sud (Bléone, Asse, Verdon, Eygues), appartiennent à ce type de lit à chenaux quand leur vallée est suffisamment ample.

Le lit moyen est régulièrement occupé par les hautes eaux, en principe une fois par an. Au contraire du lit mineur, il se caractérise par un étalement des eaux sur une profondeur beaucoup plus faible et, généralement, par une rugosité considérable, due à la végétation. Les buissons, les herbacées peignent le courant et le ralentissent considérablement, au point qu'il arrive que le niveau de l'eau, lors d'une crue, soit sensiblement plus élevé dans le lit mineur que dans le lit moyen. Nous avons pu en observer les conséquences au confluent de la Durance et de l'Asse, à la suite des inondations de septembre 1993.

Ainsi, la compétence est beaucoup plus faible dans le lit moyen et la différence avec le lit mineur est d'autant plus grande que la végétation est abondante dans le lit moyen. Seules les particules fines, généralement des argiles et des limons, voire des sables, peuvent transiter dans les lits moyen et majeur (ce sont les limons de débordement des géologues). Il y a donc, en surface, un contraste granulométrique très important entre le lit moyen-majeur et le lit mineur, qui s'ajoute à la différence de dynamique éventuelle entre lit mineur et chenal d'étiage. En revanche, les chenaux entaillés dans le lit moyen comportent fréquemment des galets. La zone de passage du lit mineur au lit moyen est ainsi une zone de discontinuité granulométrique car le courant, brusquement ralenti, abandonne une partie de sa charge au franchissement des berges. C'est ce qui permet la construction des levées alluviales ou bourrelets de berges, surtout en rive concave.

Les relations « transversales » entre les lits

Les relations entre chenal, lit mineur, lit moyen et lit majeur varient d'un cours d'eau à l'autre, et, pour le même cours d'eau, d'un point à un autre, en fonction du régime de ce cours d'eau, et d'autres facteurs que nous développons plus loin. La limite la plus nette est celle qui se place entre le lit mineur et le lit moyen, sous forme de berges, hautes de plusieurs décimètres ou plus. Ces berges sont façonnées quand l'eau s'écoule à pleins bords dans le lit mineur, avant de déborder dans le lit moyen. Elles sont donc d'autant plus nettes qu'elles sont plus souvent soumises à ces débits et que ces débits sont plus durables. Il y a ainsi une relation statistique entre la fréquence d'un certain débit et le modelé des lits. Des berges bien marquées, abruptes et continues, indiquent des débits à pleins bords fréquents et efficaces, façonnant activement le lit mineur. C'est le cas des rivières dont les crues se produisent régulièrement, comme celles de la France tempérée océanique, de l'Adour à la Somme (Tricart, 1960).

La différence entre le lit d'étiage et le lit mineur est beaucoup moins nette et se marque peu dans la topographie. Les très faibles débits réalisés dans le chenal d'étiage, qui sont souvent insuffisants pour déplacer les alluvions, à l'exception des hautes eaux, expliquent la topographie irrégulière de ce chenal et son absence de calibrage. Lorsque les débits d'étiage, ou proches de l'étiage, se prolongent pendant une très grande partie de l'année et sont séparés par des crues courtes, il arrive que des buissons, notamment des saules et des aulnes, poussent sur les bancs d'alluvions du lit mineur. C'est le cas, en particulier, des torrents méditerranéens. Mais cet indice n'est pas suffisant pour délimiter le chenal dans le lit mineur. Seule l'observation directe permet de le faire.

La distinction entre le lit moyen et le lit majeur dépend du régime du cours d'eau. Elle s'effectue sans difficulté en régions méditerranéennes, dont les crues fréquentes, violentes et brèves, génèrent des formes d'érosion et de sédimentation répétées de part et d'autre du lit mineur, sur des largeurs de plaine alluviale décroissantes de l'amont à l'aval. Lorsque la pente longitudinale diminue et que les crues, plus lentes et plus étalées dans le temps, charrient peu d'alluvions grossières, le lit moyen tend à disparaître ; il est peu à peu remplacé par un bourrelet de berges constitué par le dépôt des matières en suspension. Tel est le cas des cours d'eau de plaine en régime océanique, et de la partie aval de tous les cours d'eau.

Par ailleurs, au plan lithologique, il existe une différence fondamentale entre les lits qui incisent des matériaux meubles, et ceux qui incisent des matériaux cohérents. En effet, dans la mesure où les particules des matériaux meubles ne sont pas trop grossières, les cours d'eau peuvent aisément adapter leur lit aux contraintes hydrodynamiques. Comme ces dernières changent

en permanence, un état d'équilibre statistique est atteint, caractérisé par des oscillations autour d'une forme moyenne, qui s'ajuste aux débits les plus efficaces* réalisés suffisamment souvent. Ce sont les rivières à fond mobile de Fargue. A l'inverse, les rivières à lit cohérent entaillent la roche en place constituée de matériel consolidé. La résistance rencontrée par le courant gêne l'adaptation de leur lit aux contraintes hydrodynamiques. Ils varient de largeur et de profondeur sur de faibles distances, leur pente est irrégulière, leurs berges sont généralement mal marquées. Tout cela se traduit par un mauvais calibrage, voire même une absence de calibrage.

Le profil d'équilibre longitudinal

Les cours d'eau façonnent le profil longitudinal de leur lit par ablation et par dépôt. Les hydrauliciens ont depuis longtemps établi que la pente de ce profil tend à diminuer régulièrement vers l'aval et ils ont donné le nom de profil d'équilibre à la courbe correspondante. En fait, il est nécessaire de distinguer le profil d'équilibre théorique et le profil d'équilibre réel.

Le profil d'équilibre théorique et le profil d'équilibre réel

Le profil longitudinal du lit des cours d'eau est une courbe concave, plus ou moins accidentée par des ruptures de pente créant des rapides ou des chutes entre les biefs calmes. Cette diminution de pente vers l'aval correspond d'abord à un accroissement du débit avec les apports d'eau des affluents, dans les zones et domaines climatiques suffisamment humides. La profondeur et la largeur du lit augmentent simultanément, tandis que le calibre des alluvions transportées tend à décroître par usure et triage de leurs éléments. Transporter des particules plus fines pour un débit toujours croissant exige une vitesse moindre, donc une pente moindre. Pour des cours d'eau de longueurs comparables, la concavité sera d'autant plus accusée que le débit s'accroîtra plus vite.

La notion de profil d'équilibre découle de ces considérations théoriques simples. Il se définit donc comme une courbe régularisée, telle qu'en tous ses points, la vitesse du courant assure le transport de la totalité de la charge solide venue d'amont, sans qu'il y ait ni creusement, ni accumulation. Une telle courbe implique l'existence d'un état d'équilibre, au moins approximatif, entre la force de transport et la charge, entre l'ablation et le dépôt, condition nécessaire et suffisante de la stabilité du profil dans les limites de la période d'observation. La régularité de la décroissance de la pente de l'amont vers l'aval exige une augmentation graduelle du débit, une augmentation graduelle de la masse des alluvions transportées jusqu'à une certaine limite, et une diminution graduelle du calibre de ces alluvions. De telles conditions ne sont pas réunies naturellement, dans la plupart des situations. En effet, la réalité se révèle beaucoup plus complexe, car la pente doit

s'ajuster à des variations irrégulières du débit, de la vitesse et de la charge transportée. Cette variabilité introduit alors des perturbations durables dans le profil en long. L'apport d'eau et de charge alluviale d'un affluent important, qui provoque une brisure plus ou moins marquée du profil (c'est le cas du Rhône après son confluent avec l'Isère - Coque, 1993) est l'un des facteurs les plus fréquents de ces complications. A l'inverse, la pente se réduit quand un affluent à fort débit apporte des alluvions plus fines que les siennes, ou s'il est moins chargé (cas du Rhône à l'aval du confluent de la Saône). La lithologie, nous l'avons vu, est également un facteur majeur expliquant les irrégularités du profil longitudinal.

Ces observations conduisent à substituer à la conception d'un profil d'équilibre théorique formé d'une courbe régulière, celle d'un profil d'équilibre réel composé de segments distincts. Les facteurs de la pente ne variant pas graduellement de l'un à l'autre, il en résulte que le profil général peut ne pas présenter cette régularité (figure 14, page 30). Chaque segment, notamment ceux compris entre les confluences de deux grands affluents successifs, doit être considéré comme une courbe particulière. En conséquence, la notion d'état d'équilibre ne peut être reliée à l'existence d'une pente uniformément décroissante vers l'aval, et on comprend que les efforts constamment renouvelés des hydrauliciens, en vue d'établir une formule exprimant le profil longitudinal du lit, ne puissent aboutir à des résultats définitifs, car les variables en jeu sont multiples, difficilement mesurables et parfois même, mal définies.

L'équilibre dynamique

L'état d'équilibre est mobile, comme les facteurs qui le contrôlent. Cette mobilité permet un ajustement constant de la pente aux conditions locales et instantanées, de sorte que toute variation de l'un quelconque d'entre eux entraîne un déplacement de l'équilibre tendant à annuler les effets de cette variation initiale. C'est ainsi qu'après les bouleversements du lit provoqués par une crue, la situation antérieure tend à se rétablir, du moins approximativement. Le jeu incessant des variables indépendantes s'effectue donc de part et d'autre d'une situation moyenne, avec des écarts d'amplitudes divers selon que le régime des écoulements est plus ou moins irrégulier. En définitive, l'état d'équilibre doit se concevoir comme celui réalisé entre les valeurs que les variables concernées prennent à chaque instant.

Ce profil d'équilibre dynamique, est par conséquent provisoire. En l'absence de perturbations extérieures (modification du système morphogénique due à une variation bioclimatique, à la tectonique ou à l'intervention des sociétés humaines, sous forme d'extraction par exemple), il se maintient, une fois établi, en se modifiant peu à peu. Cette évolution va dans le sens d'un abaissement lent, sur toute sa longueur, en fonction de la diminution progressive de la charge alluviale fournie par le bassin versant. Cet abaisse-

ment s'effectue par usure du fond rocheux par les alluvions grossières mobilisées lors des crues et il se poursuit, indéfiniment, car il est impossible d'envisager un arrêt de la morphogenèse, qui correspondrait à une disparition totale des continents. La notion de profil d'équilibre définitif reste une vue de l'esprit. Il s'agit d'une forme limite, inaccessible, vers laquelle tend le profil d'équilibre réel sans jamais l'atteindre.

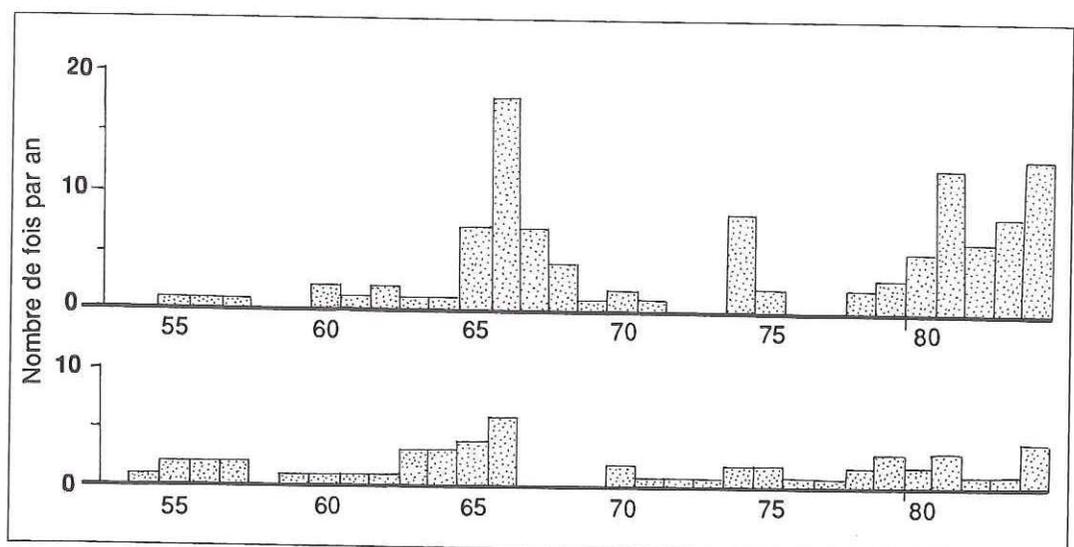
Dans le détail, l'élaboration du profil d'équilibre se fait par régularisation des pentes, c'est-à-dire réduction des pentes trop fortes, par ablation, et augmentation des pentes trop faibles, par accumulation. Dans les secteurs en creusement, chaque point se trouve abaissé à la cote d'un point situé à l'aval, et la régularisation prend l'aspect d'une action progressive. Du fait de l'interdépendance de tous les points du profil, toute modification locale se répercute à l'amont. Sa stabilisation ne peut intervenir à l'amont tant qu'elle n'est pas obtenue à l'aval. Au total, la régularisation finale présente donc un caractère régressif.

Le profil d'équilibre ainsi réalisé se relie en aval à un niveau de base qui, pour les cours d'eau français, est le plus souvent le niveau de base général, celui de l'océan mondial. Par extension, un confluent constitue un niveau de base, local cette fois, pour les deux cours d'eau conjugués, de même qu'une barre rocheuse cohérente coupant un lit est un niveau de base local pour la partie du cours d'eau située à l'amont de cette barre. Dans toutes les situations, le profil régularisé est toujours sécant par rapport à son niveau de base, puisqu'il conserve une pente, aussi faible soit-elle, jusqu'à son extrémité (par exemple 0,02 pour mille sur la Basse Amazonie ou 0,1 pour mille sur la Basse Seine). Le recoupement s'observe avec netteté pour des cours d'eau à régimes très irréguliers, qui gardent une forte pente jusqu'à l'embouchure, comme les rivières torrentielles méditerranéennes. Dans ce cas, la remontée du coin salé* est très limitée. Enfin, nous l'avons déjà évoqué, tout changement dans la position du niveau de base se développe vers l'amont depuis son extrémité, par creusement ou remblaiement régressifs, selon le sens du mouvement du niveau de base et, dans le cas du niveau de base général, selon les caractères de la topographie sous-marine.

Conclusion : le bassin versant comme système

Le flux de matière (eau, alluvions) qui parcourt un bassin versant réel, aujourd'hui, de l'amont à l'aval, intègre donc l'ensemble des caractéristiques de ce bassin versant comme les pentes, la végétation, les sols, les formations superficielles, les nappes phréatiques, les modes d'occupation du sol (cultures, prairies, villes, etc.). Il intègre également les caractéristiques des différents lits du cours d'eau (longueur, pente, rugosité, végétation en particulier). En conséquence, toute modification, naturelle ou anthropique, d'une de ses caractéristiques en un point du lit provoque aussi des variations en aval et en amont, soit du débit, soit de la pente, soit de la charge alluviale, soit de deux ou trois de ces facteurs. Ainsi, par exemple, la rectification du lit en un point permet un écoulement local plus rapide des crues (par accroissement de la pente) et peut éviter, en ce point, une inondation. Par contre, elle provoque, à l'aval du tronçon rectifié, une inondation plus fréquente, par la suppression des possibilités de stockage de l'eau (qui, de plus, facilite l'infiltration) à l'amont. L'exemple du Ger, dans le Nord de la Belgique (figure 12), ou les "inondations régressives" dans l'Essonne le montrent de façon particulièrement nette.

Figure 12 :
Conséquences de la rectification du réseau hydrographique du Ger (Belgique) sur la périodicité des crues (d'après G. Mabilie et F. Petit, 1987).
Le premier graphique indique le nombre de fois où les débits ont été égaux ou supérieurs à 5 m³/s.
Le second graphique indique le nombre de fois où, en une année, se sont présentées des périodes de 3 jours consécutifs où plus de 40 mm de pluie ont été recueillis. N.B : la rectification du réseau du Ger a été achevée en 1980.



CARACTÉRISATION HYDROGÉOMORPHOLOGIQUE DES ZONES INONDABLES

Cas général : critères d'identification et de délimitation

29

La morphologie

Les lits d'étiage et mineur
Le lit moyen
Le lit majeur
Le talus externe de lit majeur
Relations spatiales entre les différents lits

La sédimentologie

L'occupation des sols

L'implantation de la couverture végétale
La localisation des constructions
L'organisation de l'exploitation agricole
La structure du parcellaire
Les vestiges historiques et archéologiques

Signification hydrologique des unités hydrogéomorphologiques

42

Adéquation des unités hydrogéomorphologiques
et des paramètres hydrologiques : l'exemple de Mende
Essai de correspondance entre les unités hydrogéomorphologiques et l'hydrologie

Prise en compte de la variabilité des facteurs

46

Les facteurs naturels

La variabilité géomorphologique amont - aval
Le contexte climatique
Le facteur géologique

Les modifications apportées par l'homme

Les travaux et ouvrages hydrauliques
L'agriculture
L'urbanisation

La présentation des fondements de l'hydrogéomorphologie a mis l'accent sur chacun des systèmes à prendre en compte, dans ses dimensions spatiales et temporelles, pour parvenir à une bonne compréhension du fonctionnement d'un cours d'eau et à un aménagement rationnel des bassins versants. Nous avons vu que le risque d'inondation, qui nous intéresse plus particulièrement, est surtout localisé dans les plaines alluviales modernes, zones actives d'évolution des rivières et des fleuves. L'approche hydrogéomorphologique que nous proposons a pour objectif d'identifier les éléments de référence qui permettront d'interpréter la dynamique de ces milieux et l'impact des unités géomorphologiques que constituent les différents lits. Cette démarche s'inscrit naturellement dans l'étude globale d'un bassin versant, réalisée notamment dans le cadre de l'élaboration d'un Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SAGE) institué par la loi sur l'eau du 3 janvier 1992.

Avant d'entrer dans le détail de la méthode, qui fera l'objet du chapitre trois, il est indispensable d'orienter la réflexion vers deux axes. Tout d'abord, il faut évoquer et préciser les forces en présence qui jouent un rôle plus ou moins important dans le fonctionnement des hydrosystèmes. En effet, le modèle théorique d'interprétation des zones exposées à un risque d'inondation peut être relativement complexe, si l'on considère la multiplicité des facteurs intervenant dans la dynamique fluviale. Par ailleurs, il faut tenir compte des modifications qui interviennent sur les caractéristiques des lits mineur, moyen et majeur, en fonction de la situation géographique du tronçon de vallée étudiée, d'amont en aval, et des variations liées à de grandes différences climatiques.

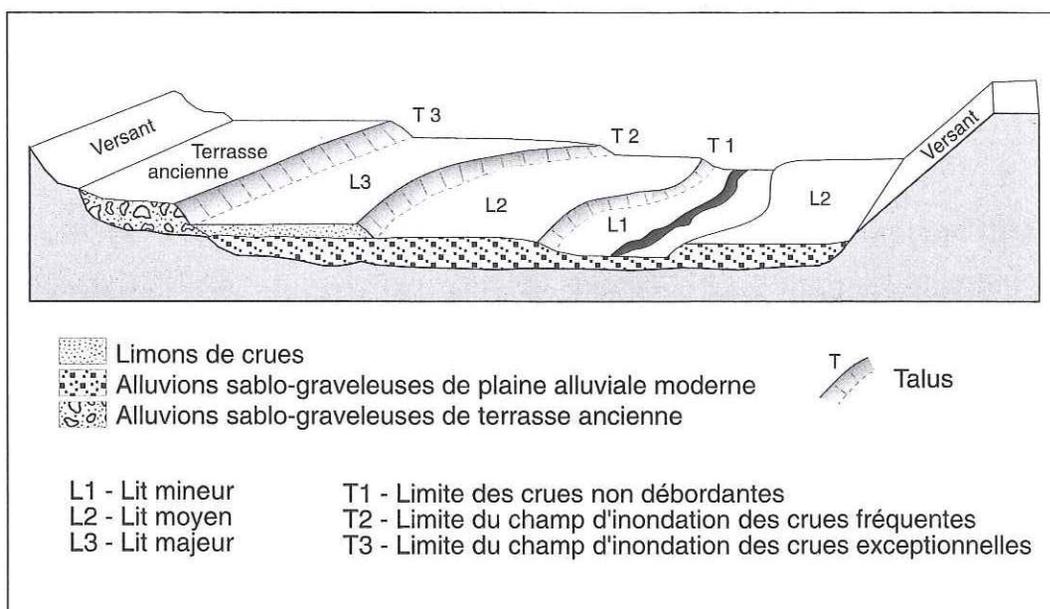
En conséquence, il est souhaitable, dans l'analyse systémique, de sélectionner un nombre limité d'indicateurs, suffisamment pertinents pour répondre aux besoins de la reconnaissance et de la cartographie des zones inondables. Ceux que nous avons retenus, après une première phase d'expérimentation, seront décrits dans un premier temps par rapport au schéma général, qui correspond le plus fréquemment à la partie moyenne d'un cours d'eau, puis dans un second temps, autour de cas particuliers, qui viennent compliquer le modèle de base à partir de contextes géomorphologiques spécifiques ou de transformations imposées au milieu naturel par des actions d'origine anthropique.

Cas général : critères d'identification et de délimitation

Les critères permettant la différenciation et la délimitation des lits concernent : la morphologie, la sédimentologie, et l'occupation des sols.

La morphologie

Le bloc diagramme ci-dessous propose une visualisation de la disposition spatiale des différents lits d'un cours d'eau et de leur contexte (figure 13). Dans ce cas, la plaine alluviale moderne est encadrée, d'un côté par un versant à pente raide, et de l'autre par une terrasse ancienne. Chaque unité morphologique est délimitée par un talus, et correspond, à l'intérieur de l'ensemble plaine alluviale moderne - terrasses, à un plan incliné de l'amont vers l'aval. Cette représentation schématique nécessite cependant une analyse plus détaillée, portant sur les unités géomorphologiques et leurs talus de séparation.



Les lits d'étéage et mineur

Ils montrent des formes actives de la dynamique fluviale, en évolution permanente, caractérisées par la continuité amont-aval, la répétitivité morphologique du système mouille-seuil, et l'irrégularité du profil longitudinal (figure 14).

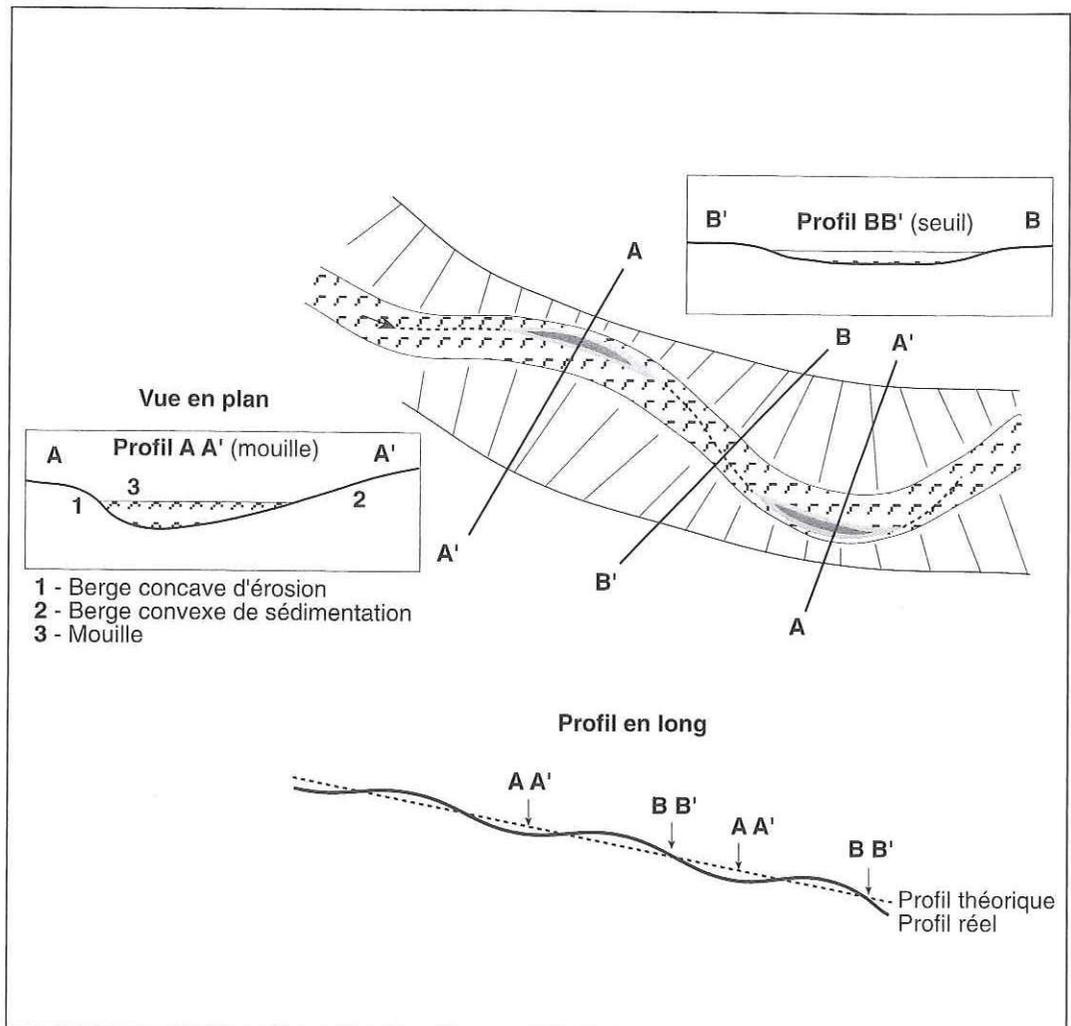


Figure 14 :
Hydromorphologie
d'un lit mineur

Le lit moyen

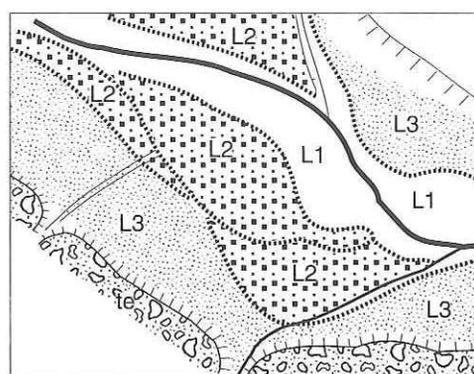
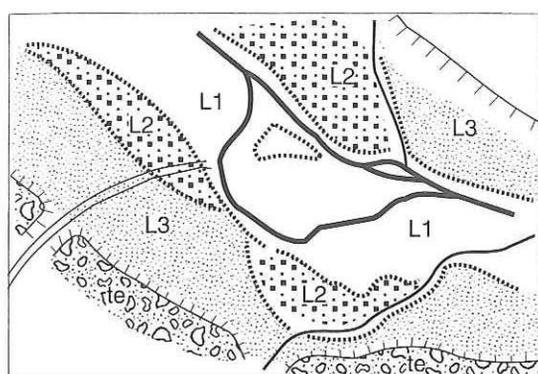
Il présente les principaux éléments de cette morphologie, mais fragmentés en tronçons se recoupant les uns les autres à la suite des crues successives. La morphologie fossile, réactivée partiellement à chaque nouvelle crue, y apparaît ainsi confuse. Son organisation peut, dans certains cas, être reconstituée sur photographies aériennes (figure 15). Fait le plus important, chaque portion de méandre présente le profil transversal d'un lit mineur, avec un chenal, une berge convexe bombée par les atterrissements et une berge concave abrupte, taillée par l'érosion. Cette morphologie de base, très nette pour les formes héritées de crues récentes, s'estompe avec le temps, en raison notamment du comblement du chenal (qui peut rester en eau très longtemps) par des alluvions fines (limons de crue). Les lits moyens ont par ailleurs très souvent fait l'objet d'extractions de matériaux, de la mise en



1945



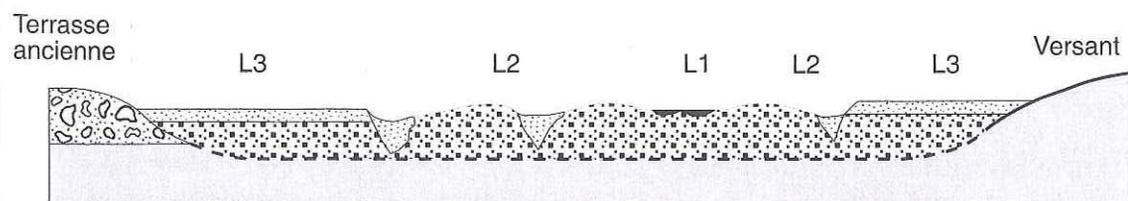
1961



La comparaison des photographies aériennes prises à 15 ans d'intervalle montre un rétrécissement du lit mineur (en blanc), et les traces de recouvrements de méandres à l'intérieur du lit moyen végétalisé (L2).

La photographie de 1961 montre également des traces d'extractions de graviers dans le lit moyen et de travaux d'aménagements hydrauliques consécutifs à la crue de 1958.

Le profil transversal ci-dessous montre, dans le lit moyen, une morphologie complexe due aux recouvrements successifs de méandres.



-  Limons de crues
-  Alluvions sablo-graveleuses
-  Alluvions de terrasse

- L1 - Lit mineur
- L2 - Lit moyen
- L3 - Lit majeur

Figure 15 :
Morphologie
d'un lit moyen
(Gardon
d'Anduze)
Evolution de 1946
à 1961
photographies
aériennes IGN
et interprétation
(profil transversal)

place d'ouvrages hydrauliques, ainsi que de défrichements agricoles. Il en résulte des transformations morphologiques d'intensité très variable pouvant affecter la surface de cette unité, ainsi que son talus d'érosion externe. La reconnaissance et la délimitation du lit moyen s'avèrent donc parfois difficiles, et nécessitent la prise en compte d'autres critères, ainsi que le recours à une vue d'ensemble, permettant de s'affranchir des modifications de détail.

