

PHYSIO-GÉO

Géographie Physique et Environnement

(ISSN 1958-573X)

Collection "Ouvrages"

***LA MÉTHODE
HYDROGÉOMORPHOLOGIQUE
DE DÉTERMINATION DES
ZONES INONDABLES***

Jean-Louis BALLAIS, Sylvain CHAVE,

Nadia DUPONT, Éric MASSON

et Marie-Josée PENVEN

Mars 2011

LA MÉTHODE HYDROGÉOMORPHOLOGIQUE DE DÉTERMINATION DES ZONES INONDABLES

Jean-Louis BALLAIS ⁽¹⁾, Sylvain CHAVE ⁽²⁾, Nadia DUPONT ⁽³⁾,

Éric MASSON ⁽⁴⁾ et Marie-Josée PENVEN ⁽⁵⁾

(1) CÉGA - UMR ESPACE 6012, CNRS et Université de Provence, 29 avenue Robert Schuman, 13621 AIX-EN-PROVENCE cedex. Courriel : jean-louis.ballais@wanadoo.fr

(2) 31 rue des Citronniers, 34140 MÈZE. Courriel : chave.sylvain@orange.fr

(3) Laboratoire COSTEL, UMR 6554, CNRS et Université de Rennes 2, place du Recteur Henri Le Moal, 35043 RENNES cedex. Courriel : nadia.dupont@uhb.fr

(4) UFR Géographie et Aménagement, Université Lille 1, avenue Paul Langevin, 59655 VILLENEUVE d'ASCQ cedex. Courriel : eric.masson@univ-lille1.fr

(5) Laboratoire COSTEL, UMR 6554, CNRS et Université de Rennes 2, place du Recteur Henri Le Moal, 35043 RENNES cedex. Courriel : marie-josee.penven@uhb.fr

Mise en ligne : 19 mars 2011.

AVANT-PROPOS

Pour la mise au point de cet ouvrage, nous avons suivi une procédure longue et complexe, mais qui nous a semblé nécessaire afin de tenir compte du stade d'évolution de notre réflexion dans un processus commencé il y a plus de 15 ans et continué et intensifié depuis quelques années au sein du groupe de travail *Hydrogéomorphologie* du *Groupe Français de Géomorphologie*, grâce à des réunions en salle et sur le terrain à Paris, à Rennes et en Champagne-Lorraine. À partir de *Cartographie des zones inondables. Approche hydrogéomorphologique* (Marcel MASSON, Gérald GARRY et Jean-Louis BALLAIS, 1996) et des discussions et échanges nombreux et importants développés d'abord dans la perspective d'une deuxième édition de cet ouvrage, Jean-Louis BALLAIS, Sylvain CHAVE, Virginie DELORME-LAURENT et Christophe ESPOSITO ont rédigé une première version de *La méthode hydrogéomorphologique*. Le processus de mise au point de cette première version a duré plus de six mois et nécessité une dizaine de moutures successives. Ensuite, cette version a été proposée à la critique des membres du groupe de travail *Hydrogéomorphologie*. Plusieurs d'entre eux, et tout particulièrement Nadia DUPONT, Éric MASSON, Marie-Josée PENVEN et Olivier VENTO, ont enrichi de manière significative le texte. Pour d'autres, les circonstances n'ont pas permis cet enrichissement, mais nous les remercions chaleureusement pour les échanges fructueux qu'ils ont permis avant et pendant la rédaction qui, d'ailleurs, en porte la trace.

Nous tenons également à remercier Alice NÉRON, chargée de mission Inondations-Ruissellement au MEEDAM, pour ses critiques judicieuses.

INTRODUCTION

Les inondations représentent un phénomène naturel largement répandu à la surface du globe. Elles sont à la fois les catastrophes les plus fréquentes et celles qui touchent le plus grand nombre d'individus. D'après le 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 constitué plus du tiers de l'ensemble des cataclysmes recensés.

Si les conséquences des inondations sont moins graves en France que dans certains pays pauvres ou émergents, elles concernent malgré tout environ 5 millions de riverains répartis dans 19000 communes. Or, contrairement à certaines idées reçues, ce risque ne cesse de croître (seuls 4 millions étaient recensés en 1996 – M. MASSON *et al.*, 1996), en dépit de dispositions réglementaires et de travaux engagés sur les principaux cours d'eau depuis le XIX^{ème} siècle, en raison notamment de l'extension des constructions dans les plaines alluviales. Aujourd'hui, le bilan est lourd. Outre les milliers de sinistrés et de personnes affectées psychologiquement, on a dénombré plus de 250 morts en 25 ans, dont vingt-cinq pour les seules inondations du département du Var en juin 2010 (C. MARTIN, 2010). Les dommages ont atteint 2 milliards de francs à Nîmes en 1988, 1,6 milliard de francs en 1992 à Vaison-la-Romaine et dans les départements du sud de la France, 4 milliards de francs en décembre 1993 et 3 milliards de francs au début de l'année 1995 dans l'ouest, le nord et l'est. Pour les inondations les plus récentes, les crues de 1999 dans l'Aude ont atteint 533 millions d'euros ; celles en 2002 dans le Gard et les départements limitrophes, 1,2 milliard d'euros. Et pour les débordements en 2003 qui ont affecté le centre-est et le sud de la France (Drôme, Loire, Lozère et Rhône), le montant des dégâts a atteint 1,5 milliard d'euros (CGDD, 2009).

Cette situation résulte certainement en partie d'une trop grande confiance accordée par les aménageurs aux travaux de protection (digues, barrages...), mais aussi de la défaillance de la mémoire collective qui tend à oublier rapidement les grandes crues passées (au-delà de 10 à 15 ans, par exemple, dans le département du Gard) et enfin de la plus grande mobilité des hommes en France 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'État français 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'Expositions 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 depuis. Elle a conduit 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 bief homogène de cours d'eau) et qui s'appuient essentiellement sur les spécificités du terrain et les données disponibles en archive

(G. 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 (J. TRICART, 1958, 1974) qui n'ont pas toujours été suffisamment pris en considération 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 les aménagements dans les zones submersibles, à préserver les champs d'expansion des crues et à réduire de façon significative les risques.

Bien que les premières expérimentations datent des années 1980 (M. MASSON, 1983; G. GARRY, 1985), le terme d'hydrogéomorphologie n'a été adopté qu'en 1995 par M. MASSON, G. GARRY et J.L. BALLAIS pour leur publication (1996). Il diffère de l'hydromorphologie qui "consiste dans l'étude des différentes modalités de la circulation de l'eau à la surface de la terre et dans les formations géologiques qui la constituent. La figuration de la répartition et de l'extension spatiale des types de circulation de l'eau est l'objet des cartes hydromorphologiques" (J. TRICART et R. FRÉCAUT, 1983).

Une première présentation de la méthode hydrogéomorphologique de détermination des zones inondables a été effectuée il y a 15 ans (M. MASSON *et al.*, 1996). Cette méthode est basée sur une démarche naturaliste qui met en évidence les différents lits des cours d'eau, les divers aménagements 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 (hauteur d'eau et vitesse d'écoulement). 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 termes de planification et d'aménagement. Mais elle n'est pas exclusive et ne se substitue pas aux méthodes 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 l'organisation des talwegs urbanisés (Aix-en-Provence, Nîmes) 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 œuvre 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 réflexion indispensables pour la compréhension des hydrosystèmes qui devraient favoriser une meilleure prise en compte de l'écoulement des eaux dans les documents d'urbanisme et l'aménagement du territoire.

Le présent ouvrage se donne pour but de préciser les principes de la méthode hydrogéomorphologique et de ses applications, tout particulièrement à la cartographie des zones inondables, à la lumière des études et recherches développées depuis 1996 sur des centaines de kilomètres de linéaire de cours d'eau (par exemple, 492 km dans les bassins versants de l'Aude et du Gardon – C. ESPOSITO *et al.*, 2009), en montrant comment relier des informations d'ordre technique aux bases explicites scientifiques, en l'occurrence celles 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 bien que toujours en évolution, mais qui requiert, pour être mise en œuvre, des compétences en photo-interprétation et une formation spécifique à laquelle sont bien préparés les géographes et certains géologues, et qui pourrait être dispensée aux ingénieurs hydrologues ou hydrauliciens. La diffusion progressive de la méthode, y compris à l'étranger (Salvador,

Espagne, Algérie, Tunisie, Chine, Canada), permet maintenant d'imposer une rigueur plus forte que lors de la rédaction de l'ouvrage de 1996 : c'est ainsi que nous parlerons de "plaine alluviale fonctionnelle" et non pas de "plaine alluviale moderne", formulation qui avait été retenue car elle est très proche de celle des cartes géologiques. Ou encore nous abandonnerons le pléonasme "terrasse ancienne", qui avait pour but d'insister sur le caractère non fonctionnel, et donc non inondable, de ces formes.

Une raison supplémentaire de fournir un nouvel ouvrage sur la méthode hydrogéomorphologique est le besoin exprimé, par exemple au récent colloque MEDCOAST 2009 à Sochi (Russie), par des spécialistes de pays qui ne pratiquent pas cette méthode et qui souhaitent pouvoir disposer d'une présentation facile à consulter, qui intègre les apports récents de la recherche et qui puisse leur servir de base à son utilisation dans leur pays. En ce sens, l'ouvrage *Cartographie des zones inondables. Approche hydrogéomorphologique* reste plus technique que scientifique et centré essentiellement sur les besoins de la France. Cette nouvelle publication permet d'insister à la fois sur les aspects développés récemment et de présenter une synthèse des connaissances acquises ; enfin, elle fournit la version française destinée à des traductions en cours de discussion, en particulier en anglais, en chinois et en arabe.

L'ouvrage est organisé en deux parties. La première présente la méthode hydrogéomorphologique et la deuxième en présente les principales applications, en particulier la cartographie des zones inondables. Les exemples seront pris surtout en France, lieu de l'élaboration de la méthode et lieu principal de son application encore aujourd'hui, mais nous utiliserons aussi très largement des exemples empruntés à d'autres états, principalement ceux (Chine, Algérie, Tunisie) où des recherches comparables ont été menées ou sont en cours.

De nombreux cas particuliers, qui nécessitent une analyse spécifique, ne seront pas abordés dans cet ouvrage, comme les lahars caractéristiques des milieux volcaniques tels l'Indonésie, ou les débâcles glaciaires (jökulhlaups) des cours d'eau de la zone froide (Islande) ou des hautes montagnes (Kunlun en Chine), ou encore l'inondation des dépressions fermées et les seiches des lacs.

PREMIÈRE PARTIE :

LA MÉTHODE

HYDROGÉOMORPHOLOGIQUE

Partie I - Chapitre I

UNE NOUVELLE MÉTHODE

I - LA NÉCESSITÉ D'UNE NOUVELLE MÉTHODE

La nécessité de la mise au point d'une nouvelle méthode de détermination des zones inondables par les cours d'eau résulte de la difficulté accrue rencontrée par les problématiques d'inondation que révèle le coût croissant des dégâts occasionnés par les inondations en France, tout particulièrement celles de Nîmes (1988), de Vaison-la-Romaine (1992), de l'Aude et des départements voisins (1999), du Gardon (2002), dans la vallée du Rhône en 2005, à nouveau de l'Aude (2005-2006), dans le département du Var (2010) enfin. Et cela malgré des études sophistiquées, des modélisations hydrauliques appuyées sur des levés topographiques nombreux dont les résultats sont fréquemment remis en question par de nouvelles crues. Ce ne sont pas les mesures topographiques qui sont contestées, mais les débits qui sont réévalués lorsque les fortes valeurs sont intégrées dans la série de données de référence. Une part importante des difficultés provient de l'évolution de la perception des problèmes, assez clairvoyante dans le passé (au prix de tâtonnements et d'échecs), atténuée plus récemment (surtout dans la deuxième moitié du XX^{ème} siècle), réduite au constat de l'exposition dans les PER et ouverte sur la prévention dans les PPR.

Les difficultés pour mener la démarche engagée en 1982 sont multiples : décisions antérieures, habitudes, insuffisances des connaissances utilisées. C'est ainsi que les conséquences des décisions antérieures, en cours d'application, n'ont pu être neutralisées. Les habitudes, basées sur les idées de la première moitié du XX^{ème} siècle, sur le triomphe de la science et de la technique sur la nature, ont inspiré la croyance au rôle positif des aménagements hydrauliques, à l'optimisme des critères retenus : Q10 (crue décennale) puis Q100 (crue centennale), à la fausse interprétation de la notion d'occurrence (centennale = une fois tous les 100 ans) et, plus généralement, à l'oubli des solutions simples de bon sens. Les insuffisances des connaissances utilisées sont de plusieurs ordres (R. WARD, 1978) : connaissance fragmentaire des données historiques sur les crues et sur les pluies (dont certaines sont mal connues en raison de la répartition spatiale du réseau de mesures, en particulier hors des zones urbanisées), extension hasardeuse des formules de l'hydraulique des canaux et des réseaux au milieu naturel, inadéquation des analyses aux petits bassins versants. À cela s'ajoutent les variations de doctrine du côté des représentants de l'État au cours du temps ou d'un département à l'autre, l'absence de propositions alternatives par manque de connaissance du territoire qui aboutit globalement à une situation de confusion, à l'absence de références claires et incontestables, à des discours contradictoires, des contre vérités, voire à un constat d'impuissance face à la fatalité.

Cette situation nécessite une connaissance globale, la compréhension d'un système complexe dans lequel interfèrent de multiples facteurs, les uns naturels, les autres d'origine anthropique. Il faut donc replacer les cas particuliers dans leur contexte général, la modélisation hydraulique dans un modèle de fonctionnement global du milieu fluvial où

hydrologie et historique des crues soient articulés avec les caractéristiques physiques de ce milieu fluvial, non seulement actuelles, mais telles qu'elles ont évolué dans le passé et évolueront dans l'avenir. Il s'agit de tenter de comprendre le fonctionnement hydraulique et la dynamique d'évolution des plaines alluviales fonctionnelles, selon une interprétation naturaliste des phénomènes qui fait défaut dans les méthodes hydrologique et, surtout, hydraulique.

Une telle nécessité se heurte à la difficulté extrême de faire connaître des méthodes nouvelles, non conformes aux schémas de pensée dominants. C'est ainsi que, en France, la méthode hydrogéomorphologique, initiée dès le début des années 1980 (M. MASSON, 1983 ; G. GARRY *et al.*, 2002), a été tolérée à la suite de la catastrophe de Vaison-la-Romaine (G. ARNAUD-FASSETTA *et al.*, 1993 ; M. MASSON, 1993 ; J.L. BALLAIS et P. SÉGURA, 1999) et n'a été reconnue effectivement que tout récemment, à la suite des nombreuses démonstrations de son efficacité (J.L. BALLAIS *et al.*, 2005).

II - UNE LENTE ÉMERGENCE SCIENTIFIQUE ET INSTITUTIONNELLE

1) Les premières cartes qualitatives (1935-1982)

Au XX^{ème} siècle, les inondations ont retenu très tôt l'attention des pouvoirs publics français qui ont décidé la mise en œuvre d'études et de cartographies. La première génération de cartes a été réalisée sur les fleuves, puis sur les principaux cours d'eau, en application d'un décret-loi d'octobre 1935. Il s'agit des plans de surfaces submersibles (PSS), qui étaient destinés à assurer le libre écoulement des eaux et à préserver les champs d'expansion des crues. Ces cartes, dressées généralement au 1/25000, ne faisaient que reprendre les limites des plus hautes eaux connues à partir des laisses de crue, des enquêtes de terrain et de l'exploitation des photographies aériennes. À côté de ces documents qualitatifs, des études plus ponctuelles et plus fines ont cependant été menées à l'aide de modèles hydrauliques, notamment pour mesurer l'impact des ouvrages sur l'écoulement des eaux. Le développement de l'urbanisation dans les zones inondables à partir des années 1950 et des zones d'activités industrielles vers les années 1970 a provoqué une forte progression de la vulnérabilité, qu'il était devenu indispensable de maîtriser. La répétition d'événements dommageables, comme les inondations du Gers en 1977 (R. LAMBERT, 1987) ou celle de la Saône pendant l'hiver 1980-1981, a été à l'origine de la mise en place d'une véritable politique de prévention, qui s'est caractérisée par le développement de la connaissance des aléas, par la création d'outils pour assurer l'information des citoyens et par une gestion plus stricte des territoires.

2) Les débuts de la méthode hydrogéomorphologique (1983-1995)

La loi du 13 juillet 1982 (loi TAZIEFF), relative à l'indemnisation des victimes des catastrophes naturelles, a obligé à définir une stratégie des études de risques. Par réaction avec la période précédente, il a été décidé de conduire de façon systématique des études "lourdes", fondées sur des modélisations mathématiques. Toutes les communes concernées par un ou plusieurs risques naturels devaient être pourvues d'une cartographie précise qui permettrait de

réglementer l'occupation des sols. Cependant, très rapidement, ce type d'étude s'est avéré, dans un certain nombre de cas, trop long à mettre en œuvre, trop coûteux et également disproportionné par rapport aux besoins. Il était, en effet, engagé indifféremment sur de petites communes rurales sans enjeu particulier, qui disposent d'espaces en dehors des zones inondables et qui ne délivrent que quelques permis de construire chaque année, et sur des communes plus importantes, où se posaient des questions délicates d'emploi et d'habitat. Par ailleurs, au-delà des enjeux, le résultat des modèles et la précision des lignes d'eau calculées n'étaient pas toujours satisfaisants, en raison du manque d'instrumentation sur certains bassins versants et aussi quelquefois du nombre et de la qualité insuffisante des données (valeurs des précipitations, hauteurs d'eau, *etc.*) en dehors de grands cours d'eau bien connus, comme la Garonne ou la Loire. Ce sont ces mêmes limites qui ont conduit les États-Unis, dès les années 1930, à délaisser la méthode probabiliste. Cependant, à la différence de la France, on a alors défini une hiérarchie de crues : Intermediate Regional Flood, Standard Project Flood et Maximum Probable Flood, sans référence à la morphologie de la plaine alluviale fonctionnelle (R. WARD, 1978).

C'est dans ce contexte que la méthode hydrogéomorphologique a émergé et a évolué (M. MASSON, 1983 ; G. GARRY, 1985). Après plusieurs tests, cette méthode, fondée sur l'analyse du terrain par photo-interprétation et observations directes, a été appliquée à plusieurs cours d'eau, afin de comparer les résultats obtenus avec ceux issus de la modélisation : le Lot à Mende (Lozère), le Gardon à Anduze (Gard), le Lez à l'amont de Montpellier (Hérault). D'abord accueillie avec scepticisme par les ingénieurs, elle a progressivement trouvé sa place et elle a été partiellement utilisée après la catastrophe de Nîmes (Gard) pour réaliser des diagnostics sur plusieurs communes du Midi méditerranéen, dont Mende, Nice et Cannes (Alpes-Maritimes) et Saint-Cyprien (Pyrénées-Orientales), et pour rédiger le cahier des charges des Atlas des crues torrentielles dans trente départements du Sud de la France.

Afin d'améliorer les études et de pallier en partie les insuffisances d'une stricte modélisation, il a aussi été demandé, à partir des années 1980, de privilégier une première étape d'analyse qualitative. Il s'agissait de consacrer davantage de temps à la recherche et à l'exploitation des archives, afin de mieux sensibiliser l'opinion publique à des phénomènes qui n'étaient généralement pas exceptionnels et d'augmenter les séries de données statistiques.

3) Depuis 1995, la méthode hydrogéomorphologique fait partie intégrante de l'étude des zones inondables

La définition des études à réaliser dans le cadre des plans de prévention des risques naturels (PPR), institués par la loi Barnier du 3 février 1995 sur le renforcement de la protection de l'environnement, a permis de mettre à plat une stratégie d'étude des inondations qui tienne compte des expériences acquises depuis 20 ans. Dorénavant, les différentes méthodes ne sont plus perçues en termes de concurrence, mais de complémentarité. Les Ministères français de l'Équipement et de l'Environnement de l'époque ont mis au point une méthode unique d'études, qui permet d'optimiser les moyens au regard des besoins, c'est-à-dire que les études sont engagées dans un ordre logique et développées jusqu'à ce que la précision des résultats soit en accord avec les attentes et les enjeux : document d'information préventive, technique, réglementaire, *etc.* (G. GARRY et E. GRASK, 1999).

Toute étude doit donc commencer par une analyse, d'une part, de la morphologie de la plaine alluviale et, d'autre part, des crues historiques. Cette première étape se traduit par deux cartes à partir desquelles peut être établie une carte de synthèse, dite d'inondabilité. Une carte d'aléas est ensuite dressée, soit directement si les données quantitatives disponibles (en particulier les hauteurs d'eau) sont satisfaisantes, soit en recourant à une modélisation, simplifiée ou plus complexe. Ces cartes, hydrogéomorphologique, d'inondabilité et d'aléas répondent au cahier des charges des Atlas des zones inondables, financés par le Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement Durable et de la Mer (MEEDDM). Elles correspondent aussi à l'information nécessaire pour établir un autre document réglementaire français, le Dossier communal synthétique (DCS), document d'information préventive, élaboré sous l'autorité du préfet du département. Elles peuvent également faire l'objet d'un "porter à connaissance" afin d'intégrer les zones inondables dans les Plans d'occupation des sols (POS), devenus Plans locaux d'Urbanisme (PLU) du fait de la loi "Solidarité et renouvellement urbain" et de gérer les permis de construire en conséquence. Enfin, elles constituent les cartes techniques de référence du PPR. Complétées par une évaluation des enjeux, elles permettent d'en fonder le zonage réglementaire.

Ces procédures ont d'abord été pratiquées dans les régions Languedoc-Roussillon, Provence-Alpes-Côte d'Azur et Midi-Pyrénées et tendent à se diffuser dans l'ensemble du territoire français. Mais le nombre de spécialistes expérimentés capables de les appliquer reste très insuffisant, ce qui conduit à des retards et à des échecs regrettables pour la sécurité des populations et de leurs biens.

Les recherches bibliographiques effectuées en bibliothèque et par Internet, au milieu des années 1990, en langues anglaise, allemande et espagnole, n'avaient permis de déceler l'existence d'une méthode similaire qu'en Italie du Nord (F. LUINO *et al.*, 2002) et avaient montré que le terme d'hydrogéomorphologie était également utilisé par les auteurs de langue anglaise, mais pour un tout autre objet, en l'occurrence le fonctionnement hydro-biologique des milieux humides. À l'étranger, après de fortes réticences, la méthode hydrogéomorphologique a été utilisée en Algérie (DHW, 2006) et est intégrée dans la réflexion de géomorphologues espagnols (C. FERNANDEZ-LAVADO *et al.* (2007) au Salvador, J. LASTRA *et al.* (2008) dans les Asturies), canadiens (M.A. LELIÈVRE *et al.*, 2008) et tunisiens (W. CHOUARI, 2009) (*infra*, p. 128). En revanche, dans la plupart des pays, c'est toujours une méthode hydrologique hydraulique qui est utilisée.

Partie I - Chapitre II

LES PRINCIPES DE LA MÉTHODE HYDROGÉOMORPHOLOGIQUE

I - LE RÔLE FONDAMENTAL DE LA GÉOMORPHOLOGIE

La méthode hydrogéomorphologique est une méthode d'abord et avant tout géomorphologique, appliquée aux vallées et plaines alluviales. C'est une méthode naturaliste qui s'inscrit dans l'évolution récente de la géomorphologie fluviale. Elle se situe dans la grande tradition de l'étude des hydrosystèmes fluviaux initiée par W.M. DAVIS (1899), puis reprise par L.B. LEOPOLD *et al.* (1964). Cependant, elle se distingue de ces derniers par la problématique du risque qui conditionne son application : son but n'est pas une connaissance théorique du fonctionnement des cours d'eau, mais plutôt la détermination et la cartographie des zones inondables par ces cours d'eau afin de permettre la prévision et la prévention de l'aléa inondation. Les études qui suivirent, notamment celle de S.A. SCHUMM (1977), décrivent précisément l'organisation spatiale des cours d'eau. Toutefois ces études se concentrent essentiellement sur l'évolution du profil en long et ses conséquences sur le débit liquide et l'érosion fluviale. Le schéma de S.A. SCHUMM permet de définir la zone amont, qui est une zone de fourniture associée à une ablation et une mobilisation des sédiments, une zone de transfert, qui est une zone de transit et de dépôt partiel de sédiments, et une zone aval, qui est une zone d'accumulation de sédiments. Dans la continuité de ce schéma, la méthode hydrogéomorphologique réside dans le fait de définir les différentes formes qui constituent la plaine alluviale tout le long de ce profil, c'est-à-dire dans l'étude du profil en travers de la plaine alluviale et ensuite de son évolution vers l'amont et vers l'aval.

Outre l'étude de la morphologie et de la sédimentologie de ces modelés, elle s'intéresse également à des indices, des critères complémentaires d'inondabilité comme la végétation naturelle et tout un ensemble de caractéristiques d'origine anthropique.

1) La morphologie

Les bases conceptuelles de l'hydrogéomorphologie sont simples mais ne correspondent pas au découpage reconnu généralement, en particulier par l'école anglo-saxonne, qui ne distingue que *channel* et *flood plain*.

En effet, à l'intérieur de la plaine alluviale fonctionnelle des cours d'eau, deux formes de lits fluviaux ont été précocement reconnues en domaine tempéré (L.A. LEOPOLD *et al.*, 1964 ; M. DERRUAU, 1962) : le *channel* ou lit mineur et la *floodplain* ou lit majeur. Le concept de *channel* est rapidement apparu très fécond grâce aux possibilités de modélisation qu'il permettait (P. BIROT, 1981) et il a ainsi fourni une base pour des centaines d'articles de

dynamique fluviale aux États-Unis, en Grande-Bretagne, en Allemagne, en Espagne, en France, *etc.*

Mais la *floodplain* est restée longtemps négligée car non modélisable : sa complexité a été mise en évidence dès 1978 par J. LEWIN, puis par A. GUPTA (1983) et par G.C. NANSON et J.C. CROKE (1992). En France, c'est l'irruption de la problématique des risques naturels initiée par la loi TAZIEFF du 13 juillet 1982 qui a provoqué un nouvel intérêt pour les formes de la vallée fluviale susceptibles d'être inondées (M. MASSON *et al.*, 1996 ; G. GARRY *et al.*, 2002 ; J.L. BALLAIS *et al.*, 2009). La précision des études demandées (échelles du 1/20 000 au 1/5000) a mis en évidence de nouveaux objets géomorphologiques, deux nouvelles formes : le lit moyen (M. MASSON *et al.*, 1996 ; J.L. BALLAIS *et al.*, 2009), puis le lit majeur exceptionnel (S. CHAVE, 2003 ; S. CHAVE et J.L. BALLAIS, 2006).

Les cours d'eau d'ordre 3 à 4 (N. STRAHLER, 1952) minimum, dans la zone de transfert (S.A. SCHUMM, 1977) se caractérisent donc en général par l'existence de trois (parfois quatre) lits : le lit mineur, le lit moyen et le lit majeur (ordinaire et exceptionnel) (Fig. 1). L'ordination de N. STRAHLER est celle qui est la plus communément utilisée et, pour cette raison, elle servira de base ici, bien que son utilisation soit parfois difficile.

a. Les lits

Les lits sont des unités spatiales comprises entre deux talus continus et qui constituent les surfaces d'écoulement des eaux. Ils sont hiérarchisés en fonction des débits à écouler, depuis l'étiage jusqu'à la crue exceptionnelle.

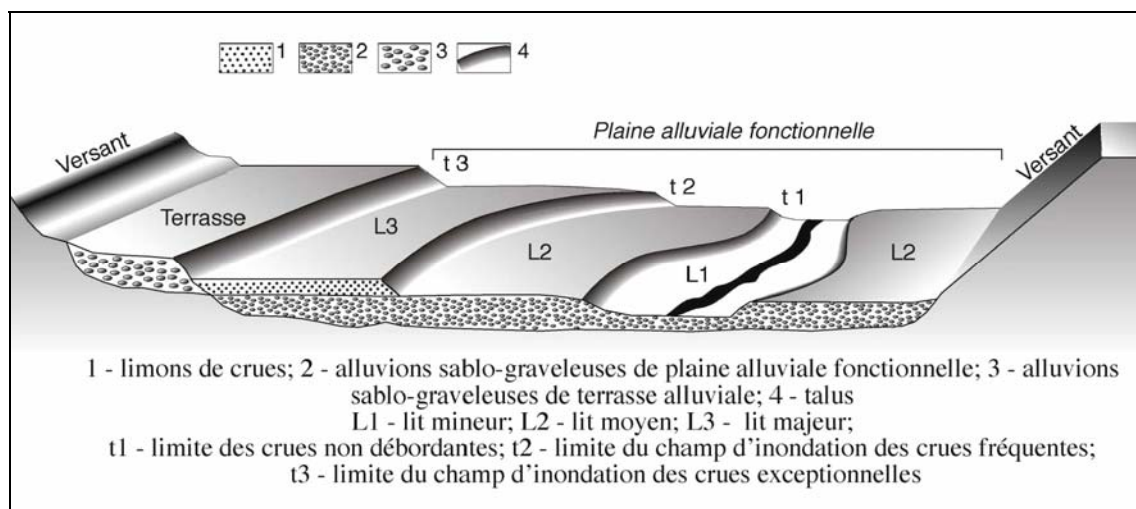


Figure 1 - Relations topographiques entre les différents lits.

[Source : J.L. BALLAIS *et al.*, 2005, modifié]

Chaque lit constitue une unité morphologique et correspond globalement à un plan sensiblement horizontal en section transversale et faiblement incliné de l'amont vers l'aval.

Le lit mineur (low flow bed ou low flow channel) montre des formes actives de la dynamique fluviale, en évolution fréquente. Les différents types de bancs (bars) qu'on y

observe, dont les "croissants d'alluvionnement" (scroll bars), peuvent fournir des indications sur le sens de migration du chenal.

Le lit mineur est peu ou pas colonisé par la végétation aérienne, en raison de la fréquence de l'écoulement des eaux (Photo 1). La principale rugosité est donc constituée par celle des alluvions du fond du lit, d'une part, et par celle des berges, d'autre part. Ainsi le courant est-il 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 (J. TRICART, 1960).



Photo 1 - Le lit mineur du Nil en Haute-Égypte.

[Cliché : J.L. BALLAIS, 2000]

Les photos 2 à 4 montrent différentes configurations du lit mineur, en zone tempérée océanique (Photo 2), en zone aride continentale (Photo 3) et en domaine méditerranéen (Photo 4).

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. Les berges 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. 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.

Des berges bien marquées, abruptes et continues, indiquent des débits à pleins bords fréquents et efficaces, qui façonnent activement le lit mineur. C'est le cas des rivières dont les crues se produisent régulièrement, comme celles de la zone tempérée et, en particulier, de la France tempérée océanique, de l'Adour à la Somme (J. TRICART, 1960) (Photo 2).