Le lit majeur

Il recouvre d'anciens lits moyens et mineurs, et offre des caractéristiques morphologiques beaucoup plus simples, liées à la seule sédimentation des matières en suspension, survenant en fin de crue, lorsque la vitesse du courant diminue. La surface topographique du lit majeur apparaît ainsi subhorizontale en profil transversal, et légèrement inclinée d'amont en aval en profil longitudinal. Cette surface peut cependant être affectée de légères dépressions, correspondant à des chenaux d'anciens lits mineurs non entièrement comblés par les dépôts sédimentaires.

Tel est le cas en particulier lorsque les crues exceptionnelles ont été très peu nombreuses par rapport aux crues moyennes, lesquelles forment alors un bourrelet de berge plus ou moins étendu sur le lit majeur. Cette morphologie est cependant plus fréquente dans les parties aval des cours d'eau.

Le talus externe de lit majeur

Cet élément morphologique est particulièrement important car il marque la limite d'extension des grandes crues. Très visible dans certaines configurations (photo n° 3), il peut aussi s'effacer entièrement. Il est donc indispensable de préciser les conditions de son identification pour le cartographe.

A l'origine, nous avons vu que la plaine alluviale moderne, organisée en forme de gouttière, est limitée de chaque côté par un talus d'érosion lié à l'abaissement du profil en long du cours d'eau pendant la dernière période glaciaire. Ce talus raccorde, selon les cas, une terrasse alluviale ancienne ou un versant à pente forte, à l'un des trois lits de la plaine alluviale moderne, comme le montre la figure 16.

En règle générale, la limite externe de la plaine alluviale moderne correspond à celle de son lit majeur. Elle marque plus ou moins nettement le paysage :

- le plus souvent (figure 17) le talus d'érosion initial, masqué dans sa partie basse par les sédiments accumulés dans la plaine alluviale moderne, reste encore très visible, sur une hauteur pouvant varier de 1 à 3 mètres lorsqu'il entaille la dernière terrasse, et plus importante éventuellement lorsqu'il concerne une terrasse plus ancienne ou le versant.

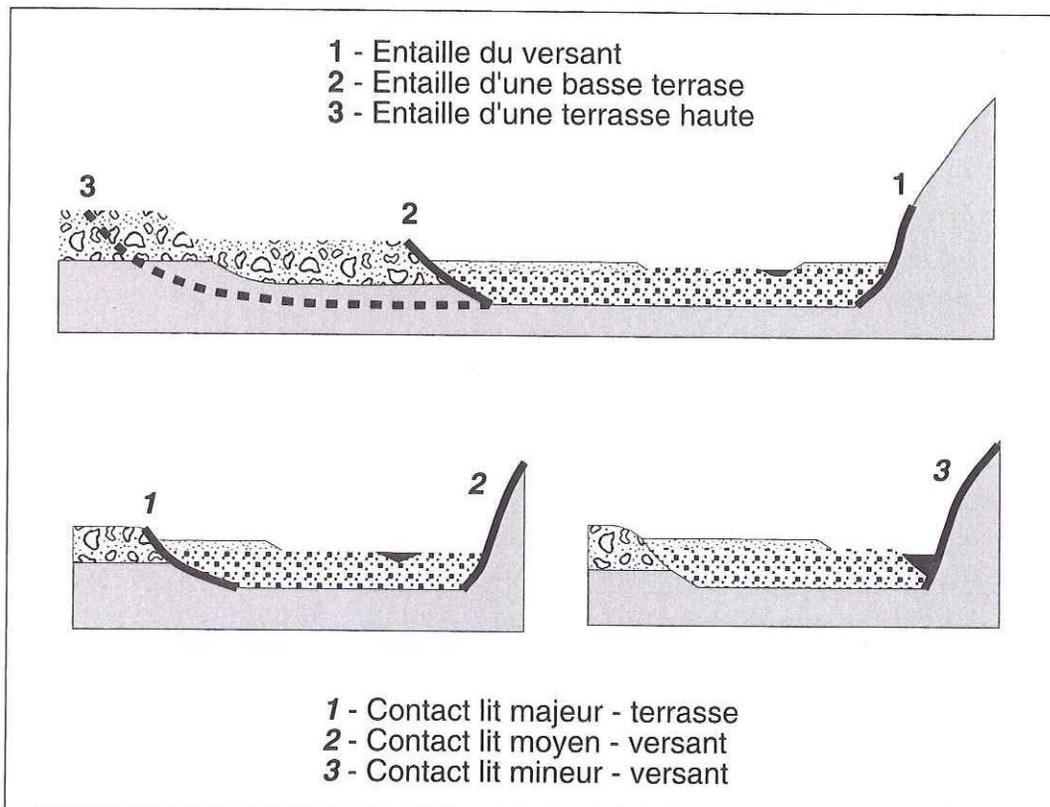


Figure 16 :
Relations plaine
alluviale
moderne-contexte

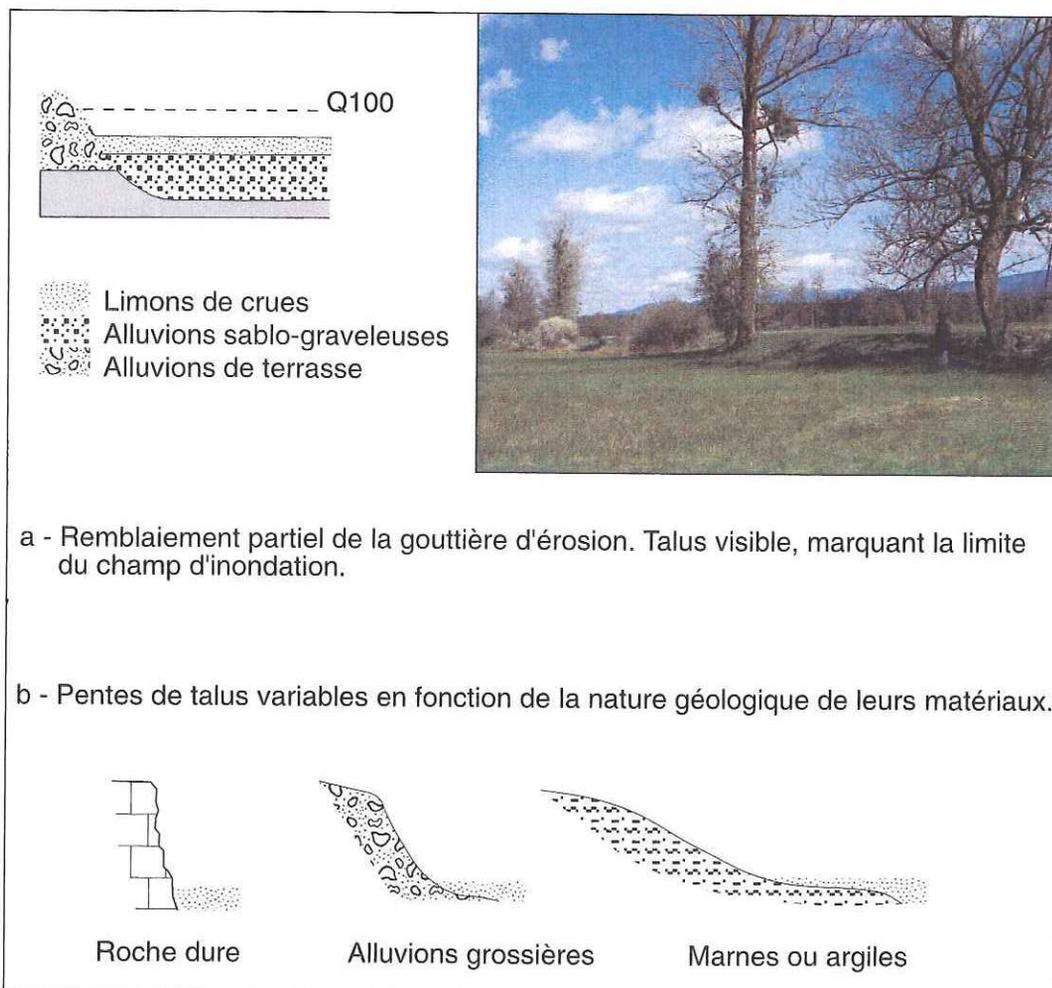


Photo n°3 :
Talus de sépara-
tion lit majeur -
terrasse ancienne
(Gardons)

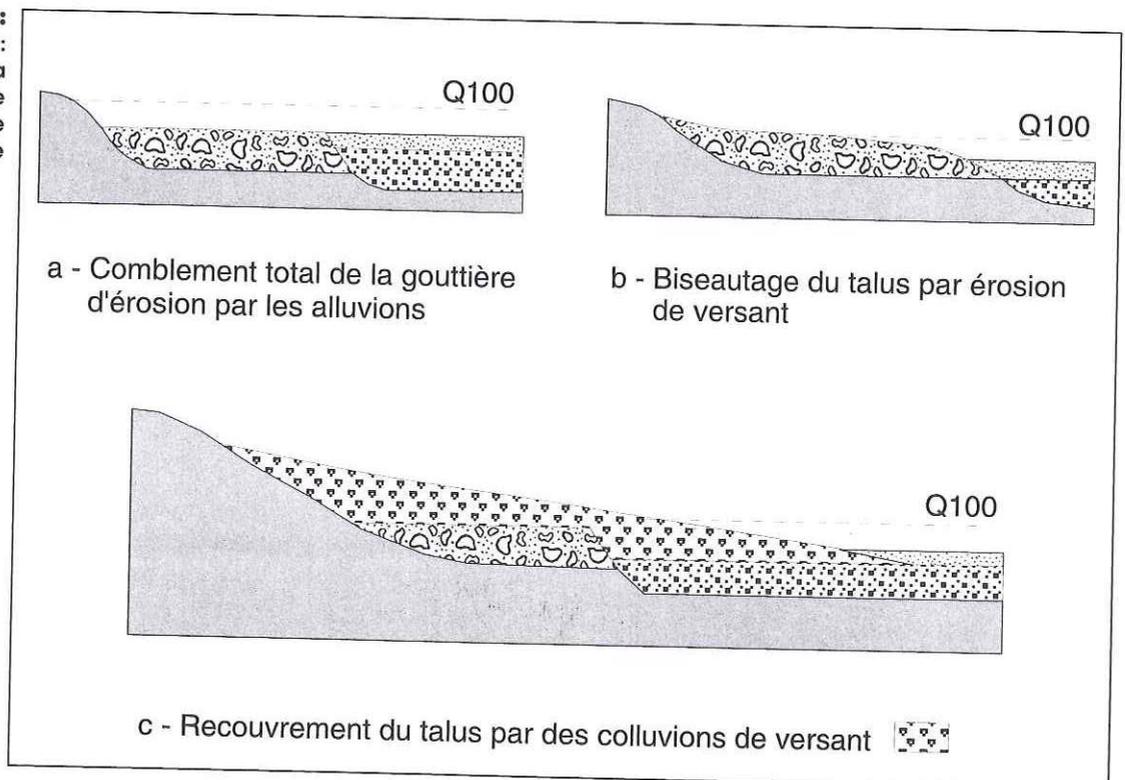
Figure 17 :
Cas général d'une
limite externe de
plaine alluviale
moderne
constituée par un
talus d'érosion

Ce talus marque alors la limite du champ d'inondation maximal consécutif aux crues rares, centennales par exemple (Q100) (figure 17 a).

Cette limite est très nette, et identifiable tant sur le terrain que sur photographies aériennes. Le talus présente en principe une pente assez raide, bien que variable en fonction de la nature des matériaux qui le constituent (figure 17 b). Son report cartographique peut donc s'effectuer avec une grande précision en plan, en fonction de l'échelle adoptée.

- quelquefois, cependant, (figure 18) cette limite a été plus ou moins dissimulée par des phénomènes plus récents, tels que :
 - le remblaiement complet de la gouttière d'érosion (figure 18 a). Ici, le rôle hydromorphologique du talus de lit majeur est effacé. Les crues exceptionnelles débordent au delà, sur la terrasse ancienne. La zone inondable peut alors atteindre un talus d'érosion plus ancien, correspondant par exemple à l'entaille de l'avant dernier cycle glaciaire dans une terrasse antérieure ou dans un pied de versant ;
 - le biseautage du talus par une érosion en provenance du versant (figure 18 b) ;
 - le recouvrement du talus par des apports sédimentaires en provenance du versant (colluvions, glacis) (figure 18 c) ;
 - la conjugaison des deux cas précédents.

Figure 18 :
Cas particuliers :
effacement de la
limite externe de
la plaine alluviale
moderne



Les configurations b et c se traduisent par une imprécision dans le positionnement de la limite maximale d'extension des crues. En effet, compte tenu de la faible pente transversale observable, une petite variation des hauteurs

d'eau de crues se traduira par une assez forte modification de cette limite. Les conséquences pratiques de cette imprécision seront cependant réduites, dans la mesure où les hauteurs de submersion et les vitesses du courant resteront modestes.

Relations spatiales entre les différents lits

Les largeurs respectives des lits mineur, moyen et majeur varient sensiblement au long d'une vallée et d'une vallée à l'autre. En règle générale, l'ensemble lit moyen - lit majeur s'étend beaucoup plus largement que le lit mineur, dans un rapport de l'ordre de 10 ou 20 à 1. Il semble que ce rapport varie notamment avec la réponse hydrologique du bassin versant. Ainsi, lorsque celui-ci présente une forte proportion de terrains perméables (cas de Mazan), l'infiltration des pluies d'intensité faible à moyenne conduit à limiter l'extension du lit mineur, alors que le lit majeur s'étale très largement. L'observation des relations spatiales entre les différents lits d'un cours d'eau peut donc permettre de mieux comprendre le fonctionnement hydrologique d'une vallée.

Nous avons vu, dans le chapitre 1, que la part respective du lit moyen et du lit majeur varie également d'amont en aval, et en fonction des régimes des cours d'eau. Par ailleurs, l'emboîtement des différents lits peut s'effectuer de plusieurs manières. En règle générale, le basculement du cours d'eau d'une rive à l'autre par formation de méandres produit une dissymétrie de la plaine alluviale moderne, avec alternance des extensions de lit majeur d'une rive à l'autre (figure 19). Cette organisation de la plaine alluviale est fortement conditionnée par la lithologie et la structure tectonique du substratum. Quelquefois, le lit majeur est traversé par des bras de lit moyen qui facilitent la submersion de la plaine alluviale.

La sédimentologie

La nature des formations alluvionnaires déposées par le cours d'eau, dépend, en un point donné, de la compétence du courant, directement liée à sa vitesse et à sa charge minérale. Elle varie ainsi globalement, à l'échelle de la vallée, par la décroissance de la taille des particules sédimentées de l'amont vers l'aval, et en un même lieu, du bas vers le haut, en raison de la diminution de la pente d'écoulement. Elle varie également, en profil transversal, depuis les lits mineur et moyen, dans lesquels se déplacent les particules les plus grossières, jusqu'au lit majeur caractérisé par le dépôt des particules les plus fines, allant des sables aux limons et aux argiles.

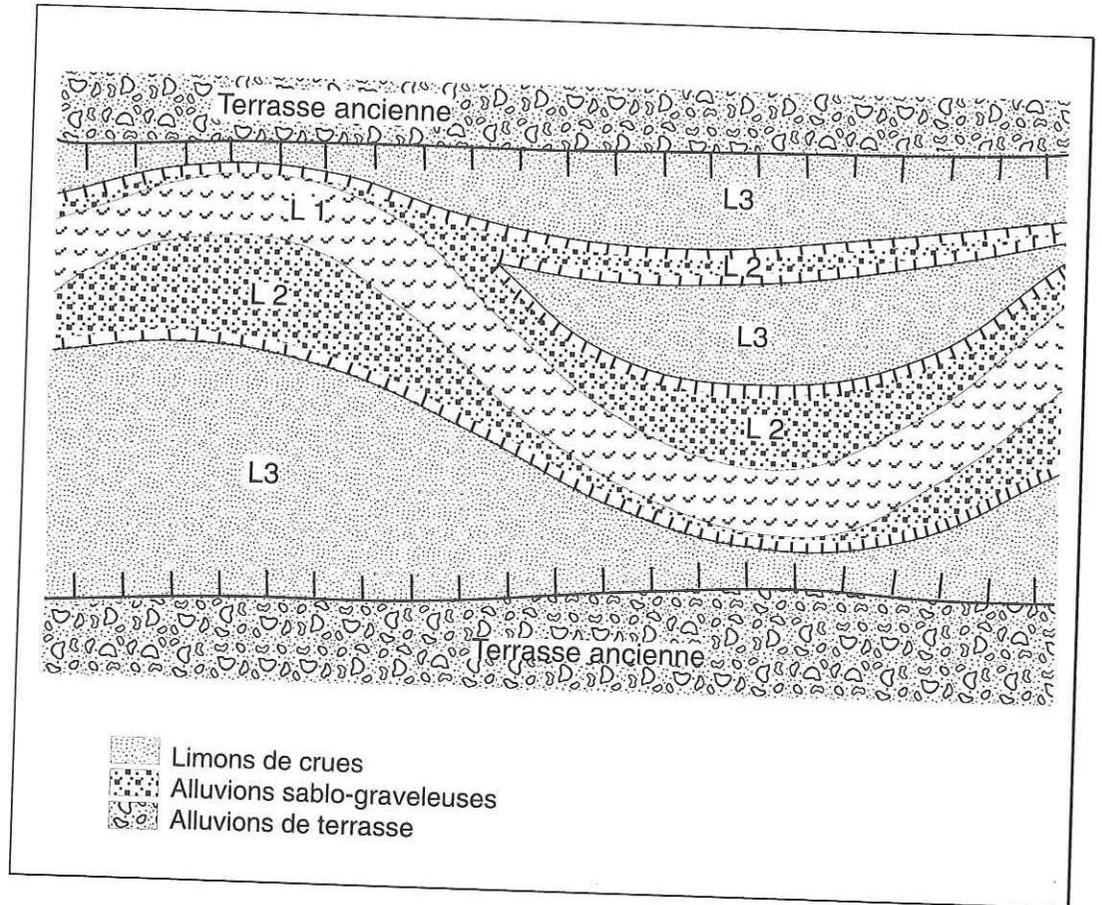


Figure 19 :
Basculement des
lits d'un bord à
l'autre de la plaine
alluviale moderne.
Rescindement du
lit majeur par un
bras du lit moyen

Le lit moyen, du fait de son irrégularité topographique et de l'abandon de ses chenaux de crue par le courant de lit mineur, montre de fortes variations granulométriques : les chenaux sont remplis de matériaux très grossiers, déposés au maximum de la crue, surmontés par des limons et argiles, et parfois par l'eau ; les parties en saillie, correspondant aux rives convexes des méandres successifs, sont formées d'alluvions grossières, mais à granulométrie décroissante du chenal au haut du profil (figure 20).

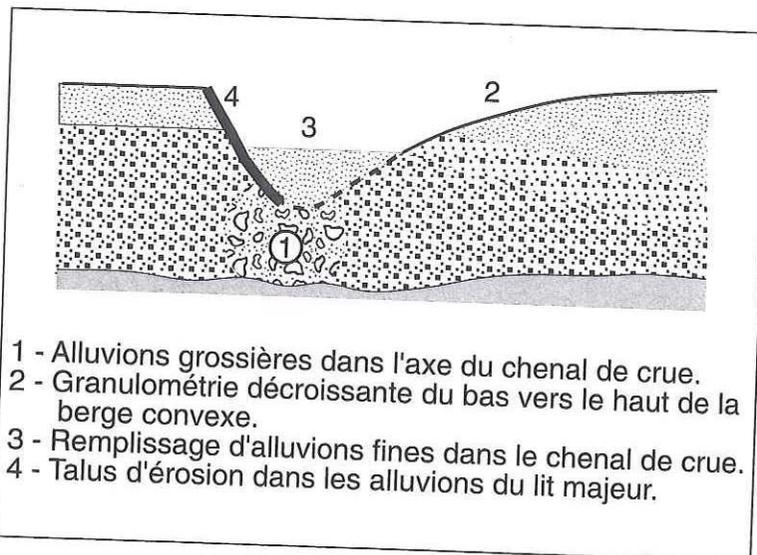


Figure 20 :
Variations granulo-
métriques types
dans un lit moyen

Les alluvions grossières de la plaine alluviale présentent globalement des granulométries comparables à celles des alluvions de terrasse, ce qui peut amener une confusion lorsque le niveau topographique de ces deux ensembles est peu différencié. Sur le terrain, cependant, leur distinction peut se faire en observant la teinte du matériau, reflet de ses rapports avec la nappe phréatique. En effet, les alluvions de terrasse, restées très longtemps hors d'eau, ont subi des phénomènes d'oxydation qui ont transformé en oxyde ferrique ($\text{Fe}^2 \text{O}^3$) rouge, le fer contenu dans le sédiment, donnant à celui-ci une teinte d'ensemble beige à ocre. Au contraire, les alluvions grossières de plaine alluviale moderne, noyées par la nappe phréatique, ont subi des phénomènes de réduction, avec production de fer ferreux ($\text{Fe}^3 \text{O}^4$) de teinte sombre, colorant le sédiment en gris-bleu. Il faut néanmoins tenir compte, dans le détail, d'oxydations ayant pu affecter la partie supérieure de ce sédiment, et susceptibles de masquer le phénomène d'ensemble. Il est nécessaire, par ailleurs, d'apprécier les modifications qui peuvent être apportées par les affluents, en particulier lorsque ceux-ci ont déposé des alluvions de nature pétrographique ou de granulométrie différentes de celles du cours d'eau principal. Ces modifications, reconnaissables par examen des matériaux, ne perturbent cependant pas le schéma général.

L'occupation des sols

L'implantation de la couverture végétale naturelle

Elle reflète très fidèlement les conditions édaphiques* liées aux unités géomorphologiques décrites précédemment. Ainsi :

- ***Le lit d'étiage et le lit mineur*** sont à peu près dépourvus de végétation émergée, et présentent des plages de galets souvent colonisées, de façon sporadique, par des espèces herbacées. La flore de type immergé ou semi-immergé est principalement développée dans le lit toujours en eau, dit lit vif, correspondant au lit mineur en zone tempérée, et au lit d'étiage dans le domaine méditerranéen.

- ***Le lit moyen*** permet l'implantation d'espèces végétales constitutives du groupement des forêts riveraines des cours d'eau, constituées d'associations végétales variables suivant les conditions climatiques régionales (ex : ripisilve à peupliers en domaine méditerranéen, aulnaie en altitude, chênaie, etc). Le développement de cette végétation est fonction de la fréquence et de la force des crues : faible, et limitée aux berges des anciens chenaux pour des conditions hydromorphologiques très dures, elle peut occuper la totalité de l'espace de lit moyen dans certains cas favorables.

En pratique, si la forêt riveraine des cours d'eau, est un indicateur fiable de la situation de lit moyen, son développement est extrêmement tributaire des pressions exercées par l'homme, comme nous le verrons plus loin.

Lorsqu'elle a pu croître normalement, elle offre un grand intérêt écologique et paysager, en raison de la diversité des espèces végétales et animales qui y vivent, diversité liée notamment à celle de ses biotopes constitutifs.

- **Le lit majeur**, initialement occupé lui aussi par la forêt riveraine, fait depuis très longtemps l'objet d'une mise en culture systématique, éradiquant pratiquement la végétation spontanée. Seule la déprise agricole autorise de nos jours la réimplantation de la forêt, comparable à celle du lit moyen, et le plus souvent très différente de celle des terrasses ou des versants, dont les conditions hydrologiques (profondeur de la nappe - absence de submersion par les crues) sont particulières. Dans quelques cas, la forêt du bord des eaux s'est maintenue sur le lit majeur. Elle peut présenter des caractéristiques spécifiques (exemple : mélange ripisilve - chênaie pubescente) et un grand intérêt écologique.

En résumé, il ressort de cette description une typologie de base où se succèdent un lit mineur hors d'eau dénudé, un lit moyen couvert d'une ripisilve et un lit majeur cultivé. Cependant, ces différents lits peuvent subir des variations dont on doit rechercher l'origine. Les photographies 4 et 5 en sont une bonne illustration.

En règle générale, la répartition des espèces végétales au sein d'une plaine alluviale traduit les rapports entre la surface du terrain naturel et la nappe. On observe ainsi un étagement de la végétation en fonction de la profondeur de celle-ci. Cet étagement est très sensible en climat méditerranéen,

Photo n° 4 :
Vue aérienne
oblique du Gardon
d'Anduze :
1. lit mineur perturbé
par des carrières et
un recalibrage ;
2. lit moyen :
ripisilve dégradée ;
3. lit majeur :
parcellaire
en lanières ;
4. terrasses
anciennes :
grand parcellaire





Photo n° 5 :
Vue au sol après une
cruë :
1. lit mineur à nu ;
2. lit moyen avec
laisses de cruë ;
3. talus de sépara-
tion lit moyen - lit
majeur ;
4. lit majeur cultivé -
Ouvèze à l'aval de
Vaison-la-Romaine

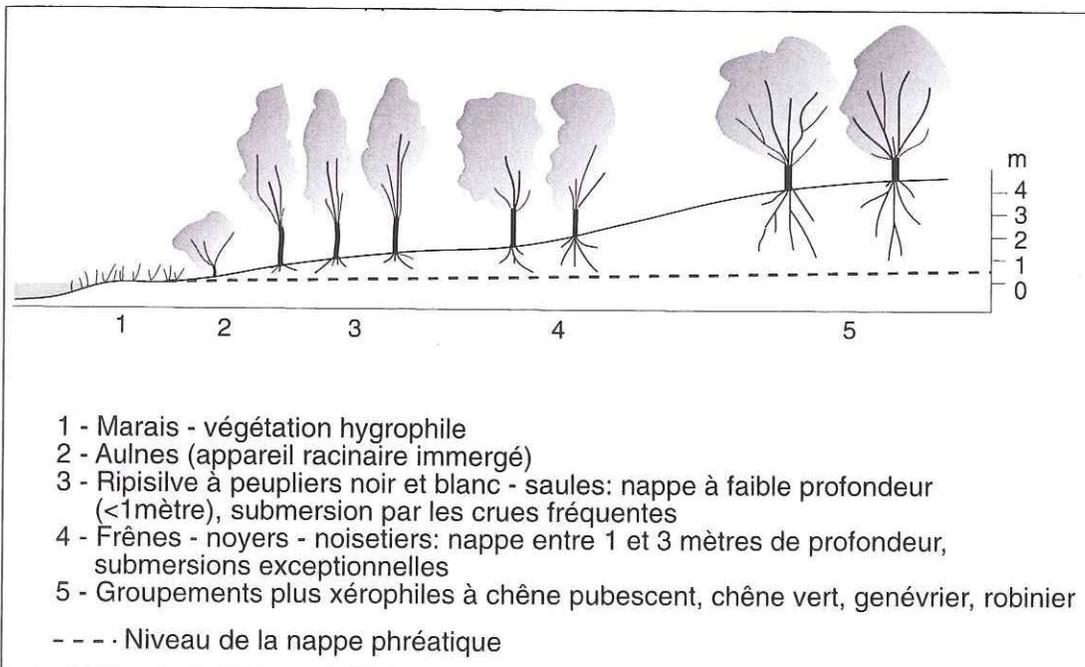


Figure 21 :
Relations de la
végétation avec le
niveau de
la nappe
en région
méditerranéenne

comme l'indique la figure 21. L'observation de la répartition des espèces végétales dans l'espace alluvial permet donc d'apporter des informations complémentaires aux données d'ordre morphologique.

La localisation des constructions

Elle a soigneusement intégré dans le passé, le fonctionnement du milieu alluvial. Leur observation fournit par conséquent de précieuses indications sur les risques d'inondation. C'est ainsi que les constructions anciennes se situent de manière quasi systématique en bordure externe de zone inondable, dans des positions morphologiques variables (figure 22) :

- en sommet de talus limitant une basse terrasse,
- sur un promontoire rocheux (parfois un dépôt de tufs ou de travertins),
- en pied de versant ou d'un dépôt de colluvions.

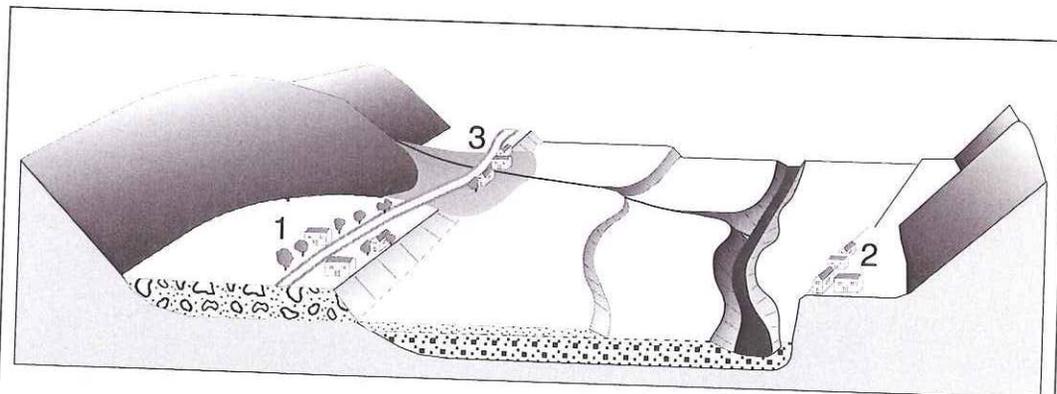


Figure 22 :
Relations des
urbanisations
anciennes avec
les zones
inondables

- 1 - Habitations et route en bordure d'une terrasse ancienne
- 2 - Implantation sur un relief rocheux
- 3 - Implantation en pied de versant ou de zone colluvionnée

Cette adaptation aux conditions hydromorphologiques, observable partout, est particulièrement rigoureuse pour des cours d'eau à régime très irrégulier, comme en milieu méditerranéen. On constate ainsi, à Vaison la Romaine, que les constructions anciennes ont été endommagées, de manière beaucoup moins catastrophique que les constructions nouvelles, du seul fait de la submersion du pont romain.