Photo 2 - Le lit mineur de la Charente à Saintes.
[Cliché : J.L. BALLAIS, 1999]



Photo 3 - Le lit mineur de la Daxigu He dans les Tianshan (Xinjiang, Chine).
[Cliché : J.L. BALLAIS, 2005]



Photo 4 - La Droude (Gard) en crue non débordante le 15 mars 2002.

[Cliché : J.L. BALLAIS, 2002]

Le lit d'étiage ou chenal d'étiage, étroit, est compris à l'intérieur du lit mineur dans lequel il forme souvent des sinuosités.

La différence entre le lit d'étiage et le lit mineur est souvent peu nette et se marque peu dans la topographie (Photo 5). 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. En zone sèche (domaines méditerranéen, sahélien et soudanien), il est utilisé par l'écoulement des basses eaux et peut s'assécher totalement. Son profil longitudinal est alors particulièrement irrégulier, avec des seuils qui forment de petits rapides à la traversée des bancs d'alluvions, et des mouilles, mares stagnantes à très faible écoulement, riches en algues et en insectes (Photo 5).



Photo 5 - Chenal d'étiage de la Fitzroy River à Geikie Gorge (Western Australia, Australie). [Cliché : J.L. BALLAIS, 2005]

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 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.

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.

Le lit moyen (intermediate flow channel) présente globalement une surface horizontale ou subhorizontale (Photos 6 et 7), mais elle offre, dans son détail, une topographie très irrégulière. Cette irrégularité est due à la présence de chenaux de crue formés par les courants qui proviennent du lit mineur. Ils peuvent rester en eau très longtemps et former une lône (ox-bow lake) (Photo 8). Ces chenaux sont tantôt des formes d'ablation, toujours en incision, et tantôt des formes en cours de comblement. Les dynamiques alluviales possibles sur cette surface sont donc multiples. Des courants très rapides peuvent circuler dans les chenaux et d'autres, beaucoup plus lents en dehors de ces chenaux (V. DELORME-LAURENT, 2007). Lors de la montée des eaux, des écoulements préférentiels peuvent utiliser ces chenaux.



Photo 6 - L'Amou Daria en Ouzbékistan. [Cliché : J.L. BALLAIS, 2003]

De gauche à droite : chenal d'étiage, lit mineur, talus, lit moyen à ripisylve.

Le lit moyen est fréquemment occupé par les hautes eaux. Au contraire du lit mineur, il se caractérise par un étalement des eaux sur une profondeur beaucoup plus faible et, généralement, par une rugosité importante, due à la végétation et à sa morphologie souvent irrégulière. 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



Photo 7 - L'Asse à Oraison (Alpes-de-Haute-Provence). [Cliché : J.L. BALLAIS, 1994]

De gauche à droite : lit mineur, chenal d'étiage, talus, lit moyen à ripisylve.



Photo 8 - Chenal de crue dans le lit moyen du Karakash Darya à Kawak (Xinjiang, Chine).

[Cliché : M. WULAMU, 2008]

sensiblement plus élevé dans le lit mineur que dans le lit moyen. Ainsi la compétence est plus faible dans le lit moyen et la différence avec le lit mineur est d'autant plus grande que la végétation est dense dans le lit moyen. Seules les particules fines, généralement des argiles et

des limons, voire des sables, peuvent transiter dans le lit moyen (ce sont les limons de débordement des géologues) sous climat tempéré. Il y a donc, en surface, un contraste granulométrique très important entre le lit moyen et le lit mineur. En revanche, les chenaux comportent fréquemment des galets (Fig. 2). La zone de passage du lit mineur au lit moyen est ainsi une zone de discontinuité granulométrique (*infra*, p. 42) car le courant, brusquement ralenti, abandonne une partie de sa charge au franchissement des berges (M. MASSON *et al.*, 1996). C'est ce qui permet la construction des levées alluviales ou bourrelets de berges, surtout en rive convexe (*infra*, p. 40).

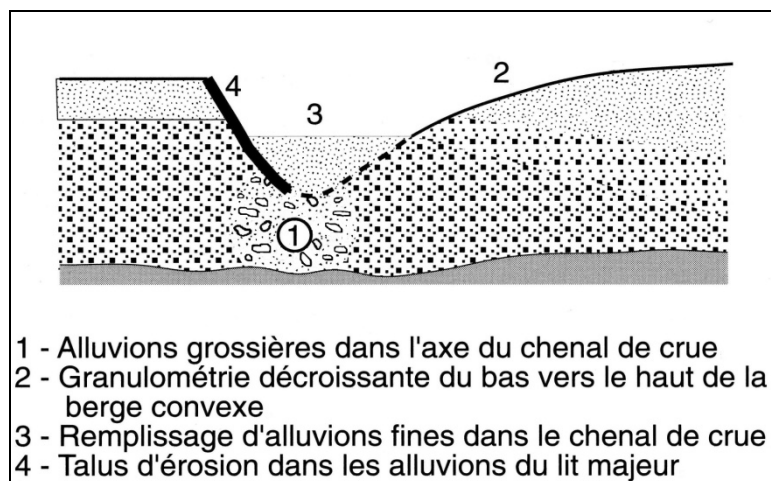


Figure 2 - Coupe d'un chenal de lit moyen.

[Source : M. MASSON *et al.*, 1996, modifié]

En domaine méditerranéen, il présente souvent les principaux éléments de la morphologie du lit mineur, mais répétés parfois plusieurs fois en profil transversal, et fragmentés en tronçons se recoupant les uns les autres à la suite des crues successives. La topographie, réactivée partiellement à chaque nouvelle crue, y apparaît assez confuse (M. MASSON *et al.*, 1996).

Le lit moyen peut également se présenter sous la forme d'une simple banquette plus ou moins large qui ressemble alors beaucoup au lit majeur (Photos 6, 7, 9, 10).

Les lits moyens font par ailleurs (ou ont fait) encore très souvent l'objet d'extractions de matériaux (ce qui est également vrai pour les lits mineurs), de la construction d'ouvrages hydrauliques et de défrichements (Photo 9).

La transposition en anglais du concept de lit moyen n'est pas une chose aisée (J.L. BALLAIS *et al.*, 2009). Comme nous l'avons dit précédemment, cette forme est sujette à controverse puisqu'elle n'existe pas sur tous les cours d'eau (Photos 11 et 12), contrairement aux lits mineur et majeur. Il semble que cette forme soit rattachée habituellement au *channel* ou *active channel* (H. PIÉGAY et S. STROFFEK, 2000) et ne soit pas reconnue comme une unité distincte. Elle est pourtant séparée du lit mineur par un talus et n'a pas les mêmes caractéristiques, tant d'un point de vue granulométrique, topographique ou d'inondabilité. Il serait donc bon de définir un terme plus précis que *channel* afin de faire ressortir ces



Photo 9 - Le Nil en Haute-Égypte. [Cliché : J.L. BALLAIS, 2000]

Lit mineur au premier plan, talus et lit moyen cultivé au second plan, talus et lit majeur cultivé à l'arrière-plan.



Photo 10 - Lit moyen du Karakash Darya au sud de Bostan Tograk (Xinjiang, Chine).

[Cliché : M. WULAMU, 2008]

différences. C'est pourquoi nous proposons de définir le lit mineur comme l'équivalent du *low flow bed* ou *low flow channel* (M.F. ROCHE, 1986) et le lit moyen comme étant l'*intermediate flow channel*.

Le lit majeur ordinaire, en profil transversal, est une surface horizontale ou subhorizontale séparée du lit moyen par un talus. Sa morphologie est en général beaucoup plus simple que celle d'un lit moyen (Photos 11 et 12). Il n'est recouvert que par les crues les moins fréquentes et les courants qui atteignent cette surface sont généralement faibles. La lame d'eau est donc bien moins importante que dans les lits moyen et mineur, ce qui ne permet pas, en général, le transport d'éléments grossiers. D'une façon générale, le lit majeur est constitué d'éléments fins dus au dépôt des matières en suspension (MES) en fin de crue (Photo 13). Ces dépôts font de cette surface une unité très fertile et très recherchée par les agriculteurs.



Photo 11 - Le Loir (lit mineur et lit majeur) à Saint-Avit-les-Guespières (Eure-et-Loir).

[Cliché : J.L. BALLAIS, 2006]



Photo 12 - Le lit majeur de l'Ognon à Ollans (Doubs).

[Cliché : J.L. BALLAIS, 2005]



Photo 13 - Dépôts de la crue de 2002 dans le lit majeur du Gardon d'Anduze.

[Cliché : J.L. BALLAIS, 2002]

Le lit majeur peut être affecté par de légères dépressions qui correspondent à des chenaux (Photos 14 et 15). Comme ceux du lit moyen, ils constituent des axes préférentiels d'écoulement des eaux de crue (Photo 15), la dynamique y est plus forte et la granulométrie parfois plus grossière.

La limite externe du lit majeur permet de définir la courbe enveloppe des plus grandes crues passées, c'est-à-dire la limite de l'extension maximale des crues, que nous avons définie comme la limite de la zone inondable. En d'autres termes, la limite externe du lit majeur constitue également la limite entre la plaine alluviale fonctionnelle et l'*encaissant*, terme proposé par R. LAMBERT, et qui désigne l'ensemble des terrains, des formations, des roches, quelles que soient leur genèse et leur nature lithologique, dans lesquels s'entaille cette plaine alluviale fonctionnelle. La limite externe du lit majeur est donc bien la limite qu'il faut connaître avec le maximum de précision. Ainsi il s'agit bien du *lit majeur géomorphologique* (G.C. NANSON et J.C. CROKE, 1992 ; C. COSANDEY, 2003 ; G. BELTRANDO, 2004) qui doit être soigneusement distingué du lit majeur hydrologique (J.P. BRAVARD et F. PETIT, 1997 ; L. ASTRADE, 2000). En effet, les hydrologues et les ingénieurs définissent le lit majeur hydraulique comme la surface proche du lit mineur qui est inondée une fois pendant une période de retour donnée, sans tenir compte du caractère alluvial ou non de cette surface. C'est ce que nous appelons *lit majeur hydraulique*, car l'histoire géomorphologique ne joue pas de rôle dans sa définition. En revanche, nous définissons le lit majeur géomorphologique comme la forme alluviale largement constituée d'alluvions en lits horizontaux (Photo 12), proche d'un lit mineur, séparée de ce lit mineur par des berges (et souvent un lit moyen) et construite par des sédiments transportés par l'actuel cours d'eau. Sa sédimentation spécifique est favorisée par l'éloignement par rapport au lit mineur et par le rôle d'obstacle perméable joué par la ripisylve, quand elle existe, qui couvre le lit moyen.

À l'intérieur du lit majeur également, des traces de morphogenèse sous forme de sillons et de dépôts d'alluvions peuvent s'observer à la suite du passage d'une crue. Elles mettent en



Photo 14 - Chenaux dans le lit majeur de l'Ognon à Bouhans-les-Montbozon (Haute- Saône). [Cliché : J.L. BALLAIS, 2005]



Photo 15 - Chenaux dans le lit majeur de la Dives en crue à Dives-sur-Mer (Calvados).
[Cliché : J.L. BALLAIS, 2006]

évidence la structure des écoulements; effacée au bout de quelques mois ou de quelques années selon les cas. Elles peuvent également révéler des mésoformes en grande partie effacées et qui sans elles seraient passées inaperçues.

La grande incidence des crues de forte magnitude en termes d'aléas, a pu être mise en évidence à la suite des crues de novembre 1999 dans l'Aude (S. CHAVE, 2002 ; CÉTÉ Méditerranée, 2003). L'examen des photographies aériennes prises quelques jours seulement après la crue montre en effet des traces de morphodynamisme très intense, comparable à celui de catastrophes antérieures, comme la crue du Gardon de 1958, ou postérieures comme celle du Pô en 2000 (Photos 16 et 17) ou celle de 2002 également sur le Gardon. Ces traces ont montré dans l'Aude, où plusieurs cours d'eau présentent un style méandrique, une tendance très nette à la formation de courants qui ont court-circuité les méandres à leur racine. Sur le terrain, elles se révèlent formées par des "jets de rives" à granulométrie parfois sableuse (Photo 18), mais souvent très grossière (Photo 19), ou par des rainures (Photos 16 et 17). Dans les deux cas, ces traces sont le produit de courants à vitesse très élevée due au recouplement du méandre qui accroît fortement la pente hydraulique. Même sur les tronçons rectilignes, lors d'une crue exceptionnelle comme celle de l'Ouvèze et de ses affluents le 22 septembre 1992 (G. ARNAUD-FASSETTA *et al.*, 1993), d'importants dépôts de matériel grossier peuvent se produire sur le lit majeur (Photos 20 et 21) en même temps que de très fortes ablations (Photo 22).



Photo 16 - Vallée du Pô : sillons et dépôts de la crue de 2000.

[Cliché : J.L. BALLAIS, 2002]

Cette constatation conduit à reconsidérer de manière totalement nouvelle les niveaux d'aléas habituellement attribués aux lits majeurs. Ainsi, soumis à un aléa faible à moyen dans le cas d'une crue rare, un lit majeur peut être affecté par un aléa fort à très fort dans le cas d'une crue exceptionnelle.

Ces exemples illustrent la difficulté d'une étude exhaustive des facteurs qui contribuent à la constitution d'un aléa hydrologique. La méthode hydrogéomorphologique, si elle ne peut prétendre à une quantification précise des niveaux d'aléas, apporte ainsi des possibilités nouvelles de prévision du fonctionnement des crues quelle que soit leur magnitude.



Photo 17 - Vallée du Pô : chenaux creusés pendant la crue de 2000.
[Cliché : J.L. BALLAIS, 2002]



Photo 18 - "Jet de rive" sur le lit majeur de l'Auzon à Mazan (Vaucluse) lors de la crue de 1994. [Cliché : J.L. BALLAIS, 1994]



Photo 19 - "Jet de rive" sur le lit majeur de l'oued el Kheroua (Tunisie centrale).

[Cliché : J.L. BALLAIS, 2005]



Photo 20 - Lit majeur de l'Ouvèze à l'aval de Vaison-la-Romaine (Vaucluse) après la crue du 22 septembre 1992. [Cliché : J.L. BALLAIS, 1992]



Photo 21 - Lit majeur du Groseau au Crestet (Vaucluse) après la crue du 22 septembre 1992. [Cliché : J.L. BALLAIS, 1992]



Photo 22 - Marmite creusée par la crue du 22 septembre 1992 dans le lit majeur de l'Ouvèze à l'aval de Vaison-la-Romaine (Vaucluse). [Cliché : J.L. BALLAIS, 1992]

Si, en général, le talus externe du lit majeur est suffisamment net pour constituer une limite indiscutable de ce lit, il existe des cas moins simples qui seront détaillés parmi les problèmes de cartographie (*infra*, p. 123). L'imprécision spatiale due à ces situations a été parfois qualifiée de zone d'incertitude (G. GARRY *et al.*, 2002), qu'il ne faut pas confondre avec le lit majeur exceptionnel.

Le lit majeur exceptionnel est une forme qui a été reconnue et décrite très récemment pour la première fois (S. CHAVE, 2002).

Dans un nombre limité de cas, observés actuellement sur le Gardon dans le Gard (H. AIMON, 2003), l'Orbieu dans l'Aude (S. CHAVE, 2003), le Tech dans les Pyrénées-Orientales (R. MUSSOT, 1992 ; J. BÉCAT et R. GUAL, 1992), la Cèze dans le Gard (Photo 23), le Meu en Ile-et-Vilaine, le Cavu en Corse du Sud (F. LAVIGNE et C. LECOEUR, sous presse), probablement le Bayon dans les Bouches-du-Rhône (O. TOUABI, 2004), mais aussi en Tunisie (Photo 24) (J.L. BALLAIS *et al.*, 2007) et en Australie (Chamberlain River – Western Australia –, Finke, Palm Creek et Ross Rivers – Northern Territory) en particulier, un lit majeur exceptionnel s'interpose entre le lit majeur ordinaire et la plus basse terrasse finipléistocène ou holocène. Les plus larges, les moins discontinus parmi ces lits majeurs exceptionnels, et donc les mieux développés, se situent en Tunisie (Photo 19) où, de plus, ils sont bien datés des inondations exceptionnelles de 1969 (J.L. BALLAIS, 1973 ; N. FEHRI, 2003) et de 1973.



Photo 23 - Lit majeur exceptionnel de la Cèze à Saint-André-de-Roquepertuis (Gard).

[Cliché : J.L. BALLAIS, 2004]



Photo 24 - Lit majeur exceptionnel de l'oued Batha (Tunisie centrale).

[Cliché : J.L. BALLAIS, 2005]

Afin de caractériser provisoirement les lits majeurs exceptionnels, nous ne prenons pas en compte ceux qui ont été seulement observés (sur le Tech en France, sur la Chamberlain River en Australie) ou dont le statut n'est pas incontestable (sur le Bayon et sur le Meu – *infra*, p. 65 – en France, sur l'oued Fessi-Tataouine en Tunisie, sur la Finke River, la Palm Creek et la Ross River en Australie aride) et nous ne retenons donc que les dix exemples de lits majeurs exceptionnels qui ont été étudiés et échantillonnés en France : quatre sur l'Orbieu (Les Carbenats, Le Faubourg, La Mourède et Les Trois Chemins), un sur le Gardon (Saint-Geniès-de-Malgoirès), un sur la Cèze (Saint-André-de-Roquepertuis), et en Tunisie : un sur l'oued Chaâl-Tarfaoui (Bordj La Gare), un sur l'oued Batha (route) et deux (Mezzouna, voie ferrée) sur l'oued Leben. Ils se trouvent tous dans la zone de transfert de cours d'eau d'ordre 4 à 6 et plus, de régime méditerranéen (sous climat méditerranéen subhumide à aride), de style méandrant à subrectiligne, dans un bassin argileux ou marneux (parfois à l'amont ou à l'aval de gorges) occupé surtout soit par des cultures peu couvrantes (vigne et oliviers), soit par la steppe. Ce type de combinaisons de facteurs naturels et de facteurs anthropiques est fréquent dans le bassin méditerranéen (par exemple, en France, dans les bassins versants du Vidourle, de l'Orb et de l'Hérault) et pourrait servir de guide pour la recherche et la reconnaissance de nouveaux cas de lit majeur exceptionnel.

La limite entre les deux lits majeurs est un talus peu élevé, en pente forte.

Le lit majeur exceptionnel, tout comme le lit majeur ordinaire, est une surface horizontale ou subhorizontale constituée d'une formation fine, en général limono-argileuse (*infra*, p. 42). Comme il se situe en position topographique supérieure, les courants qui l'affectent sont très faibles et les crues qui peuvent le submerger sont très rares. Pour les cas français, la chronologie de ces crues est encore évidemment très mal connue, tout juste est-il possible de préciser que celui du Tech a été inondé en 1940 (R. MUSSOT, 1992), celui de Saint-Geniès-de-Malgoirès, sur le Gardon d'Anduze, en 1958 et en 2002 (H. AIMON, 2003), ceux de

dernières terrasses pléistocènes qui ne sont pas généralisées à tous les cours d'eau, mais qui ont pu être mises en évidence tout autour de la Méditerranée. En France, c'est notamment le cas de l'Ouvèze à Vaison-la-Romaine (G. ARNAUD-FASSETTA *et al.*, 1993), du Bayon à l'est d'Aix-en-Provence (J.L. BALLAIS et A. CRAMBES, 1992 ; O. TOUABI, 2004) et de l'Argent-Double à Rieux-Minervois (V. LAURENT, 2003) (Fig. 3). Ces terrasses alluviales holocènes, de granulométrie généralement fine, occupent donc une altitude intermédiaire entre la dernière terrasse alluviale pléistocène et le lit majeur. Ce ne sont plus des formes fonctionnelles : elles n'appartiennent plus à la plaine alluviale fonctionnelle, mais à l'encaissant. Du point de vue de l'inondabilité, mais aussi de la rigueur des concepts géologiques et géomorphologiques, les formulations du type "terrasse inondable" ou "basse terrasse inondable", dont il serait facile de faire un vaste florilège, y compris dans la littérature anglo-saxonne, doivent donc être proscrites.

Dans de rares cas, on a pu observer l'inondation de terrasses alluviales pléistocènes (S. CHAVE, 2003 ; C. ESPOSITO *et al.*, 2009). On a pu démontrer que cette submersion provenait de situations très spécifiques, liées le plus souvent au passage de la terrasse alluviale pléistocène sous la plaine alluviale fonctionnelle (Cèze à Bagnols-sur-Cèze, Gardon à Remoulins) ou à la surélévation de la ligne d'eau par des aménagements d'aval (Aude à Villedaigne) (*infra*, p. 78).

D'amont en aval, de la zone d'ablation à la zone d'accumulation, les conditions du fonctionnement hydrogéomorphologique du cours d'eau se modifient en raison de l'évolution des débits et de la pente. Il est donc nécessaire d'envisager les modifications de la plaine alluviale fonctionnelle dans la zone d'ablation et dans la zone d'accumulation.

- La zone d'ablation

En amont d'un bassin versant, la pente longitudinale du cours d'eau et celles, transversales, des versants, sont fortes. Elles déterminent un écoulement très rapide des eaux de pluie. Les crues sont plus fréquentes et déplacent des volumes d'eau moins grands que dans la zone de transfert. Les vitesses fortes accroissent la capacité d'ablation et la compétence du cours d'eau (S.A. SCHUMM, 1977).

Les apports de matériaux, qui proviennent de l'ablation des versants, tout particulièrement de l'érosion des sols, s'effectuent à la fois longitudinalement, par transport alluvial, et transversalement par transport colluvial. Ils créent, de ce fait, des formes très différentes de celles observées dans la zone de transfert, comme des cônes alluviaux, des glacis et des vallons en berceau (M. MASSON *et al.*, 1996).

Les têtes de bassin versant se caractérisent par des cours d'eau d'ordre 1 à 2, de dimensions modestes : ils ne dépassent pas quelques kilomètres de linéaire et leurs aires de drainage sont inférieures à 20 km² en général (J.L. BALLAIS *et al.*, 2009). Ils ont été très négligés par les études de dynamique fluviale ; en conséquence, les résultats présentés ici, qui s'appuient essentiellement sur l'étude de quelques dizaines de ruisseaux et de 100 à 200 kilomètres de linéaire ainsi que sur des observations ponctuelles plus dispersées en France (départements des Bouches-du-Rhône, de l'Ardèche, de Haute-Saône, du Loir-et-Cher et de l'Indre-et-Loire), doivent être considérés comme provisoires. Nous négligerons le type très particulier constitué par les roubines (J.L. BALLAIS, 1996) et laisserons provisoirement de côté celui des vallons secs qui sera repris (*infra*, p. 127) à propos des problèmes de cartographie.

Les faibles dimensions des cours d'eau et de leurs bassins versants sont caractéristiques des parties amont, la zone d'alimentation des cours d'eau. Celles-ci ont pour conséquence :

- d'induire un lit mineur étroit et peu entaillé en conditions pas trop perturbées,
- l'absence généralisée d'un lit moyen, sauf très localement, tout à l'aval,
- un profil transversal marqué du lit majeur, rarement horizontal,
- l'absence de sursédimentation (*infra*, p. 80) à une exception près, sur le Riaou, sous-affluent du Gardon, à Aigremont (Gard),
- l'absence de terrasses alluviales, ce qui rend plus difficile l'identification de la limite de la zone inondable.

Ces caractéristiques montrent la prédominance des apports transversaux, mêmes faibles, issus des versants, sur la dynamique fluviale, longitudinale. Cette faiblesse de la dynamique fluviale facilite considérablement les interventions humaines (H. PIÉGAY *et al.*, 2003) au moyen de technologies largement diffusées (tractopelle, bautoir à lame, *etc.*) : rectification, calibrage, surcreusement de 1 à 2 m du lit mineur qui, le plus souvent, n'a plus aucune caractéristique naturelle. Ces interventions lourdes, récentes et non synchronisées viennent s'ajouter à la pratique séculaire du *vallat* qui consiste à rejeter le cours d'eau sur l'un des bords de son vallon où lui a été creusé un nouveau lit, souvent bordé de merlons. À l'occasion des grandes crues, le cours d'eau vient alors reprendre sa place dans le talweg, provoquant des dégâts dans les aménagements qu'on y avait implantés.

En amont, ou lorsque le cours d'eau principal est profondément encaissé dans un massif rocheux, la confluence des affluents d'ordre 2 à 3 s'effectue par l'intermédiaire de cônes alluviaux à profils longitudinal et transversal convexes (Photos 25 et 26). Ils traduisent la prédominance des apports latéraux dus aux torrents affluents en forte pente sur la capacité d'évacuation du cours d'eau principal à pente plus faible (Fig. 4).



Photo 25 - Cône alluvial à Luz-Saint-Sauveur (Hautes-Pyrénées).

[Cliché : J.L. BALLAIS, 1992]



Photo 26 - Cône de Stovepipe, Death Valley (Californie, USA).

[Cliché : J.L. BALLAIS, 1993]

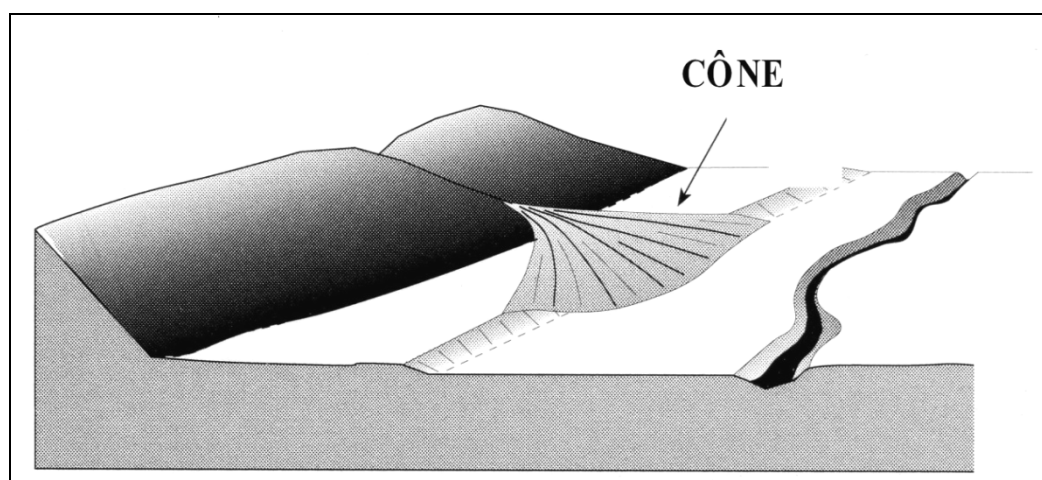


Figure 4 - Cône alluvial.

[Source : M. MASSON *et al.*, 1996, modifié]

Du fait de la dynamique torrentielle, souvent encore spectaculaire, particulièrement en France dans les Alpes-du-Sud, ces cônes sont très exposés aux risques d'inondation (J. TRICART, 1958, 1974). Leur forte charge solide provoque un déplacement très fréquent du lit mineur qui passe d'une génératrice du cône à une autre. Le recalibrage de ce lit à un moment donné n'en est que plus dangereux comme l'a montré en 1996 la catastrophe de Biescas en Espagne (S. WHITE *et al.*, 1997).

Les cônes alluviaux, 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 (M. DERRUAU, 1974). À la limite, deux cônes alluviaux qui s'accumulent en face l'un de l'autre peuvent barrer la vallée, provoquant ainsi la formation d'un lac (Fig. 5), comme ce fut probablement le cas pour le lac Saint Laurent sur la Romanche à Bourg d'Oisans (département de Savoie) de 1207 à 1219, bien que la cause exacte du barrage soit encore discutée (J.P. LEGUAY, 2005, p. 15).

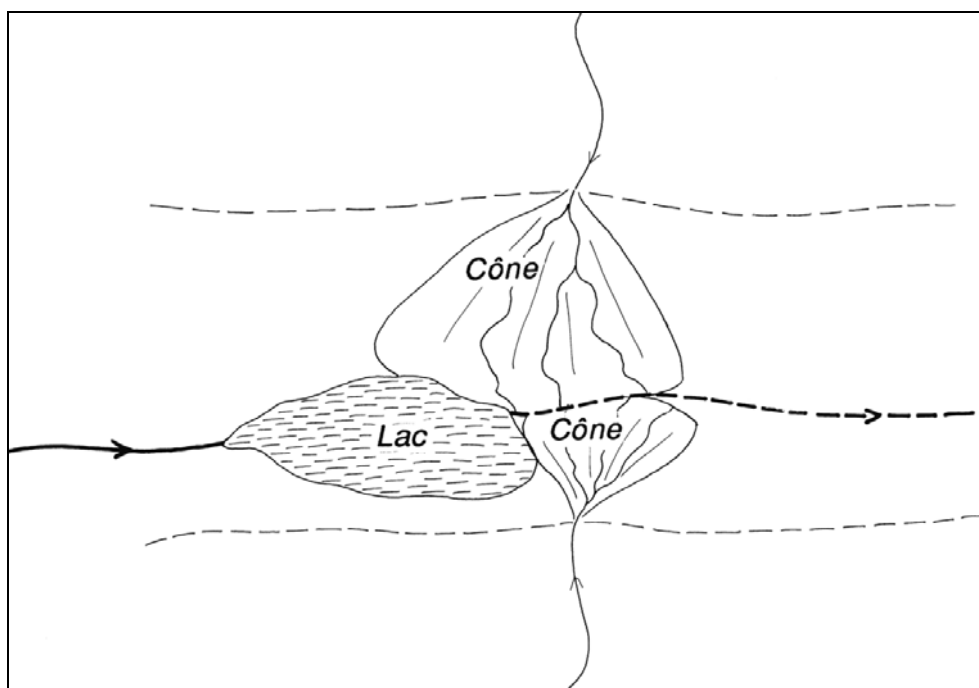


Figure 5 - Schéma de cônes alluviaux barrant l'écoulement du cours d'eau principal.

[Source : M. MASSON *et al.*, 1996, modifié]

Les glacis et épandages, formes concaves, très régulières transversalement, affectent uniquement les roches meubles du substratum. À la différence des cônes alluviaux, très ubiquistes, ils se localisent surtout dans les domaines climatiques à saison sèche marquée (Photo 27) où ils constituent une des formes fossiles pléistocènes les plus caractéristiques des piémonts (bibliographie dans J.L. BALLAIS, 1981). Des *glacis* et des *épandages fonctionnels* ont été observés récemment dans le Midi méditerranéen français, sur des affluents du Gardon et de la Cèze à Saint-Chaptes, Cardet (Photo 28) et Saint-André-de-Roquepertuis (Fig. 3) ou de la Braune (affluent du Gardon) à La Calmette. L'encaissant marneux est modelé en versants de pente concave qui se rattachent soit au sommet de la basse terrasse pléistocène (Cardet, La Calmette, Saint-André-de-Roquepertuis), soit directement au lit majeur du Gardon (Saint-Chaptes) et qui portent une couverture limoneuse épaisse de plusieurs décimètres. Dans ces cas, les cours d'eau, d'ordre 1 à 2, se réduisent à un lit mineur étroit, subrectiligne et sans affluents, plus ou moins entaillé dans le glacis ou l'épandage. À l'occasion de fortes précipitations comme à l'automne 2002, les glacis et épandages sont parcourus par des *écoulements en nappe*, peu épais, provenant à la fois du débordement des lits mineurs et de l'organisation du ruissellement sur eux-mêmes.



Photo 27 - Glacis pléistocène du piémont méridional des Aurès (Algérie).

[Cliché : J.L. BALLAIS, 1975]



Photo 28 - Glacis fonctionnel de Cardet, vallée du Gardon d'Anduze (Gard).

[Cliché : J.L. BALLAIS, 2010]

Dans des roches meubles, telles que des marnes, argiles, sables, molasses, les apports latéraux, très importants dans les vallons en berceau des cours d'eau d'ordre 1 à 2, comme la Touloubre à Venelles (Bouches-du-Rhône) ont tendance à masquer les formes d'origine fluviale (J.L. BALLAIS *et al.*, 2007). La largeur du lit mineur paraît souvent sous-dimensionnée par rapport à celle du vallon, y compris dans le cas de gorges (affluents et sous-affluents de la Courme, bassin versant du Vidourle, département du Gard (Fig. 3). Le raccordement entre l'étroite plaine alluviale fonctionnelle et le versant correspondant devient progressif, concave, et donc difficilement décelable (Fig. 6).

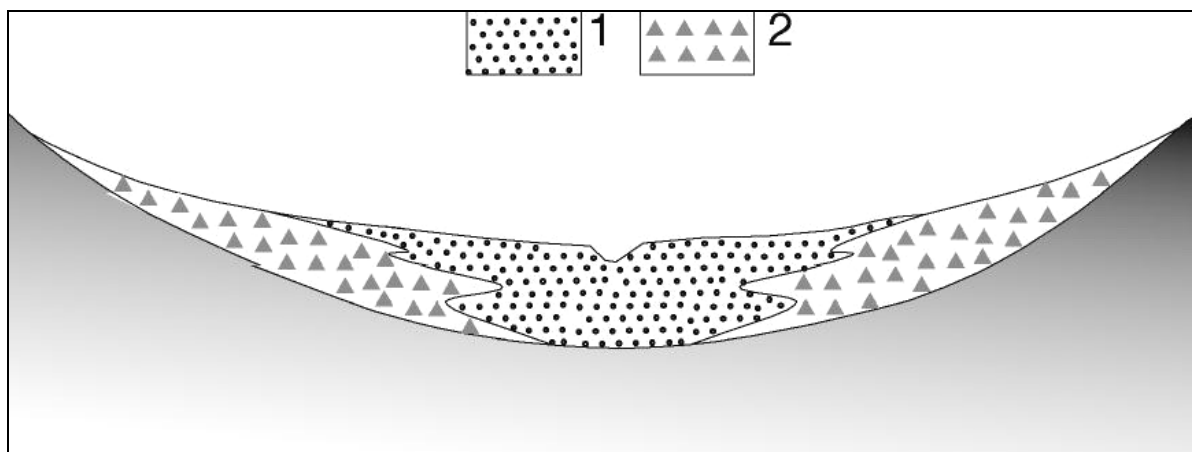


Figure 6 - Vallon en berceau. [Source : J.L. BALLAIS *et al.*, 2005]

1 : alluvions. 2 : colluvions.

Par ailleurs, la pente longitudinale forte privilégie les écoulements rapides dans l'axe de l'étroite plaine alluviale, qui ne comporte qu'un lit majeur peu large, à pente transversale marquée. On ne peut alors distinguer du point de vue hydrogéomorphologique qu'une seule zone d'inondation qui confond lits moyen et majeur, aux limites imprécises (Photo 29).



Photo 29 - Vallon en berceau : la combe Vertoillot à Cognières (Haute-Saône).

[Cliché : É. MICHEL, 2009]

- La partie moyenne : la zone de transfert

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 d'alluvions grossières, effectué par charriages successifs, est supérieur à la capacité de remise en mouvement et de transport du cours d'eau, qui alluvionne et dont le débit de crue se fractionne en filets qui contournent les bancs (ou bars) alluviaux. Il se crée alors un lit en tresses qui regroupe lit mineur et lit moyen et comprend un grand nombre de chenaux d'écoulement (Photo 30). L'ensemble de ces chenaux, séparés par des bancs, constitue alors un vaste lit moyen, qui occupe presque toute la largeur de la plaine alluviale fonctionnelle (G.C. NANSON et J.C. CROKE, 1992). Dans cette configuration, tout point de cette plaine, même éloigné du chenal principal, peut être atteint par les crues de fréquences élevées. Les crues débordant latéralement, au travers d'une ripisylve de densité moyenne, déposent des alluvions fines qui constituent un lit majeur de largeur croissante vers l'aval et croissante dans le temps. C'est ce qu'on observe sur plusieurs cours d'eau torrentiels des Alpes-du-Sud (Bléone, Asse, Verdon, Aigues), quand leur vallée est suffisamment ample (J. TRICART, 1960).



Photo 30 - Tressage sur la Bléone au Mousteret (Alpes-de-Haute-Provence).

[Cliché : J.L. BALLAIS, 2006]

- La partie aval : la zone d'accumulation

Lorsque le lit majeur occupe la plus grande partie de la plaine alluviale fonctionnelle, les écoulements se rassemblent peu à peu dans un chenal unique. La concentration de la puissance de la rivière favorise la formation de méandres qui, par migration progressive, balayent sur une longue période la totalité de la plaine alluviale fonctionnelle.

La décroissance de la vitesse du courant provoque la sédimentation des matières en suspension, de granulométrie argilo-limoneuse, qui s'accumulent dans le lit majeur et dans le lit moyen. Le dépôt de limons à proximité du lit mineur forme un bourrelet de berge plus ou moins marqué (Fig. 7 et Photo 31). Lorsqu'une accumulation se produit également 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. Il s'agit alors d'un lit en toit (Fig. 7), caractéristique d'un certain nombre de plaines alluviales côtières telles les plaines du Roussillon et la basse vallée de

l'Aude en France, la vallée du Pô en Italie ou de nombreux deltas de l'Asie des Moussons, par exemple. Cette situation est éminemment inquiétante, dans la mesure où le débordement par delà le bourrelet peut s'accompagner d'une *avulsion*, formation d'un nouveau lit mineur qui emprunte l'axe d'une gouttière latérale. Dans le cas des formes qui résultent de dynamiques d'accumulation, il n'est pratiquement pas possible de déterminer une limite entre le bourrelet de berge et la dépression formée par le lit majeur (Photo 31).

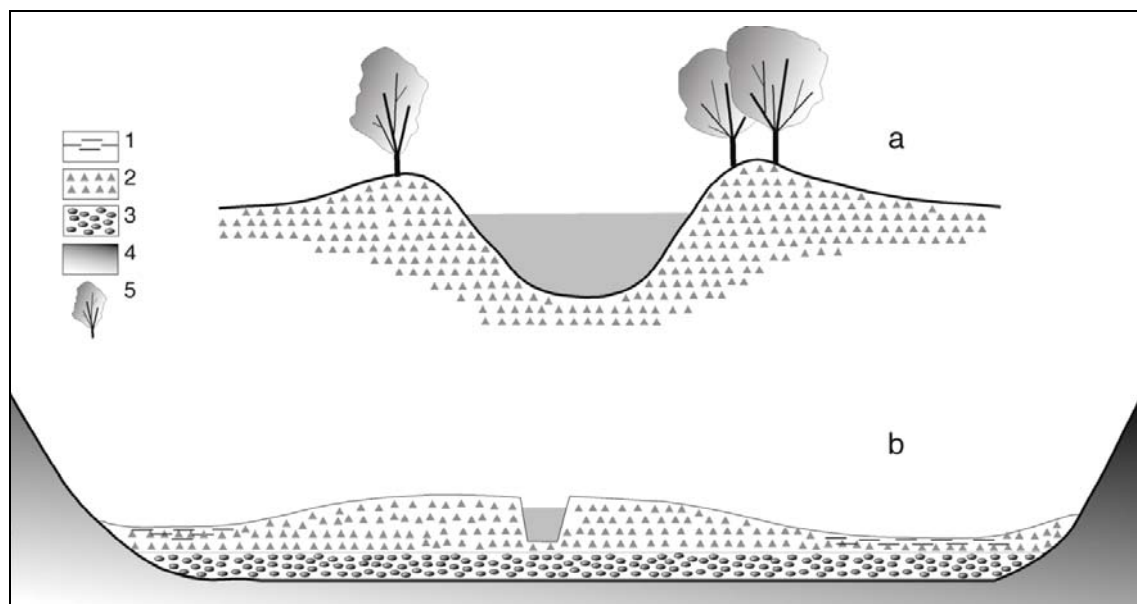


Figure 7 - Bourrelets de berge (a) et lit en toit (b). [Source : J.L. BALLAIS *et al.*, 2005]

1 : argiles. 2 : limons. 3 : galets. 4 : substrat. 5 : ripisylve.

À proximité des embouchures dans l'océan, les crues peuvent dépasser la cote du rebord sommital de la plus basse terrasse alluviale pléistocène à l'endroit où la nappe alluviale du Pléistocène supérieur, qui a été mise en place selon un niveau de base très inférieur à l'actuel, passe sous la plaine alluviale fonctionnelle, comme sur la Cèze à Bagnols-sur-Cèze. À la faveur de l'accumulation alluviale qui se produit dans le lit majeur, elles peuvent même déborder sur des terrasses alluviales plus anciennes et donc plus élevées de plusieurs mètres, comme le Gardon à Remoulins en 2002 (C. ESPOSITO *et al.*, 2009).

2) La sédimentologie

Dans le cas général, la granulométrie des formations alluviales déposées par le cours d'eau dépend, en un point donné, de la compétence du courant, directement liée à sa vitesse. Elle varie ainsi globalement, à l'échelle de la vallée, de l'amont vers l'aval et, en un même lieu, 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'aux lits majeurs caractérisés par le dépôt des particules les plus fines (M. MASSON *et al.*, 1996).

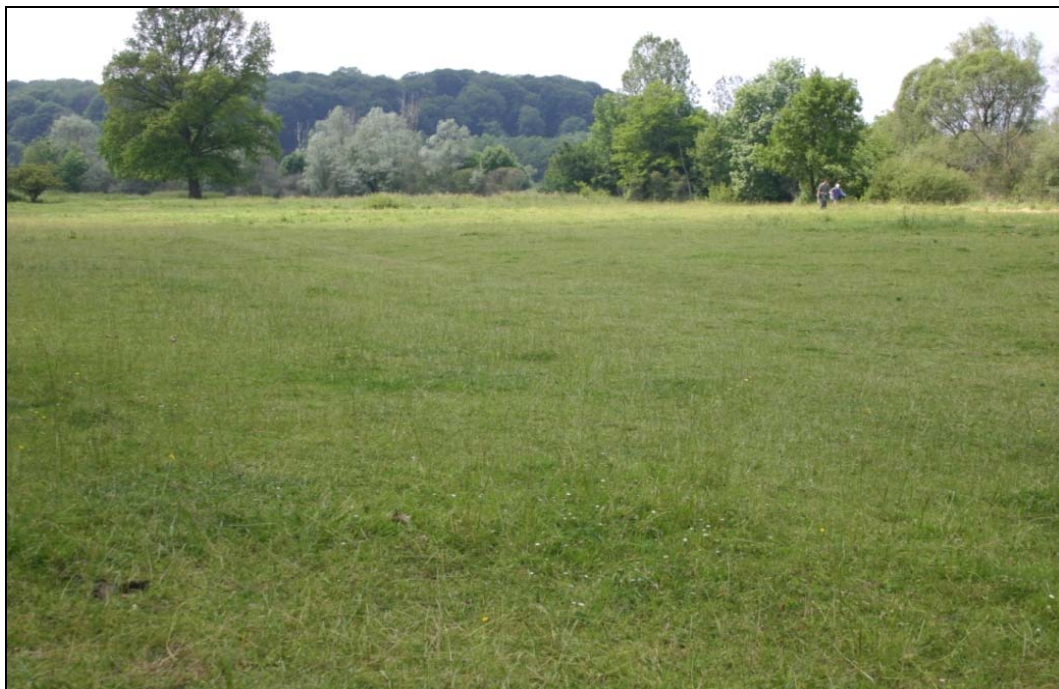


Photo 31 - Bourrelet de berge en rive gauche de l'Ognon à Pont-sur-l'Ognon (Haute-Saône). [Cliché : J.L. BALLAIS, 2005]

Dans le lit mineur, le courant est relativement rapide et sa compétence élevée, ce qui permet le transport de particules grossières comme les galets (voir Photos 3 et 7).

Le lit moyen, nous l'avons vu (*supra*, p. 20), du fait de sa topographie irrégulière et du fonctionnement intermittent de ses chenaux de crue, montre fréquemment de fortes variations granulométriques. Cependant, et même sur des cours d'eau à fort dynamisme comme la Cèze, le lit moyen peut présenter un profil de sable grossier très homogène (Photo 32) ou ne contenir qu'une très faible proportion de ballast comme sur le Karakash Darya au Xinjiang (Chine) (Fig. 8).

Sur l'Argent-Double (affluent de l'Aude), le taux de ballast, au niveau de Peyriac-Minervois, peut être supérieur à 72 % (Fig. 9), ce qui témoigne d'un hydrodynamisme très fort. De même, ce fort hydrodynamisme est confirmé par l'étude des histogrammes de fréquences cumulées de la fraction sableuse qui montre une prédominance des sables grossiers avec un grain moyen de 890 μm (V. LAURENT, 2003) (toutes les analyses granulométriques ont été réalisées au Laboratoire de l'UFR des Sciences Géographiques et de l'Aménagement de l'Université de Provence).

Cependant, il est à noter que la granulométrie qui constitue cette unité est aussi largement fonction de ce que peut fournir le substrat. En effet, si le substrat est constitué d'une roche qui, comme la molasse (J.L. BALLAIS *et al.*, 2009), ne peut se fragmenter qu'en éléments fins, il ne peut pas fournir d'éléments grossiers et le lit moyen est donc constitué de particules fines comme c'est le cas à Pertuis (Vaucluse) sur l'Èze.

Les alluvions qui constituent le sommet du lit majeur ordinaire regroupent les granulométries les plus fines, des argiles aux sables. Ce sont les mieux connues grâce à plus



Photo 32 - Coupe du lit moyen de la Cèze à Saint-André-de-Roquepertuis (Gard).

[Cliché : J.L. BALLAIS, 2005]

de deux cents analyses effectuées par F. DELORME (2004) (Fig. 10 – voir également la figure 24), K. LAHMAR (2004), V. DELORME-LAURENT (2007), A. ZAGHDOUD et M. WULAMU (2010).

Par exemple, le lit majeur de l'Ouvèze à Roaix, dans le Vaucluse, se caractérise par l'absence de ballast, sauf très localement sous forme de galets de quelques centimètres de long, et par la prédominance des argiles et des limons (Fig. 10).

Le lit majeur du Karakash Darya à Egresay montre les mêmes caractéristiques (Fig. 11). Par rapport au lit moyen tout proche (Fig. 8) il ne comporte plus de ballast, il est moins sableux (41,64 % contre 61,92 %) et plus limono-argileux (58,36 % contre 37,44 %).

Les alluvions qui constituent le sommet des lits majeurs exceptionnels ressemblent beaucoup à celles qui occupent la même position dans les lits majeurs ordinaires. Malgré leur découverte récente et leur petit nombre, elles commencent à être bien connues (H. AIMON, 2003 ; S. CHAVE 2003 ; V. DELORME-LAURENT, 2007 ; J.L. BALLAIS *et al.*, 2009 ; A. ZAGHDOUD, sous presse). Le cas le plus intéressant est celui de l'Orbieu (affluent de l'Aude) qui présente quatre exemples de lit majeur exceptionnel (S. CHAVE, 2003). La comparaison des caractéristiques granulométriques des deux lits majeurs au lieu-dit "Les Trois Chemins", à l'aval de Ferrals-les-Corbières, en rive gauche, montre que le grain moyen des sables est identique, très fin (0,15 mm). De même, la courbe cumulée de la fraction sableuse est identique et tend vers l'hyperbole (Fig. 12). Pour le lit majeur exceptionnel, le taux de ballast est de 0,4 %, celui de sable est de 30 % et celui de limons-argile est de 69,6 %. Pour le lit majeur ordinaire, on constate que le taux de ballast varie peu (1,5 %), mais que la proportion de sables est beaucoup plus importante (63 %) et qu'à l'inverse, la proportion de limons-argile est nettement plus faible (35,6 %). Dans les deux cas, le sédiment est donc très

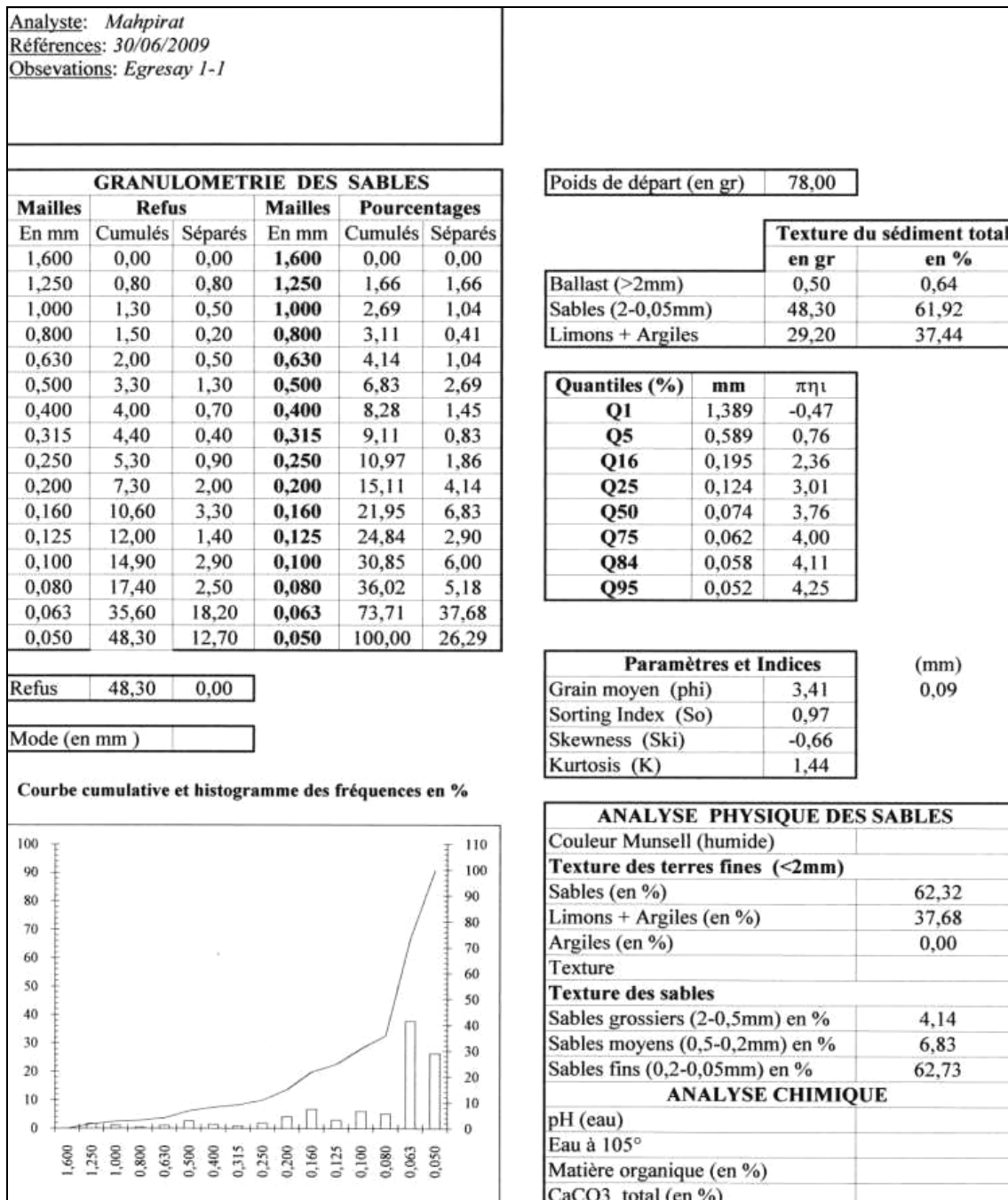


Figure 8 - Caractéristiques granulométriques du lit moyen du Karakash Darya à Egresay (Xinjiang, Chine).

[Source : M. WULAMU, 2010]

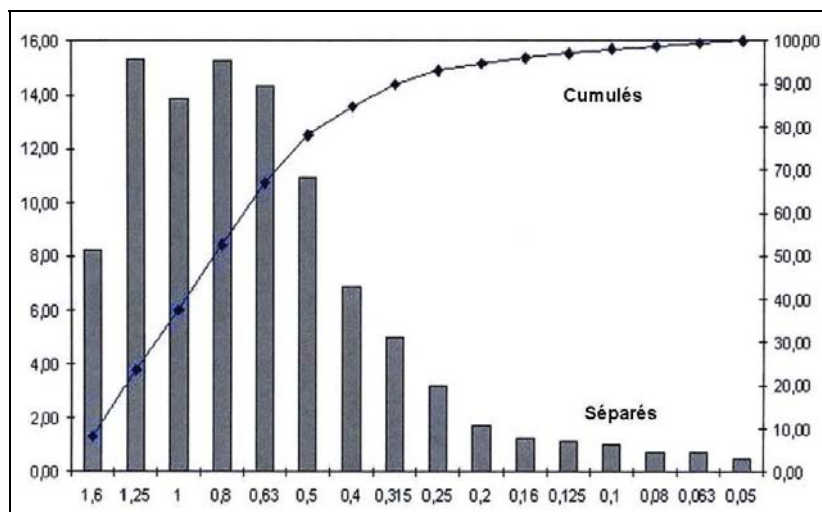


Figure 9 - Distribution granulométrique de la fraction sableuse du lit moyen de l'Argent-Double à Rieux-Minervois (Aude).

[Source : V. LAURENT, 2003]

Axe des abscisses :
diamètre en millimètres.

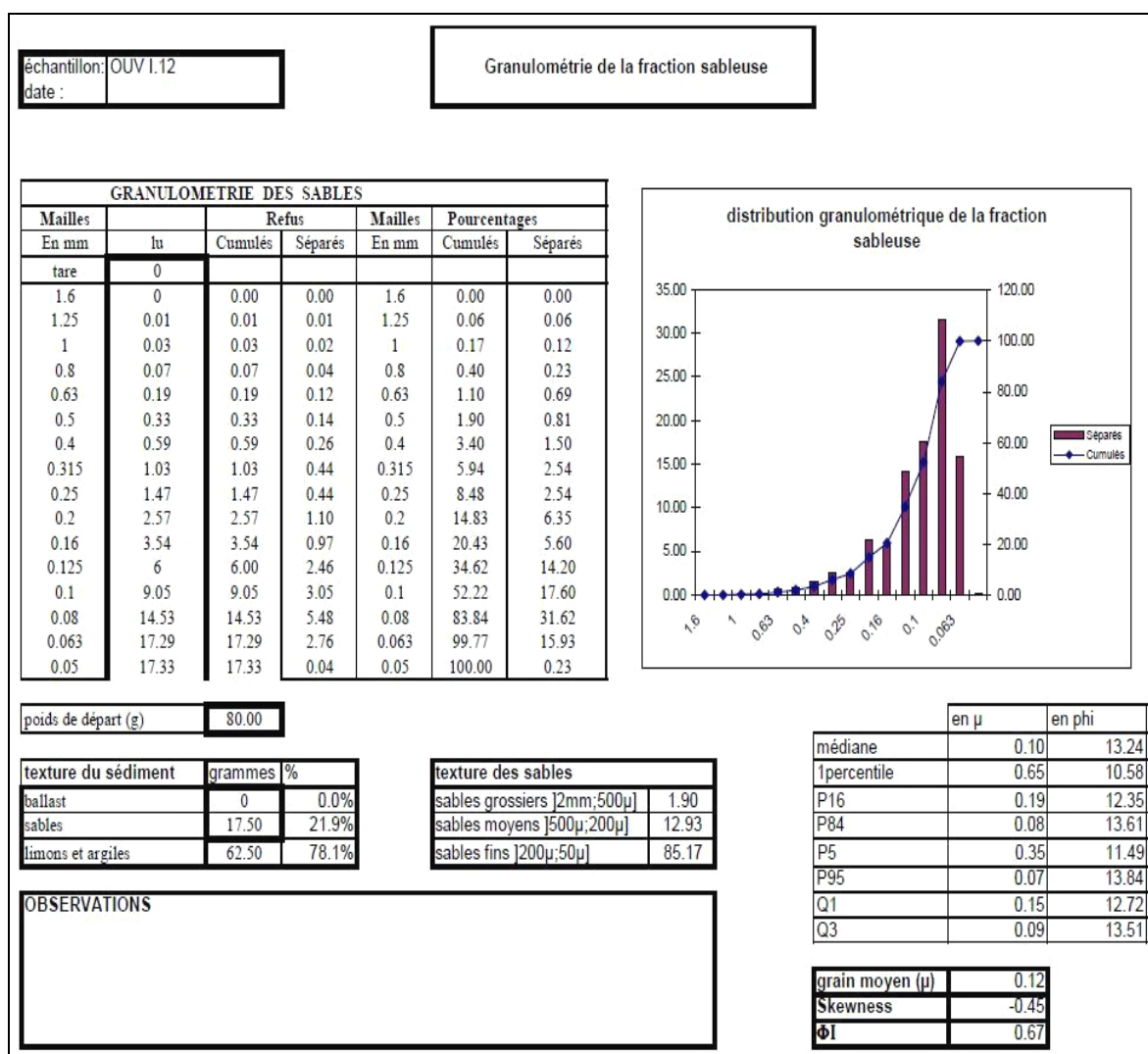


Figure 10 - Caractéristiques granulométriques des dépôts du lit majeur de l'Ouvèze à Roaix (Vaucluse).

[Sources : F. DELORME, 2004, et V. DELORME-LAURENT, 2007]

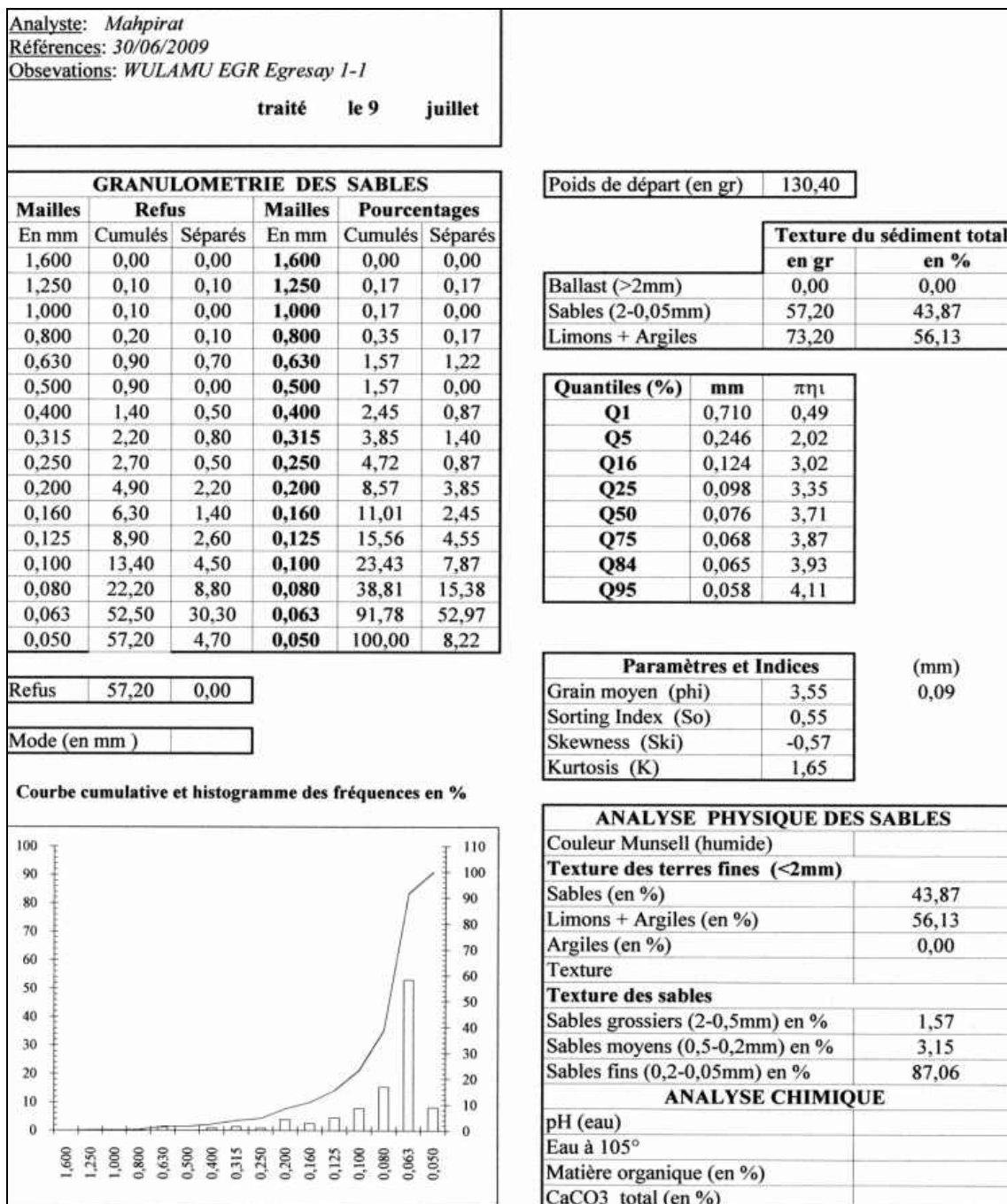


Figure 11 - Caractéristiques granulométriques du lit majeur du Karakash Darya à Egresay (Xinjiang, Chine).