Lorsque des constructions anciennes ne respectent apparemment pas cette règle, des raisons particulières apparaissent après un examen détaillé du site : présence d'une surélévation naturelle du terrain ayant permis l'implantation du noyau urbain initial (construction sur un remblai), adaptation de l'habitat (logement au premier étage) ou du mode de vie (refuge en étage en période de crue) autorisant l'établissement du bâtiment d'exploitation agricole au cœur d'une plaine alluviale trop vaste pour être mise en valeur depuis un lieu éloigné. Par ailleurs, il faut tenir compte des évolutions du milieu alluvial dans le temps. Ainsi, dans les parties aval des vallées, des constructions ont pu être édifiées sur un promontoire au cours de la période historique et devenir vulnérables aux inondations par suite du relèvement de la surface topographique dû aux dépôts successifs de crues. Compte tenu d'un rythme de sédimentation pouvant atteindre plusieurs décimètres par siècle, les conditions d'inondabilité ont pu de cette façon se trouver radicalement transformées en quelques siècles. C'est le cas, par exemple, dans les Basses Plaines de l'Aude et sur le site de la ville romaine de Vaison-la-Romaine, recouvert, avant les fouilles, par une épaisse couche de galets et de limons.

L'organisation de l'exploitation agricole

Elle était également adaptée, du moins dans le passé, à l'existence du risque d'inondation : lit majeur réservé aux cultures annuelles ; lit moyen non cultivé, et parfois utilisé en prairie.

La structure du parcellaire

Reflétant en zone inondable l'organisation du réseau de drainage, elle fournit aussi des indications intéressantes. Ainsi le lit majeur est-il fréquemment découpé en lanières étroites, perpendiculaires à l'axe du cours d'eau. Parfois même, ces lanières sont distribuées en éventail, reproduisant la géométrie d'un ancien méandre (photo n° 6). Ces structures contrastent fortement avec celles qui prédominent sur les terrasses anciennes, les zones collinaires ou les plateaux.



Caractérisation
hydrogéomorphologique
des zones inondables

Photo n° 6 :
Parcellaire en
lanières sur lits
moyen et
majeur. (vallée
des Gardons)

Les vestiges historiques et archéologiques

Ils apportent quelquefois des informations complémentaires sur le fonctionnement d'une plaine alluviale. Dans les plaines du Roussillon (Pyrénées-Orientales), par exemple, la chapelle de Villerase a dû être périodiquement dégagée des limons de crue. Elle se trouve aujourd'hui au centre d'une dépression de 1 mètre de profondeur (photo n° 7).



Photo n° 7 :
Chapelle du 16^e
siècle dans les
plaines du Roussillon
(66)

Signification hydrologique des unités hydrogéomorphologiques

Si les unités hydrogéomorphologiques peuvent sans ambiguïté être considérées comme la résultante du fonctionnement passé du cours d'eau, et particulièrement de ses régimes caractéristiques, il reste à déterminer leur signification au regard des conditions actuelles et futures de ce fonctionnement. Deux questions préalables se posent :

- Ces unités héritées de périodes anciennes peuvent-elles encore être considérées comme fonctionnelles ?
- Les aménagements réalisés par l'homme, qui ont pour conséquence globale d'augmenter la capacité du lit mineur (recalibrages, extractions en particulier), changent-ils radicalement les conditions de débordement ?

Diverses études comparatives ainsi que l'observation de grandes crues récentes apportent une réponse positive à la première question. En ce qui concerne les effets des aménagements, des différences sensibles apparaissent en fonction de l'occurrence des crues considérées et de l'importance relative des cours d'eau par rapport aux transformations qu'ils ont subies.

Adéquation des unités hydrogéomorphologiques et des paramètres hydrologiques : l'exemple de Mende

Les confrontations de la cartographie hydrogéomorphologique avec les modélisations hydrauliques et les données de crues historiques ont confirmé jusqu'ici la convergence des résultats sur plusieurs sites, tels que le Gardon d'Anduze, Pertuis ou Mende.

A Mende (Lozère), une étude hydraulique, effectuée en 1985, délimitait une zone « à haut risque » qui correspondait assez bien au lit moyen, et une zone « à risque modéré », un peu plus étendue que le lit majeur. L'inondation de 1994, survenue quelques mois après la cartographie hydrogéomorphologique, a couvert la quasi totalité des zones indiquées comme inondables. Les nombreux relevés de niveaux d'eau, réalisés par la DDE au cours de cette crue qualifiée de centennale, ont donné une hauteur d'eau moyenne de l'ordre de 1 mètre en lit moyen et de 0,5 mètre en lit majeur.

L'exemple de Mende illustre la double difficulté que l'on rencontre pour définir le risque :

- *dans l'interprétation des résultats de l'étude hydraulique.* La zone à haut risque a été considérée comme constructible en 1985. Or, la notion de lit moyen inciterait au contraire à une grande prudence, d'autant plus que cette zone constitue le premier champ d'expansion des crues à la sortie d'un tronçon de vallée de faible largeur.

- *dans la caractérisation d'une zone en termes de hauteur d'eau.* Les mesures effectuées au maximum de la crue montrent une variabilité importante, allant de 0,5 à 1,5 mètre pour la zone à haut risque, ou celle de lit moyen, réputée homogène.

Devant ces incertitudes, il semble aujourd'hui prudent de relativiser les apports des approches hydrogéomorphologique et hydrologique, qui sont complémentaires, et susceptibles de se conforter réciproquement en recoupant des informations de nature différente.

Essai de correspondance entre les unités hydrogéomorphologiques et l'hydrologie

Sous réserve de vérifications supplémentaires, les études engagées jusqu'à présent permettent d'établir les correspondances suivantes :

• **Pour un cours d'eau non aménagé**, le lit moyen coïnciderait avec l'espace occupé par les crues fréquentes (1 an à 5 ans, voire 10 ans). Cette notion a été utilisée autrefois, dans le cas de la Durance par exemple, pour délimiter le domaine public fluvial, trop fréquemment soumis aux crues pour pouvoir être livré aux activités agricoles.

Le lit majeur est la zone d'expansion des crues rares et exceptionnelles, de fréquence décennale à centennale et au-delà. Différentes relations peuvent être établies avec la modélisation hydraulique, suivant la nature de la limite externe du lit majeur. Ainsi, dans le cas d'un talus bien marqué, les crues rares et exceptionnelles occupent la totalité du lit majeur, sans distinction en plan, et ne se différencient que par leurs hauteurs d'eau et leurs vitesses d'écoulement. Par contre, pour une bordure de lit majeur en forme de plan faiblement incliné, l'extension latérale des crues varie en fonction des hauteurs d'eau. La limite ne peut être fournie théoriquement que par une modélisation à partir de levés topographiques précis. Elle peut également être déduite de l'extension maximale des limons de crue.

Les comparaisons des méthodes utilisées jusqu'ici tendent à montrer que, au regard des limites externes, les crues qualifiées de centennales par les études hydrologiques ne concernent qu'une partie du lit majeur, d'importance variable selon les cas. Cette observation peut s'interpréter, soit comme la confirmation d'un changement des conditions climatiques, soit comme l'indication de la complémentarité des deux approches. Sur ce plan, le lit

majeur correspondrait à la limite d'extension des crues exceptionnelles, c'est-à-dire de fréquence inférieure à 100 ans.

On peut cependant s'interroger aujourd'hui sur la signification de ces fréquences théoriques, pour lesquelles les hydrologues ne disposent, en dehors des grands cours d'eau, que d'un échantillonnage de données trop réduit pour permettre une interprétation statistique rigoureuse. Ainsi, même pour les crues dites centennales, il est vraisemblable que des réajustements seront effectués à la baisse dans l'avenir, à la lueur des nouvelles données.

Dans ces conditions, rien ne permet de penser aujourd'hui que le lit définit comme majeur par l'hydrogéomorphologie ne soit plus mobilisable entièrement par les crues dans les conditions climatiques actuelles. Par ailleurs, il est probable que des crues générées par des pluies distribuées sur des portions différentes d'un bassin versant, affectent séparément des tronçons successifs de plaine alluviale. La limite du lit majeur correspondrait alors à la courbe enveloppe des différents types de crues exceptionnelles ayant affecté le bassin versant dans le passé. L'indication de cette courbe enveloppe reste évidemment très utile en tant qu'outil de prévision de crues à venir. Elle est sans doute d'autant plus pertinente dans les portions plus amont des cours d'eau. En effet, l'analyse hydrologique à base historique s'appuie sur la connaissance des crues ayant touché les secteurs les plus vulnérables. Elle est donc plus pauvre en événements dans ces secteurs où l'urbanisation s'est étendue plus tardivement sur les zones inondables.

Des recherches restent à programmer afin de mieux apprécier le degré de validité des informations tant qualitatives que quantitatives dont nous disposons.

● **Pour un cours d'eau aménagé**, il semble que la modification des champs d'inondation soit variable suivant l'importance du cours d'eau. Ainsi, dans le cas du Gardon, la modélisation hydraulique montre que le chenal du lit mineur, pourtant spectaculaire, ne peut absorber que la crue décennale. Par ailleurs, il n'abaisse les hauteurs d'eau atteintes en lit majeur par la crue centennale que de 10 % environ (0,3 mètres pour 3 mètres). Le recalibrage de l'Eze, par contre, aurait une incidence plus forte, en permettant l'écoulement de crues de fréquence 20 à 30 ans. Ce facteur a pu contribuer à limiter le champ d'expansion de la crue de 1992 en lit majeur.

D'une manière générale, il semble que l'incidence des aménagements hydrauliques les plus fréquents (recalibrages, endiguements) sur l'expansion des crues soit d'autant plus forte que les dimensions du cours d'eau sont plus faibles. Ceci aurait entre autres pour incidence de restreindre le rôle écrêteur de crues des lits majeurs dans les parties amont et moyenne des bassins versants, au détriment de la sécurité à l'aval.

Conclusion

Il ressort de ces réflexions les orientations suivantes :

- *Le lit moyen*, exposé à toutes les crues, des plus fréquentes aux plus rares, est soumis aux hauteurs d'eau et aux vitesses de courant maximales. Il doit être considéré, par conséquent, comme inconstructible. Dans les petits appareils hydrographiques où ses limites ne sont pas matérialisées dans la morphologie, il est impératif d'évaluer son emprise théorique. Le non respect de cette précaution élémentaire explique la majeure partie des dégâts enregistrés au cours des dernières catastrophes.
- *Le lit majeur* correspond à l'ensemble des terrains susceptibles d'être submergés par des crues exceptionnelles, sur différentes parties du bassin versant. A l'intérieur de la courbe enveloppe donnée par la limite externe de ce lit majeur, les crues qualifiées de centennales dans l'état actuel des connaissances hydrologiques peuvent occuper des portions variables de l'espace, et quelquefois sa totalité.
- *Les aménagements hydrauliques* facilitant l'écoulement des crues peuvent avoir sur ce schéma de fonctionnement des répercussions faibles pour les grands cours d'eau, mais plus importantes pour les réseaux hydrographiques secondaires.

Prise en compte de la variabilité des facteurs

Le schéma général que nous venons de décrire subit un certain nombre de modifications en fonction des conditions géomorphologiques régionales particulières, et des transformations apportées au milieu par l'homme. Il est donc indispensable de présenter les plus importantes d'entre elles, sans qu'il soit possible, dans le cadre de ce document, de prétendre à l'exhaustivité. Comme toujours en matière d'observation du milieu naturel, une marge d'interprétation reste à la disposition de l'opérateur, et implique une bonne connaissance des mécanismes de base.

Les facteurs naturels

La variabilité géomorphologique amont - aval

D'amont en aval, les conditions de fonctionnement hydrogéomorphologique d'un cours d'eau évoluent, en raison notamment du changement de pente longitudinale et de nature lithologique du substratum. Indépendamment des facteurs géologiques, que nous examinerons plus loin, les modifications géomorphologiques résultant des variations de pente sont les plus importantes dans les parties amont et aval de la vallée. Elles sont notables, mais moins nettes, à l'intérieur de sa partie moyenne.

• La partie amont

En amont d'un bassin versant, la pente longitudinale et celles des versants sont fortes. Elles déterminent un écoulement très rapide des eaux de pluie. Les crues sont plus fréquentes, et déplacent de très volumes d'eau moins grands que dans la partie moyenne. Les vitesses plus fortes accroissent la capacité d'érosion et la compétence du cours d'eau. Les apports de matériaux, qui proviennent de l'érosion des sols, s'effectuent à la fois longitudinalement, par transport alluvial, et transversalement, par transport en nappe de colluvions. Ils créent, de ce fait, des formes très différentes de celles rencontrées dans la partie moyenne, comme des vallons en berceau, des cônes torrentiels, des glacis, des lits en tresse ou des gorges :

- **Vallons en berceau** : dans des formations géologiques de faible dureté, telles que des marnes, argiles, sables, molasse, les apports latéraux, très

importants, ont tendance à masquer les formes d'origine alluviale. Le raccordement entre la plaine alluviale moderne et le versant, correspondant initialement à une entaille d'érosion, devient progressif, concave, et donc difficilement décelable (figure 23). Par ailleurs, la pente longitudinale forte privilégie les écoulements rapides dans l'axe de la plaine alluviale, qui se comporte, dans sa totalité, comme un lit moyen, sans différenciation d'un lit majeur de débordement. On observe alors une seule zone d'inondation aux limites imprécises (photo n° 8).

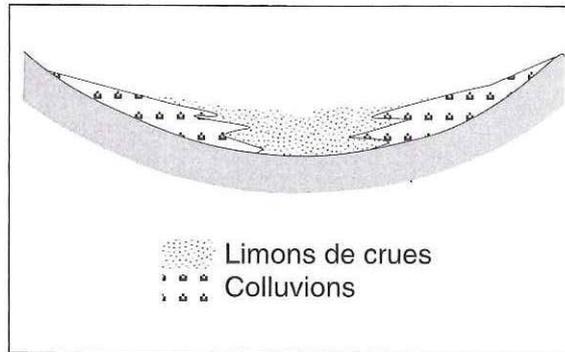


Figure 23 :
Vallon en berceau



Versant rive gauche
limite imprécise

Axe de drainage
interrompu et
partiellement
végétalisé

Versant rive droite

Photo n° 8

– **Cônes torrentiels** : En amont, ou lorsque le cours d'eau principal est profondément encaissé dans un massif rocheux, la confluence des vallons affluents s'effectue par l'intermédiaire de cônes torrentiels, qui manifestent la prédominance des apports latéraux sur la capacité d'évacuation du cours d'eau. Ces cônes sont en fait l'équivalent de l'ensemble lit mineur - lit moyen : leur forte pente longitudinale se traduit par une divagation très fréquente du lit mineur, passant d'une génératrice du cône à une autre. Lorsque les apports diminuent, la tendance à la divagation s'atténue, permettant la stabilisation d'une partie du cône par l'implantation de la forêt. Dans tous les cas, la délimitation du cône par rapport à la plaine alluviale moderne du cours d'eau principal ne présente pas de difficulté particulière. On remarque très souvent que le cône a repoussé le cours d'eau en direction du versant opposé ; parfois, l'avancée du cône a pu provoquer l'obstruction du lit mineur du cours d'eau principal, qui doit ensuite réentailler cet obstacle.

– **Glacis** : pour des pentes de versant plus faibles et constituées de matériaux peu cohérents, le phénomène des cônes torrentiels s'atténue, et prend la forme de glacis, cônes très étalés, recouvrant plus ou moins largement la plaine alluviale moderne du cours d'eau principal (figure 24). Sa délimitation est cependant plus délicate que celle du cône torrentiel, en raison de la faiblesse des pentes.

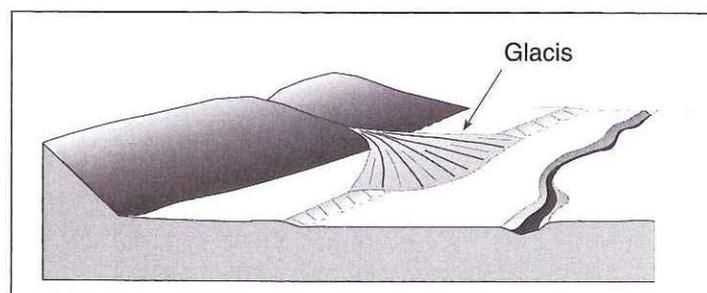
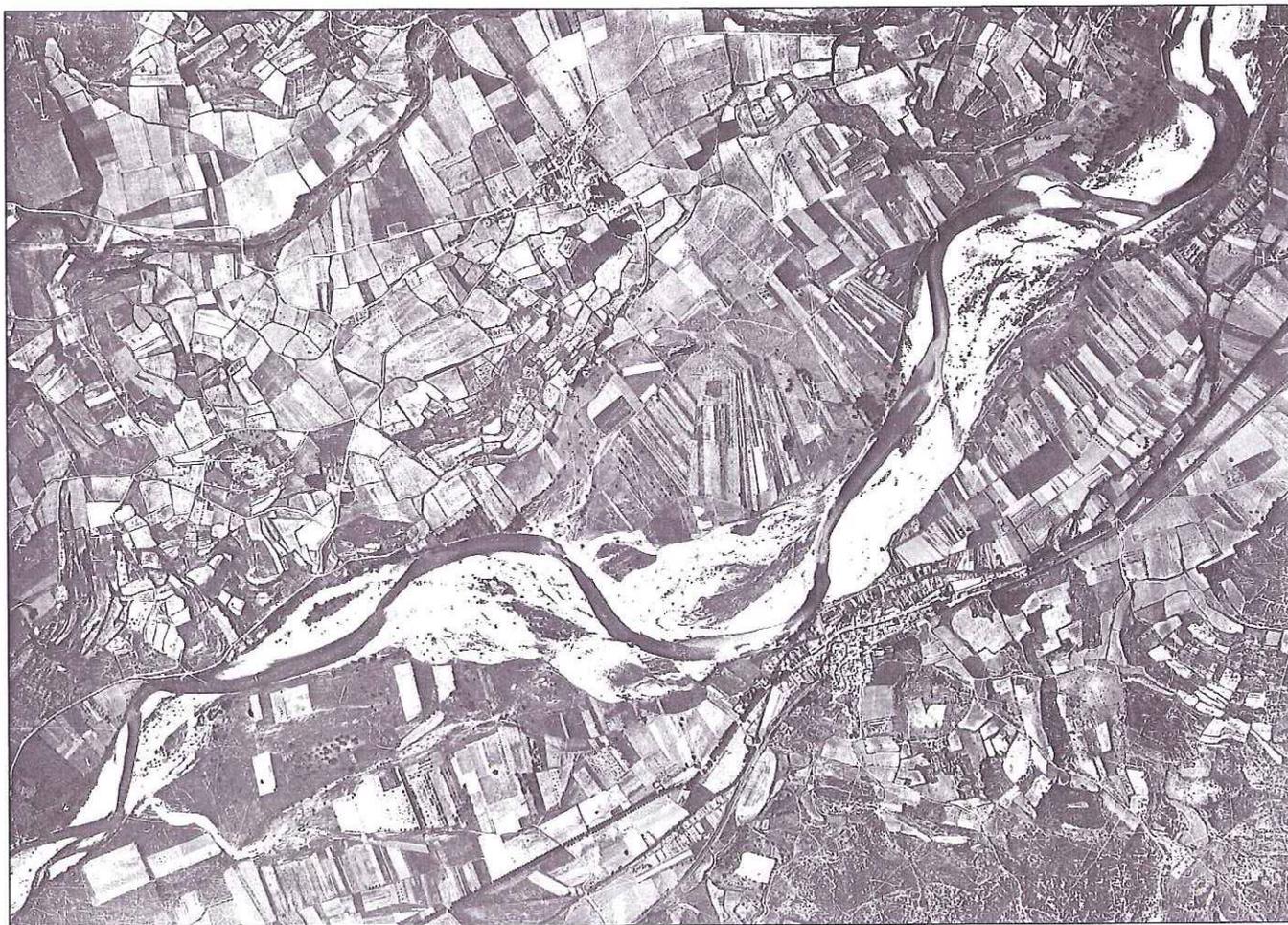


Figure 24 :
Glacis

– **Lits en tresses** : Les caractéristiques morphologiques induites par la dynamique torrentielle peuvent se développer sur de longues distances vers l'aval pour les grands cours d'eau à forte pente longitudinale, tels que la Durance. L'apport permanent d'alluvions grossières, effectué par charriages successifs, est supérieur à la capacité de remise en mouvement et de transport (compétence) du cours d'eau, qui alluvionne en permanence et est obligé de changer de lit à chaque crue. Il se crée alors un lit en tresses, comprenant un grand nombre de chenaux d'écoulement anastomosés (photo n° 9). L'ensemble de ces lits,, séparés par des atterrissements, constitue alors un vaste lit moyen, qui occupe toute la largeur de la plaine alluviale moderne. Dans cette configuration, tout point de la plaine, même éloigné du lit vif, peut être atteint par les crues de fréquence élevée. On se trouve dans une phase de jeunesse du cours d'eau, dont le lit en tresses peut s'étendre plus ou moins loin vers l'aval selon la fréquence et l'importance des crues.

Photo n° 9 :
Lit en tresses sur le
Gardon d'Anduze



– **Gorges** : dans des matériaux rocheux, à forte cohésion, le creusement a pu s'effectuer en gorges abruptes et étroites, réduisant souvent la plaine alluviale moderne à son seul lit mineur (figure 25 a). Lorsque l'entaille est plus large, un lit moyen peut se développer, voire plus rarement un lit majeur (figure 25 b). Ces différents lits sont toujours d'étendue limitée, et séparés par des talus bien marqués.

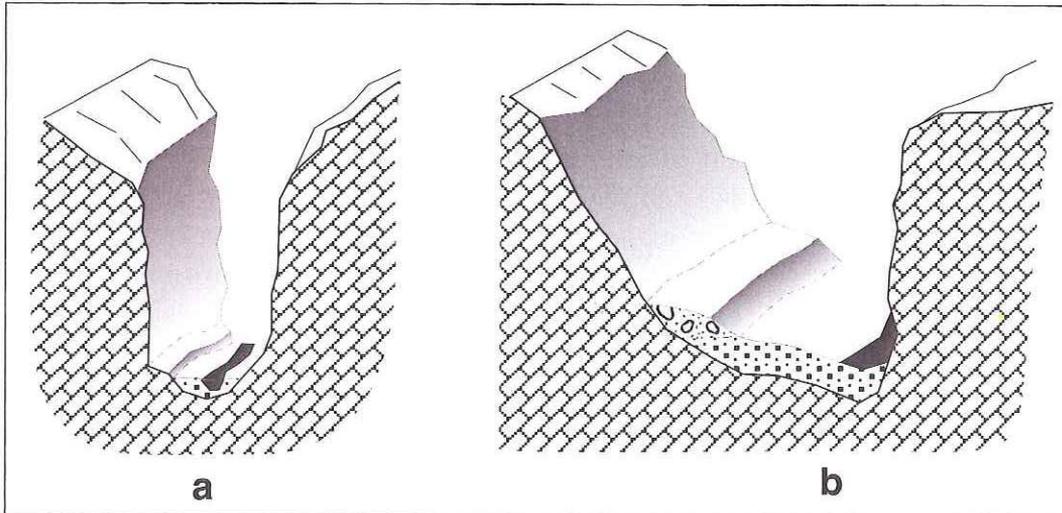


Figure 25 :
Gorges creusées dans des roches calcaires.
a) La plaine alluviale est réduite au lit mineur.
b) L'entaille plus large permet le développement d'un lit moyen.

En dépit des conditions hydrodynamiques difficiles, le tracé du cours d'eau peut présenter une meilleure stabilité dans les gorges que dans son parcours de plaine, du fait de l'ancrage de ses têtes de méandres dans les versants rocheux (photo n° 10).



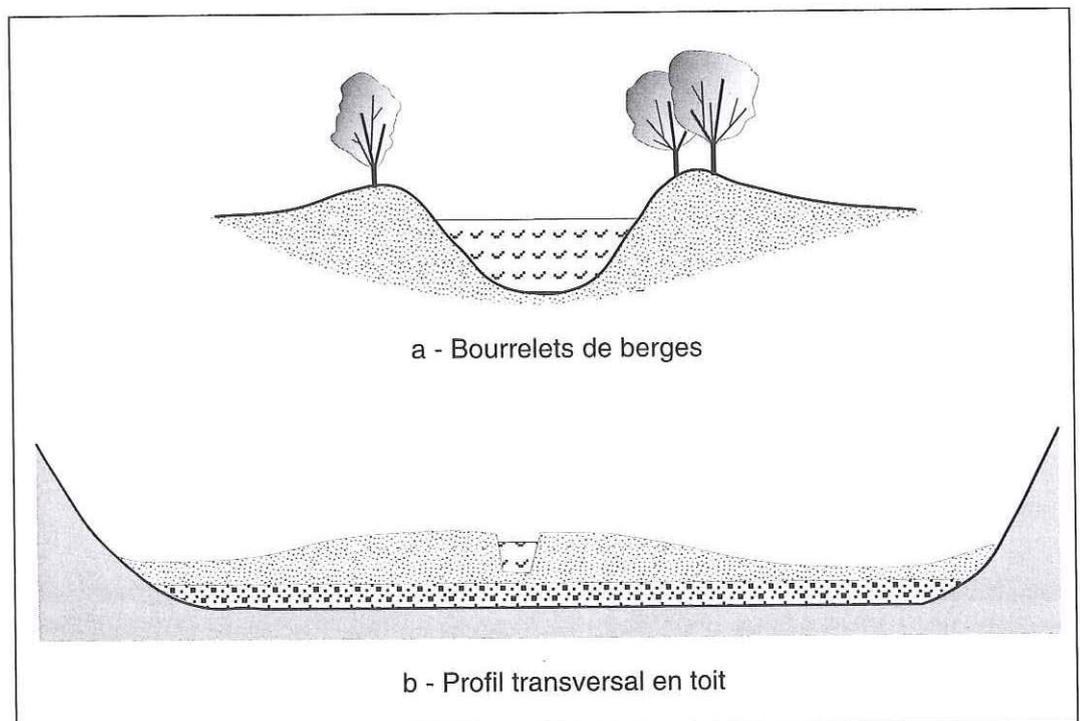
Photo n° 10 :
Méandres et plaine alluviale du Var dans la traversée des gorges de la Mescia (Alpes-Maritimes)

• La partie aval

L'aval d'un cours d'eau, en relation avec le niveau de base (mer ou lac), est principalement influencée par la diminution de sa pente longitudinale liée à la remontée de ce niveau de base au cours des derniers millénaires. La décroissance de la vitesse du courant se traduit par la sédimentation des matières argilo-limoneuses en suspension, qui recouvrent en premier lieu le lit majeur, puis le lit moyen et parfois se déposent même dans le lit mineur (bouchon vaseux des estuaires). Dans ces conditions, la plaine alluviale moderne finit par ne plus comporter qu'un lit mineur et un lit majeur.

L'évolution géomorphologique peut également se poursuivre par la transformation du lit moyen en bourrelet de berge (figure 26 a). La berge de lit mineur est généralement occupée par une végétation dense arborescente qui ralentit l'écoulement des eaux au passage des crues et provoque le dépôt de limons formant peu à peu un bourrelet de berge plus ou moins marqué. Lorsque ces dépôts s'accompagnent d'une sédimentation dans le lit mineur lui-même, l'ensemble lit mineur - bourrelet de berge s'élève peu à peu, et finit par surmonter le lit majeur. On obtient alors la configuration dénommée "lit en toit", caractéristique d'un certain nombre de plaines alluviales côtières, telles que les plaines du Roussillon par exemple (figure 26 b).

Figure 26 :
Bourrelet de
berges et profil
transversal en toit



Le contexte climatique

Nous ne disposons pas, à l'heure actuelle, d'informations suffisantes pour évaluer les modifications du modèle géomorphologique de base en fonction de l'environnement climatique. Les changements les plus importants concernent le lit moyen, qui tend à disparaître dans les régions tropicales soumises à des précipitations intenses de fréquence annuelle en saison des pluies.

Le facteur géologique

La structure géologique du bassin versant peut introduire des modifications dans l'organisation spatiale de la vallée. Il est fréquent qu'un cours d'eau traverse une série géologique où alternent, d'amont en aval, des formations présentant de grandes différences de résistance à l'érosion. Dans ce cas, le bassin versant s'organise en sous-bassins partiellement autonomes, pouvant chacun reproduire, lorsqu'ils sont suffisamment étendus, l'évolution géomorphologique amont - aval déjà décrite. Le bassin versant des Gardons en est une bonne illustration (figure 27). On retrouve également cette disposition dans la basse vallée de la Seine, où chaque méandre correspond à un sous-bassin délimité à l'amont et à l'aval par un seuil rocheux lithologique* ou structural*.

Ces variations, d'origine géologique, ne limitent pas l'application de la méthode hydrogéomorphologique, dans la mesure où les différents éléments pris en compte par l'analyse se retrouvent dans chaque sous-bassin. Il est par contre important de réinterpréter les parties de plaine alluviale situées immédiatement à l'amont des seuils rocheux ou des gorges. En effet, en s'opposant à l'évacuation des crues, ces obstacles déterminent une surélévation des eaux à l'amont (le "remous" hydraulique), qui ne laisse aucune trace géomorphologique sur le terrain, du fait de l'absence de courant rapide dans ce secteur.