[Source : M. WULAMU, 2010]

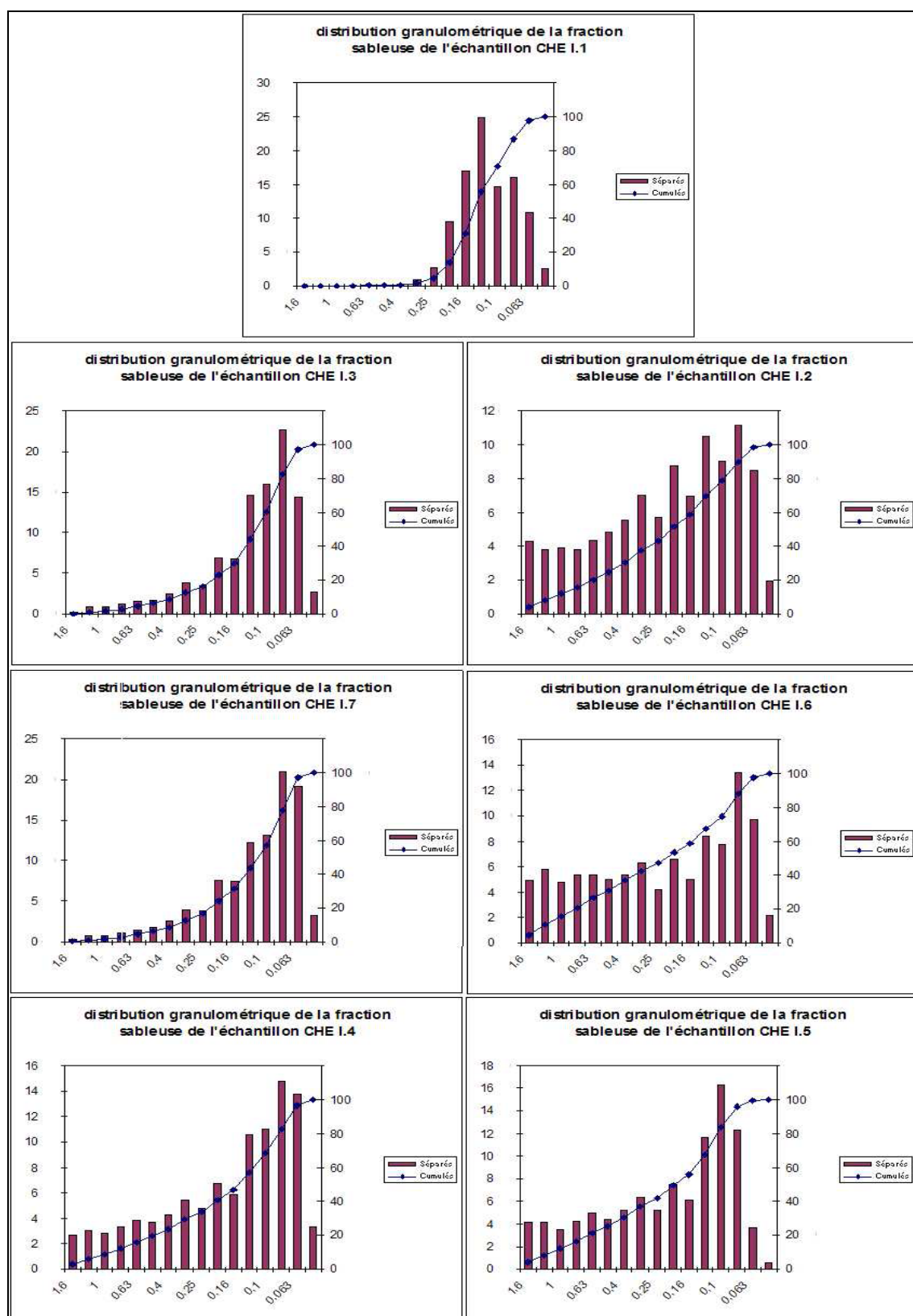


Figure 12 - Distribution granulométrique de la fraction sableuse des échantillons du lit majeur exceptionnel prélevés au lieu-dit "Les Trois Chemins" (Ferrals-les-Corbières, Aude).

[Source : V. DELORME-LAURENT, 2007]

Les valeurs sont exprimées en pourcentages.

fin avec une quasi absence de ballast, Les variations dans les proportions de sable et de limons-argiles peuvent être le témoin de dynamiques différentes, légèrement plus fortes en lit majeur ordinaire (taux de sable plus important) qu'en lit majeur exceptionnel (taux de limons-argile plus important, qui résulte d'un dépôt en eau calme). En effet, la submersion du lit majeur exceptionnel suppose celle du lit majeur ordinaire par plusieurs mètres d'eau, ce qui a été observé lors de la crue du Gardon de septembre 2002, à Dions (Gard).

Les dépôts du lit majeur exceptionnel de l'oued Leben à Mezzouna (Tunisie centrale), accumulés pendant les inondations de l'automne 1969 (J.L. BALLAIS, 1972, 1973) sont nettement plus sableux : ils ne comportent que très peu de ballast (1,9 %) et de limons-argiles (0,8 %). Cependant, les sables (97,3 %) sont bien triés (Fig. 13).

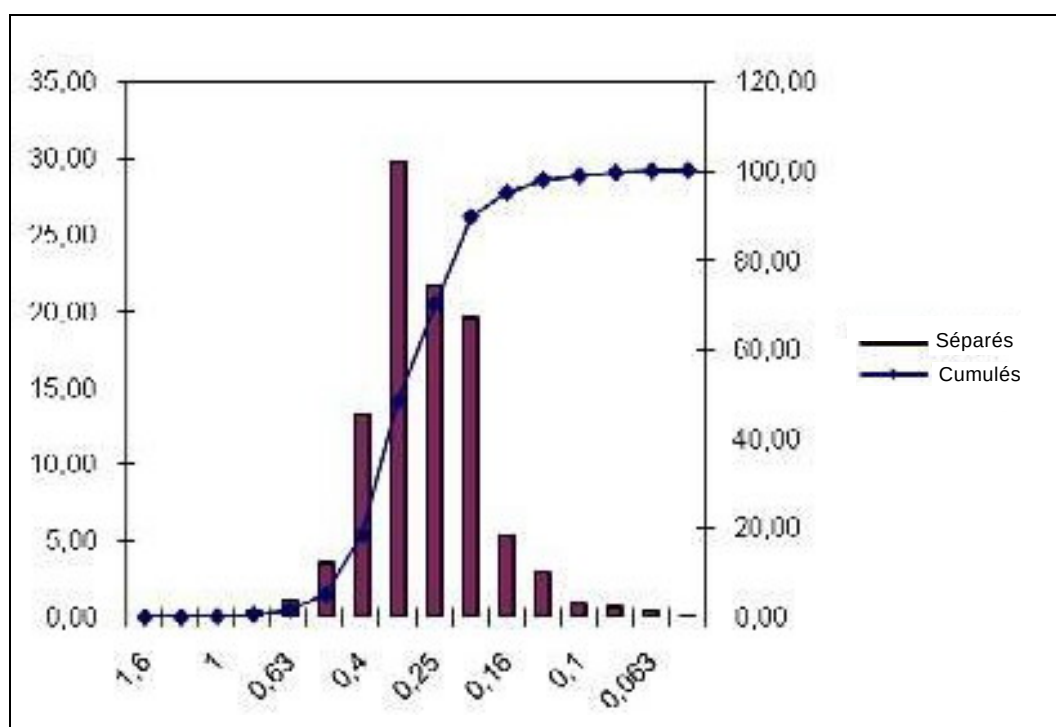


Figure 13 - Distribution granulométrique de la fraction sableuse d'un échantillon du lit majeur exceptionnel de l'oued Leben au nord de Mezzouna (Tunisie).

[Source : A. ZAGHDOUD, sous presse]

La simple observation visuelle des alluvions fines (sables, et surtout limons et argiles) des lits majeurs ordinaire et exceptionnel ne peut pas toujours permettre de les distinguer des colluvions fines issues des versants. Dans ce cas, une analyse granulométrique permet de trancher facilement entre les deux types de dépôt (Fig. 14).

Les alluvions grossières de la plaine alluviale fonctionnelle présentent globalement des granulométries comparables à celles des alluvions des terrasses alluviales pléistocènes (Photo 33), cependant, l'aspect de surface des galets est souvent différent. En particulier, les alluvions des terrasses alluviales, restées très longtemps hors d'eau, ont subi des phénomènes d'oxydation qui ont transformé en oxyde ferrique (Fe_2O_3) rougeâtre le fer contenu dans le

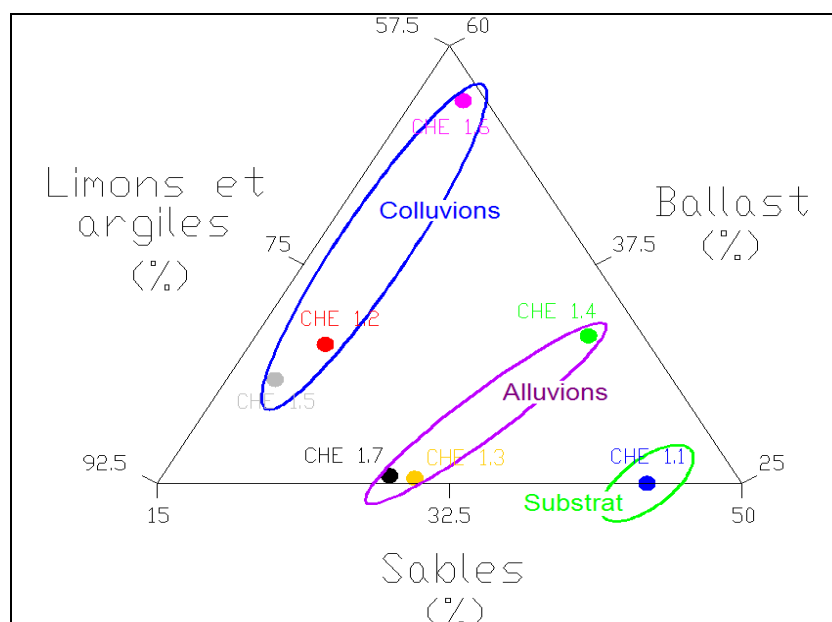


Figure 14 - Différenciation granulométrique entre alluvions et colluvions, lit majeur exceptionnel de l'Orbieu, Les Trois Chemins, Ferrals-les-Corbières (Aude).

[Source : V. DELORME-LAURENT, 2007]



Photo 33 - Terrasse alluviale du Karakash Darya à Langru (Xinjiang, Chine).

[Cliché : M. WULAMU, 2010]

sédiment, donnant à celui-ci une teinte d'ensemble beige à ocre. En domaine méditerranéen, l'évolution biochimique a souvent produit un encroûtement calcaire blanchâtre qui recouvre les galets d'une pellicule qui s'observe facilement.

3) Le rôle de la géologie

La structure géologique du bassin versant introduit des modifications dans l'organisation spatiale de la vallée, soit par la lithologie des roches, soit par la tectonique.

a. La lithologie

Dans les roches cohérentes, les cours d'eau creusent des canyons (Photo 34) qui réduisent souvent la plaine alluviale fonctionnelle à son seul lit mineur (Photo 35). Lorsque l'entaille est plus large, comme dans le cas des Gorges du Tarn, par exemple, un lit moyen peut se développer, voire plus rarement un lit majeur, dans les lobes convexes de méandres. Des cours d'eau puissants comme la Chamberlain River à El Questro (Western Australia, Australie) ou le Karakash Darya à Langru (Xinjiang, Chine) ont taillé des lits majeurs entièrement rocheux (Photo 36).



Photo 34 - Grand Canyon du Colorado (Arizona, États-Unis).

[Cliché : J.L. BALLAIS, 1993]

À l'inverse des roches cohérentes, les affleurements de roche meuble sont favorables au développement transversal de la plaine alluviale fonctionnelle et à l'individualisation des différents lits comme, par exemple la Gardonnenque, à l'amont des gorges du Gardon (Fig. 3). Cependant, nous le verrons (*infra*, p. 124), dans ce type d'encaissant meuble et sujet à fluage, le contact avec le lit majeur se fait généralement par une pente concave sur laquelle il peut être difficile de préciser la limite du versant (J.L. BALLAIS *et al.*, 2009).



Photo 35 - La Cèze à La Roque-sur-Cèze (Gard).

[Cliché : J.L. BALLAIS, 1995]



Photo 36 - Lit majeur rocheux de la Chamberlain River près d'El Questro (Western Australia, Australie). [Cliché : J.L. BALLAIS, 2005]

La lithologie du bassin versant influence par ailleurs la sédimentologie de la plaine alluviale. C'est ainsi que des bassins versants relativement étendus, partiellement (l'Èze dans le Vaucluse) ou entièrement creusés dans des formations molassiques, ne produisent que des matières en suspension (*supra*, p. 42), qui s'accumulent dans l'ensemble de la plaine alluviale

fonctionnelle. Il est donc inutile dans ce cas de rechercher des alluvions grossières à l'intérieur du lit mineur ou comme preuve de l'existence d'un lit moyen.

Dans les bassins versants calcaires, le tronçonnement de la plaine alluviale peut s'effectuer en raison de l'accumulation de dépôts de tufs qui finissent par constituer de véritables barrages transversaux (systèmes de barrages de Plivitce sur la Krona, en Croatie – Photo 37), particulièrement en domaine méditerranéen (vallée du Lez dans l'Hérault, site de Barjols dans le Var).



Photo 37 - Vallée de la Krona à Plivitce (Croatie) : barrage de tufs, à gauche.

[Cliché : J.L. BALLAIS, 2006]

b. La tectonique

Il est fréquent qu'un cours d'eau traverse une série sédimentaire plissée ou faillée où alternent des formations qui présentent de grandes différences de résistance à l'érosion fluviale. Dans ce cas, le bassin versant s'organise en sous-bassins partiellement autonomes où les affleurements cohérents de l'aval constituent un niveau de base local (exemple de l'oued Inaouène à l'aval de Taza, au Maroc). Ces sous-bassins, lorsqu'ils sont suffisamment étendus, peuvent reproduire l'organisation en trois zones successives, de l'amont à l'aval, décrite *supra*, p. 15. M. MASSON *et al.* (1996, p. 51) en donnent une bonne illustration (Fig. 15).

Le "remous" hydraulique qui se produit à l'amont des gorges ne laisse aucune trace morphodynamique sur le terrain, du fait de l'absence de courant rapide dans le secteur concerné, mais provoque une extension latérale de grande ampleur de la plaine alluviale fonctionnelle ainsi que des surcotes parfois impressionnantes, par exemple en 2002 pour le Gardon à l'amont de ses gorges (Photo 38), et même des *défluviations* (au même lieu, mais aussi par l'Esquielle, affluent du Gardon, à Saint-Geniès-de-Malgoirès – H. AIMON, 2003).

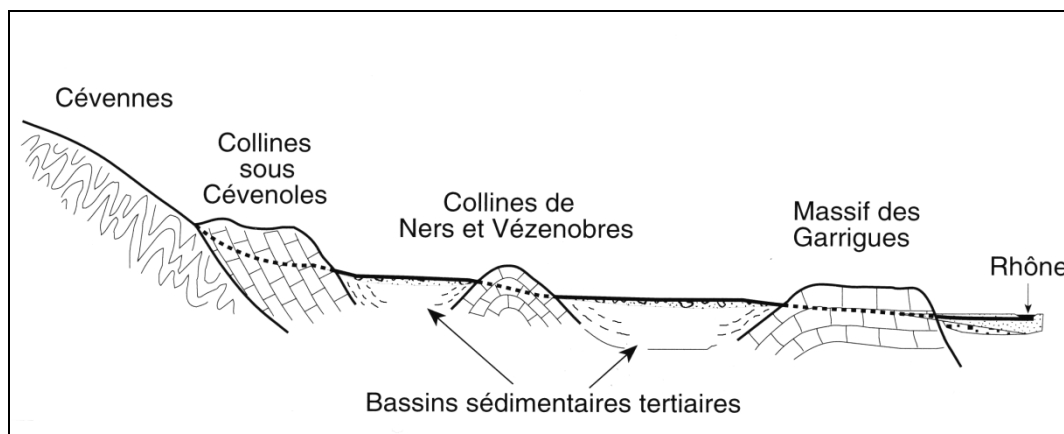


Figure 15 - Profil longitudinal schématique de la vallée des Gardons (Gard).

[Source : M. MASSON *et al.*, 1996, modifié]



Photo 38 - Le pont de Russan à Sainte-Anastasie (Gard) à demi-submergé pendant la crue du Gardon en 2002.

[Source : DIREN Languedoc-Roussillon, 2002]

II - LES CRITÈRES COMPLÉMENTAIRES

1) La couverture végétale naturelle

Quand elle est conservée, elle reflète très fidèlement les conditions édaphiques liées aux unités géomorphologiques de la plaine alluviale. En règle générale, la répartition des espèces végétales au sein d'une vallée alluviale traduit les rapports entre la surface du terrain naturel et

la nappe phréatique. On observe ainsi un étagement de la végétation en fonction de la profondeur de celle-ci (Fig. 16).

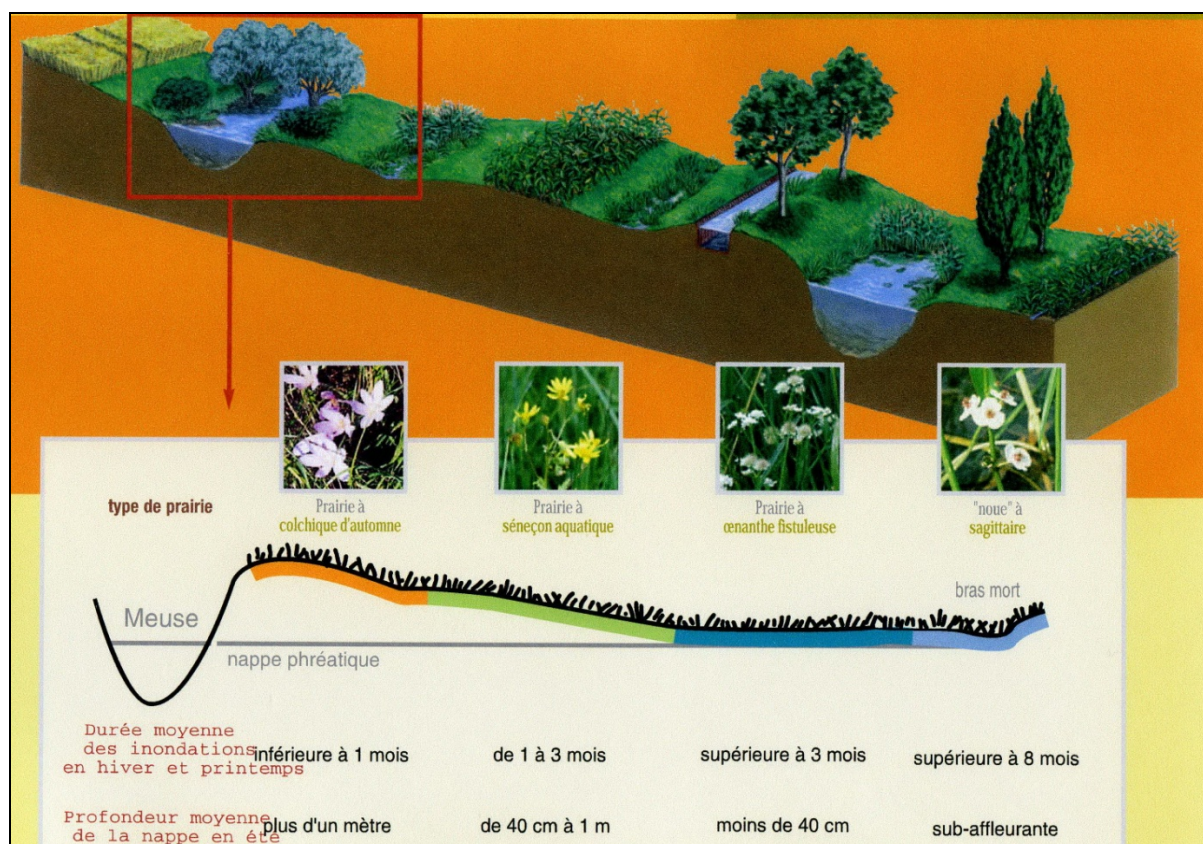


Figure 16 - Toposéquences des types de prairie de la vallée de la Meuse.

[Source : Agence de l'Eau Rhin-Meuse, 2010]

Ainsi le lit d'étiage et le lit mineur, nous l'avons vu, sont à peu près dépourvus de végétation émergée et présentent des bancs de galets ou de sable parfois colonisés par des herbacées.

Le lit moyen est souvent colonisé par une ripisylve (Photo 39) (H. PIÉGAY, 1995). Sa composition floristique varie suivant les conditions climatiques régionales (Peupliers en domaine méditerranéen ou aride continental (Asie centrale), forêt-galerie à Acacia en domaines sahélien et soudanien, varzea en Amazonie, etc.).

Le lit majeur ordinaire est naturellement occupé par une ripisylve de composition floristique différente. Dans la plupart des zones climatiques, il a été mis en culture depuis très longtemps, parfois dès le Néolithique au Moyen-Orient et les pratiques culturelles ont éliminé la végétation spontanée (Photo 40).

Le lit majeur exceptionnel présente les mêmes caractéristiques que le lit majeur ordinaire (voir Photos 23 et 24).



Photo 39 - Ripisylve du lit moyen de la Loire à Montsoreau (Maine-et-Loire).

[Cliché: J.L. BALLAIS, 2004]



Photo 40 - Lit majeur de la Loire à Savigny-en-Véron (Indre-et-Loire).

[Cliché : J.L. BALLAIS, 2005]

2) L'occupation humaine

L'occupation très ancienne de très nombreuses vallées dans le monde a confronté les sociétés humaines à la dynamique fluviale. Plusieurs caractéristiques actuellement

observables fournissent des critères secondaires à la délimitation des zones inondables.

a. La localisation des constructions

Dans le passé, la localisation des constructions a intégré le fonctionnement de la plaine alluviale fonctionnelle d'alors. L'observation de la répartition des constructions dans une vallée fournit par conséquent de précieuses indications sur les risques d'inondation. C'est ainsi que les constructions antérieures au XX^{ème} siècle se situent de manière quasi systématique sur l'encaissant, en bordure externe de la zone inondable, dans des sites variables (Fig. 17) : au sommet du talus qui limite une terrasse alluviale, sur un promontoire rocheux (parfois un dépôt de tufs ou de travertins), sur un cône alluvial ou en pied de versant (sur un dépôt de colluvions, par exemple).

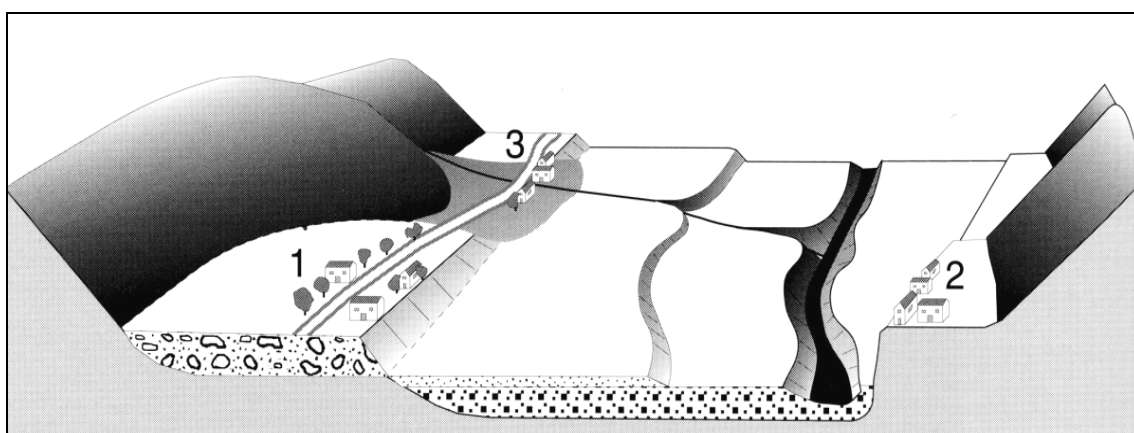


Figure 17 - Agglomérations anciennes et zones inondables.

[Source : M. MASSON *et al.*, 1996, modifié]

- 1 : habitations et routes en bordure d'une terrasse alluviale. 2 : implantation sur un versant rocheux.
3 : implantation en pied de versant ou sur un cône alluvial.

Cette adaptation aux conditions hydrogéomorphologiques s'observe partout en France, que ce soit le long de cours d'eau à régime pluvial régulier, comme la Meuse, ou le long des rivières méditerranéennes. Elle est également vraie dans de très nombreux pays comme la Chine (Fig. 18). Cependant, de nombreuses villes romaines ont été construites en zone inondable (C. ALLINNE, 2007).

Lorsque des constructions antérieures au XX^{ème} siècle ne respectent apparemment pas cette règle, des raisons particulières apparaissent après un examen détaillé. À l'échelle du site, on observe par exemple la présence d'une surélévation naturelle du terrain qui a permis l'implantation du noyau initial de l'agglomération (comme la butte de molasse de Pélissanne, dans les Bouches du Rhône, au bord de la Touloubre – J.L. BALLAIS *et al.*, 1999). À l'échelle de la construction individuelle, c'est l'adaptation de l'habitat avec le logement au premier étage (exemple de la ferme Saint-Antoine à Pertuis dans le Vaucluse, en bordure de l'Èze – Photo 41) ou du mode de vie (refuge en étage en période de crue) qui permet la construction des bâtiments d'exploitation agricole et de l'habitation au cœur d'une plaine alluviale trop vaste pour être mise en valeur depuis un lieu éloigné. En Camargue, les nombreux mas



Figure 18 - Parcellaire de la vallée du Karakash Darya au sud de Moyou (Xinjiang, Chine). [Source : Google Earth, 2010]

Lit en tresses, rizières à grandes parcelles géométriques en lit majeur, villages et parcelles géométriques plus petites sur un cône alluvial.



Photo 41 - La ferme Saint-Antoine, au centre, dans le lit majeur de l'Èze à Pertuis (Vaucluse). [Cliché : J.L. BALLAIS, 2006]

installés dans la plaine alluviale du Rhône associent ces deux types d'adaptation au milieu : les mas sont installés sur les points les plus hauts et sont adaptés à l'isolement en cas de submersion de la plaine (habitation à l'étage, réserves alimentaires...). Dans les agglomérations, les batardeaux, très utilisés à Venise, et bien adaptés à la lutte contre les crues-éclair, sont très fréquents, au moins dans le Midi méditerranéen (F. DELORME, 2004), le Midi toulousain et la Normandie (Photo 42). Dans le Midi méditerranéen français, les temples protestants constituent une exception à cette situation générale : il n'est pas rare que, construits tardivement, ils soient implantés hors du centre de l'agglomération et donc souvent en zone inondable comme à Anduze (Gard). Encore plus systématiquement, au point de constituer parfois un critère d'inondabilité, les stations d'épuration construites au XX^{ème} siècle en bordure d'un cours d'eau sont le plus souvent inondables.



Photo 42 - Batardeaux à Quissac (Gard).

[Cliché : J.L. BALLAIS, 2002]

Certaines agglomérations anciennes ont été sciemment affranchies des crues, par exemple par l'édification de remparts, comme à Tours (R. DION, 1961), Avignon, Bédarrides (Vaucluse) ou Olonzac (Hérault) (F. DELORME, 2004), ou de digues comme à Caderousse (Vaucluse) (Photo 43) ou Comps (Gard), ce qui n'excluait pas totalement le risque. Par ailleurs, de très nombreuses villes médiévales ont connu de fréquents et importants problèmes d'inondation, à commencer par Paris (J.P. LEGUAY, 2005). L'envahissement des habitations par les crues a pu pousser à reconstruire avec des soubassements plus solides comme à Amiens (*idem*).

Par contre, à l'origine, ces agglomérations avaient souvent besoin du cours d'eau pour assurer leurs activités (batellerie, tannerie, *etc.*) ; la vocation initiale du site permettait de vivre avec le risque, de s'en accommoder.



Photo 43 - Digue de Caderousse (Vaucluse). [Cliché : J.L. BALLAIS, 2010]

b. Les vestiges historiques et archéologiques

Si la concordance entre agglomération antérieure au XX^{ème} siècle et zone non inondable constitue en règle générale un indice fiable de délimitation des zones inondables, ce critère ne peut s'appliquer sans précaution à toutes les époques de développement urbain. Sa validité dépend essentiellement du rythme des modifications géomorphologiques subies par les plaines alluviales fonctionnelles (*infra*, p. 86). C'est ainsi que des archéologues mettent fréquemment à jour des vestiges qui datent de l'époque antique, ensevelis sous plusieurs mètres d'alluvions (Villemagne l'Argentière dans l'Hérault, le long de la Mare, Timgad en Algérie, Ammaedara en Tunisie, *etc.*). On observe également le dégagement des alluvions accumulées afin de préserver l'accès à des bâtiments plus récents comme la chapelle médiévale de Villerasse à Alenya (Pyrénées-Orientales) (Photo 44) (M. CALVET, 1992) ou l'église du Chambon du Lac (Puy-de-Dôme) ou même le centre ville de Bédarrides maintenant entouré d'un bourrelet de limons qui ceinture les murailles.

Si cette évolution témoigne de l'inondabilité de ces sites, elle ne permet pas d'en déduire que cette inondabilité affectait déjà ces sites lors de l'édification des constructions (M. CALVET *et al.*, 2002). Au contraire, on constate ainsi que des agglomérations implantées dans le passé hors zone inondable ont depuis été affectées par plusieurs crues. Cette situation résulte de l'accumulation progressive dans les lits majeurs des alluvions fines apportées par les crues (J.L. BALLAIS *et al.*, 2004 ; C. ESPOSITO *et al.*, 2009). Des coupes, comme celles de la cathédrale Notre-Dame de Vaison-la-Romaine, montrent l'importance dans le temps de ce type d'évolution (Photo 45) (J.L. BALLAIS, 2009-a).



Photo 44 - La chapelle de Villerasse dans le lit majeur du Réart à Alenya (Pyrénées-Orientales). [Cliché : J.L. BALLAIS, 2005]



Photo 45 - Chevet de la cathédrale Notre-Dame à Vaison-la-Romaine (Vaucluse).
[Cliché : J.L. BALLAIS, 2004]

Le niveau du lit majeur s'est élevé de un mètre entre les VII^{ème} et XI^{ème} siècles et de un mètre encore depuis le XI^{ème} siècle.

c. L'adaptation de l'activité agricole aux caractéristiques de la plaine alluviale

En France, l'activité agricole était également adaptée, avant la période contemporaine, à l'existence de l'aléa inondation : lit majeur réservé aux cultures annuelles, lit moyen non cultivé et parfois utilisé en prairie. Le rôle positif de la ripisylve, qui faisait écran aux processus du lit mineur, était d'ailleurs bien connu, comme en témoigne l'Édit Royal de 1830 concernant les fleuves des Pyrénées-Orientales, qui instituait de part et d'autre des lits mineurs une bande de "bois et taillis" d'une largeur de 30 mètres (M. MASSON, sous presse). Les cas d'adaptation des cultures au rythme des inondations sont aussi anciens et nombreux que variés. On peut citer les cultures limitées étroitement à la zone inondable par le Nil dans l'Égypte ancienne (ou, aujourd'hui, dans celle de l'Omo en Éthiopie), les rizières de l'Asie des Moussons longtemps situées dans la zone inondable, avant le creusement de canaux d'irrigation, ou encore l'étagement actuel le long du Karakash Darya (Xinjiang, Chine) : pâturages et boqueteaux ou rizières sur le lit moyen, arboriculture et maïs sur le lit majeur, maigre pâturage sur l'encaissant non irrigué.

En France, des programmes importants ont été mis en œuvre dans certaines vallées, afin d'étendre les terres cultivables aux dépens du lit moyen en utilisant les techniques de l'hydraulique fluviale définies au cours du XIX^{ème} siècle. C'est ainsi qu'ont été construites des batteries d'épis (Photo 46) destinés à limiter les migrations du lit mineur de cours d'eau semi-torrentiels.



Photo 46 - Épi sur l'Ouvèze à Vaison-la-Romaine (Vaucluse).

[Cliché : J.L. BALLAIS, 1997]

Le ralentissement des écoulements de part et d'autre du lit mineur générant des accumulations, grossières tout d'abord, relayées ensuite par des dépôts limoneux. Ceux-ci étaient parfois amplifiés par la construction de "casiers de limonage". Il en est résulté un

rétrécissement très net des lits en tresses, avec une extension corrélative des lits majeurs, qu'on peut vérifier par la comparaison de cartes des XVIII^{ème} et XIX^{ème} siècles avec la situation actuelle, par exemple pour la Durance à Pertuis (Vaucluse). Cette métamorphose accélérerait un processus naturel beaucoup plus lent qui a concerné, en particulier, de nombreux cours d'eau méditerranéens en France, comme le Gardon, la Durance, le Var, le Groseau ou le Buech (E. GAUTIER, 1992), mais aussi en Italie du Nord (F. LUINO *et al.*, 2002). Ce procédé est encore utilisé, par exemple au Xinjiang en Chine (Photo 47).



Photo 47 - Limonage dans le lit moyen du Karakash Darya (Xinjiang, Chine).

[Cliché : J.L. BALLAIS, 2008]

Cette évolution a été freinée pour les rivières domaniales par l'existence du "Domaine Public Fluvial" préservé de toute mise en valeur agricole. Dans la deuxième moitié du XX^{ème} siècle cependant, la pression agricole, encouragée parfois par la disparition des crues fréquentes laminées par les réservoirs des barrages hydroélectriques, a conduit à des défrichements de la ripisylve, parfois en toute illégalité comme dans le cas de la Durance. Le long des cours d'eau non domaniaux, les défrichements ont souvent été étendus jusqu'au haut de la berge du lit mineur, parfois d'ailleurs à la suite de crues dévastatrices, sous la protection d'endiguements continus (Photo 48), en particulier sur les fleuves des Pyrénées-Orientales après les crues de 1940 (J. BÉCAT et G. SOUTADÉ, 1992).

d. La structure du parcellaire

La structure du parcellaire reflète partiellement l'organisation du réseau de drainage en zone inondable et peut fournir également des indications intéressantes. Ainsi, en France, le lit majeur est-il fréquemment découpé en lanières étroites perpendiculaires au lit mineur du



Photo 48 - La Cèze endiguée à Bessèges (Gard).

[Cliché : J.L. BALLAIS, 2002]

cours d'eau. Parfois même, ces lanières sont distribuées en éventail, reproduisant la géométrie d'un ancien méandre (Photo 49). Ces organisations contrastent souvent fortement avec celles qui prédominent sur les terrasses alluviales, les collines ou les plateaux environnants, tout particulièrement en zone aride quand les cultures sont strictement limitées à la zone inondable.



Photo 49 - La plaine alluviale fonctionnelle du Pô (Italie). Adaptation du parcellaire aux anciens méandres. [Cliché : J.L. BALLAIS, 2002]

III - LES FACTEURS DE VARIATION

Le schéma que nous venons de décrire, valable essentiellement pour la France, subit un certain nombre de modifications en fonction des conditions climatiques régionales et des transformations apportées au milieu par les sociétés humaines.

1) Les variations en fonction des grandes zones climatiques

Depuis la parution de l'ouvrage de M. MASSON *et al.* (1996), qui y consacrait cinq lignes, le développement des recherches hors du territoire hexagonal a permis de commencer l'étude de l'influence du climat sur les caractéristiques de la plaine alluviale fonctionnelle. Traiter totalement le problème de l'impact du climat sur ces caractéristiques suppose une connaissance qui est très loin d'être complète à ce jour, dans la mesure où la plupart des études des plaines alluviales fonctionnelles ne prennent pas en compte toutes leurs unités (J. LEWIN, 1978 ; G.C. NANSON et J.C. CROKE, 1992).

À grands traits, on peut indiquer quelques éléments dans les grandes zones climatiques du Globe.

Dans la zone tempérée, qui intéresse la plus grande partie de la France et de l'Europe, les cours d'eau ont un régime peu contrasté. Dans les sections à méandres, le lit moyen tend à disparaître, du moins dans la zone de transfert, et les formations qui constituent le lit majeur sont particulièrement fines (argiles et limons) (Photo 50), voire tourbeuses (Photo 51). Les terrasses holocènes y sont très rares, peut-être faute d'observations précises, mais ont été identifiées en Grande-Bretagne au moins (A.M. HARVEY *et al.*, 1984 ; M.S.E. ROBERTSON-RINTOUL, 1986 ; R.F. SMITH et J. BOARDMAN, 1989).



Photo 50 - Le lit majeur du Rhône à Saint-Maurice-de-Gourdans (Ain).

[Cliché : J.L. BALLAIS, 2006]



Photo 51 - La Somme à Frise (Somme). [Cliché : BALLAIS, 2007]

La Bretagne a été particulièrement l'objet d'études hydrogéomorphologiques (N. DUPONT et M.J. PENVEN, 2005 ; M.J. PENVEN *et al.*, 2008). Dans l'ouest de la région, l'Hyère a un tracé sinueux à méandré, stable actuellement même si l'on note des formes d'érosion dans les courbes des méandres. La plaine alluviale fonctionnelle, fortement anthropisée par l'agriculture, laisse cependant voir de nombreuses microformes qui se traduisent par des dépressions longitudinales plus ou moins parallèles au tracé actuel du lit mineur, des dépressions arquées à proximité des courbes de méandre ou encore des cuvettes allongées ou microtalwegs, dont l'amplitude altitudinale ne dépasse pas 0,50 à 1 m. Ces microformes sont interprétées comme d'anciens chenaux du cours d'eau. La mise en eau de la plaine alluviale s'effectue par remontée de la nappe phréatique située dans les alluvions peu épaisses et son débordement dans les microdépressions, tandis que parallèlement l'eau monte dans le lit mineur du cours d'eau.

La délimitation externe du lit majeur dans ce type de section est délicate car le contact versant / fond de vallée correspond à une concavité basale très étirée constituée d'un dépôt colluvial, sur lequel il est difficile de positionner une limite avec certitude.

Dans l'est de la Bretagne, l'ensemble des cours d'eau a un régime de crue lente et les fonds alluviaux se caractérisent par des microtopographies. Ils sont constitués par une nappe caillouteuse surmontée de limons fluviatiles d'une épaisseur très modeste de 1 à 2 m. En aval de la Vilaine, ils s'épaississent légèrement dans la plaine alluviale de Beslé (2 à 2,5 m) pour atteindre dans la plaine alluviale de Masserac une épaisseur de 5 à 6 m (Photo 52).

Dans la vallée du Meu, les observations de terrain permettent d'identifier également une microtopographie où alternent bourrelets et dépressions (Fig. 19).



Photo 52 - Lit majeur de la Vilaine à Masserac (Ille et Vilaine).

[Cliché : M.J. PENVEN, 2006]

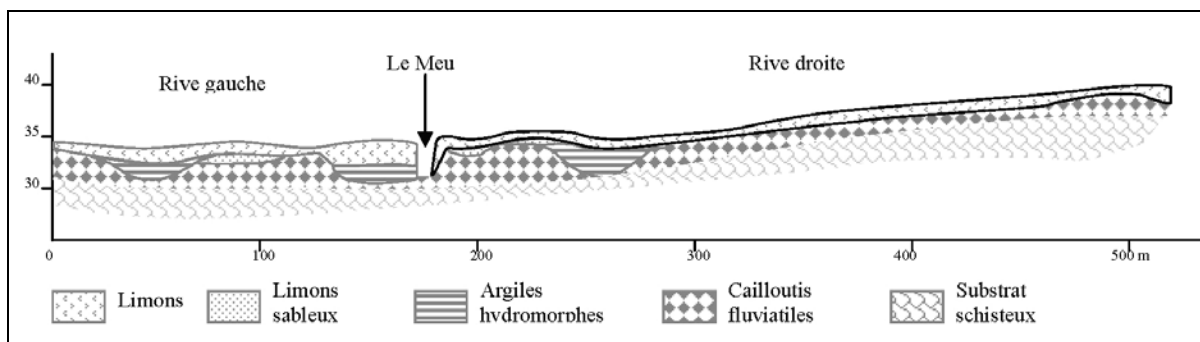


Figure 19 - Croquis synthétique de la structuration sédimentaire du fond alluvial du Meu.

[Source : M.J. PENVEN et N. DUPONT, 2010]

L'épaisseur des dépôts a été exagérée.

La cartographie effectuée sur une partie de la section de la Poulanière (Fig. 20) montre une mosaïque de corps sédimentaires de textures différentes qui conditionnent la vitesse de circulation des eaux de la nappe phréatique au sein de la nappe alluviale et contrôlent la propagation des eaux dans la plaine alluviale.

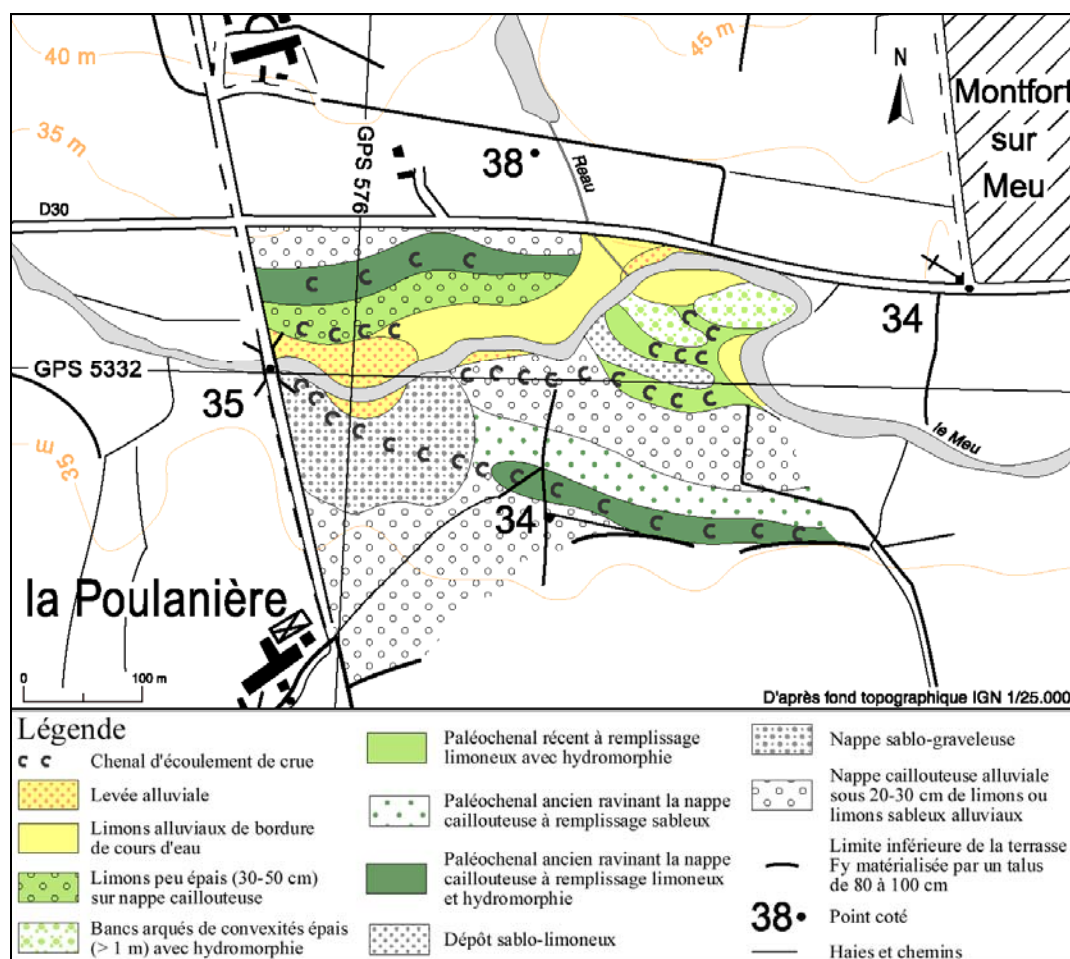


Figure 20 - Mosaïque des corps sédimentaires dans le secteur de la Poulanière.

[Source : dessin d'I. GANZETTI, conception de M.J. PENVEN et N. DUPONT]

Les dépressions allongées ou microtalwegs, dont la profondeur varie entre 0,5 m et 1,5 m, correspondent à d'anciens chenaux déconnectés ou non de l'actuel lit mineur de la rivière. Ainsi la propagation des eaux dans la plaine alluviale s'effectue par deux voies simultanées :

- par remontée de la nappe phréatique dans les alluvions avec débordement dans les microdépressions (Photo 52),
- pénétration des eaux à partir du chenal via les ensellements dans les berges qui permettent la re-connexion temporaire des paléochenaux.

Le recouvrement généralisé de la plaine s'effectue par connexion progressive des unités ennoyées et débordement du chenal.

Dans la zone froide, les crues printanières ou débâcles proviennent plus de la fusion de la glace et de la neige que des quelques précipitations. L'organisation de la plaine alluviale fonctionnelle commence à être mieux connue (E. GAUTIER et F. COSTARD, 2000). Par exemple, en zone de pergélisol, le lit mineur de la Léna atteint 5 à 7 km de large et comprend cinq à dix chenaux rectilignes, larges et peu profonds qui enserrant de grands bancs sableux et de vastes îles. La plaine alluviale fonctionnelle atteint généralement 15 km de large mais peut s'étendre sur 25 km, avec un contact progressif avec un bas plateau ou subvertical avec la terrasse principale. Marécageuse, elle comprend des îles et des chenaux anastomosés

nombreux, plus étroits et plus sinueux que ceux du lit mineur, ainsi que des bras morts, organisés en trois niveaux topographiques : un niveau inférieur submergé chaque année, un niveau médian, plus haut de 5 à 6 m, inondé tous les deux ou trois ans et un niveau supérieur, qui domine le niveau inférieur de 8 à 10 m, inondé tous les dix ans en moyenne. Cette structuration de la plaine alluviale fonctionnelle se confirme le long de l'Yenisseï (A.F. YAMSKIKH *et al.*, 1999) où s'observent plusieurs "terrasses" qui correspondent à différentes puissances de crues et sur lesquelles l'accumulation est simultanée.

Le domaine méditerranéen a été longtemps négligé car il était considéré comme une partie du domaine tempéré (J.L. BALLAIS, 2008). Si la méthode hydrogéomorphologique est apparue et s'est développée dans le domaine méditerranéen, c'est aussi parce que ce dernier présente des caractéristiques légèrement différentes de celles du domaine tempéré. Nous avons indiqué, en particulier, la présence fréquente du lit moyen, y compris dans le Darling Range et ses piémonts (Western Australia). Il faut également rappeler la granulométrie souvent grossière des alluvions du lit mineur qui contraste fortement avec celle du lit majeur. C'est également en domaine méditerranéen qu'on a observé, jusqu'à maintenant, et de beaucoup, le plus grand nombre de lits majeurs exceptionnels, et cela sur les deux rives de la Méditerranée. Enfin, c'est dans ce même domaine que les terrasses alluviales holocènes sont le plus largement représentées, principalement sur la rive méridionale de la mer Méditerranée. Il s'agit, en général, d'une terrasse préhistorique et parfois d'une terrasse préhistorique accompagnée d'une terrasse historique (références détaillées dans V. DELORME-LAURENT, 2007). Celles observées récemment dans l'Aude sur l'Argent-Double (affluent de l'Aude) et dans les Bouches-du-Rhône sur le Bayon (affluent de l'Arc) (V. DELORME-LAURENT, 2007, p. 299 et 334) sont plus récentes puisque l'une date de l'époque moderne (base : 1546 ; 1646, sommet : 1666 ; 1706 – datations OSL : Optically Stimulated Luminescence) et l'autre de l'époque contemporaine (postérieure à 1860 sur critère archéologique ; comme c'est probablement aussi le cas de celle du rio Cuadros dans la province d'Andalousie en Espagne – J.L. BALLAIS, 2009-b). La particularité de ces terrasses réside non seulement dans leur âge, mais également dans les caractéristiques de leurs dépôts. En effet, ces derniers sont en tous points semblables à ceux des lits majeurs exceptionnels et ordinaires (Fig. 21), ce qui explique que, en Afrique du Nord particulièrement, des lits majeurs ont pu être interprétés comme des terrasses alluviales. Les lits majeurs exceptionnels et ces terrasses sont situés dans la même position topographique relative, mais les premiers sont inondables alors que les secondes ne le sont plus. Dans l'état actuel, embryonnaire, de nos recherches, il n'existe pas de critères géomorphologiques décisifs pour distinguer une terrasse holocène qui a un faciès du type de celle de l'Argent-Double et un lit majeur exceptionnel. La présence de pseudomycélium dans les dépôts de la terrasse pourrait cependant constituer un critère intéressant (V. DELORME-LAURENT, 2007) qui demande vérification. Pour confirmer le caractère non inondable de la terrasse de l'Argent-Double, il a fallu recourir à une modélisation hydraulique simple (S. CHAVE, 2003 ; V. DELORME-LAURENT, 2007). Il est également possible de recourir à des témoignages visuels, mais les informations recueillies (qu'il faudra tenter de recouper) ne portent alors que sur quelques dizaines d'années, ce qui n'est pas toujours suffisant pour distinguer un lit majeur exceptionnel d'une terrasse alluviale (F. LAVIGNE, C. LE CŒUR, sous presse).

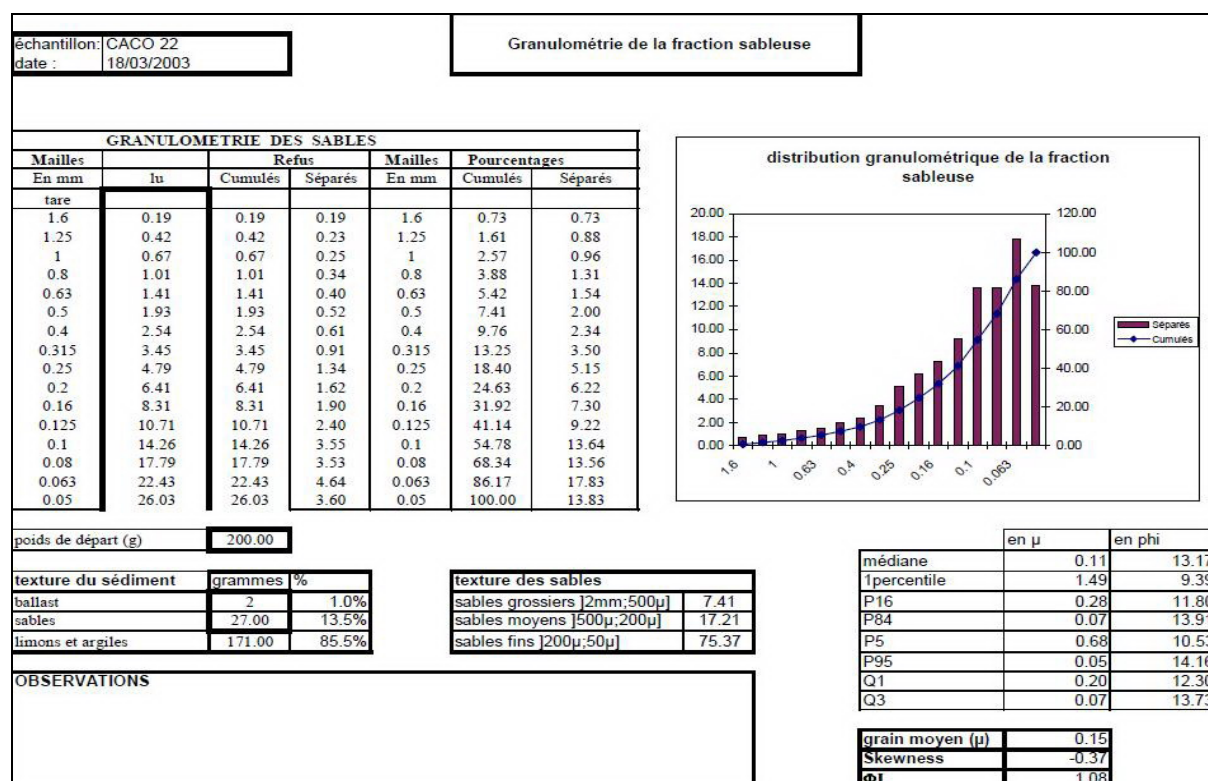


Figure 21 - Distribution granulométrique de la fraction sableuse d'un échantillon de la terrasse moderne de l'Argent-Double à Rieux-Minervois (Aude).

[Source : V. DELORME-LAURENT, 2007]

En domaine aride, les recherches menées principalement en Tunisie et au Xinjiang (Chine) permettent d'esquisser une classification des cours d'eau et de montrer que, contrairement à ce qui est parfois affirmé (J.P. BRAVARD et F. PETIT, 1997, p. 180, reprenant W.L. GRAF (1983), à propos des arroyos), les lits mineur et majeur s'observent souvent (V. DELORME-LAURENT, 2007) (Photo 53), ce qui confirme les observations de G.C. NANSON, S. TOOTH et A.D. KNIGHTON (2002). Le type le plus fréquent est constitué par les oueds, cours d'eau intermittents qui apparaissent dès le domaine méditerranéen (par exemple, plusieurs affluents de l'Asse (Alpes-de-Haute-Provence), de la Durance (l'Èze) ou du Gardon), voire sur ses bordures tempérées (par exemple l'Hers Mort en Haute-Garonne) quand les conditions lithologiques s'y prêtent. Dans les zones d'ablation et de transfert, le lit mineur, bien marqué, souvent à galets, est, le plus fréquemment, dépourvu d'écoulement superficiel (Photo 54). Le fait que ce lit mineur ne fonctionne qu'au moment des crues (Photo 55) a pour conséquence la multiplication des chenaux séparés par des bancs (Photo 56) et ce lit mineur peut être dépourvu de berges subverticales (M. MAINGUET, 2003). C'est sur ceux de la marge nord du Sahara, de rythme pluviométrique méditerranéen, que les lits majeurs exceptionnels les plus caractéristiques ont été observés et pour lesquels la datation des dépôts les plus récents (en général, 1969 – J.L. BALLAIS, 1972, 1973) est la mieux assurée. En Australie centrale, les "mega-floods" (G. PICKUP, 1991) pourraient être à l'origine des lits majeurs exceptionnels observés.



Photo 53 - L'oued Chaâl-Tarfaoui (Tunisie). [Cliché : J.L. BALLAIS, 2005]

Du premier plan à l'arrière plan et de droite à gauche : lit mineur à sec, lit moyen, lit majeur ordinaire, lit majeur exceptionnel.



Photo 54 - Lit mineur à sec de l'oued Tamerza (Tunisie).

[Cliché : J.L. BALLAIS, 2005]



Photo 55 - Crue d'un oued à La Grand-Combe (Gard) en mars 2002.

[Source : J.L. BALLAIS, 2002]



Photo 56 - Bancs de galets de l'oued el Kheroua (Tunisie centrale).

[Source : J.L. BALLAIS, 2005]

Les cours d'eau allogènes pérennes comme le Nil (Égypte) (voir Photos 1 et 9), l'Amou Daria (Ouzbékistan) (voir Photo 6) ou le Karakash Darya (Xinjiang, Chine) (voir Photo 10) présentent les mêmes trois lits que les cours d'eau méditerranéens dans les zones d'ablation et de transfert.

La zone d'accumulation de ceux d'entre eux qui sont endoréiques présente des aspects différents. S'il s'agit d'un épandage (Photo 57), le lit majeur, souvent très vaste (il peut dépasser plusieurs dizaines de kilomètres sur la Cooper Creek en Australie centrale – H.M. TOLCHER, 1998 ; G.C. NANSON *et al.*, 2002), existe fréquemment, mais sa définition nécessite de nouvelles études car le lit mineur se subdivise en tresses et les interfluves tendent à disparaître.

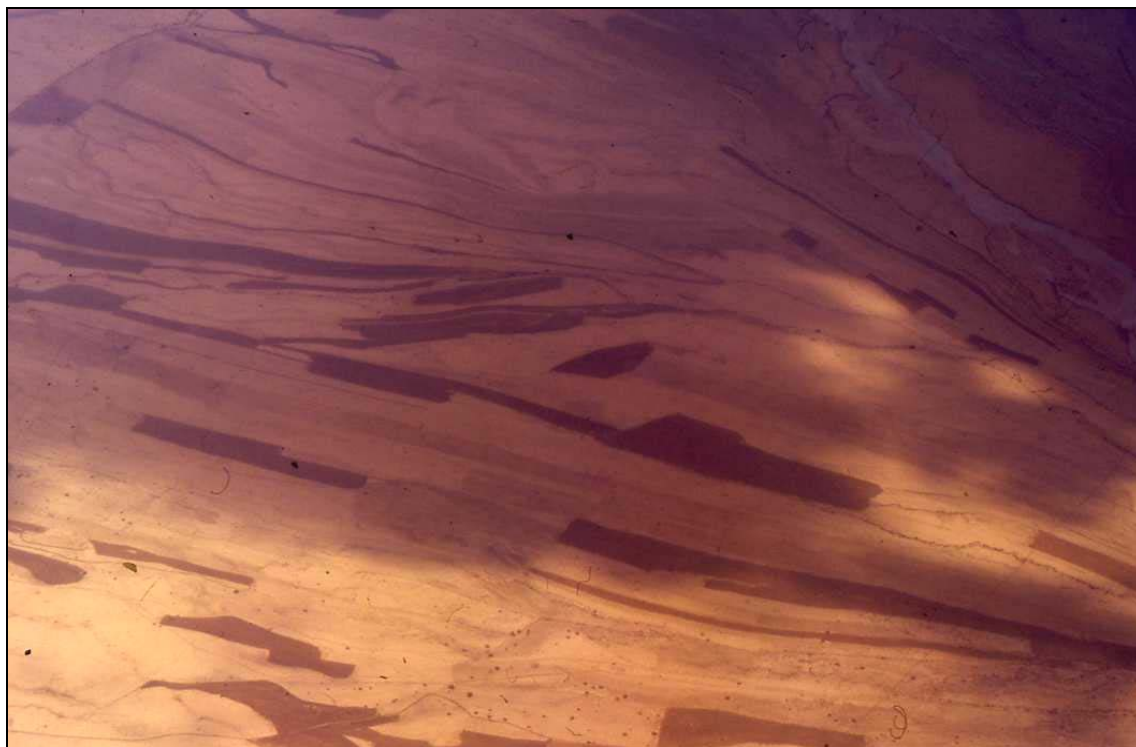


Photo 57 - Épandages dans la plaine d'El Outaya (Algérie).

[Source : J.L. BALLAIS, 2000]

Sur ceux qui viennent disparaître dans un erg comme le Karakash Darya (Chine) qui descend des Monts Karakoram-Kunlun et se perd dans le Taklamakan, de l'amont à l'aval, des dunes apparaissent sporadiquement en bordure du lit majeur, puis dans le lit majeur, puis enfin dans les lits moyen et mineur. Tout à l'aval, le lit majeur est parfois taillé dans les dunes et le lit moyen peut s'interposer entre deux branches du lit mineur, le cours d'eau devient un oued qui ne coule qu'au moment des crues de printemps et des diffluences récentes ou actuelles s'observent sous et dans les dunes (Fig. 22) (J.L. BALLAIS *et al.*, sous presse). Dans cette situation, il devient difficile de distinguer la limite externe du lit majeur, parfois recouverte par des sables éoliens. Là encore, la sédimentologie se révèle précieuse : dans le cas du Karakash Darya, les formations éoliennes sont presque exclusivement sableuses (94,4 % de sables) alors que celles du lit majeur sont limono-argileuses (74,8 %) et ne contiennent que 25,2 % de sables (M. WULAMU, 2010).

Outre les crues des rivières et des oueds, des inondations peuvent se produire lors d'écoulements en nappe (sheet floods) sans lits individualisés, à l'occasion d'orages particulièrement intenses, par exemple sur les glaciers selon des modalités proches de celles du

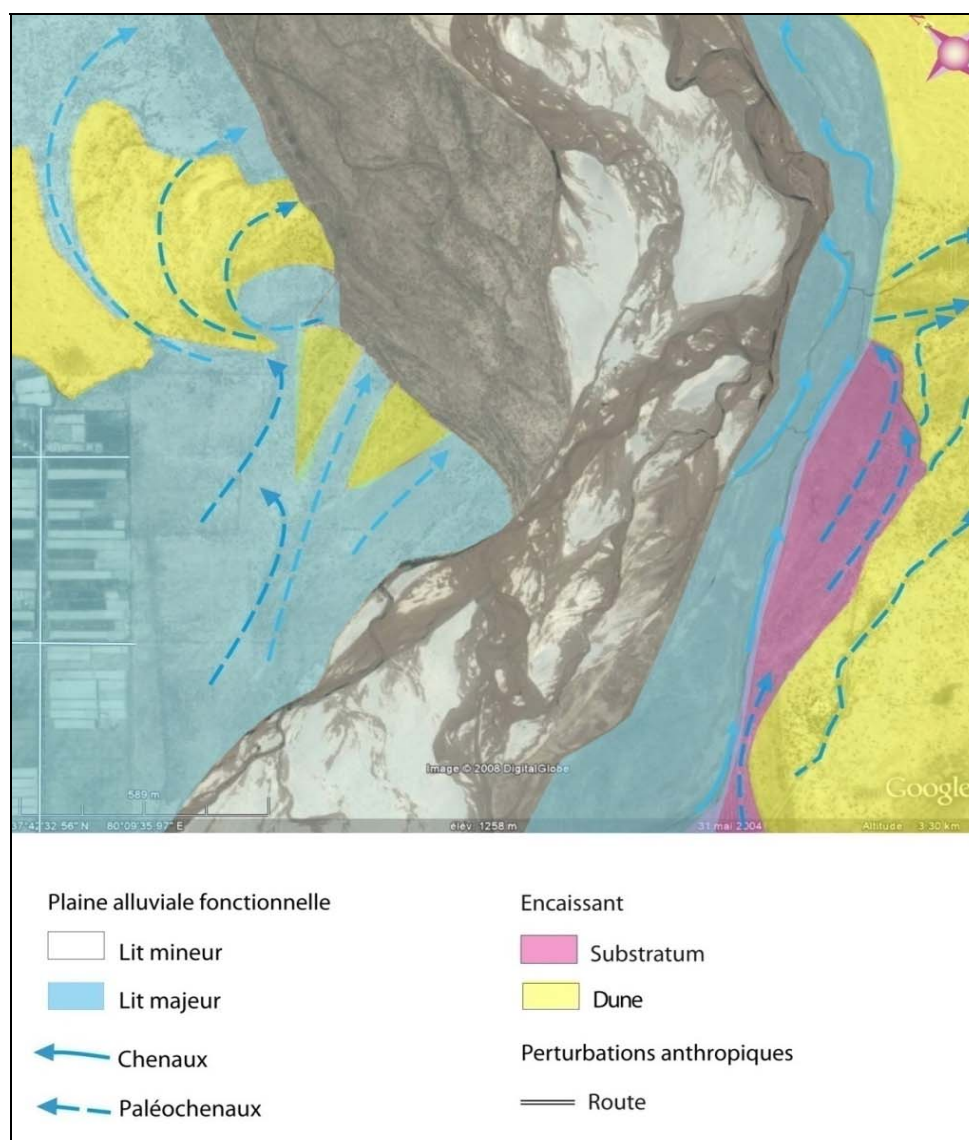


Figure 22 - Carte hydrogéomorphologique du Karakash Darya à Kawak (Xinjiang, Chine). [Source : M. WULAMU, 2010]

domaine méditerranéen. Très rares, ils n'en constituent pas moins un danger pour les habitations en matériaux légers, les cultures et les troupeaux comme en 1969, lors des inondations exceptionnelles en Tunisie centrale et méridionale (J.L. BALLAIS, 1972, p. 185).