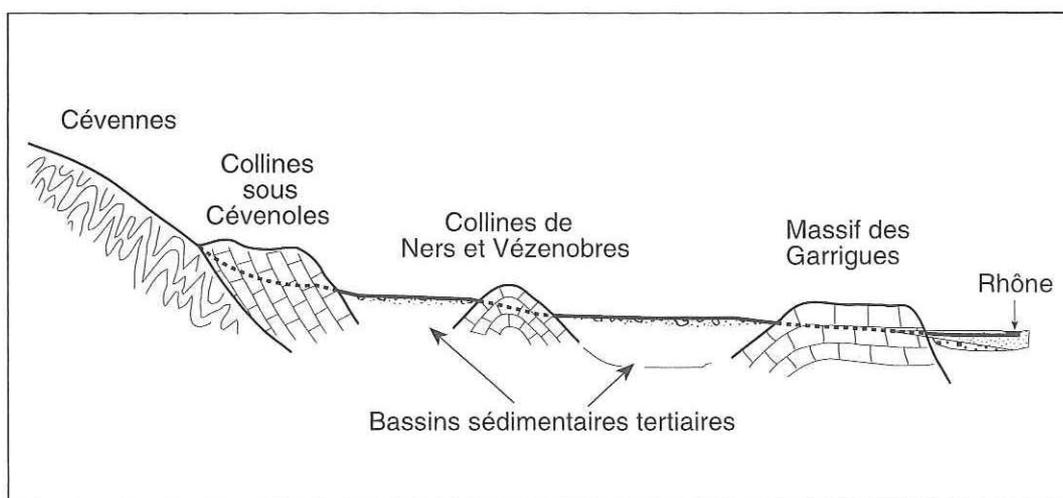


Figure 27 :
Profil longitudinal
schématisé
de la vallée des
Gardons (Gard)

Les modifications apportées par l'homme

L'analyse hydrogéomorphologique s'intéresse en premier lieu à l'espace alluvial non perturbé par les activités humaines, qui constitue en quelque sorte un cadre de référence, explicitant le fonctionnement du cours d'eau. Elle demeure cependant riche d'enseignements, même lorsque des transformations d'origine anthropique ont profondément bouleversé le milieu naturel. Ces transformations, dont l'incidence sur les écoulements peut varier dans de fortes proportions, soit dans le sens de l'accélération, soit au contraire

dans celui du freinage et de la rétention, sont de nature très diverse. Elles ont été particulièrement importantes ces dernières décennies, en raison de l'ampleur des moyens techniques et financiers dont elles ont bénéficié. Sans entrer dans les détails, nous en rappellerons ici quelques exemples en fonction des principaux domaines d'activité.

Les travaux et ouvrages hydrauliques

Modifiant les écoulements, ils peuvent être classés en deux grandes catégories suivant les objectifs qui leur sont assignés :

- Les plus répandus ont pour but de **limiter l'étendue des terrains exposés aux inondations** en accélérant les écoulements, ce qui permet de réduire la section, donc l'emprise des crues au sol, ou en élevant des obstacles entre la zone à protéger et la zone d'écoulement.

D'une manière générale, ces moyens d'action tendent tous à ramener les eaux de crue dans le seul lit mineur, plus ou moins agrandi selon la nature et l'importance de ces moyens. Ainsi peut-on disposer d'un large éventail de solutions techniques, des plus simples aux plus évoluées : de l'entretien et du curage au cuvelage et à la couverture, en passant par les recalibrages et les endiguements (photo n° 11).

Photo n° 11 :
Travaux de recalibrage après les crues de juin 1994. Vallée de la Frayère (Alpes Maritimes)

Ces travaux et ouvrages, qui peuvent être efficaces pour la protection de biens vulnérables localisés, posent de nombreux problèmes lorsqu'ils sont généralisés à de grandes longueurs de cours d'eau. Ils conduisent en effet à supprimer le rôle du lit majeur, voire du lit moyen, qui auparavant constituaient de vastes étendues propices à l'écrêtement des crues. Ils se traduisent par un accroissement de l'amplitude et de la fréquence des crues à l'aval. De plus, la conjugaison de vitesses d'écoulement rapides et de berges à pente trop raide provoque des érosions de grande ampleur (photo n° 12), nécessitant le recours à des

ouvrages de défense, eux-mêmes très pénalisants pour le milieu alluvial. Il est donc important de prendre en compte ces aménagements dans les études en tant que facteurs modificatifs du fonctionnement hydraulique du cours d'eau.

- La deuxième catégorie d'ouvrages et travaux est destinée au contraire à **régulariser le régime hydrologique** par freinage des écoulements, augmentation des capacités de rétention ou de l'infiltration dans les sols. Elle est de plus en plus souvent mise à contribution, en particulier





Photo n° 12 :
Les érosions de
berges attaquent
de préférence des
tronçons dégarnis
de leur végétation
Rivière Auzon
(Vaucluse)
janvier 1994.

sous forme de bassins de rétention, voire de barrages écrêteurs de crue, ainsi que par le développement d'autres techniques alternatives au ruissellement pluvial urbain (tranchées drainantes, chaussées poreuses, etc.). Ces moyens concourent à une meilleure utilisation des potentialités du bassin versant, que l'approche hydrogéomorphologique peut contribuer à promouvoir.

L'agriculture

Les activités agricoles participent à la modification du régime des cours d'eau, à différents niveaux :

- **L'évolution des emprises agricoles.** Il est probable que la déprise amorcée depuis le début du siècle et amplifiée ces cinquante dernières années constitue, du fait de la reforestation spontanée, un facteur favorable à la réduction du ruissellement et à l'atténuation des crues. On peut donc considérer que nos vallées sont globalement moins exposées aux très grandes crues, qu'au siècle passé. Cette remarque doit cependant être tempérée, pour tenir compte de l'accroissement du ruissellement, consécutif à la saturation des sols soumis à des pluies prolongées, ainsi que de l'amplification des crues et de l'augmentation de leur fréquence dues aux travaux de recalibrages et aux endiguements généralisés. Nous ne disposons pas aujourd'hui d'études globales nous permettant de connaître la résultante de ces tendances contradictoires.

- **Les drainages agricoles**, affectant de nombreuses zones humides ou simplement exposées aux crues, peuvent, de la même manière que les recalibrages, concourir à accroître les amplitudes des crues.

- **Les curages, recalibrages et endiguements** réalisés à des fins agricoles (photo n° 13) ont touché dans le passé un linéaire très important de cours d'eau ; bien que moins spectaculaires que des travaux récents, ils ont également de fortes répercussions sur la formation des crues du fait de leur généralisation.

Photo n° 13 :
Les sous affluents
eux-mêmes ont
été fréquemment
recalibrés et endi-
gués, supprimant
le rôle écrêteur de
cruce de leur lit
majeur (affluent
de l'Eze -
Vaucluse)



• **Les modifications des structures et des pratiques agricoles**, qui portent notamment sur le parcellaire (élimination des haies et des murets, remembrements), sur le choix des cultures (cultures de plein champ ou vignes à la place de prairies ou de friches), ou sur le désherbage des vignes, augmentent systématiquement le coefficient de ruissellement, ainsi que l'érosion des sols (photo n° 14).

La recherche de nouveaux sols alluviaux, conduit à défricher les forêts riveraines du bord des eaux, et fragilise les berges qui ne sont plus protégées par les systèmes racinaires des arbres. Dans les vallons secs des régions méditerranéennes, le défrichage ne laisse souvent subsister qu'une mince bande végétale sur le lit mineur. Encombré, celui-ci ne fonctionne plus en période de crue, et tout le flot s'écoule à forte vitesse sur le lit majeur à nu, qu'il érode en sillons parallèles (photo n° 15).

Photo n° 14 :
Ruissellements
dans un vignoble -
Pertuis (Vaucluse)



L'urbanisation

Elle donne lieu à un accroissement systématique de l'imperméabilisation des sols et, par la pratique des réseaux d'assainissement, à l'accélération des écoulements. Ce phénomène bien connu a suscité l'emploi de techniques alternatives au ruissellement pluvial, encore assez peu mises en pratique.

L'impact de l'urbanisation est fonction du rapport existant, dans chaque bassin versant, entre les

superficies urbanisées, naturelles ou agricoles. Il peut être très important pour des petits bassins versants en grande partie construits.

Caractérisation
hydrogéomorphologique
des zones inondables



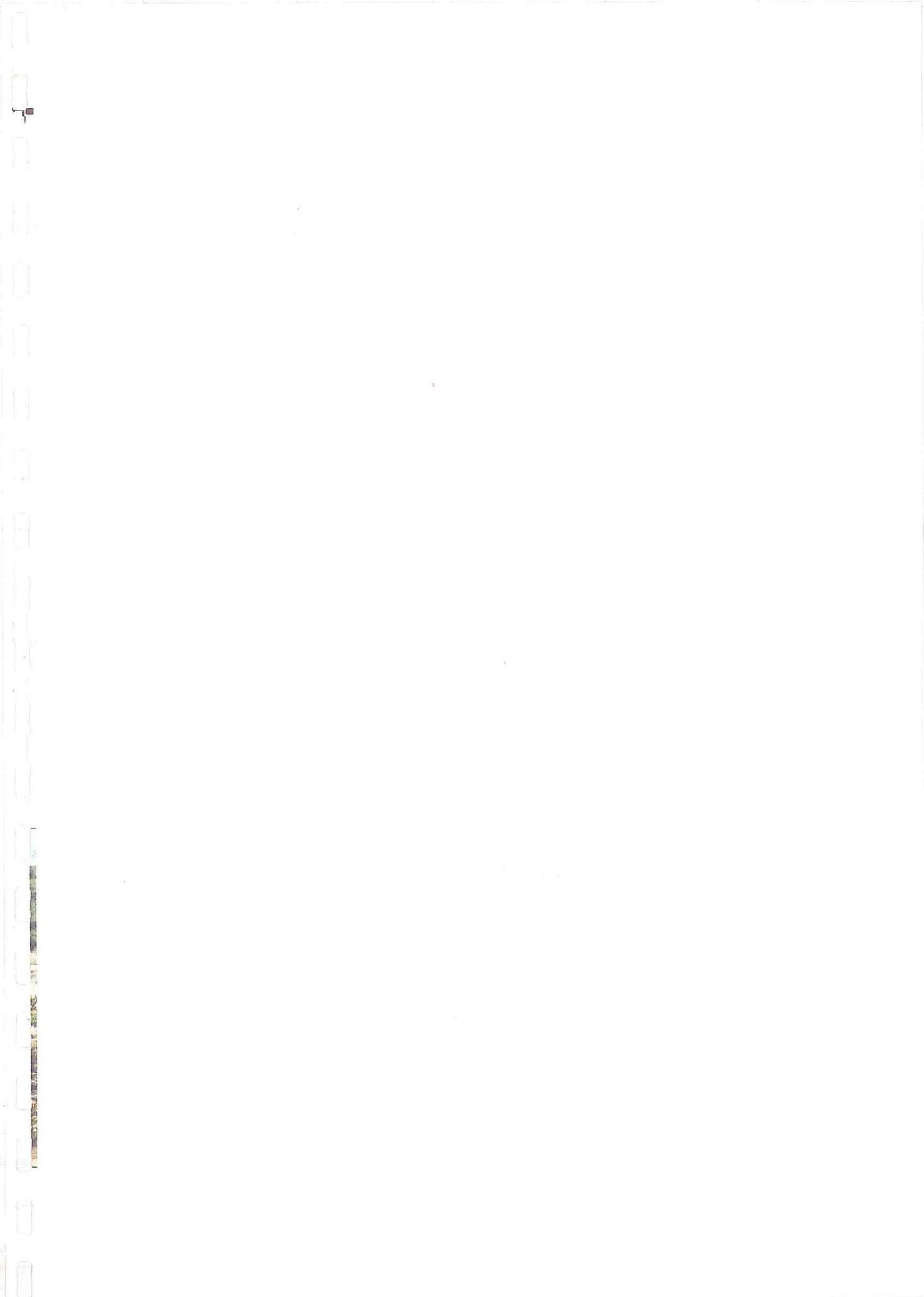
Lit mineur
végétalisé
Bourrelet
de berge

Lit majeur
érodé par
la crue

Photo n° 15 :
Inondations à Aix-
en-Provence -
Septembre 1993.
Le lit mineur, endi-
gué et encombré
de végétation, a
été contourné par
la crue, qui a forte-
ment érodé le lit
majeur du vallon
sec, labouré peu
de temps aupara-
vant.

Conclusion

Il s'avère nécessaire, lors d'une analyse hydrogéomorphologique, de bien différencier les informations liées au fonctionnement "naturel" du milieu alluvial, de celles qui découlent des actions anthropiques, et qui peuvent modifier, dans des proportions très variables selon les cas, le comportement du cours d'eau en crue.



MISE EN ŒUVRE DE LA MÉTHODE HYDROGÉOMORPHOLOGIQUE

<i>Présentation de la méthode</i>	58
<i>Moyens techniques d'acquisition des données</i>	
Les cartes	
Les levés topographiques	
L'imagerie satellitaire	
Les photographies aériennes	
Les archives	
Les observations de terrain	
<i>Les différents niveaux d'approche</i>	63
Bassins versants	
Plaine alluviale moderne	
<i>Conditions pratiques de mise en œuvre</i>	73
<i>Articulation de l'approche hydrogéomorphologique aux études de risques d'inondation</i>	74
<i>Principales applications</i>	76
<i>Application à la planification</i>	
<i>Application à l'aménagement des cours d'eau</i>	78
<i>Application à la gestion des eaux à l'échelle des bassins versants</i>	83
<i>Fiches de cas</i>	84
Saint Cyprien	
Mazan	
Pertuis, La Tour d'Aygues, Grambois	
Vaison la Romaine	

Présentation de la méthode

Après avoir rappelé les fondements de l'hydrogéomorphologie et décrit les milieux alluviaux concernés, le moment est venu de préciser les modalités pratiques de mise en œuvre de la méthode hydrogéomorphologique et de montrer quelques exemples significatifs d'application.

La méthode que nous proposons repose sur l'utilisation de plusieurs types d'informations et de différentes techniques de traitement de données. Elle peut s'effectuer à diverses échelles, par sélection et interprétation des informations les plus adaptées, et s'inscrit ainsi dans le cadre d'études plus globales relevant de l'aménagement du territoire ou de stratégies de gestion des eaux pluviales.

Moyens techniques d'acquisition des données

Un des principaux intérêts de l'approche hydrogéomorphologique réside dans la modestie des moyens techniques auxquels elle fait appel (cartes - levés topographiques - imagerie satellitaire - photographies aériennes), dans la rapidité avec laquelle peut être effectué le diagnostic, et par conséquent dans la modicité des coûts d'étude. Parmi ces moyens, la photo-interprétation tient une grande place, en raison de la multiplicité des informations qu'elle apporte et de son exceptionnelle efficacité par rapport à l'investissement très limité en temps qu'elle demande.

Les cartes

En premier lieu, les cartes topographiques sont nécessaires à la localisation des informations. De ce point de vue, le document le plus adapté à l'heure actuelle est la carte I.G.N. (Institut Géographique National) au 1:25 000, qui existe sur tout le territoire national. Il est cependant conseillé de travailler sur des agrandissements au 1:10 000 pour obtenir un confort de lecture et une meilleure précision des reports géomorphologiques.

Outre ce rôle de support et de repérage géographique, ces cartes, très documentées, peuvent fournir des informations spécifiques utiles à la cartographie des zones inondables. Elles renseignent par exemple sur la présence de talus, sur la toponymie (ex : lieux dits "les Paluds") et sur l'occupation des sols. Les points cotés et les courbes de niveau sont également exploitables, sous réserve de tenir compte de leur imprécision relative en altimétrie (de l'ordre de 1 mètre pour les premiers, et de 3 mètres pour les secondes).

Dans certains cas, il est possible d'affiner l'analyse en recourant à des cartes ou à des plans topographiques à plus grande échelle (1:10 000 ; 1:5 000; voire 1:2 000 en milieu urbain) pour améliorer la précision altimétrique et en intégrant les données issues des nivellements de repères de crues.

Enfin, il est souvent profitable de consulter les cartes anciennes, y compris celles de Cassini qui sont toujours éditées par l'IGN. Elles témoignent en particulier de la dynamique de la plaine alluviale et de l'évolution dans le temps des tracés de lit mineur.

Certaines cartes à vocation scientifique contiennent aussi des données précieuses pour l'interprétation hydrogéomorphologique (Garry - Le Moigne - 1991). Il s'agit notamment :

- des cartes géologiques au 1:50 000 ou au 1:80 000 qui couvrent l'ensemble du territoire national. Elles fournissent des informations sur la constitution géologique des bassins versants, conditionnant en particulier la perméabilité du substratum, et parfois, sur l'organisation de la plaine alluviale (différenciation entre plaine alluviale moderne et terrasses anciennes par exemple).

- des cartes géomorphologiques au 1:50.000 qui n'ont donné lieu qu'à la production d'une vingtaine de feuilles, entre 1971 et 1990. Elles favorisent la compréhension de la plaine alluviale moderne, mais leur exploitation est relativement complexe. Leur échelle est trop petite par rapport aux besoins de la cartographie des zones inondables.

- d'autres types de documents, comme les cartes pédologiques ou de la végétation, peuvent, dans certains cas, apporter des données complémentaires, à condition de bien en connaître les clés d'interprétation.

Les levés topographiques

Nous avons vu que la morphologie de la plaine alluviale moderne constitue un facteur déterminant de l'analyse hydrogéomorphologique. La traduction de cette morphologie en termes topographiques permet ensuite de passer à une exploitation quantitative des données hydrologiques.

Les cartes topographiques au 1:25 000, qui constituent normalement une première référence de mesures, ont une précision altimétrique trop faible en plaines alluviales. Aussi est-il nécessaire de recourir à des levés complémentaires, réalisés soit sur le terrain, par profils sélectionnés, soit par photorestitution. Cette dernière méthode, qui est plus onéreuse pour un nombre de points limité, offre la possibilité de couvrir de manière homogène, toute la superficie de la plaine alluviale. Il est souhaitable, pour optimiser cette phase d'étude, d'identifier et de lever spécifiquement tous les points significatifs de la morphologie (arêtes supérieure et inférieure d'un talus) mis en évidence par la carte hydrogéomorphologique.

L'imagerie satellitaire

L'imagerie satellitaire est un produit numérisé de la télédétection, susceptible de donner lieu à une cartographie au 1:25 000 pour les résolutions les plus

finer. Elles sont aujourd'hui compatibles avec certaines préoccupations d'aménagement, selon le niveau de précision recherché.

Si ces images, obtenues par différents satellites d'observation de la terre (SPOT, ERS, LANDSAT), présentent certains avantages (répétitivité, multiplicité des canaux, faiblesse des déformations d'image, traitement numérique) et si les derniers satellites fournissent des données à résolution améliorée (pixel de 20 mètres en multispectral, et de 10 mètres en panchromatique pour SPOT...), l'utilisation de ces images n'apparaît pas vraiment adaptée au problème posé. En particulier, la difficulté d'obtention du recouvrement stéréoscopique, plus encore que l'échelle des images, rend celles-ci beaucoup moins intéressantes que les photographies aériennes, sauf dans les Pays En Développement (PED) où ces dernières n'existent pas. Cette situation peut évoluer positivement dans l'avenir, avec la mise en orbite en 2002 du satellite SPOT V dont le pixel sera de 5 mètres et qui enregistrera des images à recouvrement stéréoscopique avant - arrière.

Les photographies aériennes

Les photographies aériennes constituent un autre outil de la télédétection, plus ancien et plus répandu, qui répond mieux aux besoins de la cartographie hydrogéomorphologique. On trouvera une présentation plus complète des types de photographies et de leurs usages dans l'ouvrage de G. Garry - J.M. Gouffan et M. Le Moigne (1993).

• Principales caractéristiques des photographies aériennes

Les photographies aériennes se différencient en fonction de l'axe de prise de vue (oblique ou vertical), de l'échelle et de l'émulsion (panchromatique ou infra-rouge). Elles peuvent être exploitées soit par photo-identification d'objets directement visibles sur les photographies aériennes, soit par photo-interprétation de photographies aériennes verticales, dont le grand intérêt réside dans l'utilisation de l'effet stéréoscopique.

Les photographies aériennes verticales sont prises à partir d'un avion équipé d'une trappe, à altitude constante, suivant un axe de vol déterminé, avec un recouvrement de 60 % entre deux photographies successives. Les prises de vues sont organisées en bandes parallèles comportant également un recouvrement latéral de 20 %.

La vision stéréoscopique réside dans la restitution de la sensation de relief que l'on peut obtenir par l'observation simultanée, sur deux photographies successives, de la même portion de terrain. Cette sensation peut être amplifiée par l'hyperstéréoscopie résultant de l'utilisation d'appareils à grossissement ou par l'amplification de la distance séparant les deux points de prise de vue par rapport à la distance interpupillaire. C'est à partir de l'interprétation stéréoscopique que s'effectuent les opérations de photo-restitution, bases de l'établissement des cartes topographiques.

La cartographie des champs d'inondation ne requiert pas la prise en compte de l'altimétrie. Basée sur l'interprétation qualitative relative des variations morphologiques de la plaine alluviale, elle peut être réalisée avec des appareils simples, les stéréoscopes, qui se partagent en deux grandes catégories :

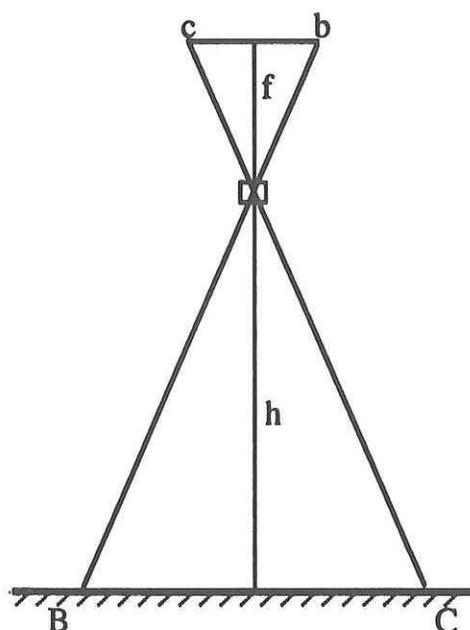
- les lunettes stéréoscopiques, appareils très rustiques pouvant être aisément emportés sur le terrain ;

- les stéréoscopes à miroirs, plus fragiles mais plus performants, comportant ou non des dispositifs grossissants.

L'échelle est déterminée par le rapport entre la focale de l'appareil photographique et l'altitude de prise de vue (figure 28). Cette échelle, moyenne pour une mission aérienne donnée, subit des variations de détail liées aux irrégularités de la surface du terrain. Ces variations sont négligeables dans une plaine alluviale où les dénivelés sont très faibles.

Les photographies aériennes comportent en marge une série de renseignements relatifs à l'identification de la mission, la date et l'heure de prises de vues, l'échelle, et le numéro de la photo.

Outre l'échelle, les missions aériennes diffèrent par **leurs émulsions** photographiques. La plus courante et la moins chère est le panchromatique noir et blanc. La couleur est fréquemment utilisée pour les missions à grande échelle. L'infrarouge, noir et blanc ou couleurs, est moins répandu. Toutes ces émulsions conviennent à la photo-interprétation hydrogéomorphologique.



$$\frac{cb}{BC} = \frac{f}{h} = \frac{1}{E} \text{ ou } E = \frac{h}{f}$$

f = focale
h = hauteur de vol
au-dessus du sol

Figure 28 :
Schéma de principe
du calcul
de l'échelle

• Choix des photographies aériennes

L'échelle et la date de prises de vues sont deux critères déterminants pour le choix de la mission qui servira à la photo-interprétation. On sélectionnera donc en priorité, parmi l'ensemble des missions existantes, celles dont l'échelle est la plus grande, afin d'obtenir la meilleure précision possible, et qui sont récentes, afin d'actualiser l'occupation des sols et particulièrement les transformations d'origine anthropique.

En ce qui concerne l'échelle, l'optimum semble correspondre au 1:10 000. Il n'est pas indispensable, dans les applications courantes, de recourir à des échelles plus grandes (1:8 000 ou 1:5 000). Celles-ci tendent en effet à écraser le relief lors de l'interprétation stéréoscopique et à amoindrir la perception globale de la structure du site. A l'inverse, il n'est pas souhaitable d'utiliser des missions dont l'échelle est inférieure au 1:20 000. Le 1:30 000 constitue une limite extrême qui requiert une grande expérience de la part de l'interpréteur.

Il est généralement possible, pour un même site, de se procurer plusieurs missions espacées de 5 à 10 ans, permettant de remonter dans le temps jusqu'aux années 1950, voire 1940, et par conséquent d'effectuer des comparaisons diachroniques*.

Cependant, compte tenu des enjeux très importants liés au diagnostic des aléas d'inondation, il apparaît de plus en plus souhaitable, au plan économique, d'optimiser l'analyse hydrogéomorphologique, en programmant une mission photographique aérienne spécifique dès le démarrage de l'étude. Il est possible ainsi de choisir à la fois l'échelle, l'émulsion et le cadrage des bandes de prise de vue. Cette mission pourra ensuite éventuellement servir à une restitution photogrammétrique si une modélisation hydraulique est envisagée, et à la constitution d'un fond de plan topographique de référence.

Indépendamment de ces photographies qui sont enregistrées en période hydrologique normale, de nombreuses missions ont été effectuées dans les vallées au moment d'une crue historique. Ces prises de vues se prêtent à l'établissement d'une cartographie des zones inondées qui complète avantageusement l'interprétation hydrogéomorphologique (G. Garry-1985).

• Les sources documentaires

Le plus important fournisseur de photographies aériennes en France est l'I.G.N. (Institut Géographique National), qui enregistre régulièrement l'ensemble du territoire national au 1:30 000. Il réalise en outre des missions à la commande, en particulier au 1:20 000, au 1:17 500 (photographies en Infra Rouge Couleurs pour l'Inventaire Forestier National) et au 1:60 000.

De nombreuses autres missions sont assurées par des entreprises de travaux aériens sur des parties plus ou moins importantes du territoire, à des échelles souvent supérieures, 1:10 000 par exemple.

L'inventaire de ces couvertures aériennes est consultable à la Photothèque de Saint-Mandé, gérée par l'I.G.N., ainsi que dans les antennes commerciales régionales de l'I.G.N. Les Comités Départementaux de l'Information Géographique (C.D.I.G.), animés par les Services du Cadastre, recensent et diffusent l'information relative aux plans et aux missions photographiques aériennes à grande échelle.

• L'interprétation des photographies aériennes

Elle permet de visualiser le relief, et en particulier, dans le cas qui nous intéresse, de distinguer deux unités géomorphologiques d'altitude très légèrement différente, séparées par un talus, même de faible hauteur (quelques décimètres).

Si l'interprétation de la microtopographie constitue une base essentielle de la cartographie hydrogéomorphologique, celle-ci ne peut atteindre sa pleine efficacité que par le recours simultané aux observations relatives aux autres paramètres présentés au chapitre III. Il s'agit alors d'une interprétation complète, facilitant le recoupement d'informations souvent fragmentaires.

Cette interprétation, tout à fait comparable à celle qui pourrait résulter d'une observation directe du terrain, est cependant nettement plus efficace que celle-ci. En effet, la vision stéréoscopique, embrassant une superficie importante (de quelques hectares à quelques kilomètres carrés à la fois), facilite la mise en relation d'indices appartenant à un même paramètre, mais souvent partiellement effacés (ex : talus traversé par des parcelles cultivées).

Par ailleurs, il est possible de déterminer la cote relative de points sélectionnés sur la photographie, au moyen d'une barre de parallaxe.

Il faut noter que si la vision stéréoscopique s'acquiert relativement rapidement, l'interprétation globale des photographies aériennes nécessite un apprentissage spécifique appuyé sur l'acquisition des bases géomorphologiques correspondantes.

Les archives

Déjà partiellement exploitées dans le cadre des études hydrologiques et hydrauliques, les archives sont susceptibles de fournir des informations précieuses sur les crues enregistrées dans le passé.

Les données quantitatives relatives aux précipitations et aux débits font l'objet d'archivages systématiques et de traitements statistiques par les organismes compétents (Météorologie Nationale - EDF - DIREN - Agences de l'Eau - DDE - DDAF). Elles sont, au moins partiellement, disponibles en banques de données, et comportent dans certains cas les relevés altimétriques des plus hautes eaux observées lors de crues historiques. Ces informations, qui constituent la base de l'analyse statistique prévisionnelle de la fréquence des crues, ne remontent généralement, hormis pour les grands cours d'eau, qu'à quelques dizaines d'années, et manquent souvent de précision.

Des données complémentaires peuvent être obtenues par l'analyse des archives départementales et communales, qui ont parfois conservé la mémoire d'événements hydrologiques marquants, vieux de plusieurs siècles. La recherche documentaire concerne également les travaux et ouvrages hydrauliques, dont la connaissance permet de reconstituer l'historique de l'aménagement du cours d'eau.

Les observations de terrain

Elles sont indispensables pour vérifier les données résultant de la photo-interprétation, pour lever les incertitudes dans les cas difficiles et pour étudier des éléments non apparents sur les photographies, tels que des limites ou des travaux anciens masqués par une végétation dense. Ce recours au terrain s'impose en particulier pour étalonner les informations relatives à une configuration régionale nouvelle pour l'observateur. Certaines d'entre elles, comme la nature des sols alluviaux, ne sont accessibles que par ce moyen.

Les différents niveaux d'approche

La méthode que nous préconisons permet d'effectuer un diagnostic de l'aléa inondation dans sa dimension spatiale, au niveau du bassin versant et de la plaine alluviale moderne.

Bassin versant

Outre la délimitation du bassin et de ses sous-bassins facilitée par la photo-interprétation, l'approche hydrogéomorphologique intègre divers éléments utiles à l'étude hydrologique, et facilite leur analyse rationnelle. Elle porte en particulier sur les aspects suivants :

- La nature lithologique des constituants physiques du bassin versant, appartenant soit au substratum (roches au sens géologique) soit aux formations superficielles (colluvions - éluvions* - alluvions). Cette étude permet d'évaluer, même grossièrement, les capacités d'infiltration, en tenant compte d'autres paramètres tels que la pente, et d'établir des hypothèses de fonctionnement du cours d'eau pour diverses situations pluviométriques.

Le cas de Mazan (p. 86) illustre l'intérêt de cette démarche, qui, en l'occurrence, a permis de comprendre la contradiction observée entre un lit mineur sous dimensionné et un lit majeur de grande ampleur.

- L'occupation des sols, conditionnant le ruissellement, en fonction notamment de l'importance relative du recouvrement végétal permanent ou saisonnier (cultures).

- La délimitation de portions homogènes du bassin versant différenciées par niveau de réponse à des épisodes pluvieux, et leur régime d'écoulement.

Il est par ailleurs possible d'établir une comparaison diachronique de l'évolution du milieu en exploitant des photographies aériennes anciennes, par exemple pour suivre les changements de tracé du lit mineur ou de l'occupation du sol (déprise agricole au bénéfice de la forêt, urbanisation de zones naturelles, etc.).

Plusieurs expérimentations, qui mériteraient d'être développées, ont montré l'intérêt de ces différentes approches pour évaluer, par exemple, la répartition entre ruissellement et infiltration en fonction de diverses situations pluviométriques.

Plaine alluviale moderne

C'est sans doute à cette échelle que la méthode hydrogéomorphologique fournit les résultats les plus intéressants et les plus novateurs par rapport aux méthodes classiques. Son expérimentation, menée sur une vingtaine de sites alluviaux, confirme son efficacité, à condition toutefois qu'elle soit appliquée avec rigueur, par du personnel formé et expérimenté.

• Elaboration de la cartographie hydrogéomorphologique

Elle a pour objectif d'identifier et de spatialiser les divers types d'informations correspondant aux critères présentés au chapitre II. Ce travail s'effectue avec les moyens décrits précédemment, en couvrant une étendue de plaine alluviale suffisamment importante, par exemple un tronçon homogène de vallée, pour que la compréhension d'ensemble du système alluvial soit la meilleure possible.

En pratique, il s'avère nécessaire, avant d'effectuer l'interprétation des phénomènes mis en évidence, de pondérer les informations relatives au fonctionnement hydrogéomorphologique "naturel" du cours d'eau par celles qui relèvent de modifications d'origine anthropique affectant les conditions d'écoulement. La distinction n'est pas toujours évidente, certains éléments topographiques dus à l'homme pouvant apparaître comme naturels en première analyse (ex : remblai occupant la totalité d'un méandre de lit majeur), ou échapper à l'observation (ex. : épis en enrochements ayant provoqué un atterrissement, masqués par la végétation). En cas de doute, le recours à des photographies aériennes antérieures aux aménagements apporte en général une réponse satisfaisante, hormis pour les ouvrages très anciens, dont les effets sont le plus souvent limités, et qui s'intègrent en quelque sorte dans le fonctionnement hydrogéomorphologique naturel du milieu.

Le recueil des données porte sur les deux catégories d'informations complémentaires suivantes :

- La géomorphologie (ou hydrogéomorphologie) du milieu "naturel" stricto-sensu, qui décrit et positionne dans l'espace :
 - les unités hydrogéomorphologiques,
 - les limites séparant ces unités (talus, avec leurs hauteurs et déclivités),

- les manifestations de l'hydrodynamique : zones d'érosion et de sédimentation, affleurements rocheux dus à l'érosion verticale, axes d'écoulements préférentiels en lit majeur.

Il est important d'établir la différence entre les informations sûres, indiscutables, et les indices non vérifiés, qui pourront être précisés ultérieurement. Tel est le cas par exemple de talus effacés par les labours, ou d'une limite externe de lit majeur en pente douce, dont le calage pourra être amélioré par un levé topographique précis.

• Les modifications apportées par l'homme, qui comprennent :

- l'occupation (ou utilisation) des sols

En première analyse, il s'agit de délimiter les grandes zones naturelles, agricoles et d'urbanisation, qui occupent la plaine alluviale moderne. Cette connaissance présente un intérêt à la fois au plan hydrologique (détermination des axes d'écoulement préférentiel des crues et du freinage exercé sur les courants), et au plan de l'étude de la vulnérabilité.

Au-delà, il est possible d'entrer dans le détail de ces différentes zones, en caractérisant par exemple, la physionomie * de la végétation et son état, les diverses spéculations agricoles et les types d'habitats. En pratique, le degré de finesse recherché dépendra de l'objectif de l'étude (niveau diagnostique ou niveau aménagement) et de l'échelle adoptée.

- Les travaux et ouvrages qui modifient les écoulements, tels que les remblais, digues, recalibrages, seuils, épis, voire les protections de berges. Leur cartographie sera d'autant plus précise que l'on disposera de photographies aériennes à plus grande échelle. Il est même souvent possible de mettre en évidence les ouvrages hydrauliques traversant des remblais routiers, et parfois d'en évaluer les dimensions. Le report de ces éléments sur carte fournira une première appréciation de leurs effets sur les écoulements (protection relative, perte de capacité de laminage). Ces informations, essentiellement qualitatives, nuancent les données hydrogéomorphologiques. Elles pourront aussi être vérifiées et analysées de manière détaillée par des observations de terrain et des levés topographiques, permettant de les quantifier.

La restitution cartographique peut être réalisée de plusieurs façons :

• En dissociant les informations au moyen de deux cartes distinctes comme dans le cas des Plans d'Exposition aux Risques (PER) du Gardon d'Anduze (Gard) (figure 29) :

- la carte géomorphologique au 1:10 000 regroupe, d'une part, les données relatives à l'hydrogéomorphologie "naturelle", et d'autre part, celles qui concernent les travaux et ouvrages ayant une incidence sur le fonctionnement hydrologique (figure 29 a) ;

- la carte de l'occupation des sols identifie la physionomie des zones naturelles (strates haute, moyenne et basse), les principales spéculations agricoles, les habitations isolées et les activités humaines repérables spatialement (figure 29 b).

* Dans ce cas, le niveau de précision élevé obtenu par la photo-interprétation résulte en partie de la réalisation d'une mission photographique aérienne spécifique, en couleurs, à l'échelle du 1:10 000.

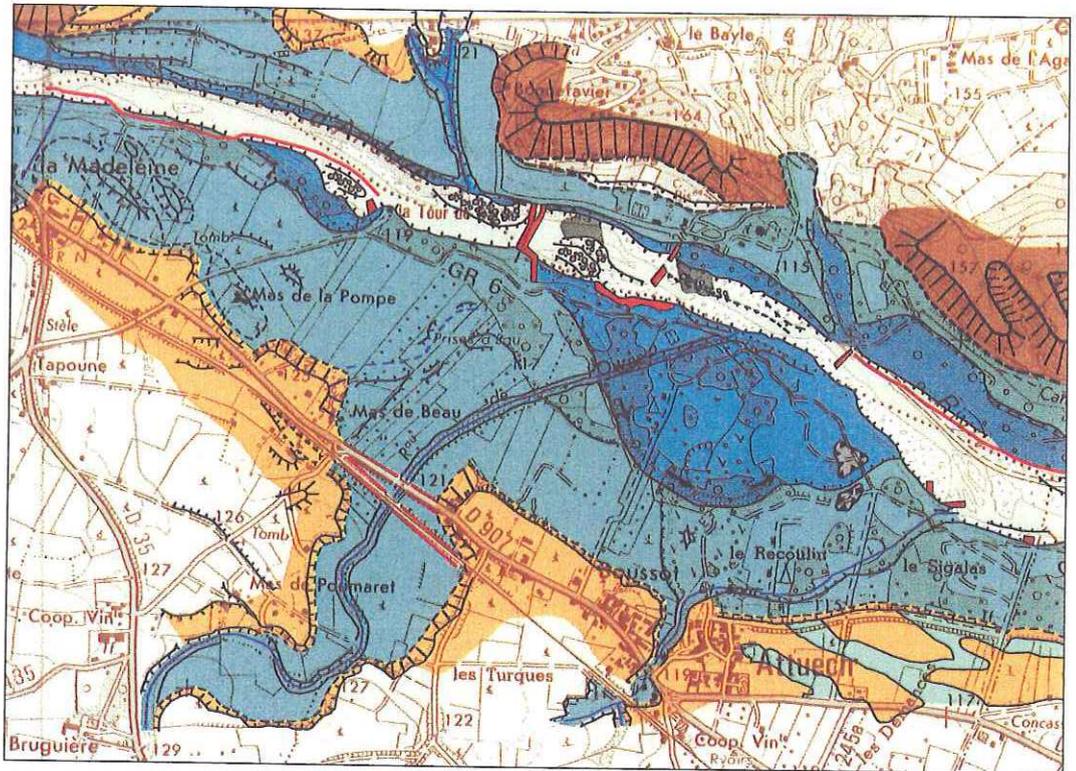
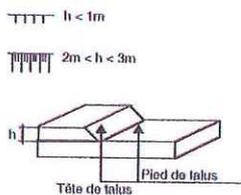
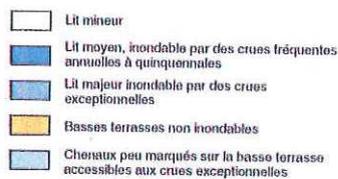


Figure 29 a :
Carte géomorphologique
du Gardon d'Anduze
(extrait)

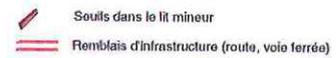
Talus d'érosion



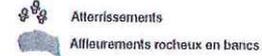
Champs d'inondation



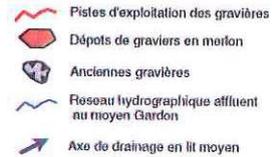
Travaux à incidence hydraulique



Lit mineur



Divers



- En regroupant l'ensemble des informations sur une seule carte, si on utilise des procédés cartographiques informatisés, et en les sélectionnant en fonction des besoins. Nous ne disposons pas pour le moment d'exemple de ce type.

- La solution théoriquement la plus satisfaisante consisterait à élaborer, pour un même site, une première carte réservée exclusivement aux informations relatives au milieu naturel, et une seconde rassemblant tous les éléments liés à l'occupation des sols, y compris les travaux et ouvrages à finalité hydraulique. Une carte hydrogéomorphologique synthétique permettrait alors de choisir et de hiérarchiser les facteurs présentant un réel intérêt dans l'optique des études de risques d'inondation.

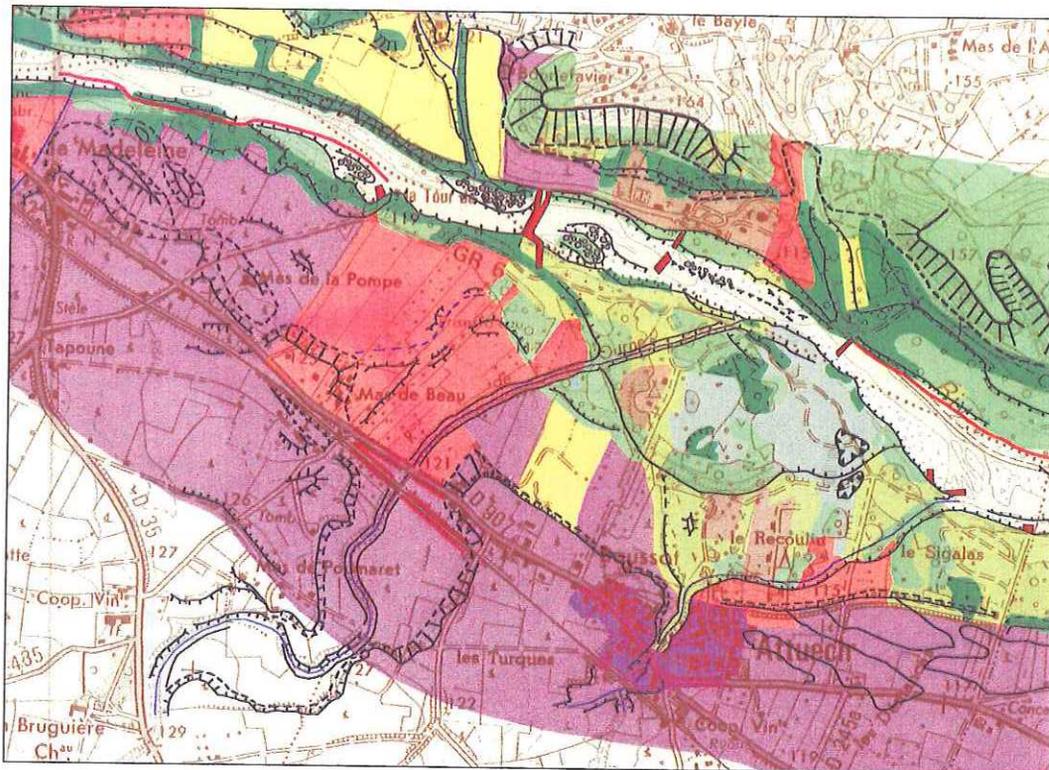


Figure 29 b :
Carte d'occupation
des sols du Gardon
d'Anduze (extrait).

Zones naturelles

- Strate haute
- Strate moyenne (taillis) ou strate haute clairsemée
- Strate basse, herbacée à arbustive ou végétation dégradée

Zones agricoles

- Cultures de plein champs dominantes
- Cultures mixtes
- Vignes dominantes

Constructions

- Habitat groupé non soumis au risque d'inondation
- Camping
- Zone d'extraction ancienne
- Emprise d'usine de concassage criblage et dépôts

Limitée à l'origine aux plaines alluviales des grands et moyens cours d'eau, la cartographie hydrogéomorphologique a été appliquée récemment aux vallons secondaires, à morphologie moins marquée, affectés eux aussi par des crues violentes lors de phénomènes pluvieux exceptionnels. Tel a été le cas en 1993 de la commune d'Aix-en-Provence (figure 30). D'autres applications semblables sont en cours d'étude, notamment dans le bassin de l'Eze (Vaucluse).

Cette cartographie de petits vallons ou de talwegs présente un grand intérêt en zones périurbaines, où les extensions négligent le plus souvent de prendre en compte les axes d'écoulement naturel, considérés comme mineurs, et parfois peu discernables dans la topographie.

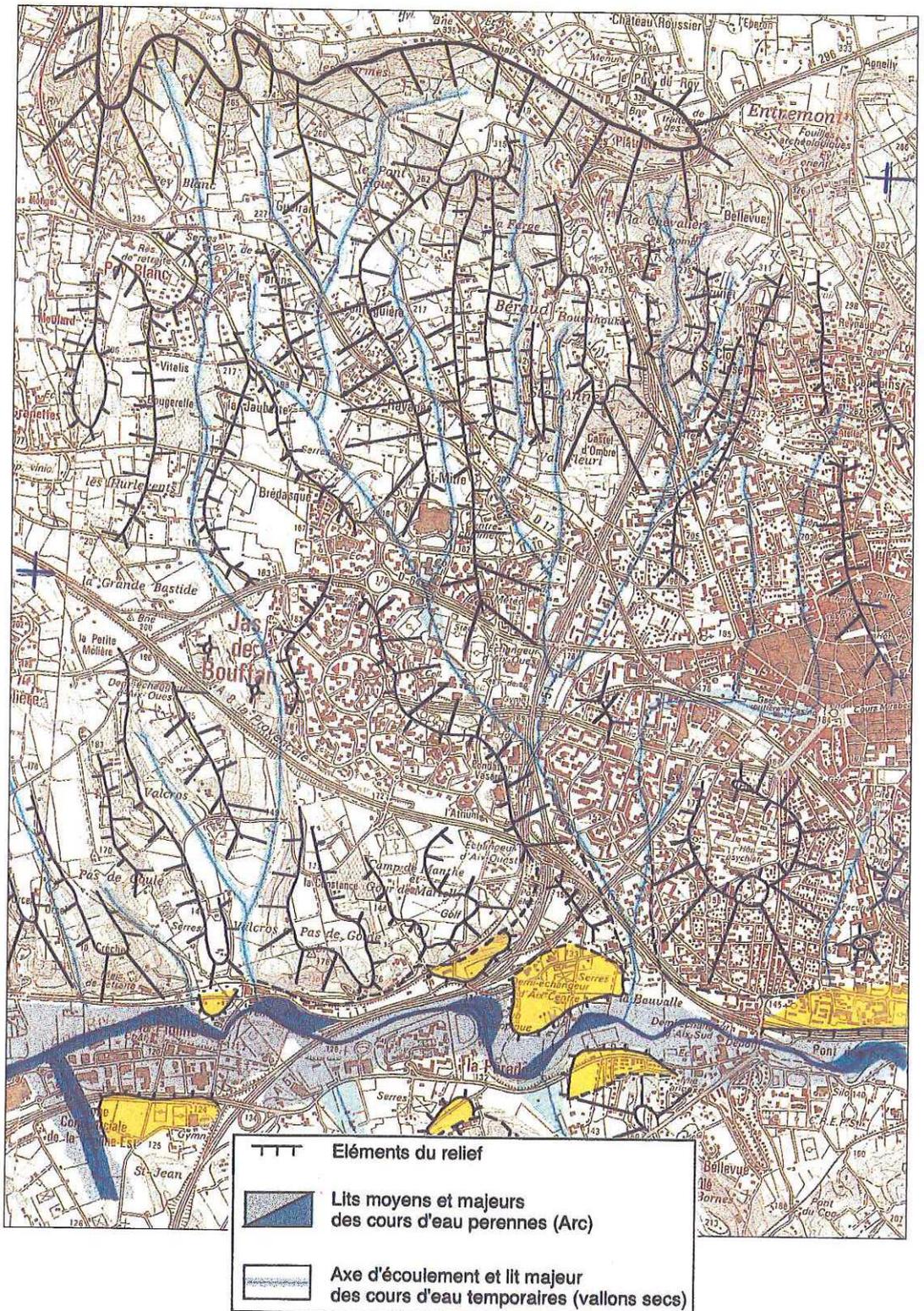
• **Interprétation de la cartographie hydrogéomorphologique**

Compte tenu des correspondances établies précédemment entre unités hydrogéomorphologiques et fonctionnement hydrologique de la plaine alluviale moderne, il est possible, à partir d'un exemple tel que celui du Gardon d'Anduze, d'interpréter les données de la carte afin d'en tirer des enseignements opérationnels au niveau de l'aménagement et surtout de la planification. Cette interprétation peut être plus ou moins développée suivant que l'on associe ou non des informations d'ordre quantitatif relevant de l'hydrologie.

L'interprétation qualitative consistera à affecter aux unités hydrogéomorphologiques une caractérisation en terme de niveau d'exposition à l'aléa. Ainsi, un lit moyen de cours d'eau à régime torrentiel, en climat méditerranéen, devra être considéré comme exposé à l'aléa maximal, puisqu'il sera a priori mobilisé par toutes les crues, de la plus fréquente à la plus exceptionnelle, avec les hauteurs d'eau et les vitesses de courant les plus élevés de la plaine alluviale.

En ce qui concerne le lit majeur, il est relativement difficile de préciser le niveau d'aléa auquel il est soumis. L'interprétation a le choix entre diverses attitudes, fortement dépendantes des caractéristiques du site étudié :

Figure 30 :
Carte
hydrogéomorphologique
d'Aix-en-Provence
(extrait).



- en première analyse, tout lit majeur est à considérer comme soumis à l'aléa hydrologique, c'est-à-dire susceptible d'être affecté par des crues de fréquence faible. Ce constat peut conduire, soit, par mesure de précaution, à renoncer à l'urbanisation de ce lit, soit, en cas d'enjeux socio-économiques importants, à préciser le niveau de l'aléa au moyen d'une étude hydraulique spécifique.

Notons qu'il est toujours possible d'enrichir la connaissance hydrogéomorphologique par des estimations hydrologiques. Celles-ci peuvent être effectuées à partir des données des crues historiques ou/et d'une intensité pluviométrique théorique représentative de la climatologie régionale. Dans le cas de vallons de faibles dimensions, ce calcul théorique facilitera la cartographie d'une bande d'écoulement des eaux, non matérialisée explicitement sur le terrain, du fait du raccordement progressif de la plaine alluviale à ses versants.

- Dans un second temps, des observations complémentaires peuvent permettre d'affiner la cartographie de ce lit majeur, par exemple en indiquant la présence d'une bande latérale d'écoulement correspondant au raccordement du lit majeur au versant. Cette bande, surtout si elle se situe en rive convexe de la plaine alluviale, pourra être considérée comme faiblement exposée à l'aléa. Inversement, des situations géomorphologiques particulières inciteront à redoubler de prudence, et par conséquent à qualifier ce lit majeur d'un aléa élevé, voire à le considérer comme un lit moyen potentiel. Tel est le cas, par exemple, lorsque cette unité hydrogéomorphologique joue le rôle de premier champ d'expansion d'un cours d'eau de versant à forte pente, ou lorsqu'elle se situe immédiatement à l'amont d'un rétrécissement naturel ou artificiel de la plaine alluviale moderne, ou encore lorsqu'elle forme une dépression en contrebas du lit mineur.

Bien évidemment, en l'absence de données chiffrées, cette interprétation doit être considérée comme indicative, et susceptible d'être révisée par des études ultérieures. Dans cette attente, elle doit cependant être prise en compte, en application du principe de précaution.

Par ailleurs, le fait de disposer d'une bonne connaissance des caractéristiques et du fonctionnement hydrogéomorphologique d'un milieu alluvial conduit à examiner avec un certain recul les conséquences d'aménagements hydrauliques, trop souvent considérés comme une garantie de protection contre les crues.

Les exemples suivants montrent, à titre indicatif, les limites des travaux de recalibrage :

- Pour le Gardon d'Anduze, dont le bassin versant atteint une superficie de l'ordre de 1 000 km² et les débits 2 000 m³/s, le chenal dit "de crue", pourtant largement dimensionné, ne se traduit, sur le lit moyen, que par un abaissement de la ligne d'eau en crue centennale de 0,3 m, soit 10 % de la hauteur totale.

- Pour la Vallée de l'Eze (84), au niveau de Pertuis, dont la superficie du bassin versant et les débits sont plus réduits (150 km² et 350 m³/s), le surcalibrage à 130 m³/s du lit mineur a une incidence plus importante. Il supprime les inondations de crues moyenne (décennales à vingtennales), et met hors d'eau une frange externe du lit majeur pour la crue centennale, observée en

1993. Il ne change cependant pas de manière significative les conditions de submersion du lit moyen et de la partie du lit majeur bordant ce lit moyen.

Le problème se pose apparemment de manière très différente pour les digues longitudinales, destinées à supprimer les crues sur des zones initialement inondables. En pratique, de nombreux exemples, tant anciens (comme celui de la Loire) que récents (Camargue, Pertuis,...) montrent le caractère trop souvent illusoire de ces protections, qui tendent à masquer la réalité du danger.

Il est évident qu'il sera nécessaire autant que possible d'étayer cette interprétation par la prise en compte de données hydrologiques. Mais à défaut, et en particulier dans les secteurs où les enjeux sont faibles ou dans ceux dont on sait qu'il ne sera matériellement pas possible de passer à la quantification hydraulique (vallons de faibles dimensions), cette présentation des résultats hydrogéomorphologiques sera directement utilisable pour la planification et la gestion des sols.

L'interprétation semi-quantitative intègre dans la démarche, des données quantitatives relatives à la connaissance hydrologique du bassin versant (pluviométrie, ruissellement, débits spécifiques et débits théoriques des crues rares et exceptionnelles) et aux données des crues historiques (plus hautes eaux, fréquence). Cette phase, qui relève de l'intervention d'un hydrologue expérimenté, permet d'étalonner les différentes unités géomorphologiques, en leur affectant un ordre de grandeur relatif aux paramètres physiques des inondations : hauteurs d'eau, vitesses du courant.

Plus complète que la précédente, la démarche a l'inconvénient de proposer des valeurs chiffrées approchées, et nécessite par conséquent un effort particulier d'explicitation vis-à-vis des non spécialistes.

L'interprétation quantitative s'appuie sur la modélisation hydraulique et sur des données altimétriques précises. Cette exigence représente un changement important de niveau d'analyse, marquant le passage d'une phase de diagnostic à une phase d'étude de projet. Il est cependant possible d'envisager, entre ces deux phases, des transitions basées sur l'approfondissement des apports de l'approche qualitative :

- la carte hydrogéomorphologique décrit en continu la plaine alluviale moderne et son contexte immédiat. Elle fournit de ce fait une aide à la délimitation des secteurs homogènes et à la reconnaissance des points singuliers (élargissements, rétrécissements, confluences, changements de direction, etc.). Elle facilite également le choix des profils topographiques les plus représentatifs de la géométrie des zones inondables en liaison avec les éléments hydrogéomorphologiques significatifs. Ces données altimétriques peuvent ensuite plus aisément constituer la trame d'un modèle de terrain topographique, d'utilité comparable, voire supérieure, à celle d'un levé photogrammétrique classique ;

- l'élaboration de la carte d'occupation des sols autorise une appréhension plus globale de la rugosité du terrain et peut donc concourir à la détermination des coefficients de Strickler ;

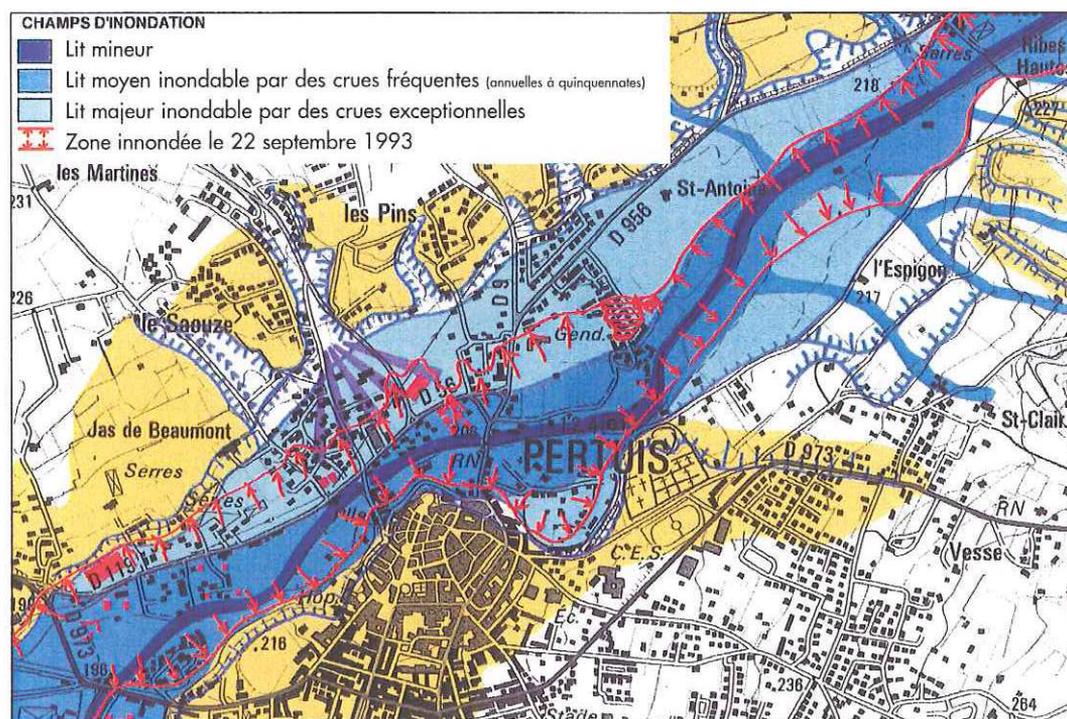
- la compréhension de la dynamique fluviale peut tirer avantage de la possibilité offerte par la photo-interprétation de cartographier les zones d'érosion et de sédimentation actuelles, puis de comparer cette situation avec celle de périodes antérieures. Les tendances d'évolution apparaissent alors clairement comme résultant de causes naturelles (structure géologique par exemple) ou anthropiques (mise en place de protections,...).
Il apparaît ainsi possible de passer graduellement de la cartographie hydrogéomorphologique qualitative à l'étude hydraulique quantitative.

• Vérification de la fiabilité de la méthode

Testés à l'occasion d'études hydrauliques, les résultats de la méthode hydrogéomorphologique ont pu être vérifiés également à la suite d'inondations catastrophiques survenues quelques mois après l'établissement de la cartographie, dans la vallée de l'Eze (Pertuis, La Tour d'Aygues et Grambois) et dans la vallée du Lot (Mende). Qualifiées de centennales par les méthodes statistiques, ces crues ont affecté des zones fortement urbanisées, dont certaines ont été touchées de manière suffisamment grave, à Pertuis notamment, pour qu'une dizaine de pavillons aient dû être démolis à la suite de l'inondation.

Les cartes de la figure 31 représentent à la fois la caractérisation hydrogéomorphologique de ces zones et les limites d'extension de la crue. On constate ainsi :

- à Pertuis (figure 31 a), l'inondation a submergé la totalité du lit moyen et une partie du lit majeur. Les études hydrauliques postérieures à la crue ont montré dans le champ du lit moyen, des hauteurs d'eau supérieures à 1 mètre et des vitesses supérieures à 0,5 m/s. Nous avons vu précédemment que la frange de lit majeur, non touchée par cette crue, a sans doute été préservée par le recalibrage du lit mineur, qui absorbe dorénavant 25 à 30 % du débit de la crue centennale.