En domaine tropical plus ou moins humide, il semble que les bourrelets de berge soient particulièrement développés (Amazone, Gange, Yangzi) et les lits majeurs très vastes, sujets à des inondations gigantesques et très meurtrières du fait de ce dispositif. Des combinaisons complexes peuvent résulter de l'alternance de pluies de mousson et de pluies de cyclone et favoriser la genèse de lits majeurs exceptionnels comme sur la Chamberlain River à El Questro (Australie du Nord-Ouest) (Photo 58).

Les applications de la méthode hydrogéomorphologique effectuées dans les DOM-COM, parfois à grande échelle (Nouvelle-Calédonie) ne mettraient en évidence aucune contradiction majeure avec l'expérience acquise dans l'hexagone (M. MASSON, G. GARRY, P. BUQUET, communications orales).



Photo 58 - La Chamberlain River à El Questro (Western Australia, Australie).

[Source : J.L. BALLAIS, 2005]

Lit majeur ordinaire (au premier plan), talus et lit majeur exceptionnel (à l'arrière plan).

2) Les facteurs anthropiques

L'analyse hydrogéomorphologique s'applique d'abord à l'espace fluvial non perturbé par les activités humaine. Elle demeure cependant très efficace même lorsque des transformations d'origine anthropique ont profondément bouleversé le milieu naturel. Ces transformations peuvent, comme nous le verrons, modifier notablement le fonctionnement hydraulique de la plaine alluviale fonctionnelle, soit dans le sens de l'accélération de la vitesse du flot, soit au contraire dans celui du freinage et de la rétention. Elles peuvent aussi perturber l'interprétation hydrogéomorphologique en modifiant la morphologie des différents lits ainsi que leurs limites. 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 (M. MASSON, sous presse).

a. Les travaux et ouvrages hydrauliques

Les travaux et ouvrages hydrauliques mis en œuvre dans les plaines alluviales peuvent être classés, quel que soit le but pour lequel ils ont été réalisés, en fonction de leurs incidences vis-à-vis de la propagation des crues. On distinguera ainsi (M. MASSON, sous presse) les modifications :

- Qui favorisent les écoulements tout en limitant la vulnérabilité aux inondations et à l'érosion fluviale. Ces travaux et ouvrages relèvent suivant les cas de l'hydraulique fluviale (curages, recalibrages, rescindements, rectifications, dérivations, endiguements, cuvelages, couvertures, épis de protection de berges, seuils), de l'hydraulique agricole (drainages) ou de l'hydraulique urbaine (réseaux d'assainissement pluvial). Les extractions de matériaux longtemps opérées dans les lits mineurs en France ont également des répercussions sur l'écoulement des crues.
- Qui font obstacle aux écoulements : seuils, barrages, ouvrages de franchissement de la plaine alluviale ; constructions diverses, clôtures...
- Qui favorisent la rétention : barrages, lacs collinaires, techniques alternatives à l'assainissement pluvial urbain (tranchées drainantes, chaussées poreuses, bassins de rétention).
- Qui accroissent la vulnérabilité des biens et des personnes : extension de logements aux rez-de-chaussée d'immeubles, altération d'ouvrages de protection.

- Les travaux et ouvrages qui favorisent les écoulements

Recalibrages, rescindements et rectifications affectent essentiellement le lit mineur et, lorsqu'il existe, tout ou partie du lit moyen. Employés depuis très longtemps dans le but de protéger les lits majeurs mis en culture des crues les plus fréquentes (annuelles à décennales), ils ont été peu à peu généralisés à une grande partie du réseau hydrographique français, du moins sur les petits et moyens cours d'eau. Le rôle des recalibrages sur l'hydraulique des crues commence à être mieux connu, quoique les évaluations chiffrées soient encore peu nombreuses. Bien qu'ils aient pu longtemps être considérés comme bénéfiques, ils ont, en réalité, des conséquences très variables sur le fonctionnement hydraulique du cours d'eau. En effet, il est en principe possible de dimensionner le lit mineur d'un cours d'eau de telle sorte qu'il assure sans débordement le transit des plus fortes crues. Dans ce cas, la cartographie hydrogéomorphologique des zones inondables devient de fait obsolète. Mais l'expérience montre les limites de ces interventions. Ainsi, dans le cas le plus courant, la diminution de la pointe de crue est peu significative, et ne remet pas en question la cartographie hydrogéomorphologique. Par exemple, le recalibrage à grande échelle du Gardon (Gard) au moyen d'extractions de matériaux opérés au cours des années 1970-1985 n'a permis, au vu d'une modélisation hydraulique, d'abaisser le fil de l'eau d'une crue exceptionnelle de type 1958 que de 10 % (hauteur de 2,70 m au lieu de 3,00 m sur le lit majeur) (CÉTÉ Méditerranée, 1997). Et il n'a nullement empêché le flot de la crue de 2002 d'envahir le lit majeur ordinaire, de provoquer une défluviation et de recouvrir le lit majeur exceptionnel à Saint-Geniès-de-Malgoirès (*infra*, p. 52). Le cas de l'Hers Mort, affluent de rive droite de la Garonne, étudié par N. FAVRE (2004) et F. GAZELLE (2004), est un autre exemple, parmi d'autres, de la perte de l'effet de laminage produit par la submersion d'un vaste lit majeur, à la suite d'un recalibrage effectué pour évacuer le débit d'une crue de fréquence trentennale, opéré sur seulement trente kilomètres de ce cours d'eau à l'amont de Toulouse.

Le résultat de ces interventions est donc une modification radicale de la morphologie, du lit mineur en particulier, qui peut aller du reprofilage par curage ou terrassement sans changement du tracé (exemple de cours d'eau d'ordre 1 à 2 dans le bassin versant du Gardon, voir *supra*, p. 35), jusqu'à la rectification complète de ce tracé sur des longueurs de quelques kilomètres à quelques dizaines de kilomètres (Photo 59). Des travaux plus localisés, tels que des rescindements de méandres, ont été également réalisés fréquemment afin de protéger des agglomérations menacées.

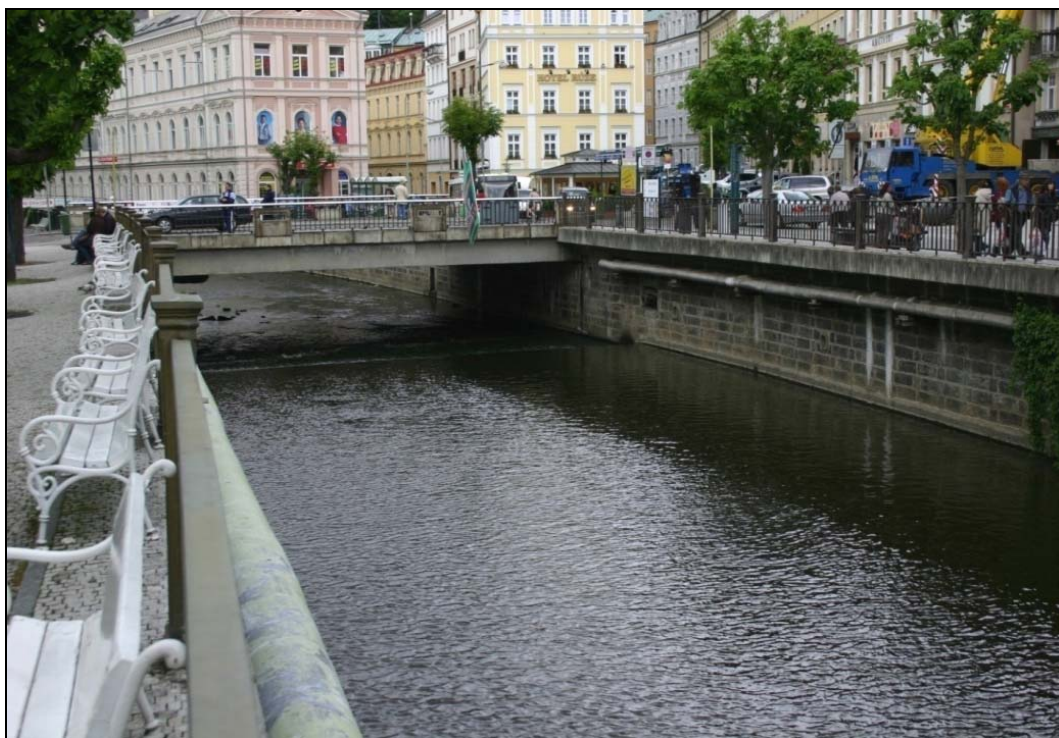


Photo 59 - La Tepla à Karlovy Vary (République tchèque).

[Cliché : J.L. BALLAIS, 2007]

Ces modifications, très apparentes lorsqu'elles sont relativement récentes, peuvent passer inaperçues au bout de quelques années, du fait de la dégradation que subissent ces aménagements sous l'effet de la morphogenèse et de leur reconquête par la flore et la faune.

Le constat de cette évolution régressive par rapport au but recherché (mais *a contrario* progressive au plan environnemental : écologie et paysage en particulier) a fréquemment conduit les aménageurs à les conforter par la mise en place d'ouvrages ponctuels ou généralisés destinés à fixer les profils et les tracés des lits mineurs. Il s'ensuit une artificialisation plus ou moins complète, assurée le plus souvent par la mise en place d'enrochements à l'exemple de la Cadière qui se jette dans l'Étang de Berre (M. FIANDINO, 2003) (Bouches-du-Rhône), mais aussi par la canalisation (basse Vilaine, en Ille-et-Vilaine) en pierre ou en béton (très nombreux exemples également depuis des cours d'eau d'ordre 3 ou 4 comme la Touloubre à Pélissanne (Bouches-du-Rhône) jusqu'à la Seine à Paris, en passant par l'Ill à Strasbourg ou la Tepla à Karlovy Vary (République tchèque – Photo 59), voire, en milieu urbain, par la couverture pure et simple (très nombreux exemples, dont celui de l'oued Fès à Fès, au Maroc, et celui, exceptionnel, du Paillon, à Nice, dans les Alpes-Maritimes).

En pratique, il est toujours utile d'identifier ces aménagements et même de reconstituer les différentes étapes de l'intervention humaine, de manière à mieux comprendre le fonctionnement initial du cours d'eau qui était souvent très éloigné de ce qu'il est devenu au fil du temps.

On utilise également l'analyse hydrogéomorphologique par ailleurs pour tenir compte des risques de changement brusque de lit d'un bief de cours d'eau auparavant dérivé, par exemple selon la technique du vallat (*supra*, p. 35). Ces dérivations ont pu être réalisées dès l'Antiquité : l'épisode du nettoyage des écuries d'Augias par Héraklès en est la traduction mythique et le détournement du Busento, en Italie, pour y enterrer Alaric, la preuve de sa

maîtrise (W. DURANT, 1963). Au Moyen-Âge, les dérivations se développent en France, comme sur la Seine à Troyes ou sur une rivière des environs de Soissons en 1196, sur le Drac à Grenoble dès le XIII^{ème} siècle, mais aussi dans de nombreuses régions musulmanes et en Chine. La municipalité de Toulouse projette même de dévier la Garonne en plusieurs bras au milieu du XV^{ème} siècle (J.P. LEGUAY, 2005, p. 99 et 109) Au cours de cette période, la dérivation est une technique fréquemment utilisée pour construire les ponts (C. THOMASSET, 2006) et il est arrivé plusieurs fois que le cours d'eau ne revienne pas dans son lit mineur naturel. Plus tardivement, on a canalisé l'Èze à Pertuis, l'Aigues à Orange (Vaucluse) ou l'Aude à nouveau (J. ASTIER, 1992) dans ses basses plaines. Plus récemment encore, les dérivations ont été multipliées afin de drainer les zones humides traversées par les cours d'eau ou d'alimenter des cours d'eau d'autres bassins versants (la Neste pour les rivières du plateau de Lannemezan ou les dérivations multiples des systèmes de barrages hydrauliques dans les Alpes).

L'ancien tracé, bien qu'en apparence entièrement effacé par les travaux agricoles ou l'extension des agglomérations, peut être remis en activité lors d'une grande crue qui provoque des dégâts considérables, ce qui fut probablement le cas pour la Seine à Paris en 1910 (Fig. 33) et sûrement pour l'Èze à Pertuis en 1993. Or, une analyse géomorphologique peut, indépendamment des données d'archives, très utiles par ailleurs (*infra*, p. 114), mettre en évidence la modification subie par le cours d'eau et par conséquent les risques de retour accidentel à l'ancien lit.

Les endiguements concernent, sous des formes variées, une grande partie du réseau hydrographique, soit en accompagnement, sous forme de merlons de terre (particulièrement net sur la basse Vilaine), de recalibrages et rectifications réalisés pour la protection de zones cultivées, soit en tant qu'ouvrages largement dimensionnés construits en fonction de la présence de zones aménagées (Photo 60).



Photo 60 - Le Sals à Rennes-les-Bains (Aude). [Cliché : J.L. BALLAIS, 1999]

Ils ont, au plan hydraulique, sensiblement la même fonction que les recalibrages, en l'amplifiant, avec l'espoir presque toujours déçu sur le long terme de canaliser toutes les crues jusqu'aux plus importantes (à l'exemple des levées de la Loire (R. DION, 1961 ; J.P. LECOMPTE, 2000), ou de celles de très nombreux cours d'eau de l'Asie des Moussons comme le Hoang He et le Yangzi). Leurs modes de construction sont très hétérogènes, de même que leur implantation, plus ou moins proche de la berge du lit mineur, et le niveau d'entretien dont ils ont bénéficié.

- Les obstacles artificiels aux écoulements

Les seuils et ouvrages hydrauliques implantés dans le lit mineur n'ont en général par eux-mêmes que peu d'incidence sur l'écoulement des grandes crues et sur les relations de celles-ci avec les unités hydrogéomorphologiques. En revanche, un ouvrage de franchissement d'une plaine alluviale qui associe un pont sur le lit mineur et un remblai d'accès routier calé à la cote du pont constitue un obstacle dont les effets directs peuvent s'avérer extrêmement négatifs. Des différences majeures de comportement s'observent ainsi entre des ponts médiévaux ou modernes "en dos d'âne" (Photo 61) et des ouvrages contemporains (Photo 62).



Photo 61 - Pont de Sant Joan de les Abadesses (Catalogne, Espagne).

[Cliché : J.L. BALLAIS, 2005]

Les crues de novembre 1999 dans l'Aude ont bien montré ces comportements. Par exemple, au pont médiéval d'Ornaisons, la crue, débordant rapidement sur un remblai d'accès de faible hauteur (1 à 2 mètres), n'a atteint qu'une hauteur réduite sous l'arche centrale. Les limites du champ d'inondation n'ont pas été modifiées et la rupture du remblai d'accès n'a pas entraîné de conséquences graves. À l'inverse, le cas où le profil de l'ouvrage est horizontal, par conception d'origine ou par transformations ultérieures, est illustré par la voie ferrée Marseille-Toulouse sur la commune de Villedaigne. Au franchissement de l'Orbieu, le



Photo 62 - Thomond Bridge sur le Shannon à Limerick (Irlande).

[Cliché : J.L. BALLAIS, 2009]

remblai qui a permis de caler la voie ferrée au niveau de la terrasse alluviale qui encadre la plaine alluviale fonctionnelle a fait barrage et provoqué le débordement des eaux sur cette terrasse alluviale en rive gauche et sur le remblai, provoquant la rupture de celui-ci. La photo 63 indique la hauteur de l'eau atteinte dans Raissac.



Photo 63 - Repère de la crue de l'Aude en 1999 à Raissac (Aude).

[Cliché : J.L. BALLAIS, 2001]

Les courants violents qui en ont résulté ont convergé sur le village de Villedaigne, situé immédiatement à l'aval, et ont provoqué des dégâts considérables. Une conséquence secondaire de l'effet de barrage produit par le remblai d'accès au pont a été la constitution d'un plan d'eau qui a provoqué l'inondation de l'encaissant de la plaine alluviale fonctionnelle de l'Orbieu.

Les ouvrages transversaux, parce qu'ils ralentissent la vitesse du cours d'eau en crue, provoquent une sursédimentation dans le lit majeur. Cela s'observe parfois sur des cours d'eau d'ordre 1 à 2 (Riaille à Entrechaux dans le Vaucluse) et surtout sur des cours d'eau d'ordre 3, 4 et plus (Èze, Ouvèze, Argent Double). L'obstacle est souvent constitué par un pont et le remblai de la route qui le dessert (Riaille à Entrechaux, Èze à Pertuis, Ouvèze à Roaix – F. DELORME, 2004) (Photo 64). Les cas les plus nets, spectaculaires, que l'on connaisse aujourd'hui ont été étudiés dans l'Aude à la suite des crues de 1999. Ils concernent le Canal du Midi, achevé en 1681, et qui, parce qu'il franchit le lit majeur de plusieurs affluents de rive gauche de l'Aude a provoqué, en trois siècles, une sursédimentation telle que la dénivellation entre l'amont et l'aval du Canal atteint plusieurs mètres (Fig. 23) (S. CHAVE, 2002 ; F. DELORME, 2004 ; V. DELORME-LAURENT, 2007 ; F. DELORME *et al.*, 2009).



Photo 64 - Sursédimentation dans le lit majeur de l'Ouvèze, à l'amont d'une route (à droite), à Roaix (Vaucluse). [Cliché : F. DELORME, 2004]

Par ailleurs, des obstacles dispersés en zone inondable, tels que des constructions à usage d'habitation, peuvent conduire à des modifications importantes du fonctionnement hydraulique en période de crue. Le cas de la ville de Mende, qui a fait l'objet d'une étude hydrogéomorphologique au premier semestre de 1994, puis de très nombreux relevés des hauteurs d'eau au cours de la crue de septembre de la même année, montre l'importance des variations qui peuvent être enregistrées (M. MASSON *et al.*, 1996).

Il est ainsi démontré que les relevés des plus hautes eaux ou Plus Hautes Eaux Connues (PHEC) utilisés dans les études hydrauliques peuvent, compte tenu de leur densité généralement très faible, être entachés de marges d'erreur susceptibles de fausser les résultats de ces études. On souligne ainsi le danger de ne retenir, en France, pour les spécifications des aléas, que des valeurs brutes (1 mètre par exemple en matière de hauteur d'eau) non assorties de marges d'erreur raisonnables.

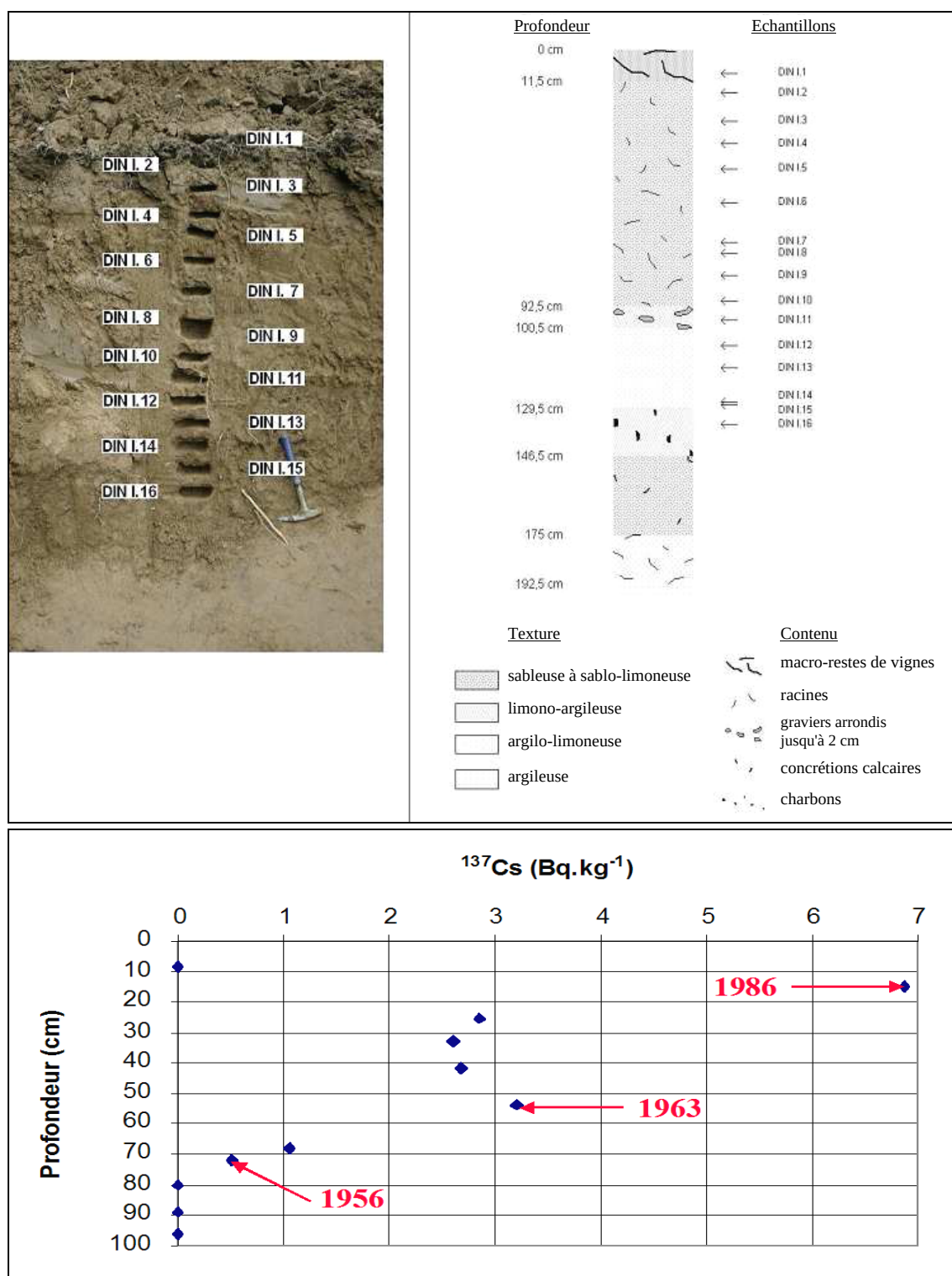


Figure 23 - Exhaussement du lit majeur de l'Argent-Double au cours du XX^{ème} siècle à La Redorte (Aude). [Source : F. DELORME, 2004]

Il existe d'autres exemples d'obstacles dispersés en zone inondable, comme les remblais dont l'importance varie depuis le remblaiement marginal (comme sur le Karakash Darya à l'aval du pont d'Ulugata – M. WULAMU, 2010) jusqu'à la transformation totale (aval de l'oued Mekraz à Fès, au Maroc – A. GARTET, 2007) en passant par les terrils constitués des déchets

des mines de charbon dans les vallées au nord d'Alès ou encore les décharges comme dans le lit majeur de l'Argent-Double et l'exhaussement des lits majeurs dans les villes, comme à Paris dès 1507 (J.P. LEGUAY, 2000, p. 195).

Les barrages mériteraient un développement important qui sort du cadre de cet ouvrage. Dans le cas le plus extrême, comme le Haut Barrage d'Assouan sur le Nil, ils permettent un contrôle total du régime du cours d'eau. Alors, mais aussi lorsque le contrôle n'est pas complet, comme celui du barrage d'Ulugata sur le Karakash Darya (Xinjiang, Chine), le nouveau régime imposé par les besoins de la production d'hydroélectricité ou l'irrigation écrête les plus fortes crues et oblige le cours d'eau à réduire la superficie de la plaine alluviale fonctionnelle et à ajuster éventuellement de nouveaux lits. Sur le Karakash Darya, le lit majeur n'est plus que très rarement inondé et c'est le lit moyen qui se transforme en lit majeur (J.L. BALLAIS *et al.*, sous presse). Dans le cas de petits barrages destinés à l'irrigation, l'écoulement peut être presque totalement interrompu à l'aval et les lits devenir progressivement peu distincts (oued Mekraz au Maroc – A. GARTET, 2007).

- Les aménagements qui favorisent la rétention

Ils vont dans le sens d'une meilleure intégration des caractéristiques du milieu fluvial. Il faut cependant remarquer que l'efficacité des techniques alternatives au ruissellement pluvial urbain est fortement limitée par leur coût et la proportion d'espace urbain qu'il est effectivement possible de traiter. De ce point de vue, les rétentions qu'on obtient ainsi ne peuvent rivaliser avec ce qu'il serait possible de réaliser en utilisant les lits majeurs des cours d'eau périurbains, voire urbains. La comparaison est d'autant plus nécessaire à faire que l'utilisation de ces lits majeurs comme zones d'expansion des crues s'accommode aisément de la création d'espaces verts et de parc urbains, voire d'aires de sport, ce qui constitue une valorisation économique et sociale de ces espaces.

- Les aménagements générateurs d'une augmentation de la vulnérabilité

Des modifications récentes apportées à des aménagements hydrauliques destinés à protéger des agglomérations anciennes implantées partiellement en zone inondable peuvent s'avérer génératrices de nombreux dysfonctionnements. Ces modifications résultent le plus souvent de l'oubli des raisons pour lesquelles ont été réalisés ces aménagements.

Tel est le cas par exemple de la transformation en logements ou en boutiques de rez-de-chaussée d'immeubles, initialement utilisés comme remises (Sommières, Gard). Très nombreuses également sont les réductions de la section d'écoulement d'un cours d'eau et de sa plaine alluviale fonctionnelle, comme cela s'était produit par exemple sur les cadereaux de Nîmes (Éditions ville de Nîmes, 1989).

b. Les pratiques agricoles

Certaines pratiques agricoles peuvent modifier le régime des cours d'eau ou/et l'organisation des lits dans la plaine alluviale fonctionnelle.

Il est probable que la déprise agricole, en France et en Europe, constitue un facteur favorable à la réduction du ruissellement et à l'atténuation des crues. De ce strict point de vue, on peut donc considérer que leurs vallées sont globalement moins exposées aux très grandes crues qu'au XIX^{ème} siècle. Cette conclusion doit cependant être nuancée pour tenir compte de l'accroissement du ruissellement consécutif à la saturation des sols soumis à des pluies prolongées qui a été observée plusieurs fois, en domaine méditerranéen, lors de pluies très

intenses (G. ARNAUD-FASSETTA *et al.*, 1993). Même dans le cas de rétraction du terroir cultivé, la concentration des cultures, des vignes en particulier, à proximité des cours d'eau peut provoquer un accroissement du ruissellement en facilitant la connexion avec ces cours d'eau (M. LÉONARD, 2003 ; F. DELORME *et al.*, 2009). Par ailleurs, dans les nombreux pays où la surface cultivée continue à s'accroître, toutes choses égales par ailleurs, le taux de ruissellement augmente.

Dans les vallons secs du domaine méditerranéen et de la zone tempérée, le défrichement ne laisse souvent subsister qu'une mince bande végétale sur le lit mineur (Photo 65). Encombré, avec souvent la formation d'un "bouchon végétal", 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. Tel a été le cas de la commune d'Aix-en-Provence et de sa banlieue (J.L. BALLAIS *et al.*, 1999), des petits cours d'eau proches de Fréjus (M. MASSON *et al.*, 1996), ainsi que de nombreux petits sous-affluents (d'ordre 1 à 3) du Gardon pendant la crue du 9 septembre 2002 (C. ESPOSITO, 2003 ; J.L. BALLAIS et S. CHAVE, 2005).



Photo 65 - Vallon sec d'un sous-affluent du Gardon (Gard).

[Cliché : J.L. BALLAIS, 2005]

Le rôle des drainages agricoles paraît marginal et très localisé dans les bassins versants. En revanche, les curages, recalibrages et endiguements réalisés à des fins agricoles ont touché dans le passé un linéaire très important de cours d'eau. Bien que moins spectaculaires que des travaux récents (Photo 66), ils ont également de fortes répercussions sur la formation des crues du fait de leur généralisation.

Les modifications des aménagements et des pratiques agricoles, qui portent sur le parcellaire (élimination des haies en Bretagne et en Normandie, des murets dans le Midi méditerranéen, remembrements partout qui se marquent par les mêmes actions), sur le choix



Photo 66 - Aménagement des lits de l'Ouvèze à Vaison-la-Romaine (Vaucluse) après la crue du 22 septembre 1992. [Cliché : J.L. BALLAIS, 1995]

des cultures (cultures de plein champ ou vignes à la place de prairies ou de friches) ou sur le désherbage (par exemple des vignes), l'utilisation d'engins mécaniques qui tassent le sol, le regroupement des cultures en quartiers homogènes (vignes dans le Midi méditerranéen, labours en Pays de Caux – E. HAUCHARD, 2001) augmentent systématiquement le coefficient de ruissellement, ainsi que l'érosion des sols (Photo 67), pour se limiter à des exemples français.



Photo 67 - Vignes à Saint-Chaptes (Gard). [Cliché : J.L. BALLAIS, 2005]

c. L'imperméabilisation des sols due à l'urbanisation

Elle produit un accroissement systématique du ruissellement pluvial et, par la pratique des réseaux d'assainissement, provoque l'accélération des écoulements (P. GABERT, 1996). Ce phénomène bien connu a suscité l'emploi de techniques alternatives au ruissellement pluvial, encore assez peu mises en pratique (C. CHAMOUX, 2003).