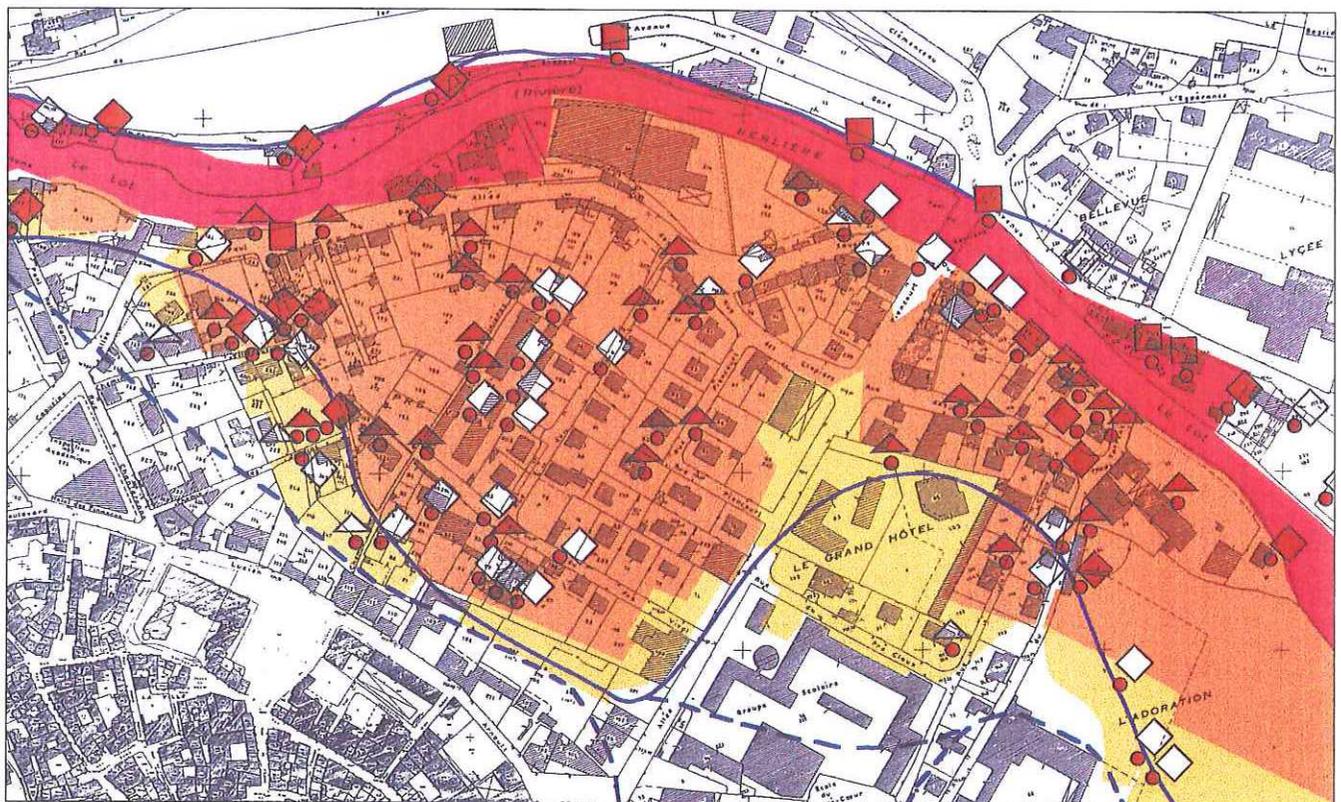


- à Mende (figure 31 b), le lit moyen de la rivière avait été qualifié de secteur à haut risque par une étude hydraulique menée en 1985. Par ailleurs, les relevés effectués par la DDE de Lozère lors de la grande crue de 1994 ont indiqué dans cette même zone, des hauteurs d'eau de 1 mètre en moyenne. Ces deux références ont confirmé la fiabilité de la cartographie hydrogéomorphologique pour la caractérisation de ces zones inondables. On a pu également constater ici la précision de la délimitation spatiale des lits moyen et majeur par rapport à l'extension de la crue de 1994.

La carte de la figure 31 b fournit une information supplémentaire. Elle atteste de la dispersion des mesures de hauteur d'eau dans une zone considérée comme homogène tant au plan hydrogéomorphologique qu'au plan hydraulique. Cette observation est de nature à nous faire réfléchir sur la relativité des données hydrauliques quantitatives concernant, en l'occurrence, un secteur déjà urbanisé.

La fiabilité de la méthode a pu aussi être vérifiée, a posteriori cette fois, à Vaison la Romaine (Vaucluse) et à Auribeau (Alpes Maritimes). Dans cette dernière commune, la délimitation du lit majeur obtenue à partir de photo

Figure 31 b :
Mende (Lozère)
- Cartographie :
été 1994
- Inondation :
septembre 1994



Zones définies par l'étude hydraulique de 1985

- Inconstructible
- A haut risque
- A risque modéré

Limites hydrogéomorphologiques

- Lit moyen (limite externe)
- Lit majeur (limite externe)

Hauteurs d'eau relevées par la DDE lors de la crue du 24/09/94

- Inférieures à 0,5m
- Comprises entre 0,5 et 1m
- Comprises entre 1m et 1,5m
- Comprises entre 1,5m et 2m
- Supérieures à 2m

graphies aériennes de 1991 s'est avérée conforme à la zone effectivement submergée en 1994.

• **Limites d'application**

Nous avons vu que dans certaines conditions géomorphologiques, il n'était pas possible de déterminer les zones inondables avec exactitude. Tel est le cas en particulier :

- de vallons en berceau, avec raccordement progressif du lit majeur au versant
- de limites masquées par des phénomènes secondaires, comme le biseau-tage d'un talus par érosion, son recouvrement par des colluvions ou son lissage par des labours.

Par ailleurs, l'application de la méthode hydrogéomorphologique, bien adaptée au cas général de la formation d'une plaine alluviale moderne, peut s'avérer moins fiable lorsque celle-ci résulte d'une histoire plus complexe. Il en est ainsi, par exemple, de la plaine des Sorgues, dans le Vaucluse, où le lit majeur s'étend de manière démesurée au regard de la taille des cours d'eau actuels. La plaine de la Limagne, dans le secteur d'Ambert (Puy de Dôme) présente des caractéristiques comparables. Dans ces deux cas, la formation de la plaine alluviale semble s'être inscrite dans un bassin sédimentaire pré-existant, qu'elle a recouvert d'un placage régulier d'alluvions au fur et à mesure de la divagation de son lit mineur.

Les études à venir révéleront certainement d'autres situations particulières qui nécessiteront, comme pour les exemples précédents, de procéder à une interprétation géomorphologique spécifique, voire d'appuyer l'analyse sur des relevés topographiques précis.

• **Utilisation de la cartographie hydrogéomorphologique**

Cette cartographie, qui traite de vastes superficies alluviales, est particulièrement adaptée au diagnostic de l'aléa et du risque hydrologique dans le cadre des problématiques liées à l'aménagement du territoire et à la planification. Elle souligne en effet très rapidement les zones inondables concernées par l'urbanisation actuelle ou prévue dans les Plans d'Occupation des Sols. Il est donc possible d'alerter les collectivités locales concernées et de les inciter à réviser leurs POS afin de prendre en compte le risque de manière satisfaisante.

Les exemples de Pertuis et de Mazan (Vaucluse), présentés dans le chapitre 3, illustrent l'importance du problème que l'on peut rencontrer, lorsque le développement urbain récent n'a pas été accompagné d'une démarche d'étude susceptible de mettre en évidence l'aléa hydrologique.

Pour des communes dépourvues de POS, ou lorsque les enjeux sont peu importants, la démarche hydrogéomorphologique suffit généralement pour redéfinir les extensions de l'urbanisation. La carte offre l'avantage d'être facilement lisible par les élus et les habitants. Ceux-ci peuvent de ce fait la vérifier dans le détail, sans que la précision des limites des zones inondables soit mise en défaut. Dans le cas contraire (absence de terrains de recharge, opérations en partie engagées...), l'approche hydrogéomorphologique peut être relayée par une analyse hydraulique apte à quantifier le niveau de risque.

Conditions pratiques de mise en oeuvre

La méthode hydrogéomorphologique se caractérise par :

Sa rapidité d'exécution : la photo-interprétation permet de cartographier de grandes étendues de plaine alluviale avec un minimum de temps. Indispensable pour les petits cours d'eau et les vallons secondaires, cet aspect reste très appréciable dans les vallées plus importantes. A titre d'exemple, un photo-interprète expérimenté peut couvrir en une journée, selon l'échelle de restitution adoptée, entre 3 et 10 kilomètres d'un cours d'eau moyen. La vérification terrain, toujours nécessaire pour tester les zones d'incertitude, demande en outre une journée de travail environ pour une dizaine de kilomètres. Au-delà de cette cartographie minimale, l'approfondissement de l'analyse, qui a pour but de prendre en compte les modifications d'origine anthropique, l'occupation des sols et le zonage réglementaire, peut selon les cas, doubler ou tripler le temps de travail.

Son coût modique : la mise en oeuvre de la méthode n'implique pas d'outillage lourd. Elle n'engage pratiquement que le coût d'un personnel qualifié. L'effet d'échelle est important. Il favorise un gain de temps lorsque l'étude porte sur une grande longueur de plaine alluviale (plusieurs dizaines de kilomètres) en réduisant la recherche documentaire à une seule opération. Cet effet d'échelle incite de ce fait à programmer, avant le démarrage de l'étude, une mission spécifique de prise de vues aériennes, facteur d'optimisation de la photo-interprétation.

Articulation de l'approche hydrogéomorphologique avec les études de risques d'inondation

L'hydrogéomorphologie constitue, avec l'analyse historique et l'hydrologie, l'un des volets des études d'aléas et de risques d'inondation. L'organigramme ci-contre situe chacun de ces volets et montre leur interdépendance.

Selon les cas, on peut programmer dès le départ la chaîne complète des études, depuis l'hydrogéomorphologie jusqu'à la modélisation hydraulique, ou procéder par étapes successives, afin d'optimiser les moyens mis en oeuvre. Compte tenu de l'étendue spatiale des territoires soumis à l'aléa d'inondation, cette deuxième solution paraît préférable.

L'analyse hydrogéomorphologique permet de cartographier rapidement d'importants linéaires de plaine alluviale, à la fois sur les cours d'eau principaux et sur leurs affluents, trop souvent négligés dans les études classiques. Elle peut être effectuée en deux phases successives :

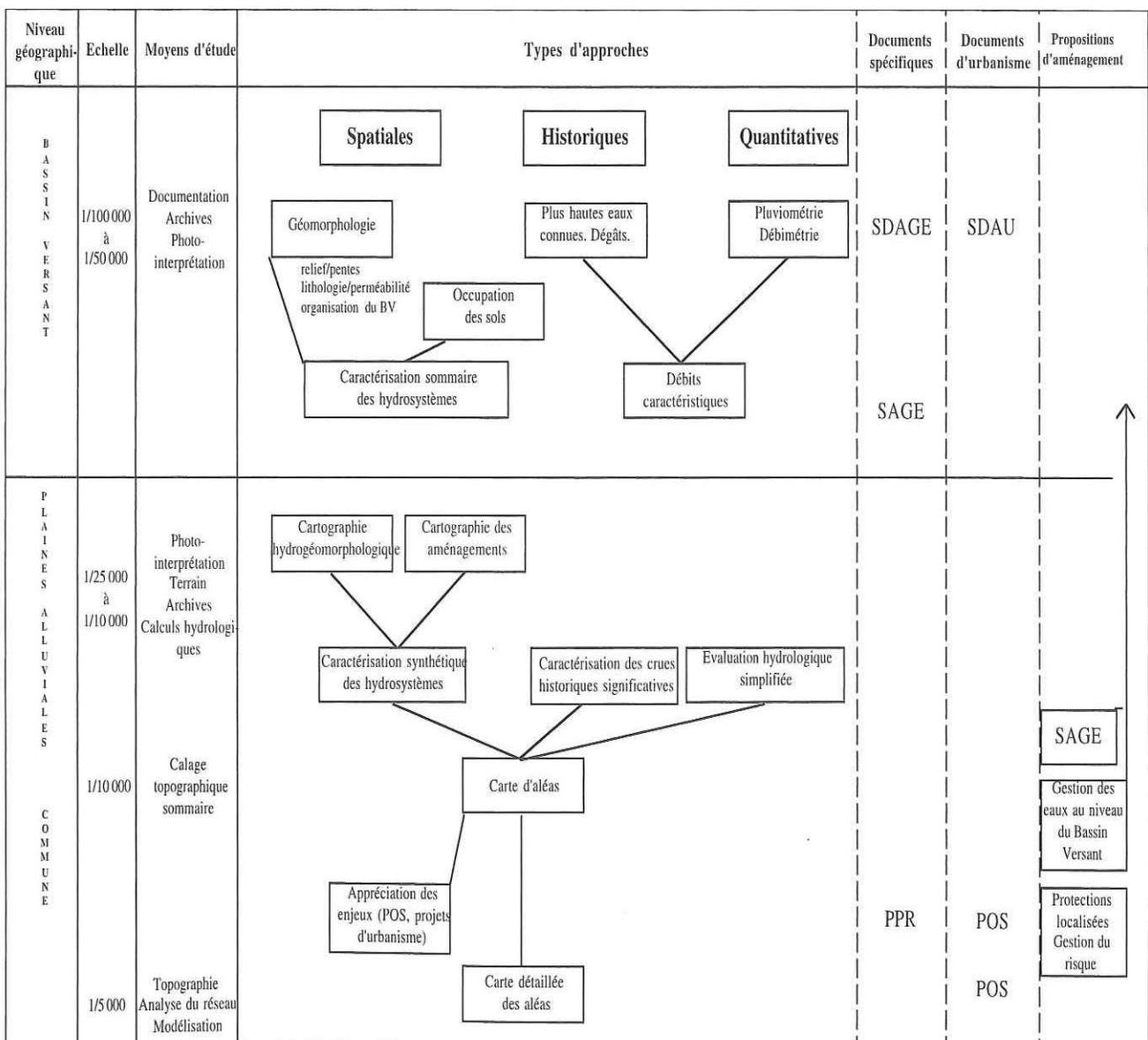
- La première se limite à la cartographie des spécificités hydrogéomorphologiques proprement dites et des grands traits de l'occupation des sols.
- La seconde consiste à cartographier en détail, en principe à l'échelle du 1:10 000, les données complémentaires relatives aux modifications d'origine anthropique, aux évolutions dans le temps de l'hydrodynamique fluviale, et à l'occupation des sols. Le rythme de travail peut alors être réduit à 1 ou 2 km par jour de photo-interprétation.

L'exploitation de ces informations, étayée de compléments d'analyse géomorphologique, de la connaissance des crues historiques et des données hydrologiques (relevés de crues - archives), peut aller plus ou moins loin en direction de l'approche hydraulique. Elle sera d'autant plus pertinente que la démarche aura été effectuée de manière pluridisciplinaire, et avec un esprit critique permettant de confronter des informations parfois contradictoires.

Mise en œuvre
de la méthode
hydrogéomorphologique

L'approche hydrogéomorphologique facilite également l'intégration de cette problématique dans celle, plus large, de l'aménagement et de la gestion d'un cours d'eau et de son bassin versant. Elle ouvre en particulier le champ de la réflexion, d'une part à la gestion des eaux pluviales (utilisation des lits majeurs pour la rétention, limitation des facteurs de ruissellement en milieu agricole et en milieu urbain, restauration et mise en valeur des cours d'eau...), et d'autre part à la gestion de l'espace (création de parcs en lits majeur et moyen, mise en évidence de nouvelles potentialités d'extension et de structuration urbaine, développement des pratiques sociales dans les espaces de plaines alluviales...).

Organigramme simplifié
des études diagnostique
du risque d'inondation



Principales applications

Mise en pratique depuis plusieurs années, la méthode hydromorphologique ne doit pas être considérée comme concurrente des méthodes hydrologiques et hydrauliques, dont elle est complémentaire. Son champ d'application est cependant assez largement ouvert :

- En tant que vecteur d'une réflexion applicable à la gestion des espaces, au niveau de l'aménagement du territoire et de la planification, notamment dans le cadre de la politique de prévention du risque d'inondation (PPR).
- Comme référence à une stratégie globale de gestion des eaux, incluant en particulier la préservation des champs d'expansion des crues, l'aménagement des cours d'eau et la maîtrise du ruissellement pluvial.
- Comme base rationnelle d'une politique globale de gestion des eaux, à l'échelle de l'aménagement intégré des cours d'eau et à celle du bassin versant.

Applications à la planification

Couplée à la connaissance des crues historiques et à une analyse hydrologique simplifiée, la cartographie hydrogéomorphologique fournit des informations suffisantes pour permettre aux aménageurs des choix décisifs, en ce qui concerne la maîtrise de l'urbanisation et la mise en valeur des espaces affectés par les inondations.

De très nombreux plans d'occupation des sols (POS) ont été instruits ou révisés sans étude du risque d'inondation, ou en tenant compte d'études fragmentaires, souvent très optimistes vis à vis de ce risque. Cette situation s'explique par la convergence de raisons économiques (coût des études hydrauliques, enjeux fonciers), et psychosociologiques (oubli par les citoyens des contraintes liées à la nature, croyance dans les capacités des techniques à maîtriser les phénomènes naturels). Il est donc nécessaire, à la lumière des récentes catastrophes, de développer une véritable culture du risque afin de cesser d'exposer toujours plus de vies humaines et de biens matériels à ces cataclysmes dont on peut parfaitement réduire les conséquences.

L'expérience montre qu'à l'heure actuelle, la modification ou la révision des POS est parfaitement réalisable, à condition de bien faire comprendre aux élus la nature et l'importance des enjeux. Le plus souvent, il existe deux solutions pour intégrer la connaissance du phénomène ; soit l'espace à urba-

niser est suffisamment vaste pour que l'on puisse le restreindre aux zones les moins exposées, soit il est possible de transférer les terrains constructibles sur d'autres secteurs du territoire communal.

L'exemple des communes étudiées dans le cadre d'un programme expérimental initié par la SDPRM et la DAU, ainsi que celui de communes engagées volontairement dans des opérations similaires, telles que Marseille, mettent en évidence trois orientations :

• **La modification du POS**

Cette mesure est la plus sûre, mais ne présente pas un caractère d'irréversibilité. Elle ne pose pas de problème majeur pour les espaces à faibles enjeux, et favorise la préservation des champs d'expansion des crues. Elle est plus difficile, mais reste acceptable, lorsque les zones concernées ont subi un début d'urbanisation. Tel est le cas de Mazan (Vaucluse), où des modifications importantes ont été décidées après concertation. Le report des perspectives d'urbanisation vers d'autres zones laisse cependant entier le problème des constructions existantes, pour lesquelles diverses mesures de sécurité devront être prises. A Pertuis, où les zones inondables sont déjà presque totalement urbanisées, il pourrait s'avérer nécessaire de démolir des constructions, qui, implantées dans le lit moyen, ont été fortement endommagées par les crues de septembre 1993.

• **Le prolongement du POS en projet d'aménagement et d'urbanisme**

Le plus souvent, l'urbanisation des zones inondables découle plus de l'absence de projet d'aménagement urbain que d'un choix délibéré. Or, l'examen des milieux alluviaux montre qu'au-delà des contraintes qu'ils imposent, ils recèlent des potentialités trop souvent négligées, en particulier pour la préservation et l'organisation d'espaces de nature et de loisirs, voire pour la constitution de parcs urbains ou périurbains. Plusieurs études ont débouché sur ce type de solution, pour des agglomérations jusqu'alors dépourvues de véritable projet d'urbanisme. Il est ainsi possible de créer une trame verte accompagnant la trame bleue du réseau hydrographique et bénéficiant d'atouts indéniables, par la qualité des sites, la présence de l'eau et souvent, la qualité des peuplements végétaux existants ou potentiels.

La mise en valeur de ces espaces peut justifier leur acquisition, au moins partielle, par la collectivité. Cette mesure garantit la pérennité des actions et la possibilité de mettre en place les moyens nécessaires à leur gestion. Cette démarche peut être l'occasion pour la commune de réfléchir à un véritable plan d'aménagement urbain, non plus linéaire, mais organisé en profondeur, ouvrant de nombreuses possibilités de fonctionnement. Le réseau hydrographique peut alors devenir structurant pour l'agglomération, a contrario d'un développement en tâche d'huile.

• **Le prolongement de la démarche structurante** à l'intérieur des zones NA et NB des POS, ainsi que des ZAC et des lotissements. Il est en effet possible d'imposer des plans d'aménagement dans le règlement de ces zones pour préserver les terrains inondables de toute construction, et les transformer en espaces verts, aires de jeux ou, sous certaines conditions, parkings occasionnels.

Ces exemples, qui ont surtout pour but d'ouvrir le champ de la réflexion, attestent que la prise en compte du risque d'inondation, d'abord ressentie par les élus et les habitants comme une contrainte, peut devenir un atout pour la collectivité, en la conduisant à innover dans sa démarche d'aménagement. La cartographie géomorphologique, exprimant les potentialités et les contraintes des espaces et des milieux naturels, permet d'optimiser l'occupation des sols grâce à une dynamique d'aménagement à laquelle doivent oeuvrer conjointement techniciens et décideurs.

Applications à l'aménagement des cours d'eau

L'analyse et la cartographie hydrogéomorphologiques mettent en évidence des contradictions fortes entre le fonctionnement naturel des cours d'eau et les aménagements qui leur sont imposés. Une démarche à base naturaliste tendrait à contraindre le moins possible le cours d'eau, en laissant à sa disposition la plus grande partie des zones d'expansion des crues qu'il s'est forgées au cours du temps. Elle vise à freiner l'eau en vue d'écrêter les crues et de réalimenter les nappes. A l'inverse, les aménagements hydrauliques classiques, dérivés des principes d'assainissement pluvial urbain et de l'ingénierie des canaux et des voies navigables, tendent à la fois à accroître les vitesses et à réduire le plus possible la largeur de la plaine alluviale active. L'expérience des grandes inondations récentes confirme ce schéma théorique. Elle montre notamment les limites de ces aménagements, qui ne peuvent gérer des volumes d'eau considérables, s'écoulant dans des espaces de temps de plus en plus réduits.

Depuis une dizaine d'années, diverses expériences, en France comme à l'étranger, ont montré la nécessité d'infléchir les aménagements de cours d'eau, de manière à minorer les travaux et ouvrages lourds, et à accroître les interventions inspirées par le génie écologique. Cette tendance est cependant loin de prévaloir, et risque de régresser en raison des craintes inspirées par les récentes catastrophes. Placée jusqu'ici prioritairement sous l'angle de la protection de l'environnement, cette problématique devrait aujourd'hui être élargie sous l'angle fonctionnel de l'hydrogéomorphologie. Celui-ci vise à comprendre l'organisation et la dynamique de la plaine alluviale, dans le but de mieux gérer les eaux à partir de deux orientations antagonistes mais complémentaires :

- celle de la concentration et de l'évacuation,
- celle de l'étalement et du freinage.

• Le constat de pratiques qui tendent à privilégier la fonction d'évacuation

En milieu urbain, l'objectif le plus ambitieux consiste à assurer l'évacuation d'une lame d'eau résultant d'une pluie de fréquence de retour décennale. Il laisse sans solution les conséquences des fréquences plus rares, pourtant de loin les plus dangereuses. Il conduit aussi, au fur et à mesure de l'extension du réseau sur de nouvelles zones imperméabilisées, à accroître très fortement le risque pour les zones situées à l'aval, où la densité de l'urbanisation interdit d'augmenter la capacité des ouvrages. La prise de conscience de cette problématique conduit désormais certaines villes à remettre en question leur politique d'assainissement, en privilégiant l'emploi de techniques de freinage des écoulements sur les parties amont de leurs bassins hydrographiques.

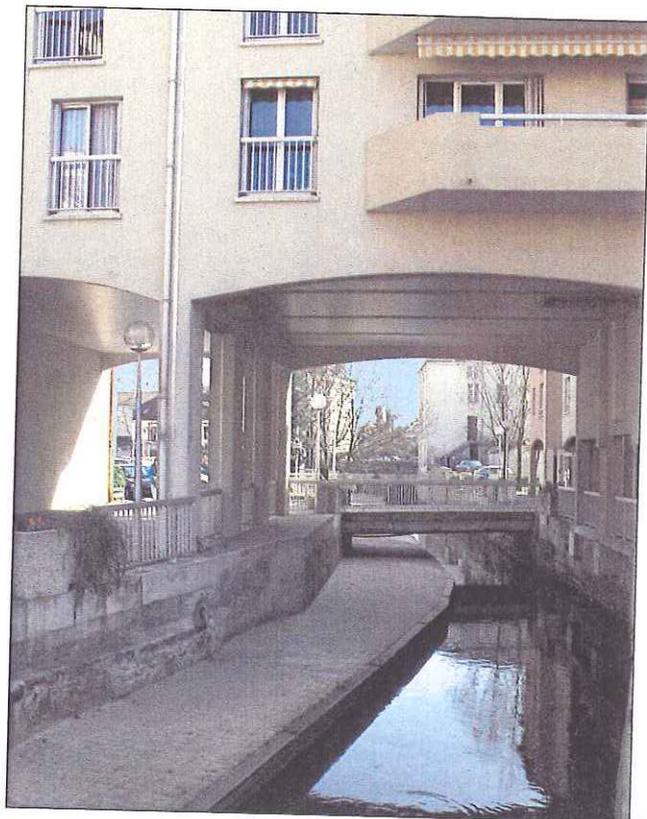
La Commune de Marseille lance, dans cet esprit, un très ambitieux programme d'études et de travaux exploitant toutes les ressources de ses sites non encore urbanisés : bassins de rétention, mais aussi équipement des lits majeurs en digues transversales, systèmes d'infiltration. Ailleurs, d'autres techniques alternatives au ruissellement (chaussées et tranchées drainantes, rétention sur les toits et les parkings...) sont utilisées de manière croissante, bien qu'encore très largement insuffisante. L'exemple de Marseille, montre que l'approche hydrogéomorphologique, très utile au niveau de la cartographie des zones inondables, sert également à la définition et au dimensionnement des techniques alternatives, en particulier pour l'équipement des lits majeurs en ouvrages rustiques destinés à l'écrêtement des crues des sous-bassins versants. La publication des résultats des études et des expérimentations paraîtra prochainement, sous la responsabilité du service Assainissement de la ville.

En milieu naturel et rural, et dans la traversée des agglomérations par de grands cours d'eau, la lutte contre les inondations menée depuis très longtemps (le 12^{ème} siècle sur la Loire par exemple) a principalement été menée dans l'objectif d'évacuer les eaux vers l'aval, en jouant sur la vitesse d'écoulement. Il s'agit en quelque sorte de supprimer le fonctionnement hydraulique du lit majeur, voire du lit moyen, en surdimensionnant le lit mineur et en l'artificialisant de manière à ce qu'il puisse assurer seul l'évacuation des crues. Cette opération nécessite, d'une part d'élargir la section de ce lit mineur, et d'autre part d'améliorer son coefficient de Strickler (ou de rugosité) en supprimant la végétation, puis en régularisant les berges et le fond, pour enfin les enrocher et les bétonner. Cette artificialisation est en général accompagnée d'une rectification du tracé, permettant d'accroître la pente hydraulique, facteur supplémentaire d'accélération des écoulements.

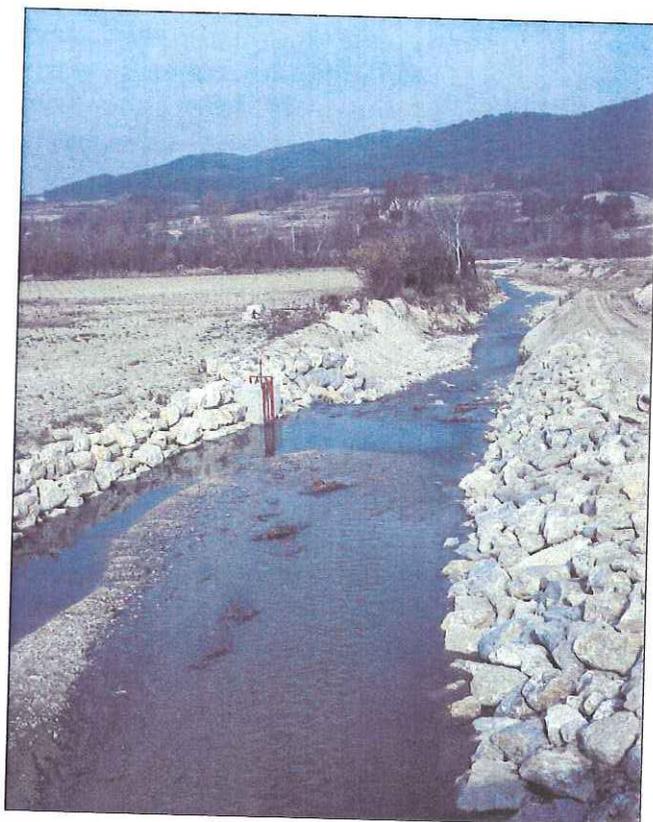
Ce système est efficace lorsqu'il est limité à une traversée d'agglomération (photo n° 16). Il devient par contre dangereux, comme pour l'assainissement pluvial en milieu urbain, lorsqu'il est étendu à des longueurs importantes de cours d'eau (photo n° 17). Il conduit en effet à diminuer fortement le temps nécessaire à l'écoulement du volume d'eau ruisselé sur le bassin versant, en particulier en supprimant l'effet d'écrêtement initialement opéré par les débordements sur les lits moyen et majeur, où les obstacles créés par la forêt riveraine des cours d'eau et l'agriculture, ralentissent considérablement les vitesses.

Les conséquences de cette transformation du milieu, peu étudiées jusqu'ici, sont sans doute très importantes, par l'effet de compression dans le temps de l'onde de crue, pouvant jouer simultanément pour plusieurs sous-bassins versants, et par l'accroissement de l'amplitude, donc du débit maximal de la crue. Elles sont proportionnelles à la longueur de cours d'eau remaniée, qui compte en principe non seulement la rivière principale, mais aussi ses affluents. Les recalibrages récents à finalité de protection de zones habitées se conjuguent généralement avec des travaux plus anciens de recalibrage et de drainage des zones agricoles. La persistance à vouloir évacuer les eaux se retrouve également dans les zones naturelles sans enjeu économique, où les ouvrages hydrauliques, routiers en particulier, sont très souvent surdimensionnés afin de protéger des zones pourtant non vulnérables.

Cette politique a été appliquée sur de nombreux cours d'eau méditerranéens, et notamment sur les fleuves des Pyrénées Orientales, où les recalibrages généralisés ont conduit les élus locaux à croire que les plaines du Roussillon, situées à l'aval, étaient de ce fait protégées des inondations auxquelles elles avaient toujours été soumises (M. Masson,



Photos n° 16 :
Aménagement de
l'Yvette (Essonne)
dans la traversée de
Longjumeau



Photos n° 17 :
Remodelage et
endiguement du
Toulourenc (Vaucluse)
après les crues
de septembre 1992.

P. Buquet - 1990). Elle s'est traduite, depuis quelques années, par le développement d'une urbanisation ne respectant plus les précautions les plus élémentaires. Doublement ignorante du fonctionnement hydraulique du milieu, elle contribue également à amplifier les risques en augmentant les débits et en provoquant très souvent des ruptures du système défensif, comme ce fut le cas en Camargue à la fin de l'année 1993 et sur d'autres sites des régions méditerranéennes (photo n° 18).

Lorsqu'un accident se produit par rupture d'ouvrage, la tendance actuelle des aménageurs, obéissant toujours à la même logique, consiste à reconstruire un ouvrage de dimensions et de résistance supérieures. Ainsi les inondations de 1992 et 1993 dans le Midi de la France donnent-elles lieu maintenant à une multiplication des protections lourdes, consistant inva-

riablement à augmenter la section de recalibrage, à enrocher ou bétonner les berges, et à surélever les digues. Ce comportement s'inscrit inévitablement dans une spirale conduisant à une inflation permanente des coûts d'aménagement et à l'altération de plus en plus brutale de l'environnement (écologique, paysager, hydrogéologique et de cadre de vie). Il s'oppose à une gestion rationnelle des cours d'eau, qui permettrait de résoudre, pour des coûts incomparablement moins élevés, les contradictions qui existent entre le fonctionnement normal d'un cours d'eau et la gestion de l'espace.

Mise en œuvre
de la méthode
hydrogéomorphologique



• Proposition d'une démarche globale inspirée de l'observation des phénomènes naturels

L'approche hydrogéomorphologique peut concourir à promouvoir un aménagement mieux intégré, en proposant des solutions adaptées aux caractéristiques des milieux alluviaux, par exemple :

- la définition des champs d'inondation de lit majeur, dont un aménagement sommaire permettrait d'augmenter les capacités d'écrêtage des crues, aujourd'hui souvent compromises par des endiguements,
- la réhabilitation des lits mineur et moyen, trop souvent artificialisés par des recalibrages et des protections de berges dont l'efficacité hydraulique est contestable vis-à-vis de la protection contre les inondations, et les effets négatifs évidents sur l'environnement.

Maintenir ou restituer les champs d'inondation des cours d'eau.

Cela implique de supprimer digues et bourrelets de berges partout où ils ne sont pas indispensables, et de réaliser, dans les secteurs les plus favorables, des aménagements légers destinés à freiner le courant : reboisement des lits moyens, digues transversales aux lits majeur et moyen. Ces dernières ont été édifiées à grande échelle dans le passé, par exemple dans la plaine alluvia-

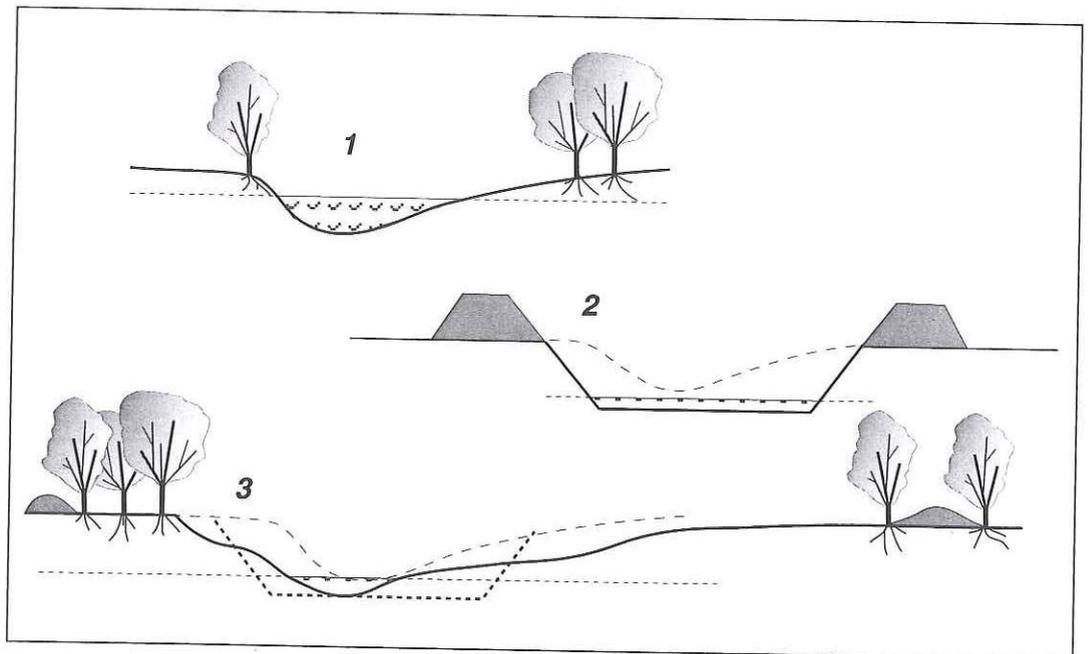
Photo n° 18 :
L'Eze à Pertuis après
l'inondation de
septembre 1993 :
affouillements
derrière la digue en
gabions, rupture et
inondation du
lotissement du
Sethi de Berba
implanté en lit
moyen.

le de la Durance et dans tous les vallons secs méditerranéens sous la forme de murets, banquettes et restanques.

Reconstituer des lits mineurs et moyens adaptés à des débits différenciés.

Le recalibrage tend à surdimensionner très largement le lit mineur, qui perd de ce fait toute fonctionnalité écologique, paysagère et hydrologique, et qui est rapidement envahi par la végétation. Il est donc nécessaire de réduire sa section, en lui restituant une forme fonctionnelle, en plan et en profil transversal : reconstitution de méandres et des alternances de mouilles et de seuils, tels qu'ils ont été décrits au chapitre II. Le lit moyen, quant à lui, doit être légèrement surélevé par rapport au lit mineur, ce qui favorise d'ailleurs le contrôle du développement de sa végétation. Il est souhaitable d'élargir sa section, en rechargeant une partie du lit mineur recalibré, comme le montre la figure 32.

Figure 32 :
Aménagement
d'un cours d'eau
en profil
transversal
1 - Etat naturel
2 - Etat après
recalibrage
3 - Reconstitution
de lit mineur
et de lit moyen



Les digues éventuelles peuvent aussi être implantées en retrait par rapport à la berge de lit moyen, afin de réduire leur vulnérabilité à l'érosion, d'augmenter la section d'écoulement et d'accroître la possibilité d'étalement de l'onde de crue.

L'application de cette démarche suppose le respect de deux principes :

- une évolution de la politique foncière.

Le remodelage des lits des cours d'eau impose en effet de repousser les limites de l'urbanisation et de l'agriculture afin de trouver un compromis entre l'emprise du lit majeur inondable et celle, insuffisante, du recalibrage. Des calculs économiques simples permettraient de montrer les avantages de ce type de solution par rapport à une pratique de muselage extrême du cours d'eau, générateur des catastrophes que l'on connaît.

Notons cependant que, compte tenu de la déprise agricole actuelle qui rend caduques les politiques de protection des cultures implantées en zone inondable, les endiguements ne devraient être réalisés qu'exceptionnellement, conformément à une utilisation hydrologique rationnelle des lits majeurs.

- la submersibilité des ouvrages.

Les digues devraient être systématiquement équipées de déversoirs. Cette précaution éviterait les ruptures auxquelles on remédie généralement, pour les digues longitudinales, par des reconstructions surdimensionnées qui ont pour conséquence de supprimer l'effet de bassin de rétention initial. Là encore, une stratégie prévisionnelle de gestion intégrée du risque reste à développer, pour éviter les solutions employées au coup par coup.

Ce bref exposé permet d'entrouvrir le champ extrêmement vaste de l'aménagement des cours d'eau basé sur la compréhension de leur fonctionnement hydrogéomorphologique et qui est souvent en contradiction avec les pratiques les plus classiques.

Applications à la gestion des eaux, à l'échelle d'un bassin versant

L'aménagement des cours d'eau conduit, comme nous l'avons vu, à élargir la problématique du lit mineur à l'ensemble de la plaine alluviale moderne, considérée comme une entité à traiter globalement. Les premières expérimentations permettent d'envisager pour l'avenir, un développement sensible de cette démarche, qui présente, outre l'intérêt fonctionnel et sécuritaire, celui de limiter les incidences économiques des inondations, et de favoriser un aménagement intégrant pleinement les préoccupations environnementalistes.

Fiches de cas

Commune : Saint Cyprien

Département : Pyrénées orientales/Maître d'ouvrage : Commune - DRM

Données générales - Problématique

La commune de Saint-Cyprien, implantée initialement à l'extrémité d'une colline sableuse (Miocène) séparant le bassin versant du Tech de celui de l'étang du Canet, s'est étendue récemment sur le cordon littoral et sur la plaine inondable formée par le colmatage d'une partie de l'étang (figure 33).

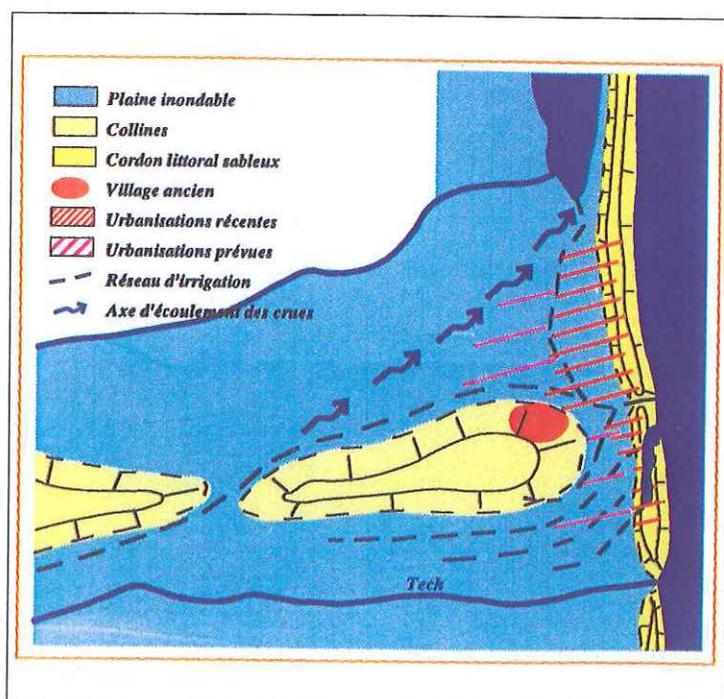
Ces extensions urbaines ont déjà été soumises aux inondations. Or l'urbanisation future prévue au POS va encore accroître notablement les risques, en empiétant sur la plaine alluviale du fleuve Tech, particulièrement dangereux (cf. catastrophe de 1940), et sur celle des affluents de l'étang du Canet.

Cette problématique, explicitée par une étude du CETE Méditerranée (1991), a incité la Commune à lancer une étude Diagnostic du risque hydrologique.

Figure 33 :
Cartographie
hydrogéomorphologique
de la région de
Saint Cyprien.

Analyse - Aspects particuliers

L'analyse géomorphologique a comporté :



- la photo-interprétation, qui a mis en évidence des axes d'écoulement de crues, corrélables avec la structure du niveau d'érosion (contact alluvions - substratum), inducteur de l'évolution holocène de la plaine. L'interprétation a été complétée par l'observation des limons de crue et des vases de colmatage de l'ancienne lagune.

- L'analyse de plans topographiques au 1:2000, ainsi que l'analyse hydrologique sommaire du réseau d'assainissement, comprenant des aménagements hydrauliques peu fonctionnels (canal de l'Aygoual).

La cartographie des zones inondables a posé dans ce cas quelques problèmes du fait :

- de la morphologie très peu marquée des plaines alluviales, formant de vastes champs d'inondation interpénétrés (plaines du Roussillon),
- des transformations subies par le réseau hydrographique, déplacé pour être transformé en réseau d'irrigation plus ou moins artificialisé, puis reconverti en réseau d'assainissement,
- de l'histoire géomorphologique complexe de ce secteur, liée aux interactions entre les dynamiques alluviales, marines et lagunaires (zones en cuvette derrière le cordon littoral).

Résultats - Prise en compte

L'étude diagnostic a permis :

- de délimiter les zones inondables, sans qu'il soit possible d'évaluer une période de retour des crues,
- d'identifier les axes d'écoulement préférentiels,
- de mettre au point une stratégie d'aménagement.

Cette stratégie est basée sur :

- la hiérarchisation des risques, les inondations liées au Tech s'avérant beaucoup plus dangereuses que celles affectant la plaine Nord reliée à l'étang du Canet,
- la reconstitution d'un réseau hydrographique fonctionnel, s'écartant du réseau d'irrigation (qui a perdu son intérêt du fait de la déprise agricole), et retrouvant les axes d'écoulement naturels,
- la définition d'aménagements hydrauliques favorisant l'amortissement des crues sur des lits moyens et majeurs reconstitués et endigués à distance suffisante pour ménager une zone d'écêtement des crues.

La prise en compte de ces résultats a porté sur :

- la modification du Plan d'Occupation des Sols : abandon des zones NA prévues dans le champ d'inondation du Tech, réservation d'espaces naturels en bordure des nouveaux axes hydrographiques, prescriptions et recommandations pour les Plans d'Aménagement de Zones et les règles de construction,
- les aménagements hydrauliques : création d'une "trame bleue" à base de terrassements modérés, support d'une "trame verte", constitution de champs d'épandage amont et de bassins de rétention ; redimensionnement d'ouvrages à l'aval,
- les aménagements de la "trame verte" , qui apporte à la Commune des espaces verts aménagés et des cheminements reliant les différentes parties de l'agglomération.

Commune : Mazan

Département : Vaucluse - Maître d'Ouvrage : DAU - DDE

Données générales - Problématique

La commune de Mazan, située au pied du Mont Ventoux, dans le bassin de Carpentras, est traversée par la rivière Auzon, affluent de l'Ouvèze. Le village ancien est implanté sur une butte témoin détachée d'un plateau molassique. Il s'est récemment développé sur la plaine alluviale moderne de l'Auzon. Du fait de la rareté des crues enregistrées sur ce site de mémoire d'homme, le POS prévoyait d'étendre très largement les zones NA sur cette plaine. La catastrophe de Vaison La Romaine a incité la DDE du Vaucluse à vérifier la constructibilité de ces terrains au regard des risques d'inondation. Le diagnostic du risque pluvial a été réalisé par le CETE Méditerranée en 1993.

Analyse - Aspects particuliers

La cartographie des zones inondables a été réalisée par photo-interprétation de photographies aériennes couleurs à l'échelle du 1:20.000. Une première analyse a très rapidement montré que, en dépit de la rareté des crues connues et de l'étroitesse du lit mineur, la plaine alluviale de l'Auzon était très étendue immédiatement à l'amont et à l'aval du village de Mazan, où elle forme deux vastes bassins d'étalement des crues (figure 34).

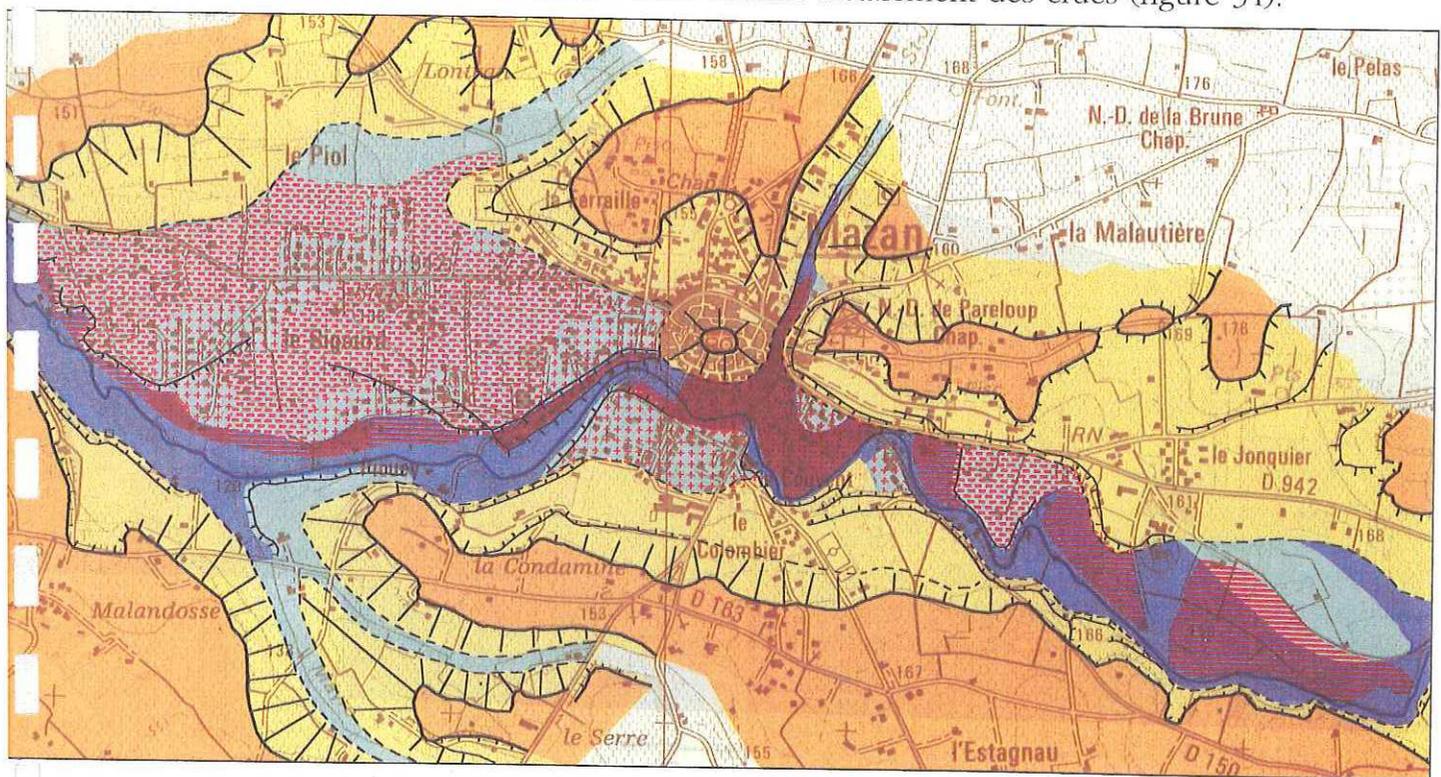


Figure 34 :
Commune
de MAZAN
Cartographie des
zones inondables
et de
l'urbanisation

	Urbanisation	
	Existante	Prévue au P.O.S
Lit moyen		
Lit majeur		

Non identifiées comme inondables par les aménageurs, ces zones plates, comprises entre l'Auzon et la route de Carpentras, ont attiré l'urbanisation depuis quelques années. Cette tendance s'est amplifiée avec l'adoption d'un POS considérant comme constructible l'ensemble de ce secteur, et faisant l'impasse sur les potentialités des collines aux formes molles qui jouxtent le village ancien au Nord.

Il apparaissait ainsi une contradiction évidente entre cette observation, les données relatives aux crues historiques et les orientations du POS.

Des éléments de réponse ont pu être apportés par l'interprétation géologique du bassin versant amont de Mazan, constitué par une dominante de roches perméables, calcaires et sableuses. Ainsi, pour des pluies d'intensité faible à moyenne, l'infiltration des eaux sur cette partie amont serait suffisante pour éviter la formation des crues au niveau de Mazan. Le lit mineur présente de ce fait une très faible section, de même que le lit moyen. Par contre, en cas de pluies très importantes et intenses, le ruissellement dominerait, provoquant des crues dont le débit (de l'ordre de 500 m³/s) serait à l'échelle de la superficie du bassin versant (140 km²). Ces crues seraient à l'origine de l'élargissement du lit majeur, particulièrement bien marqué juste à l'amont du vieux village, zone qui s'avère constituer le premier champ d'épandage de l'Auzon au pied du versant du Ventoux, à l'amorce de sa traversée des plateaux de Carpentras.

Immédiatement à l'aval du vieux village, après le resserrement lié à la butte témoin, le lit majeur s'élargit de nouveau progressivement, et se raccorde à ceux des affluents rive droite et rive gauche de l'Auzon. En rive droite, les observations de terrain (sur des parois de tranchées d'assainissement) montrent la superposition du lit majeur et d'une terrasse ancienne, formant une zone plate dont l'inondabilité est sans doute très exceptionnelle et limitée à des hauteurs d'eau et à des vitesses de courant faibles.

Ces observations ont pu être en partie confrontées à des évaluations de débit obtenues par approche hydrologique, et à des calculs de ligne d'eau effectués sur les profils les plus significatifs.

Résultats - Prise en compte

Les interprétations précédentes ont été présentées et discutées en réunions de groupe de travail réunissant, outre le CETE, le Maire et ses adjoints, la DDE et la DDAF. Elles ont été vérifiées par des élus, à partir d'observations d'inondations ayant affecté le lit moyen. Ces tests ont confirmé la précision obtenue par l'approche hydrogéomorphologique, malgré le handicap de l'échelle des prises de vues (1:20 000).

Dans ce contexte, le CETE a proposé des modifications du POS (figure 35), consistant à supprimer une partie importante des zones NA : intégralement dans le lit moyen, et partiellement en lit majeur. Elles ont surtout concerné le bassin d'étalement amont, premier champ d'expansion des crues dévalant du versant. En compensation, le lit moyen, transformé en zone ND, peut constituer un espace vert public de qualité, bordant les zones urbanisées. L'urbanisation future pourra s'étendre plus favorablement sur les collines basses, proches du vieux village.

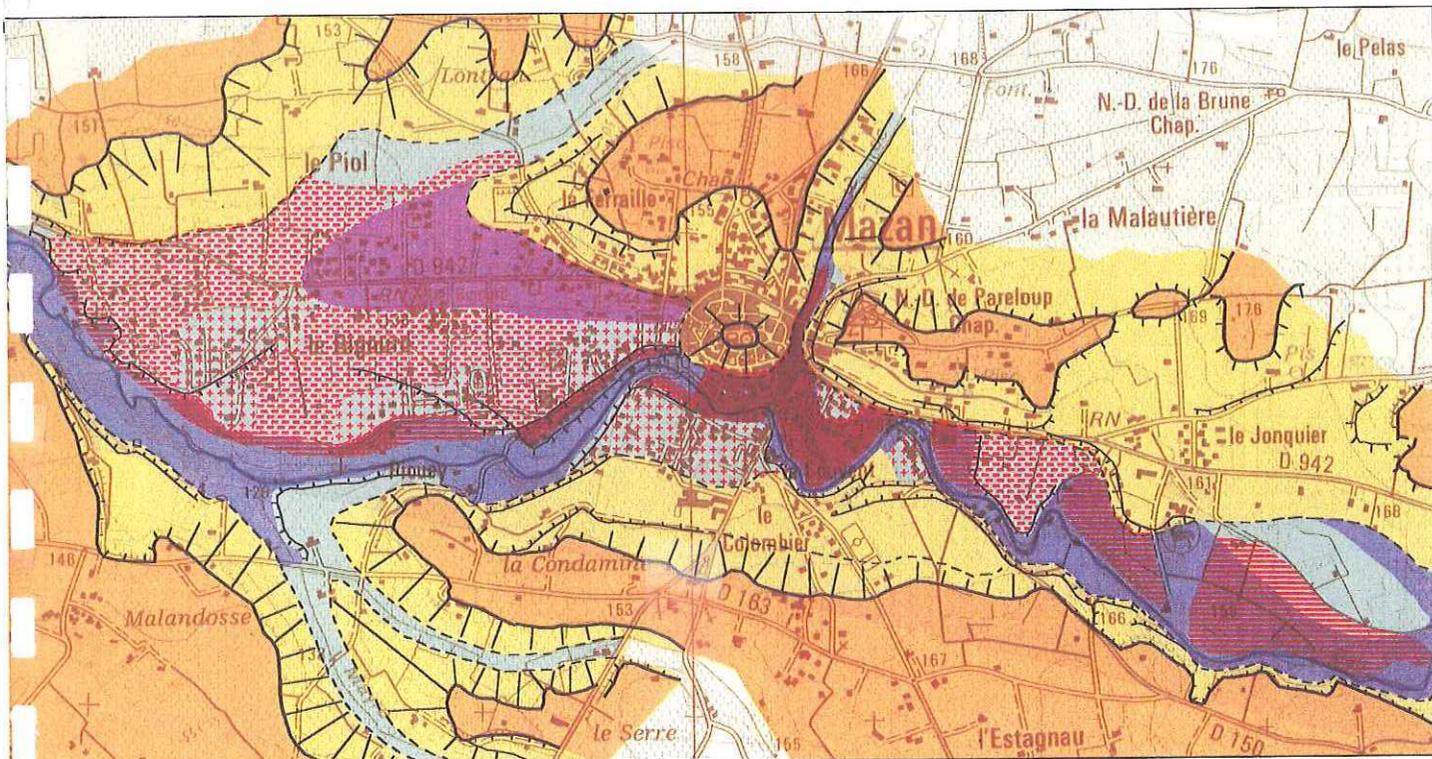


Figure 35 :
Commune
de MAZAN
Propositions de
modifications
du POS

 Zone d'aléa limité - Constructibilité admise sous conditions.
Les autres zones inondables deviennent inconstructibles.

	Urbanisation	
	Existante	Prévue au P.O.S
Lit moyen		
Lit majeur		

Les constructions existantes exposées au risque, mais dont la démolition ne s'impose pas, devront être soumises à des prescriptions spéciales relatives aux conditions d'habitation (logements interdits en rez-de-chaussée par exemple) et à un plan d'évacuation et de secours.

En décembre 1993 et janvier 1994, des crues moyennes ont provoqué des dégâts non négligeables (en particulier la destruction d'un pont). Elles sont venues confirmer la nécessité d'appliquer avec fermeté les dispositions arrêtées au cours de l'année 1993 en réunions de concertation.

La prévention du risque pourra également être améliorée dans l'avenir grâce à une démarche intercommunale de gestion des crues à l'amont de Mazan (aménagement de zones de stockage temporaire des crues, reboisements...).

Vallée de l'Eze : communes de Pertuis, La Tour d'Aygues, Grambois

Département : Vaucluse - Maître d'Ouvrage : DDE 84

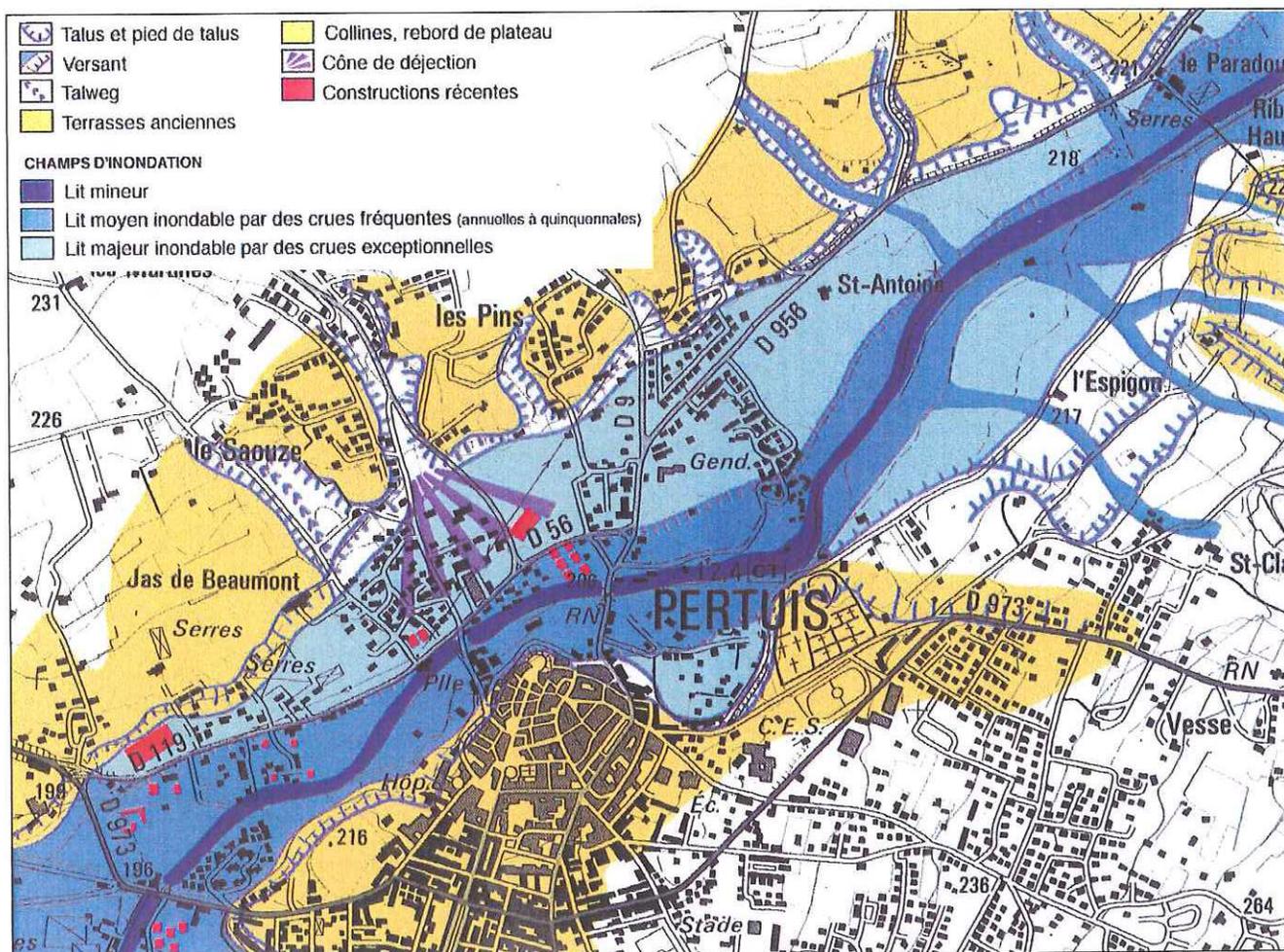
Mise en œuvre
de la méthode
hydrogéomorphologique

Données générales - Problématique

Début 1993, une étude globale d'Environnement et d'Aménagement de la Basse Durance alertait la DDE 84 sur les risques d'inondation susceptibles d'affecter les vallées affluentes. Une première cartographie géomorphologique réalisée très rapidement (une journée de travail) ayant confirmé le risque pour la vallée de l'Eze, la DDE commandait une étude portant sur les communes de Pertuis, La Tour d'Aygues et Grambois.