L'impact de l'urbanisation est fonction du rapport qui existe, dans chaque bassin versant, entre les superficies urbanisées et les surfaces naturelles ou agricoles. Il peut être très important pour des petits bassins versants en grande partie construits comme celui de la Cadière (M. FIANDINO, 2003), mais reste encore relativement faible dans la plupart des cas. À cette même échelle, l'apport de pluie ruisselée sur les autoroutes peut jouer un rôle non négligeable au moment des précipitations intenses (P. GABERT et J. NICOD, 1982 ; J.L. BALLAIS *et al.*, 1999).

d. Conclusion

La conjugaison de plusieurs types d'aménagements, de logique et d'âge différents, peut provoquer une aggravation des crues et de leurs dégâts, comme le 15 juin 2010 dans le département du Var (C. MARTIN, 2010). La conséquence de toutes ces interventions a été montrée, en termes quantitatifs, pour le Geer, cours d'eau belge dont le bassin versant atteint un peu moins de 500 km² (G. MABILLE et F. PETIT, 1987) : après la fin des aménagements en 1980, le nombre de fois où le débit a atteint 5 m³/s n'est plus corrélé au nombre de périodes de trois jours consécutifs où on a recueilli au moins 40 mm de pluie (Fig. 24).

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

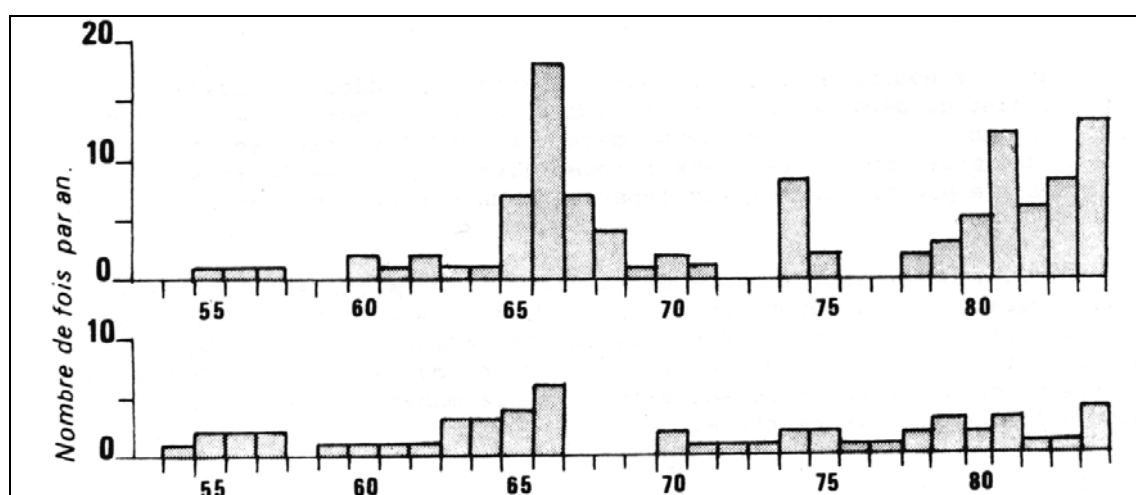


Figure 24 - Conséquences de l'aménagement du bassin versant du Geer (Belgique) sur la périodicité des crues. [Source : G. MABILLE et F. PETIT, 1986]

En haut, le nombre de fois où les débits ont été égaux ou supérieurs à 5 m³/s. En bas, le nombre de fois où, en une année, des pluies supérieures à 40 mm se sont produites sur trois jours successifs.

IV - L'ÉVOLUTION DES UNITÉS HYDROGÉOMORPHOLOGIQUES À L'ÉCHELLE HISTORIQUE

1) L'évolution des lits mineurs

L'évolution transversale des lits mineurs est fréquemment intégrée en France dans les études hydrauliques, du fait de son caractère apparent, voire spectaculaire. Elle se traduit par des changements de tracé, rapides dans les zones d'ablation et de transfert des cours d'eau, plus progressifs à l'aval, dont on peut en partie reconstituer l'historique, pour la période contemporaine, à partir de photographies aériennes et de cartes topographiques. Il est parfois difficile de distinguer la part de ces évolutions due au morphodynamisme propre de la rivière de celle qui résulte des interventions humaines.

Moins visible est la modification du profil longitudinal qu'on peut observer sur certaines portions du réseau hydrographique. Il s'agit en général d'un abaissement du fond du lit par érosion régressive, ce que l'observation des ponts met bien en évidence (Photo 68).

Lorsqu'elle concerne les zones d'ablation ou de transfert, elle est généralement interprétée par les géomorphologues (J.P. BRAVARD et F. PETIT, 1997) comme la conséquence d'un déficit d'apport en matériaux alluvionnaires, déficit lui-même consécutif à la décroissance de l'ablation sur les versants.



Photo 68 - Pont sur l'oued Za (Maroc). [Cliché : J.L. BALLAIS, 1994]

Une autre cause d'approfondissement du lit mineur est liée, dans de nombreux cours d'eau, aux extractions de matériaux opérées soit par les carrières (gravières, sablières), soit par les travaux de recalibrages. Sur un grand nombre de cours d'eau méditerranéens comme le

Gardon, l'Ouvèze ou la Durance, cet approfondissement peut atteindre localement 1 m (A. BRANKA, 2002 ; V. DURIN, 2001). Les récentes études menées sur le bassin versant de l'Orb (Hérault) ont permis d'estimer l'impact des extractions dans le lit mineur du fleuve (J.R. MALAVOI, 2004) : sur le secteur de Thézan les Béziers (amont de Béziers), l'abaissement de ce lit mineur peut atteindre 3 à 4 m depuis les années 1930-1940.

Il peut arriver que, comme on l'observe en Guadeloupe (M. MASSON, communication écrite) et dans le domaine méditerranéen (J.L. BALLAIS, 1995 ; J.L. BALLAIS, 2009-b), l'incision du lit mineur dans son substratum soit telle qu'elle lui permette d'absorber les plus grandes crues. Le lit majeur se trouve alors perché par rapport au lit mineur, devient donc une terrasse alluviale et ne joue plus de rôle dans la propagation de ces crues. Ce cas de figure, rare, peut s'observer sur les petits cours d'eau où le recalibrage a atteint des proportions très importantes par rapport aux débits à écouler (nombreux exemples de cours d'eau d'ordre 1 à 2, sous-affluents du Gardon, en Gardonnenque). En Andalousie, au Maroc, en Algérie et en Tunisie, c'est l'entaille régressive récente sur les cours d'eau d'ordre 2 à 4 (J.L. BALLAIS, 1991 ; J.L. BALLAIS *et al.*, 2003, J.L. BALLAIS, 2009-b) combinée à l'extension des terres cultivées, qui constitue le moteur de cette évolution (Photo 69).



Photo 69 - Entaille contemporaine du lit mineur du rio Cuadros (Bedmar, Andalousie, Espagne). [Cliché : J.L. BALLAIS, 2007]

Le creusement atteint 2 m depuis la construction du pont.

2) L'évolution des lits majeurs

À l'échelle historique, une tendance à l'accumulation de limons dans le lit majeur de nombreux cours d'eau du Midi méditerranéen français a été prouvée ou confirmée récemment. On l'observe, en particulier, sur les fleuves côtiers du Roussillon (A.T. GROVE et

O. RACKHAM, 2001, p. 251 ; M. CALVET *et al.* 2002), le Rhône et plusieurs de ses affluents (Ouvèze (J.L. BALLAIS (2009), Aigues, Gardon, Durance) ou sous-affluents (Èze, Riaille – J.L. BALLAIS *et al.*, 2004). Cette tendance coïncide partiellement avec une phase majeure de colluvionnement sur les versants, générée par l'extension maximale des sols cultivés pendant la période moderne et le début de la période contemporaine (XVII^{ème} - XIX^{ème} siècles). L'utilisation de radioisotopes artificiels (^{137}Cs et ^{134}Cs) ou naturels (^{210}Pb) a permis de montrer qu'au cours du XX^{ème} siècle, cette tendance persistait, au moins pour le Gardon d'Anduze (crue de 1958) et l'Ouvèze (crue de 1992) (P. BONTÉ *et al.*, 2001 ; J.L. BALLAIS *et al.*, 2004), ainsi que pour l'Aude et l'Argent-Double (voir Fig. 23) (F. DELORME, 2004 ; F. DELORME *et al.*, 2009).

Ces dosages (P. BONTÉ *et al.*, 2001) ont permis d'évaluer à environ 30 cm l'épaisseur de sédiments déposée lors de la seule crue de 1958 dans le lit majeur du Gardon d'Anduze à Attuech (Gard) (Fig. 25) et à une épaisseur au moins équivalente lors de la crue de 1992 de l'Ouvèze à Vaison-la-Romaine (Vaucluse).

Enfin, l'utilisation du ^7Be , pour la première fois en France, a permis de mesurer l'épaisseur des dépôts accumulés par la crue de 2002 dans les lits majeurs de la Cèze, du Gardon et de plusieurs de leurs affluents (V. DELORME-LAURENT, 2007). À l'exception d'un cas d'absence de dépôt, à Dions, les épaisseurs se répartissent entre quelques millimètres (moins de 1 cm à Attuech, Photo 70) et jusqu'à 18 cm sur le Gardon, à la sortie des ses gorges, juste à l'amont du Pont du Gard.

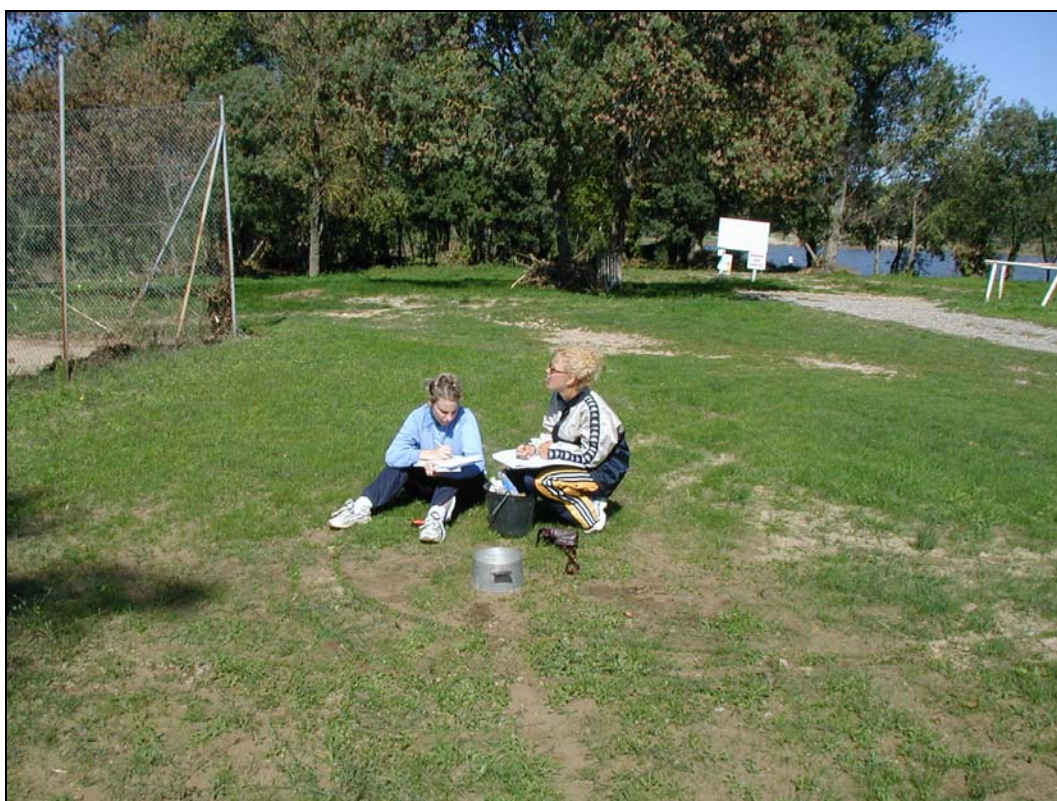


Photo 70 - Prélèvement des dépôts de la crue de 2002 à Attuech (Gard).

[Cliché : S. CHAVE, 2002]

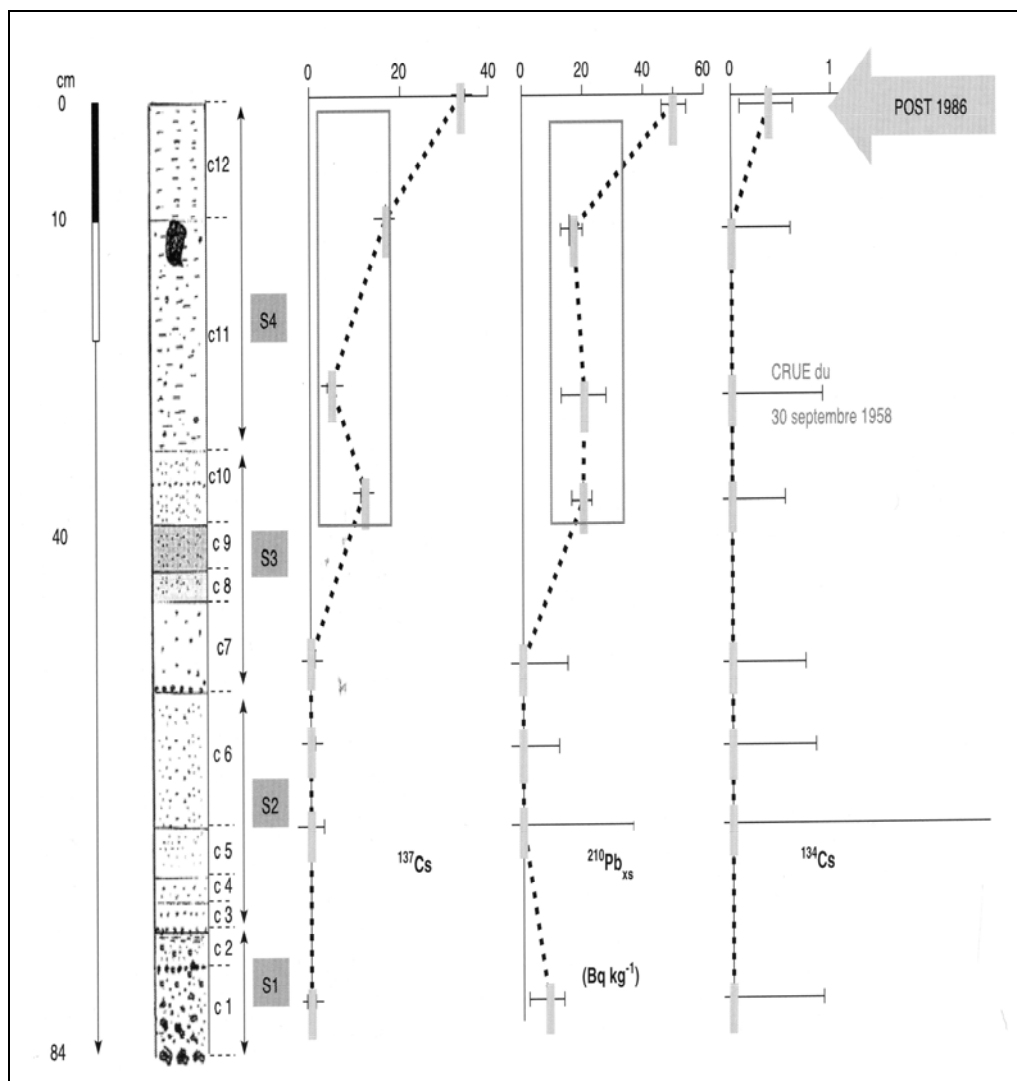


Figure 25 - Accumulation dans le lit majeur du Gardon d'Anduze au cours du XX^{ème} siècle (Attuech, Gard).

[Source : P. BONTÉ *et al.*, 2001]

Négligée ou sous-estimée jusqu'à ces dernières années, cette tendance à la surélévation des lits majeurs pose des problèmes d'aménagement importants, mais dont l'évaluation n'en est encore que dans sa phase initiale. Ces problèmes sont liés à l'élévation, corrélative à celle de la surface topographique du lit majeur, de la ligne d'eau des crues, dont les plus fortes peuvent finir par inonder les agglomérations qui étaient implantées de manière à échapper à ces crues. En particulier, la terrasse alluviale la plus basse peut devenir ainsi inondable, comme la crue du Gardon de 2002 l'a montré à Remoulins (C. ESPOSITO, 2003 ; C. ESPOSITO *et al.*, 2009). La limite externe du lit majeur doit donc être considérée dans ce contexte comme une limite minimum de la zone inondable (J.L. BALLAIS *et al.*, 2004), ce que viennent de prouver, une fois de plus, les inondations du 15 juin 2010 dans le département du Var (C. MARTIN, 2010).

Partie I - Chapitre III

CORRESPONDANCE ENTRE L'HYDROGÉOMORPHOLOGIE ET LE FONCTIONNEMENT HYDRAULIQUE

L'analyse et la cartographie hydrogéomorphologiques, si elles contribuent à compléter et à enrichir les connaissances acquises sur l'organisation et le fonctionnement des milieux fluviaux, ont avant tout pour finalité d'évaluer l'aléa hydrologique et de permettre l'élaboration de stratégies de prévention de cet aléa. Cet objectif est traditionnellement celui des études hydrologiques et hydrauliques dont les méthodologies, mises au point depuis très longtemps en application des sciences correspondantes, sont abondamment utilisées dans les études de diagnostic de l'aléa et du risque d'inondation, en France et dans de nombreux pays. Il est donc nécessaire de déterminer les apports spécifiques de chacune de ces deux démarches scientifiques.

Nous examinerons successivement les connaissances acquises en matière de calage des relations entre les unités hydrogéomorphologiques et les connaissances acquises sur les crues passées, les problèmes posés par la quantification des caractéristiques hydrologiques et hydrauliques et les possibilités offertes par le couplage des deux démarches méthodologiques (S. CHAVE, 2003).

I - LES CORRESPONDANCES GLOBALES ENTRE LES UNITÉS HYDROGÉOMORPHOLOGIQUES ET L'HYDRAULIQUE DES CRUES

Ces correspondances doivent concerner l'appareil hydrologique lui-même, indépendamment de toute perturbation générée par l'action anthropique, mais aussi tenir compte complémentaiement des modifications dues à cette action. Elles comprennent les délimitations spatiales des espaces concernés par les différents types de crues et l'évaluation des hauteurs d'eau et des vitesses d'écoulement.

1) Les délimitations des espaces concernés par les différents types de crues

M. MASSON *et al.* (1996) avaient proposé des correspondances que les études poursuivies depuis ont partiellement remises en cause :

- Lit mineur : écoulement des crues saisonnières à annuelles, qui n'inondent pas les lits moyen ou majeur (voir Photo 4).
- Lit moyen : "le lit moyen coïnciderait avec l'espace occupé par les crues fréquentes (1 à 5

ans, voire 10 ans)" (M. MASSON *et al.*, 1996, p. 43). En fait, les études précises manquent le plus souvent. Récemment, V. DELORME-LAURENT (2007) a montré que le lit moyen de l'Orbieu à Luc-sur-Orbieu présentait bien une forte fréquence de submersion (52 fois de 1960 à 2005), alors que le lit moyen de l'Ouvèze à Vaison-la-Romaine n'avait été submergé que 12 fois de 1935 à 2005.

- Lit majeur ordinaire : inondable par les crues "rares à exceptionnelles" (M. MASSON *et al.*, 1996, p. 43). Comme pour le lit moyen, il vient d'être montré (V. DELORME-LAURENT, 2007 ; J.L. BALLAIS *et al.*, 2007) que la fréquence de submersion était extrêmement variable : tous les 5,6 ans sur l'Orbieu à Luc-sur-Orbieu et seulement tous les 17,4 ans sur l'Ouvèze à Vaison-la-Romaine.

Le lit majeur exceptionnel est inondable par les crues véritablement rares : en 1940 sur le Tech (R. MUSSOT, 1992), en 1969 sur les oueds Leben, Batha et Châal-Tarfaoui en Tunisie (V. DELORME-LAURENT, 2007), en 1958 et en 2002 sur le Gardon à Saint-Geniès-de-Malgoirès (H. AIMON, 2003) et probablement sur la Cèze à Saint-André-de-Roquepertuis (V. DELORME-LAURENT, 2007), en 1999 sur l'Orbieu à Ferrals-les-Corbières (S. CHAVE, 2003).

Il devrait être facile de multiplier les études sur la fréquence de submersion des lits majeurs ordinaires, qui sont presque toujours représentés sur les cours d'eau équipés de stations hydrométriques. En revanche, pour la submersion des lits moyens, il faut disposer d'une station de mesure suffisamment proche pour pouvoir effectuer les transpositions et calculs nécessaires (V. DELORME-LAURENT, 2007).

Ces lits intègrent non seulement les crues de fréquences décennale à centennale, classiquement prises en compte dans les études hydrauliques, mais, au delà, les crues exceptionnelles, y compris celles qui remplissent l'ensemble de la plaine alluviale fonctionnelle, celles de *débit géomorphologique* (S. CHAVE, 2003 ; S. CHAVE et J.L. BALLAIS, 2006).

En pratique, en matière d'aléa inondation en France, la distinction entre lit mineur et lit moyen ne présente pas un très grand intérêt, malgré quelques exceptions comme à Vaison-la-Romaine ou à Pertuis, dans la mesure où ces deux espaces sont conjointement et fréquemment affectés par de nombreuses crues et subissent les hauteurs d'eau et les vitesses de courant les plus élevées de la plaine alluviale fonctionnelle. En revanche, dans de très nombreux pays, le lit moyen est cultivé ou construit, avec des enjeux qui ne sont pas toujours négligeables.

Quoi qu'il en soit, une attention particulière doit par contre être apportée à la limite externe du lit majeur qui sépare la partie inondable de la vallée de sa partie non inondable.

L'analyse détaillée des vallées affectées par les crues de novembre 1999 dans l'Aude et les départements limitrophes et celles de 2002 dans le Gard montre que, sur respectivement environ 350 et 492 kilomètres de cours d'eau, l'inondation est restée circonscrite à l'intérieur du lit majeur géomorphologique pour 87 à 91 % du linéaire. Les 13 à 9 % restants correspondent à des débordements hors du lit majeur imputables à des circonstances particulières (Fig. 26). L'étude s'est appuyée, d'une part, sur la cartographie hydrogéomorphologique et, d'autre part, sur la cartographie des zones inondées. Grâce à un Système d'Information Géographique (SIG), on a d'abord repéré et isolé tous les secteurs où la surface inondée excède celle du lit majeur. Chaque cas répertorié constitue un objet numérique, que nous avons nommé "polygone de dépassement" (Fig. 27). Dans un second temps, la démarche

a visé à transformer ces "polygones de dépassement" en figures géométriques simples afin de mesurer les "linéaires de dépassement". Sur chaque cours d'eau, la somme de ces linéaires unitaires rapportée au périmètre du lit majeur conduit à l'estimation du pourcentage de son "linéaire de dépassement", ou de son inverse, le "linéaire de non-dépassement". Un tri a ensuite été effectué en fonction de l'introduction d'un "seuil de significativité". Celui-ci a été estimé à travers les incertitudes techniques inhérentes à la réalisation de chaque étape de création des deux documents. Ont été ainsi prises en compte les incertitudes imputables au fond cartographique utilisé, celles liées au géoréférencement et à la digitalisation des cartes hydrogéomorphologiques et l'incertitude contenue dans le report de l'information géomorphologique sur la carte topographique. Dans la mesure où certains de ces paramètres sont très difficiles à évaluer en raison de leur caractère lié à l'appréciation humaine, la valeur retenue pour ce seuil est de 25 mètres. C'est une valeur minimale qui correspond à l'incertitude du report de l'information géomorphologique (1 mm, soit 25 mètres). Ainsi seuls les polygones de dépassement qui présentent une amplitude moyenne supérieure à cette valeur ont été considérés comme significatifs et ont fait l'objet de recherches sur les causes du dépassement (Fig. 28) (S. CHAVE, 2002 ; C. ESPOSITO, 2003 ; C. ESPOSITO *et al.*, 2009).

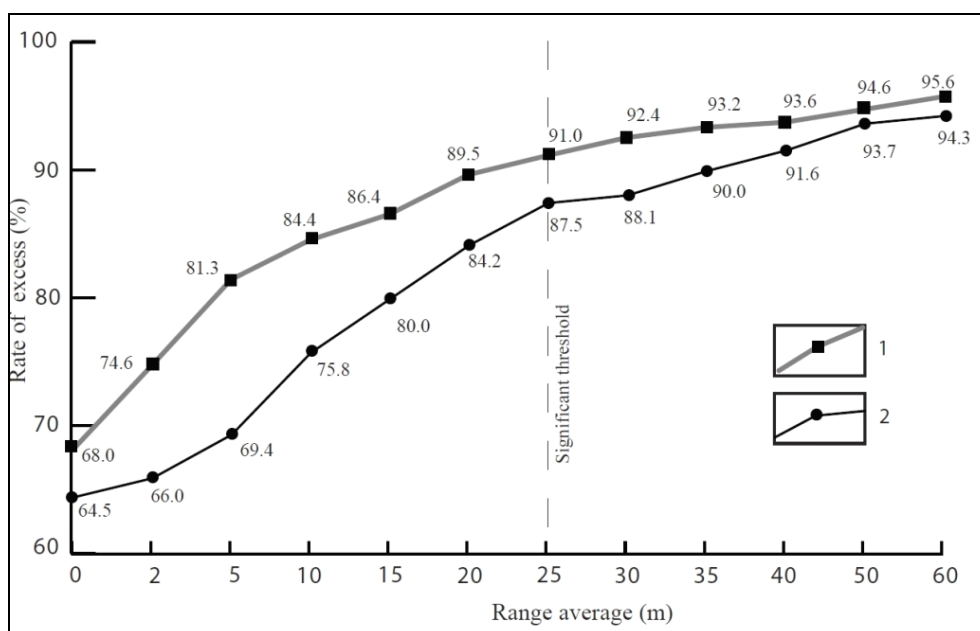


Figure 26 - Courbe moyenne du taux de non dépassement des limites de la plaine alluviale fonctionnelle (déterminées par la méthode hydrogéomorphologique) par celles des zones inondées par sept cours d'eau en novembre 1999 (1 : Aude) et en septembre 2002 (2 : Gardon).

[Source : C. ESPOSITO *et al.*, 2009]

Il se confirme ainsi que la limite du lit majeur géomorphologique peut être considérée, en l'état de nos connaissances, comme la courbe enveloppe de toutes les crues historiques. Quelques cas particuliers font exception, comme celui des apports latéraux qui peuvent réduire le champ d'inondation.

Dans ces conditions, cette limite du lit majeur constitue la seule référence commune utilisable pour tout un bassin versant, et ce contrairement aux crues historiques dites "de

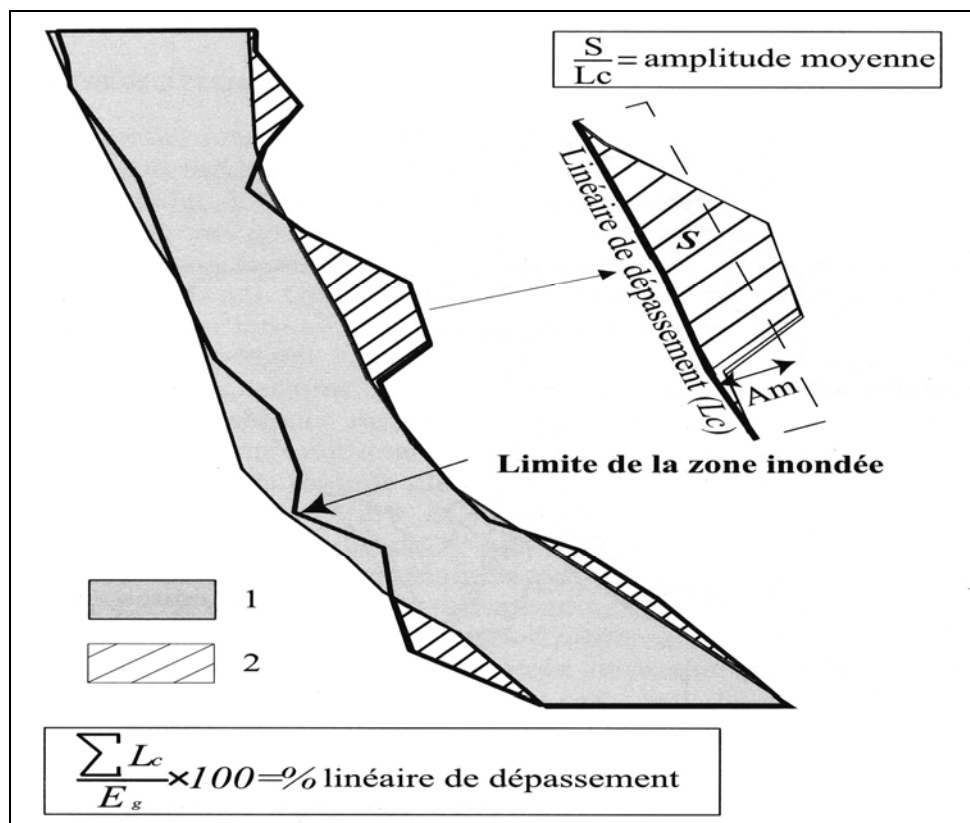


Figure 27 - Superposition des limites et schématisation des polygones de dépassement.

[Source : S. CHAVE, 2002]

1 : plaine alluviale fonctionnelle du cours d'eau. 2 : surfaces inondées au-delà de la plaine alluviale fonctionnelle (polygone de dépassement).

Cours d'eau	Enveloppe géomorphologique globale (en m)	Polygones de dépassement (nb)	"Linéaire de dépassement" significatif (en m)	Dépassement significatif (en %)	Polygones significatifs (nb)
Argent-Double	39 630	97	4 318,5	10,9	6
Orbiel	30 120	60	1 773,5	5,9	4
Clamoux	39 120	99	1 223	3,1	2
Cesse	30 580	47	0	0,0	0
Orbieu	106 400	137	27 474	25,8	30
Nielle	16 708	42	0	0,0	0
Berre	86 586	150	8 902	10,3	9
Totaux	349 144	632	43 691	12,5	51

Figure 28 - Tableau de synthèse des résultats issus de la première étape de vérification pour sept cours d'eau des Corbières et du Minervois. [Source : S. CHAVE, 2002]

référence", qui ont pu n'affecter chacune que telle ou telle partie de ce bassin. C'est à partir de cette limite physique que peut être effectuée l'interprétation globale du fonctionnement du cours d'eau lors des fortes crues, et par conséquent la mise en évidence des cas particuliers générateurs de dysfonctionnements.

L'analyse et la cartographie hydrogéomorphologiques permettent ainsi de traiter de manière homogène tous les segments du réseau hydrographique, depuis le cours d'eau

d'ordre 1 jusqu'à l'embouchure, en modulant le nombre et la qualité des informations recueillies en fonction de l'échelle de restitution demandée et de la qualité du support topographique dont elles peuvent disposer.