En juillet 1993, les résultats présentés aux élus locaux montraient l'étendue du problème, pour la commune de Pertuis en particulier, située au confluent de l'Eze et de la Basse Durance. Il était ainsi constaté que, dans la traversée de cette agglomération, la plus grande partie de la plaine alluviale moderne était déjà construite, depuis relativement peu de temps d'ailleurs (5 à 10 ans), alors que le village ancien, implanté sur une terrasse alluviale haute, était hors d'eau. Un problème similaire apparaissait à la Tour d'Aygues, à une échelle plus limitée et, accessoirement, à Grambois.

Figure 36 :
Cartographie
hydrogéomorphologique
de la commune
de Pertuis



Le 22 septembre 1993, des pluies abondantes (165 mm en 24 h sur 150 km²) provoquaient le débordement de l'Eze, occasionnant des dégâts extrêmement importants sur des lotissements récents, dont un ensemble HLM, un supermarché et... la caserne des pompiers. La plus grande partie des constructions atteintes se situait dans le lit moyen.

Analyse - Aspects particuliers

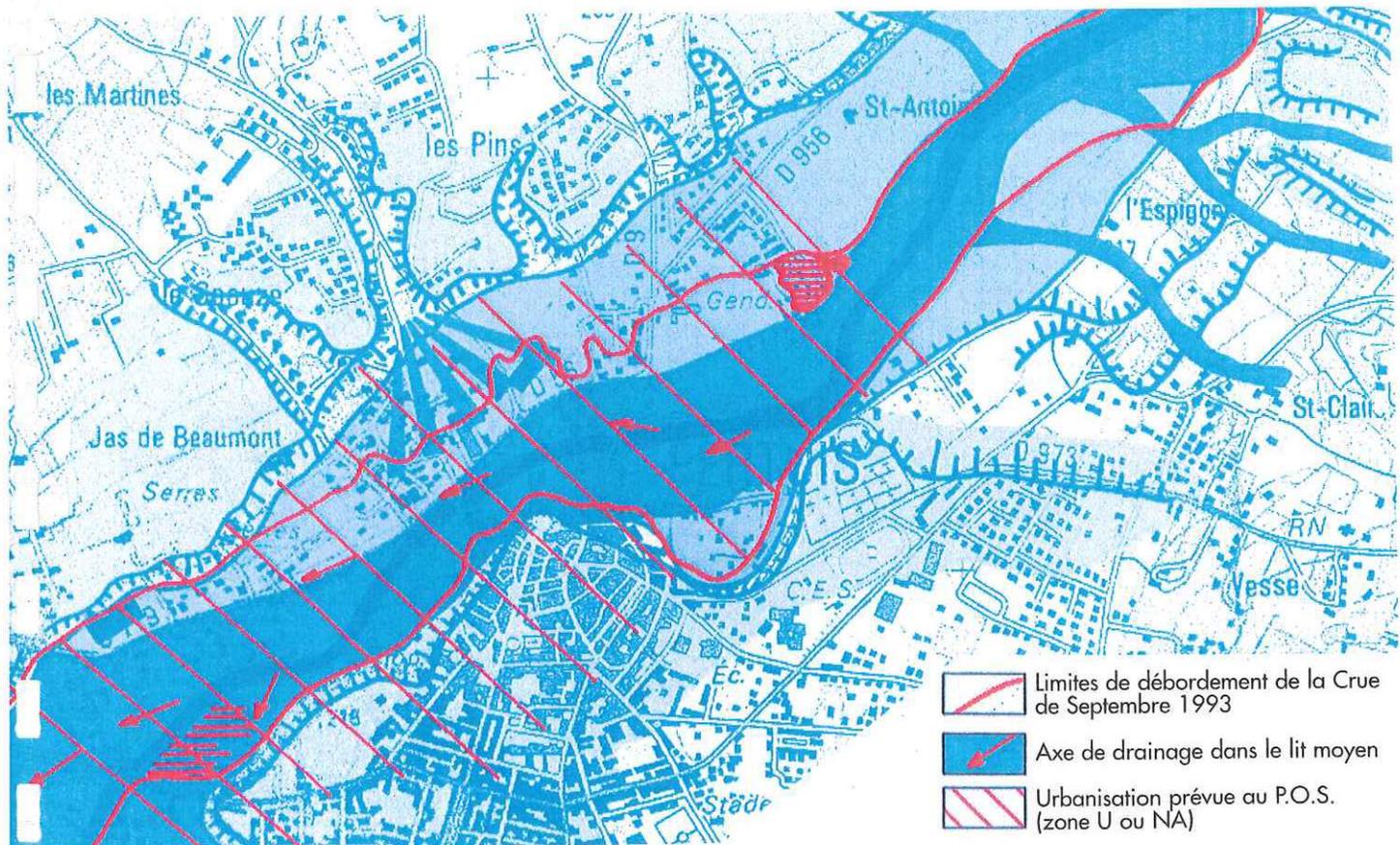
Le cas de Pertuis, qui s'avère relativement classique, est celui d'un cours d'eau bien constitué, dont les lits moyen et majeur sont faciles à cartographier par la méthode hydrogéomorphologique.

L'étude de 1993 avait pour but de délimiter les zones inondables et d'évaluer le niveau de risque auquel étaient soumis les secteurs urbanisés ou urbanisables. Elle a donné lieu à une cartographie hydrogéomorphologique réalisée à partir de photographies aériennes couleurs au 1:20 000 de 1991 (figure 36) et à une analyse des données hydrologiques historiques. Elle a aussi bénéficié des enseignements fournis par la crue de septembre de la même année dont la zone d'expansion a pu être comparée au zonage du POS (figure 37).

Résultats - Prise en compte

Figure n° 37 :
Superposition des
zones touchées
par la crue de
septembre 1993 et
des orientations
du POS

Au vue de l'ampleur des problèmes constatés, une seconde étude a été programmée par le Syndicat Intercommunal d'Aménagement de l'Eze, sous la forme plus large d'un schéma de restauration, d'aménagement et de gestion de la vallée. Elle a étendu la cartographie hydrogéomorphologique au réseau d'affluents de l'Eze et proposé une stratégie de gestion des eaux pluviales à l'échelle du bassin versant



Les résultats, confirmés par une modélisation hydraulique, montrent que le lit moyen et une partie du lit majeur doivent être considérés comme inconstruc-tibles au regard des paramètres physiques de l'inondation (hauteurs d'eau, vitesse du courant) et des seuils actuellement définis par l'Administration. Le reste du lit majeur, qui n'a pas été submergé par la crue de 1993 (quali-fiée de centennale par l'étude hydrologique), a probablement bénéficié de l'effet du recalibrage de l'Eze. On peut cependant estimer qu'il reste inon-dable pour une crue encore plus rare.

Au niveau du bassin versant, on a pu évaluer la part respective du ruissel-lement en milieu rural (viticulture dominante) et en milieu naturel, ainsi que les perturbations apportées au fonctionnement du cours d'eau par les amé-nagements hydrauliques.

Les propositions ont porté sur la modification des POS, les possibilités de gestion des eaux pluviales, ainsi que sur les travaux à engager pour proté-ger les zones construites et pour remodeler les berges et le lit moyen du cours d'eau.

Des modifications ont été apportées au POS de la Tour d'Aygues pour rédui-re les surfaces urbanisables en zones inondables. Des destructions de mai-sons particulièrement exposées sont aussi envisagées. Enfin, des travaux d'aménagement des berges et du lit moyen, de restauration des cours d'eau, d'évacuation des eaux, ou à l'inverse de leur gestion (en zone viticole et en zones NA en particulier), sont en cours de programmation.

Commune : Vaison la Romaine

Département : Vaucluse

Données générales - Problématique

Examinée d'un point de vue hydrogéomorphologique, la catastrophe de Vaison la Romaine apparaît comme un phénomène relativement simple, inscrit à l'avance dans le paysage et dans l'histoire du site.

Indépendamment des controverses relatives aux calculs de débit au niveau du Pont Romain (variant selon les estimations entre 600 et 1.200 m³/s) et à la fréquence de cette crue, qui relèvent pour une part de la recherche en hydraulique et pour une autre de la spéculation intellectuelle, des observations géomorphologiques, effectuées après l'événement, mettent en évidence les différents lits de l'Ouvèze, insuffisamment pris en compte dans les études antérieures.

Analyse - Aspects particuliers

L'approche que nous proposons s'appuie sur :

- l'hydrogéomorphologie proprement dite

Les zones récemment urbanisées en bordure de l'Ouvèze tant à l'amont qu'à l'aval du pont romain correspondent sans ambiguïté, a minima à un lit majeur, et plus certainement au lit moyen du cours d'eau, comme le montre l'interprétation de photographies aériennes antérieures à leur urbanisation.

- l'observation de l'urbanisation du site et des constructions

Les photographies aériennes anciennes montrent que l'urbanisation, implantée dans le passé sur les collines calcaires, se limitait précisément à la limite externe du lit majeur.

Au niveau du pont romain, dans un goulet rocheux provoquant la remontée des eaux à l'amont, on remarque qu'aucun local à usage d'habitation ne se trouvait au-dessous de la cote du parapet (photo n° 19). Il semble même que la submersion de ce pont, entraînant l'écoulement des eaux dans la vieille ville en rive droite, était partiellement maîtrisée grâce à des galeries ramenant les eaux à l'Ouvèze sous les immeubles situés immédiatement à l'aval du pont.

Plus à l'aval, le niveau topographique des urbanisations anciennes s'abaisse progressivement pour se rapprocher de celui du lit mineur, sans dépasser la limite indiquée ci-avant.

La même disposition se retrouve une dizaine de kilomètres à l'amont de Vaison la Romaine, sur l'Ouvèze, dans la traversée du village de Mollans.

- l'observation géomorphologique globale du secteur :

Le pont ancien de Mollans, bien que situé à l'amont du pont romain de Vaison la Romaine, présente une ouverture nettement plus importante, qui peut (sans certitude) indiquer des débits de crues exceptionnelles supérieurs (photo n° 20).

Cette observation peut être couplée avec celle de la présence, entre ces deux sites, d'une surlargeur de la plaine alluviale moderne, qui atteint 500 mètres. Ce champ d'inondation, développé sur 5 kilomètres de longueur environ,

permettait vraisemblablement un étalement de l'onde de crue, pouvant compenser les apports simultanés des affluents débouchant sur l'Ouvèze dans ce secteur.

Or, des extractions de matériaux ont eu pour conséquence le recalibrage de ce tronçon de l'Ouvèze dont la section est passée à 150 m² environ. Il est donc possible qu'une crue moyenne de l'Ouvèze amont, que l'on peut estimer à 300 m³/s au pont de Mollans le 22 septembre 1992, se soit écoulee sans écrêtement et se soit superposée aux crues des affluents, Groseau et Lauzon, qui ont fourni les apports les plus spectaculaires.

Des observations complémentaires montrent par ailleurs à quel point, dans les vallées affluentes, la gestion de l'espace agricole, telle qu'elle est pratiquée actuellement, conduit à des ruissellements torrentiels. En effet, les modes culturels liés à la viticulture se traduisent, là comme dans la vallée de l'Eze, par la disparition des haies et des murets, alors que le désherbage et la disposition des rangées de vignes dans le sens de la pente accélèrent l'écoulement des eaux vers l'axe du vallon. Ici, la mise en culture du lit majeur ne laisse subsister la végétation naturelle que dans le lit mineur qui est pratiquement obstrué. Elle facilite ainsi des écoulements en nappe qui sont repérables par des griffes d'érosion longitudinales. L'impact des remblais routiers perpendiculaires à l'axe de ces vallons, avec débordement, érosion régressive, puis rupture, complète l'effet torrentiel de ce dispositif, qui s'amplifie d'amont en aval.

La fréquence et l'intensité de ces phénomènes est attestée par des observations géomorphologiques complémentaires. Le ruisseau de Riaille, par exemple, qui s'écoule dans un petit vallon affluent de l'Ouvèze, révèle près d'Entrechaux, une sédimentation de limons d'origine molassique sur une hauteur de 3 mètres, en amont d'un remblai routier. Ce rehaussement progressif est mis en évidence par un ouvrage hydraulique vieux de quelques dizaines d'années (et au plus de 100 à 200 ans, point restant à vérifier sur archives), fonctionnant encore au pied du remblai (photo n° 21).

Cet exemple, malheureusement analysé seulement après la catastrophe de septembre 1992, confirme le parti qu'il serait possible de tirer d'approches hydrogéomorphologiques systématiques.



Conclusion

Les principes de l'approche hydrogéomorphologique des zones inondables sont posés depuis quelques années déjà. La validité de la méthode a pu être récemment vérifiée sur plusieurs sites méditerranéens grâce à des modélisations hydrauliques menées en parallèle (Gardon d'Anduze) ou à des mesures effectuées sur le terrain à la suite de crues catastrophiques, comme à Pertuis en 1993 ou à Mende en 1994. Désormais, son efficacité ne fait plus aucun doute si l'étude est conduite par un personnel qualifié. Il faut cependant rester prudent quant à ses limites et aux conditions de son utilisation. Excellent outil de diagnostic spatial des zones submersibles, elle se prête bien à une évaluation qualitative des milieux dans une perspective globale de prévention, soit à l'occasion de l'élaboration ou de la révision d'un Plan d'Occupation des Sols (POS), soit dans le cadre d'un Plan de Prévention des Risques (PPR). Mais elle doit être complétée par une démarche quantitative lorsque les enjeux territoriaux sont forts.

Au-delà de l'étude des cours d'eau principaux, cette méthode, qui fait largement appel à la photo-interprétation, s'est également montrée performante pour analyser les petits affluents, le plus souvent secs une grande partie de l'année, les vallons, qui sont de plus en plus sollicités par des constructions individuelles, ainsi que pour appréhender l'organisation du relief et retrouver des axes d'écoulement apparemment effacés par les aménagements en milieu urbain (Marseille, Aix-en-Provence, la Tour d'Aygues...).

La démarche hydrogéomorphologique permet donc, d'une façon générale, de mieux comprendre le fonctionnement des hydrosystèmes et d'adapter l'urbanisation aux spécificités des vallées, en aménageant, par exemple, des parcs urbains ou péri-urbains, voire une véritable trame verte en bordure des rivières. Elle mérite à ce titre d'être largement mise en œuvre dans l'étude des plaines alluviales, conjointement à une recherche des phénomènes historiques auprès des archives départementales, et à une évaluation simplifiée des données hydrologiques. Cette méthode, qui est aujourd'hui opérationnelle, n'est évidemment pas figée. Les prochaines expérimentations permettront d'affiner certains points de détail et de mieux préciser son rôle au niveau des bassins versants.

Canyon : gorge profonde creusée dans des roches calcaires.

Coin salé (ou biseau salé) : avancée des eaux marines à l'intérieur des terres, sous la nappe d'eau douce.

Colluvions : dépôts de pente.

Compétence : capacité du cours d'eau à transporter des sédiments.

Crue de projet : crue caractéristique, de fréquence décennale ou centennale, retenue comme référence pour les aménagements hydrauliques.

Débit à plein bord : débit maximal du lit mineur avant débordement

Dendritique : réseau hydrographique en forme d'arbre, avec branches maîtresses et rameaux (M. Derruau)

Diachronique : comparaison d'informations correspondant à des périodes différentes.

Edaphique : relatif au sol

Eluvion : partie d'un sol (d'une roche) demeurant en place après altération superficielle et lessivage de ses constituants solubles.

Gélifraction : action du gel, provoquant l'éclatement des roches sous climat péri-glaciaire.

Hétérométrique : se dit d'une formation constituée d'éléments de granulométrie variée.

Inlandsis : glacier couvrant toute une région (exemples actuels : Antarctique, Groënland).

Karstique : définit un massif calcaire affecté par des phénomènes de dissolutions (dolines, avens...)

Limnigraphique : enregistrement du niveau d'eau d'une rivière ou d'un fleuve.

Lithologie : définit la composition pétrographique d'une roche

Molasse : sédiment lacustre ou marin dû à la destruction de montagnes en cours de surrection.

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

Ordre : définit la situation hiérarchique d'un cours d'eau dans le réseau hydrographique d'un bassin versant.

Plaine : forme de relief grossièrement horizontale, d'altitude variable, dans laquelle le réseau hydrographique coule à fleur de sol.

Plateau : forme de relief grossièrement horizontale dans laquelle le réseau hydrographique est encaissé.

Plateau continental : appelé également plate-forme continentale, surface sous-marine en pente douce qui borde le continent.

Pollen : cellules sexuelles mâles des plantes à fleurs.

Physionomie : caractérisation du couvert végétal en strates arborescentes, arbustives ou herbacées

Q10-Q100 : crue statistiquement définie en fréquence de retour (10 ans et 100 ans)

Ripisilve : forêt riveraine des cours d'eau. Association à peupliers et saules en climat méditerranéen.

Structural : conditionné par la structure géologique (tectonique).

Système morphogénique : ensemble des combinaisons de processus élémentaires responsables du façonnement du relief d'une portion d'espace soumise aux mêmes agents d'érosion opérant selon des modalités identiques.

Topographie : description planimétrique et altimétrique d'une portion de surface terrestre

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- D. ALDUC, J.P. AUFFRET, G. CARPENTIER, J.P. LAUTRIDOU, D. LEFEBVRE, M. PORCHER
Nouvelles données sur le Pléistocène de la basse vallée de la Seine et son prolongement sous-marin. Bulletin d'Information des Géologues du Bassin de Paris, vol. 16, n°2, 1979. pp. 27-34.
- C. AMOROS (dir.), G.E. PETTS (dir.)
Hydrosystèmes fluviaux. Paris, Masson, 1993. 300 p. (collection écologie)
- G. ARNAUX-FASSETTA, J.L. BALLAIS, E. BEGHIN, M. JORDA, J.C. MEFFRE, M. PROVANSAL, J.C. RODITIS, S. SUANEZ
La crue de l'Ouvèze à Vaison-la-Romaine (22 septembre 1992). Ses effets morphodynamiques, sa place dans le fonctionnement d'un géosystème anthropisé. Revue de Géomorphologie Dynamique, vol 2, 1993. pp. 34-48.
- J.L. BALLAIS, A. CRAMBES
Morphogénèse holocène, géosystèmes et anthropisation sur la montagne Sainte-Victoire. Revue Méditerranée, vol 1.2, 1992. pp. 29-41.
- J.L. BALLAIS, M. JORDA, M. PROVANSAL, J. COVO
Morphogénèse holocène sur le périmètre des Alpilles, Travaux du Centre C. Jullian, n° 14, 1993. pp 515-546.
- J.P. BRAVARD, A. BOT-HELLY, B. HELLY, H. SAVAY-GUERRAZ
Le site de Vienne (38), Saint-Romain (69), Sainte-Colombe (69). L'évolution de la plaine alluviale du Rhône, de l'Age du Fer à la fin de l'Antiquité : proposition d'interprétation. Revue Archéologie et Espaces, APDCA, 1990. pp. 437-452.
- J. CHALINE
Histoire de l'homme et des climats au Quaternaire. Paris, Doin, 1985. 366 p.
- R. COQUE
Géomorphologie. Paris, A. Colin, 1993. 503 p.
- DELEGATION AUX RISQUES MAJEURS
M. MASSON - J. DE SAINT-SEINE
PER inondation du moyen Gardon d'Anduze. Apports de la cartographie géomorphologique et de la photo-interprétation pour les études de risques d'inondation. Rapport CETE - DRM, 1988. 48 p.
- M. DERRUAU
Les formes du relief terrestre. Paris, Masson, 1974. 120 p.
- M. DORIDOT, G. GARRY
Application de la télédétection à l'évaluation du risque d'inondation. Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, LCPC, n° 150-151, 1987, pp. 169-184.
- A. FAURE-SOULET, M. MASSON
Prise en compte du risque hydrologique dans les documents d'urbanisme. Marseille, IRIAM, 1992. 5 p. Rencontre Internationale du Génie Urbain, 16-17 septembre 1992
- G. GARRY
Evolution et rôle de la cartographie dans la gestion des zones inondables en France. Revue Mappemonde, n°4, 1994. pp. 10-16
- G. GARRY
Le risque d'inondation en France. Recherche d'une approche globale du risque d'inondation et de sa traduction cartographique dans une perspective de prévention. Paris, université PARIS I Panthéon-Sorbonne, 1993. 509 p. Thèse de doctorat de géographie.
- J. JOUZEL, C. LORIUS, M. STIEVENARD
Les archives glaciaires du Groenland. La Recherche, n° 25, 1994. pp. 38-45.
- G. MABILLE, F. PETIT
Influence des aménagements du cours d'une rivière de moyenne Belgique et de son bassin hydrographique sur le comportement hydrologique de la rivière. Actes du Colloque "Crues et inondations", Strasbourg, 1986, pp. 279-293.
- M. MASSON
Après Vaison-la-Romaine - Pour une approche pluridisciplinaire de la prévision et de la planification. Revue de Géomorphologie Dynamique, vol 2, 1993. pp. 73-77

M. MASSON

Essai de cartographie des champs d'inondation par photo-interprétation. Rapport CETE-STU, 1983. 47 p.

M. MASSON, P. BUQUET

Communes littorales des Pyrénées-Orientales - Prise en compte de l'environnement pour la planification et l'aménagement. Rapport DDE 66 - STU, 1990.

M. MASSON, P. BUQUET, A. FAURE-SOULET, M. BRIGANDO, J. DE SAINT-SEINE

Études de diagnostic du risque pluvial. Communes de Saint-Cyprien (Pyrénées-Orientales) en 1991, Gardanne (Bouches-du-Rhône) en 1992, Florac (Lozère) et Apt (Vaucluse) en 1993, Mazan (Vaucluse), Velleron (Vaucluse), Mende (Lozère) et Antibes (Alpes-Maritimes) en 1994, Cannes - Nice - Menton - Vence - Roquefort les Pins en 1995. Rapports financés par les Ministère de l'Environnement et de l'Équipement.

M. MASSON, A. FAURE-SOULET

Éléments de méthodologie pour la prise en compte du risque hydrologique dans la planification et l'urbanisme. Rapport CETE - STU, 1991. 51 p.

MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT
M. DESBORDES

Ruissellement pluvial urbain, guide de prévention. Paris, Documentation Française, 1994. 85 p.

MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT,
MINISTÈRE DE L'ÉQUIPEMENT
G. GARRY

La cartographie des Plans d'Exposition au risque d'inondation. Paris, Documentation Française, 1988. 115 p.

MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT,
MINISTÈRE DE L'ÉQUIPEMENT
G. GARRY, J.M. GOUFFAN, M. LE MOIGNE

Environnement et aménagement : 3 L'usage des photographies aériennes. Paris, éditions du STU*, 1992, 154 p

MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT,
MINISTÈRE DE L'ÉQUIPEMENT
G. GARRY, M. LE MOIGNE

Environnement et aménagement, cartes utiles : 1. Le recueil des données cartographiques. Paris, éditions du STU*, 1991. 176 p

MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT,
MINISTÈRE DE L'URBANISME
DÉLÉGATION AUX RISQUES MAJEURS
G. GARRY

Photo-interprétation et cartographie des zones inondables. Paris, éditions du STU*, 1985. 74 p.

PP. PIRAZZOLI

World Atlas of Holocene sea-level changes. Elsevier 58, 1991. 300 p. Oceanography series

N. ROBERTS

The Holocene, an environmental history. Oxford, Basil Blackwell, 1991. 227 p.

J. TRICART

Phénomènes démesurés et régime permanent dans les bassins montagnards (Queyras et Ubaye, Alpes françaises). *Revue de Géomorphologie Dynamique*, vol 3, 1974. pp. 99-114.

J. TRICART

Mise au point : les types de lits fluviaux. *L'information Géographique*, n° 5, 1960. pp. 210-214.

J. TRICART

La crue de la mi-juin 1957 sur le Guil, l'Ubaye et la Cerveyrette. *Revue de Géographie Alpine*, vol 4, 1958. pp. 565-627.

G. VIERS

Éléments de géomorphologie. Paris, Nathan, 1990. 224 p.

* Documents disponibles au bureau de vente de Villes et Territoires, ministère de l'Équipement, Arche de la Défense, 92055 Paris la Défense, Cedex 04.

**Sigles
Sources
photographiques**

Sigles

BRGM

Bureau de Recherches géologiques
et minières

CETE

Centre d'Études Techniques
de l'Équipement

DAU

Direction de l'Architecture
et de l'Urbanisme

DRM

Délégation aux Risques Majeurs

IGN

Institut Géographique National

SDPRM

Sous Direction de la Prévention
des Risques Majeurs

STU

Service Technique de l'Urbanisme

Sources photographiques

Pages	Photos	Types de photos	Sources	Auteurs
31	1 et 2	aériennes, 1945, 1961	IGN ¹	
33	3	sol	CETE Méd.	M. Masson
38	4	aérienne oblique	CETE Méd.	M. Costa
39	5	sol	CETE Méd.	M. Masson
41	6	aérienne		J. Cl. Houssard ²
41	7	sol	CETE Méd.	M. Masson
47	8	sol	CETE Méd.	M. Masson
48	9	aérienne, 1946	IGN ¹	
49	10	sol	CETE Méd.	H. Ernardès
52	11	sol		G. Garry
53	12	sol		G. Garry
54	13	sol	CETE Méd.	M. Masson
54	14	sol	CETE Méd.	M. Masson
55	15	sol	CETE Méd.	M. Masson
80	16	sol		G. Garry
80	17	sol		G. Garry
81	18	sol	CETE Méd.	M. Masson
94	19	sol		G. Garry
95	20	sol		G. Garry
95	21	sol		G. Garry

¹ Mission Alès - Pont-Saint-Esprit - Anduze - Uzès

² 7, rue Paul-Painlevé, 30000 Nîmes

Dépôt légal : 2^e trimestre 1996
Achévé d'imprimer : Juin 1996
ouvrage en vente aux Éditions Villes et Territoires
Arche de La Défense 92055 Paris La Défense cédex 04
Tél. : (1) 40 81 15 82

Les inondations représentent le risque naturel le plus fréquent et le plus dommageable en France. Les principaux événements de ces dernières années (Grand-Bornand en 1987, Nîmes en 1988, Vaison-la-Romaine en 1992, Sud-est méditerranéen au cours de l'hiver 1993-1994, ouest, nord et est de la France en janvier 1995 et plus récemment l'Hérault en janvier 1996) sont venus infirmer cette réalité en mettant l'accent sur l'impact à la fois économique et humain de ces catastrophes. La politique de prévention des risques naturels engagée à partir de 1982 a permis de développer une méthodologie d'études visant à mieux connaître les cours d'eau afin de prendre en compte leur fonctionnement dans l'occupation des sols. Cette réflexion a conduit à privilégier un premier niveau d'approche des phénomènes qui repose sur une **analyse hydrogéomorphologique des plaines alluviales**. Celle-ci consiste à identifier les conditions naturelles d'écoulement d'un cours d'eau en fonction de ses différents lits et à apprécier les perturbations de cet écoulement consécutives aux activités humaines dans la vallée. Cette démarche, assez peu répandue jusqu'à présent, offre pourtant de nombreux avantages: elle permet notamment une compréhension globale d'entités géographiques et d'hydrosystèmes où se dégagent plus facilement les secteurs qui pourront être consacrés à l'urbanisation et ceux qui devront être préservés comme **champs d'expansion des crues**. Par ailleurs, c'est aussi une démarche rapide et peu onéreuse dans la mesure où elle s'appuie essentiellement sur la photo-interprétation et l'étude du terrain.

Cet ouvrage présente et explicite cette méthode qui va dorénavant trouver sa place dans le cadre des **Plans de Prévention des Risques (PPR)**.

Il sera utile aux professionnels et aux étudiants de l'environnement et de l'aménagement ainsi qu'à tout public concerné par la prévention du risque d'inondation.

Les Éditions
Villes et Territoires

92055 Paris La Défense Cedex
Tél.: 40 81 15 82.

ISBN: 2-11-082148-5

Prix: 85 F.