2) L'évaluation des hauteurs d'eau et des vitesses d'écoulement

L'analyse hydrogéomorphologique limitée aux observations de terrain ne permet pas d'évaluer directement les hauteurs d'eau susceptibles d'être atteintes par de fortes crues. On peut cependant parfois déduire des informations à ce sujet à partir de la présence de dépôts alluviaux de crues passées sur le talus externe du lit majeur à pente faible (rarement indentifiables) ou dans des abris sous roche (slack water deposits) et autres petites cavités karstiques (Gardon – N.A. SHEFFER *et al.*, 2008 ; oued el Hallouf, en Tunisie – Photo 71), Chamberlain River (Australie) ou encore de laisses de crue formées de débris flottables (végétaux, objets en matière plastique très fréquents après les inondations depuis une quarantaine d'années) ou de dépôts de limons (Gardon) ou de traces laissées par la submersion sur les constructions (Dions sur le Gardon, Ferrals-les-Corbières sur l'Orbieu).



Photo 71 - Dépôts de crue sableux de l'oued el Hallouf (Tunisie) conservés dans un abri sous roche. [Cliché : J.L. BALLAIS, 2005]

À l'inverse, l'intégration dans la méthode hydrogéomorphologique d'informations fournies par des relevés de crues historiques permet d'apporter à cette question une réponse plus ou moins complète selon les cas. Cette extension méthodologique résulte de la fusion, opérée en 2002, entre la méthode décrite par M. MASSON *et al.* (1996) et celle qui résulte des travaux de R. LAMBERT (R. LAMBERT et C. PRUNET, 2000) et de la DIREN Midi-Pyrénées (DIREN Midi-Pyrénées, 1996 – voir Fig. 36). Elle tient compte du fait que, dans certaines régions, les

relevés de niveaux d'eau atteints dans le passé sont nombreux, fiables et ont fait l'objet de mesures de nivellement (Photo 72). Les informations plus spécifiquement retenues concernent alors les relevés des niveaux topographiques atteints par les plus hautes eaux connues (PHEC), les hauteurs d'eau mesurées aux stations limnimétriques et limnigraphiques, qui peuvent donner lieu, lorsqu'elles sont assez nombreuses, à un traitement statistique, et les limites d'extension maximale des plus grandes crues connues. C'est ainsi que pour les principaux appareils hydrographiques (en général, des fleuves et rivières appartenant au domaine public fluvial français) on utilise des Plans de Surfaces Submersibles (PSS). L'expérience montre cependant que ces documents tombent très vite dans l'oubli, et que de très nombreuses extensions récentes d'agglomérations affectées par des catastrophes ont été implantées en parfaite ignorance de leur existence (par exemple dans l'Aude et le Tarn malgré les PSS de 1891 et de 1930, ou sur le Rhône aval malgré le PSS de 1911) (G. GARRY *et al.*, 2002).



Photo 72 - Repères de crues du Vidourle à Quissac (Gard).

[Cliché : J.L. BALLAIS, 2002]

Si ces données ont été le plus souvent insuffisamment utilisées dans un passé récent, on peut par contre très bien les utiliser dans le cadre de nouvelles études de diagnostic. On peut, de plus, les compléter par les données d'archives, généralement moins précises mais qui remontent souvent beaucoup plus loin dans le temps (*infra*, p. 114).

Ainsi, bien que les exemples restent encore limités, il est possible, dans des bassins versants riches en informations, de traduire directement la carte des unités hydro-géomorphologiques en carte des hauteurs d'eau relatives à une crue rare ou à une crue

exceptionnelle. En conséquence, la DIREN Midi-Pyrénées a pu réaliser des Plans de Prévention des Risques d'Inondation (PPRI) sans recourir aux modélisations hydrauliques.

En ce qui concerne les vitesses d'écoulement, il s'avèrerait hasardeux de tenter de les obtenir à partir des seules données géomorphologiques et les relevés de crues historiques sont dépourvus d'indications chiffrées à ce sujet. Par ailleurs, l'idée séduisante de déduire ces vitesses des résultats de l'analyse granulométrique des dépôts alluviaux par l'utilisation de la courbe de HJULSTRÖM (A. MONTAGNÉ, 2003), si elle se justifie dans la comparaison globale des unités hydrogéomorphologiques (vitesses très élevées dans la zone de grand écoulement et nettement plus faibles dans le lit majeur), ne permet pas de fournir des résultats quantitatifs utilisables dans les modélisations.

II - L'HYDROGÉOMORPHOLOGIE ET LA MODÉLISATION

Dans les études sur les zones inondables en France, la question de l'évaluation de l'aléa est dans la pratique actuelle commandée par l'application du *Guide méthodologique - plans de prévention des risques d'inondation* (MATE, 1999). Outre la cartographie hydrogéomorphologique et l'utilisation des données relatives aux crues historiques, ce document préconise le recours à une modélisation hydraulique qui porte sur des crues types de fréquence décennale et centennale. Cette méthode permet en effet de fournir sur le tronçon de plaine alluviale considéré les limites des zones inondables, les hauteurs d'eau et les vitesses d'écoulement qui caractérisent ces deux types de crues. La modélisation est méthodologiquement la seule approche qui permette de déterminer les paramètres de l'aléa tels que demandés par ce guide. Mais la qualité de la modélisation mise en œuvre et la fiabilité des résultats obtenus supposent :

- Une bonne connaissance locale de la pluviométrie. Malgré la densification du réseau des pluviomètres depuis les années 1950 (à l'exemple de la région Languedoc-Roussillon), la probabilité d'avoir une chronique des pluies représentative du secteur étudié reste aléatoire, notamment dans les zones rurales.
- Une palette d'événements pluviométriques large qui permette de donner des résultats conformes à la fréquence modélisée. L'usage est ainsi d'estimer un événement centennal à partir d'au moins 30 années d'observations. Par ailleurs, la survenue ultérieure d'un ou plusieurs épisodes pluvieux supérieurs à la chronique disponible va abaisser la fréquence de chaque événement de la chronique, ce qui s'est vérifié pour les pluies du 22 septembre 1992 à Vaison-la-Romaine (G. ARNAUD-FASSETTA *et al.*, 1993). Autrement dit, la fréquence d'une pluie centennale pourra devenir trentennale lorsque des pluies plus fortes auront été mesurées par la station quelques années après (M. DESBORDES, 2010). L'impact de telles évolutions n'est pas sans conséquences pour les modélisations hydrauliques et la détermination des paramètres de l'aléa. Quelle aurait été la fréquence d'une pluie du type de celle de novembre 1999 dans l'Aude avant 1999 ?

Cette méthode pose un certain nombre de problèmes qui interdisent de s'en servir sans discussion comme référence vis-à-vis de la méthode hydrogéomorphologique. Ces problèmes tiennent en fait au constat de divergences importantes constatées à plusieurs reprises entre les résultats des calculs et la réalité des caractéristiques des crues observées postérieurement à la réalisation de ces études. C'est ainsi que, sur la foi d'études antérieures, la commune de Vaison la Romaine a construit la majeure partie des lits majeur et même moyen de l'Ouvèze

dans la traversée de l'agglomération avant que survienne avec la crue de 1992 la catastrophe que l'on sait (G. ARNAUD-FASSETTA *et al.*, 1993 ; M. MASSON, 1993). Plus près de nous, les crues de 1999 et de 2002 dans le Sud de la France ont permis d'étudier plusieurs cas similaires, par exemple à Luc-sur-Orbieu (Aude) (Photo 73) et à Durban-Corbières (Aude).



Photo 73 - Pont de Luc-sur-Orbieu (Aude) détruit par la crue de novembre 1999.

[Source : CÉTÉ Méditerranée, 1999]

Vérifiée plusieurs fois, cette divergence peut être considérée comme systématique. Les comparaisons effectuées récemment dans diverses régions de France confirment la fréquence de cette situation (M. MASSON, sous presse).

Plus généralement, une contradiction apparaît entre la différenciation de 4 unités hydrogéomorphologiques (soit 4 lits) et les résultats des calculs hydrauliques, qui ne différencient pour leur part que deux lits hydrologiques (mineur et majeur). Ces deux lits correspondent à deux seuils (Q_{10} et Q_{100}) définis, dans le cadre des études hydrauliques, à partir des calculs statistiques effectués sur les données relatives aux crues historiques. Ces seuils, et en particulier celui de la crue centennale, ne sont matérialisés, à l'intérieur de la plaine alluviale, par aucune limite morphologique observable. De fait, on peut constater systématiquement que les limites des crues qualifiées d'occurrence centennale s'avèrent comprises à l'intérieur de l'espace du lit majeur géomorphologique.

Le caractère abstrait des résultats des calculs hydrologiques et hydrauliques est aussi évident en ce qui concerne les types de crues de plus forte occurrence (1/50, 1/20, 1/10). En fait, et en dehors du lit mineur qui permet de définir le débit à pleins bords, la seule correspondance que l'on puisse établir à l'heure actuelle concerne la limite externe du lit moyen, en zone tempérée, quand il existe ; celui-ci contient en effet toutes les crues

débordantes fréquentes, d'occurrence comprise entre 1 et 5 ans, voire 10 ans et même semble-t-il, 15 ans dans le cas de la Région Midi-Pyrénées (DIREN Midi-Pyrénées, 1996).

Au delà de la période de retour de 100 ans, la notion de fréquence est encore plus discutable, puisque l'on ne sait rien, *a priori*, de la position par rapport au présent de la cote du plancher alluvial il y a 250 ans, ou pis encore, 1000 ans (voire même 10000 dans le cas des inondations de 1969 en Tunisie méridionale – J.L. BALLAIS, 1973), périodes de retour utilisées dans certaines études statistiques des crues historiques. En fait, la stationnarité postulée par les calculs hydrauliques n'existe pas. En effet, nous l'avons vu, l'altitude du lit majeur des cours d'eau a tendu à augmenter au cours du temps et le climat, lui-même, qui contrôle en grande partie le régime des cours d'eau, a varié au cours des mille dernières années (E. LE ROY LADURIE, 1967).

En pratique, la contradiction n'est qu'apparente entre ces deux types d'informations car elle résulte du fait que les deux méthodes ne s'intéressent pas aux mêmes objets. L'hydrogéomorphologie intègre tous les éléments observables sur le terrain, pour en faire ensuite l'interprétation en termes de genèse, de fonctionnement hydraulique et de tendances d'évolution. Elle implique de ce fait la recherche de l'exhaustivité et englobe l'ensemble des situations hydrauliques auxquelles peut être soumise la plaine alluviale fonctionnelle. La démarche de l'hydraulique fluviale est conditionnée par le nombre et la qualité des informations quantitatives d'ordre hydrologique et hydraulique (crues historiques) disponibles ou mobilisables sans dépense excessive. Elle est de ce fait tributaire de deux séries de contraintes : celles des marges d'erreur de mesure et celles des fréquences des crues. Les marges d'erreur imputables à toute mesure physique, relativement limitées dans le cas d'aménagements simples et homogènes (canaux, tuyaux), prennent une importance beaucoup plus grande pour les milieux complexes et évolutifs que sont les cours d'eau. Sans insister outre mesure sur cet aspect, pourtant trop souvent négligé dans les études opérationnelles, il faut prendre conscience, à partir d'évaluations systématiques réalisées récemment (CÉTÉ Méditerranée, 2001), du fait que la quantification hydraulique ne peut prétendre à une rigueur mathématique. Cette constatation ne peut être sans incidence sur la crédibilité des études hydrauliques et conduit à s'interroger sur le degré d'applicabilité des limites réglementaires assignées en France aux niveaux d'aléas (hauteur d'eau de 1 m et vitesse de 0,5 m/s) dans les PPRI. Pour les fréquences de crue, si la fréquence décennale, adoptée en assainissement pluvial urbain pour des raisons économiques (coût élevé des réseaux), ne présente guère d'intérêt en matière d'hydraulique fluviale, l'adoption dans ce domaine de la crue centennale a constitué un progrès indéniable. Il n'en reste pas moins que les calculs qui relèvent de cette crue-type sont entachés de marges d'erreur très importantes pour une majorité de bassins versants pour lesquels on ne dispose que de séries pluviométriques et de crues historiques trop courtes pour que les règles de la statistique puissent s'appliquer correctement. Ainsi s'explique un certain nombre de contradictions, rappelées ci-dessus, constatées entre les résultats d'études hydrauliques et les caractéristiques de crues de forte magnitude survenues ultérieurement.

Nous avons vu que cette contradiction ne peut être levée que dans le cas où une crue exceptionnelle antérieure à la réalisation de l'étude peut être considérée comme "crue de référence" et fournit des données spatiales et quantitatives précises, ce qui est le cas en particulier pour les grands cours d'eau utilisés par les sociétés humaines depuis des siècles. Dans la majorité des cas, cette crue de référence elle-même ne peut fournir de renseignements fiables que pour la partie du bassin versant où elle a effectivement été maximale.

Partie I

CONCLUSION

Née des besoins en connaissance de l'aléa inondation, née dans des services voués à la technique et à l'application, et à l'écart de la recherche académique, la méthode hydrogéomorphologique de détermination des zones inondables s'est d'abord développée au sein de la cindynique et des ministères français qui l'ont réglementairement en charge. Son efficacité lui a permis de s'ouvrir sur la recherche universitaire en géomorphologie qui a facilité son développement théorique et a conduit à de nouvelles avancées.

Dans la plupart des pays, particulièrement ceux de tradition géomorphologique anglo-saxonne, les spécialistes ne distinguent que le *channel* (lit mineur) et la *floodplain* (lit majeur), malgré les travaux pionniers de J. LEWIN (1978), A. GUPTA (1983) et G.C. NANSON et J.C. CROKE (1992). En France, grâce au développement de la problématique des risques naturels depuis 1982 qui a rompu avec la tradition des modélisations hydrauliques et hydrologiques, l'étude plus fine des plaines alluviales fonctionnelles a permis de révéler l'existence de deux nouvelles formes : le lit moyen ou *intermediate flow channel*, dès 1996, et le lit majeur exceptionnel ou *exceptional high water bed* quelques années plus tard. La multiplication des études et des cartographies en France, et d'abord dans le Midi méditerranéen depuis quelques années, afin de répondre à la demande sociale, a confirmé l'existence de ces deux formes. Parallèlement, des recherches ont commencé dans d'autres pays : Algérie, Espagne, Tunisie, Chine. Elles confirment l'existence fréquente du lit moyen, y compris sur de nombreux oueds du Maghreb et sur les cours d'eau pérennes du sud du désert du Takla-Makan (Chine) alimentés par la fusion des neiges et des glaces du Karakoram et des Kunlun. Dans l'état actuel de nos connaissances, c'est la Tunisie qui offre les meilleurs exemples de lits majeurs exceptionnels, les plus larges, les moins discontinus et donc les mieux développés, la plupart datés des inondations exceptionnelles de 1969, mais il semble également certain que le Nord-ouest de l'Australie (Western Australia), avec ses pluies de mousson mais aussi de cyclones, en possède également. Plus généralement, les cas nombreux et variés de "terrasses inondables" relevés dans la bibliographie géomorphologique (dans des milieux aussi variés que l'Amazonie et la Sibérie) devraient, en fait, relever des lits majeurs exceptionnels. Ainsi la réduction du nombre des formes de lit à seulement deux, nécessaire pour l'application de la modélisation hydraulique il y a 50 ans, se révèle être un des derniers avatars de la conception davisienne de l'érosion normale, c'est-à-dire, tempérée.

Mais, en raison de son histoire en France, l'essentiel des applications de la méthode hydrogéomorphologique se situe toujours dans le domaine appliqué et opérationnel : cartographie des zones inondables, méthode intégrée, aménagement.

SECONDE PARTIE

LES APPLICATIONS DE LA

MÉTHODE HYDROGÉOMORPHOLOGIQUE

Partie II - Chapitre I

LA CARTOGRAPHIE DES ZONES INONDABLES

La méthode que nous proposons offre de nombreuses potentialités qui découlent de son angle d'attaque, de son point de vue, basé sur les sciences d'observation. Elle repose sur l'utilisation de différents types d'informations et de techniques de traitement de données. Elle peut s'appliquer à diverses échelles, par sélection et interprétation des informations les plus adaptées et s'inscrit ainsi dans le cadre d'études plus globales qui relèvent de l'aménagement du territoire ou de stratégies de gestion des eaux pluviales.

C'est sans aucun doute à l'échelle de la plaine alluviale fonctionnelle que la méthode hydrogéomorphologique fournit les résultats les plus intéressants et les plus novateurs par rapport aux méthodes classiques.

Ses principaux apports concernent d'abord l'analyse et la cartographie des unités hydrogéomorphologiques principales et des talus qui leur sont associées, des mésoformes et des manifestations de l'hydrodynamisme. La cartographie hydrogéomorphologique peut également fournir des informations intéressantes dans des secteurs urbains, apparemment peu propices aux observations de terrain ou sur photographies aériennes. En effet, là où les bouleversements topographiques dus à la multiplication non seulement des constructions, mais aussi des remblais et déblais rend l'exploitation des levés topographiques, même très détaillés, problématique, il est possible de retrouver des éléments discontinus de limites d'unités dont l'interprétation permet de reconstituer la continuité. Ce travail est évidemment facilité lorsqu'une partie de ces bouleversements est suffisamment récente (moins de 50 ans) pour qu'il soit possible de se référer à l'interprétation de missions photographiques anciennes.

Les observations de terrain complétées ou non par la consultation d'archives permettent souvent aussi, par la compréhension du fonctionnement hydraulique des milieux fluviaux, de reconstituer les étapes de l'artificialisation des réseaux hydrographiques, et par conséquent d'en relever les incohérences qui peuvent expliquer des situations d'inondabilité *a priori* anormales.

I - RAPPEL CRITIQUE DES MOYENS TECHNIQUES D'ACQUISITION DES DONNÉES

1) 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 en France est la carte de l'IGN (Institut Géographique National) au 1/25000 (y compris le scan 25), qui existe sur tout le territoire national. Malheureusement, l'utilisation des points cotés et des courbes de

niveau se heurte à leur imprécision relative en altimétrie (de l'ordre de 1 mètre pour les premiers et de 3 mètres pour les seconds), supérieure à la marge d'erreur exigée par la cartographie hydrogéomorphologique.

Il est souvent profitable de consulter les cartes anciennes, par exemple, en France, celles de Cassini, réalisées au XVIII^{ème} siècle (Fig. 29). Malgré certaines erreurs de localisation et l'échelle insuffisante pour l'étude de la plaine alluviale fonctionnelle, elles montrent le tracé du lit mineur des cours d'eau importants (ordre 4 et plus), en particulier l'existence de lits en tresses aujourd'hui disparus, comme sur la Durance, ou de grands méandres, toujours visibles comme sur l'Orbieu.

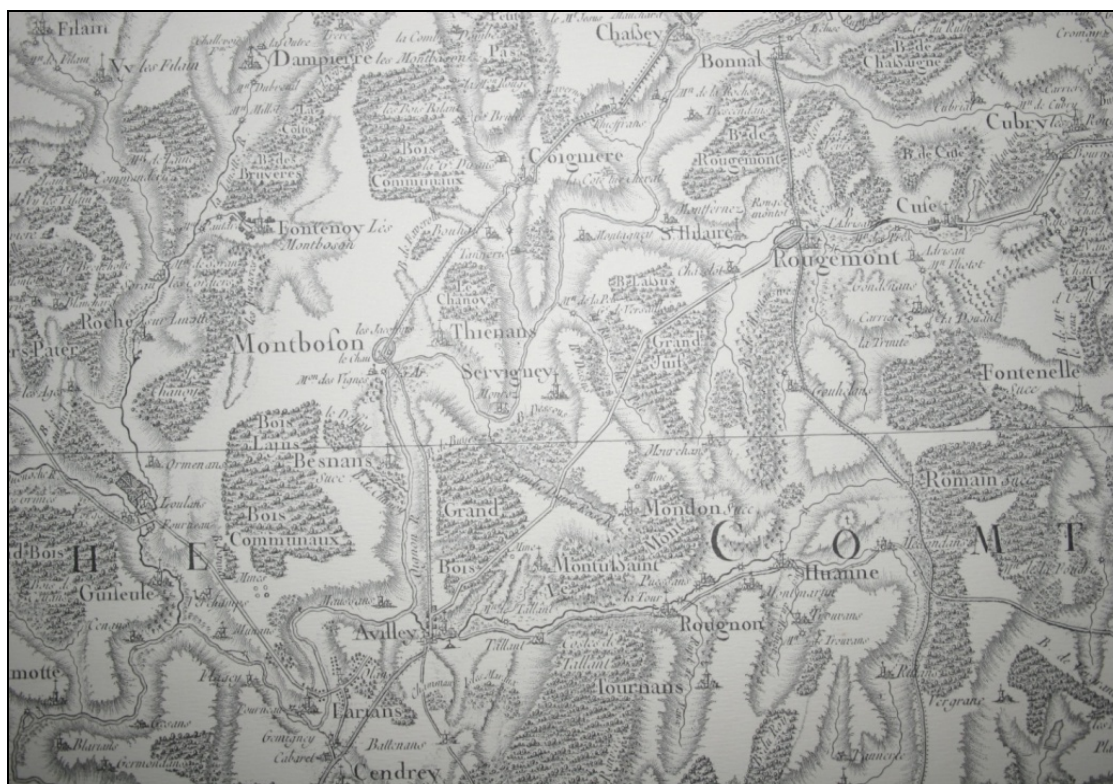


Figure 29 - Extrait de la Carte de Cassini de Vesoul (1760).

[Source : J.L. BALLAIS, 2009]

L'IGN possède également des minutes au 1/40 000, réalisées au milieu du XIX^{ème} siècle et qui ont servi de base à la couverture topographique au 1/80 000 (cartes d'État Major en courbes de niveau) levée de 1817 à 1866. Toutes ces cartes témoignent, à des degrés divers, de l'évolution de la plaine alluviale fonctionnelle. Enfin, l'utilisation des Plans cadastraux, levés en même temps que la carte d'État Major, permet des reconstitutions encore plus fines de l'évolution du tracé du lit mineur (S. BOYER, 2001) (Fig. 30).

Certaines cartes à vocation scientifique, en particulier les cartes géologiques, géomorphologiques, pédologiques et de la végétation, contiennent aussi des données précieuses pour l'interprétation hydrogéomorphologique (G. GARRY et M. LE MOIGNE, 1991).

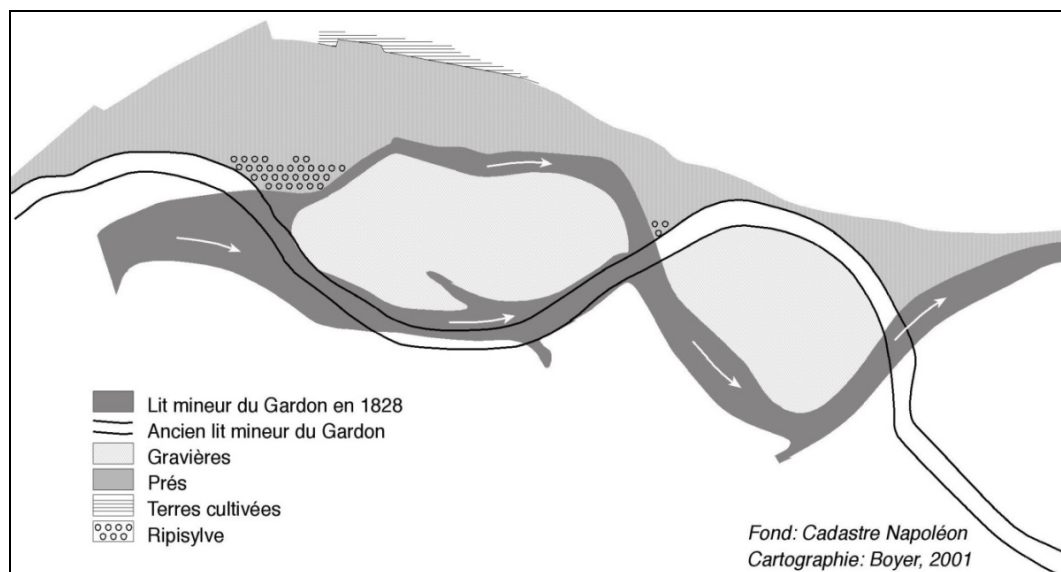


Figure 30 - Évolution du lit mineur du Gardon d'Anduze (Gard) au XIX^{ème} siècle.

[Source : S. BOYER, 2001]

Les cartes géologiques au 1/50000 ou au 1/80000, éditées par le Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM), couvrent l'ensemble du territoire national. Elles sont assez peu utilisables car la représentation des "alluvions modernes" regroupe toutes les formations alluviales holocènes, c'est-à-dire y compris celles qui constituent les terrasses alluviales. De plus, leur limite reste souvent trop approximative, spécialement sur celles levées avant les années 1960, en France ou dans d'autres pays comme l'Algérie au moins (J.L. BALLAIS *et al.*, 1984). Au total, ce serait une erreur grossière de prendre la limite de ces alluvions modernes comme limite de la zone inondable.

Les cartes géomorphologiques au 1/50000 n'ont donné lieu qu'à la production d'une vingtaine de feuilles entre 1971 et 1990 (RCP 77, 1970). Elles favorisent la compréhension de la plaine alluviale fonctionnelle, mais leur exploitation est relativement complexe. De plus, leur échelle est trop petite par rapport aux besoins de la cartographie des zones inondables.

2) Les photographies aériennes

Les photographies aériennes constituent un outil de la télédétection, le plus ancien et le plus répandu, qui répond encore le 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 *et al.* (1992).

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. En ce qui concerne l'échelle, l'optimum semble correspondre au 1/10000. En France, il est généralement possible, pour un même bief, de se procurer plusieurs missions espacées de 5 à 10 ans, qui permettent de remonter dans le temps jusqu'aux années 1950, voire 1940, et par conséquent d'effectuer des comparaisons diachroniques qui peuvent faciliter l'interprétation, spécialement dans le cas d'aménagements récents.

L'interprétation des photos aériennes permet de visualiser le relief et le modelé et, en particulier, dans le cas qui nous intéresse, de distinguer deux unités géomorphologiques d'altitudes très légèrement différentes, séparées par un talus, même de faible hauteur (quelques décimètres). 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, qui embrasse une superficie importante (de quelques hectares à quelques kilomètres carrés à la fois), facilite la mise en relation d'indices qui appartiennent à un même paramètre, mais sont souvent partiellement effacés (exemple : talus traversé par des parcelles cultivées).

3) L'imagerie satellite

a. La télédétection et les contraintes d'accès aux données géographiques

La télédétection satellitaire est un outil complémentaire de l'imagerie aérienne car dans de nombreux pays, l'accès aux données provenant de missions aériennes est parfois très restreint. Plusieurs raisons expliquent cette limite. Tout d'abord, le coût d'une mission aérienne ne permet pas à la grande majorité des pays du globe de maintenir une couverture intégrale actualisée de leur territoire. Les acquisitions et actualisations sont le plus souvent restreintes aux principaux sites d'intérêt socio-économiques, ce qui exclut de fait une grande partie des espaces "naturels" à forte dynamique hydrogéomorphologique. De plus, les contraintes géographiques telles que l'étendue, le relief, le climat, *etc.* et leurs conséquences comme la nébulosité atmosphérique ou la surface à photographier sont également des facteurs qui limitent le recours à l'imagerie aérienne et par conséquent l'accès à des jeux de données d'archives. De ce fait, il est parfois impossible de réaliser des modèles numériques de surface par photogrammétrie ou de procéder à un suivi de l'évolution des lits fluviaux à forte dynamique par analyse rétrospective d'image. Bien sûr, il est possible de compenser ce hiatus d'information par l'accroissement de la pratique de terrain (levés topographiques géoréférencés, interprétation hydrogéomorphologique *in situ*), mais le manque d'information spatialisée alourdit les missions de terrain dans leur organisation, dans le report des données récoltées et dans la durée nécessaire à la couverture d'une zone géographique conséquente. Enfin, le manque ou l'absence d'imagerie aérienne récente traduit le plus souvent un suivi environnemental insuffisant (discontinu, inexistant, inadapté aux échelles fines) qui s'accompagne de lacunes en cartographie topographique détaillée (inférieure ou égale à 1/25000), en mesure hydrométriques (échelles limnimétriques, stations débitmétriques) et sur le suivi local des crues (délimitation des niveaux de crue, spatialisation des zones inondées). Dans de nombreux états (Algérie, Éthiopie, Chine, *etc.*), les photographies aériennes (comme les cartes topographiques d'ailleurs) sont ou ont été protégées par le secret militaire et donc d'accès impossible.

Une partie de ces contraintes peut néanmoins être réduite par l'utilisation de l'imagerie satellitaire et aéroportée. Le recours à ce type de données spatialisées peut alors compléter ou se substituer à l'usage des données numériques de type photographie aérienne/cartographie topographique dans l'application de la méthode hydrogéomorphologique. Il est ainsi possible d'optimiser l'analyse de terrain en généralisant l'interprétation hydrogéomorphologique *in situ*. La détermination des sites d'apprentissage et de validation des indicateurs morphologiques à partir de l'interprétation des images permet également d'anticiper la préparation et d'améliorer l'efficacité des sorties de terrain selon une démarche itérative (image-terrain-image). Comme la photographie aérienne, l'usage de l'imagerie satellite THRS permet également de mobiliser

les informations géographiques (parcellaire, végétation, aménagement) pour affiner l'analyse hydrogéomorphologique ; mais elle offre aussi d'autres possibilités en télédétection passive ou active.

b. Nouveaux capteurs satellitaires – nouvelles perspectives pour l'hydrogéomorphologie

En télédétection satellitaire passive ou active, les missions d'observation terrestre se multiplient depuis plusieurs décennies et offrent une très large palette de capteurs embarqués et de données d'archive disponibles. Très tôt utilisées pour l'identification des différentes morphologies fluviales (B.F. SNISHCHENKO et D.V. SNISHCHENKO, 1986), ces images étaient limitées par la résolution spatiale de l'acquisition des données à moyenne (10 à 30 m) et basse résolution (100 m et plus) durant la période 1972-2000. Cependant les progrès récents des dix dernières années, et particulièrement l'arrivée de données HRS (haute résolution spatiale : 5 à 10 m) et THRS (très haute résolution spatiale : 0,4 m à 2,5 m), offrent un très fort potentiel d'application pour la méthode hydrogéomorphologique. Ces données sont disponibles sur la majeure partie des surfaces continentales (exception faite des zones polaires au delà de 70°-80° de latitude) et permettent donc de transférer une méthode d'analyse dans un pays qui ne disposerait pas des données géographiques requises pour les besoins d'une étude hydrogéomorphologique.

En télédétection passive, les données satellites THRS concurrencent les missions de photographie aéroportées sur les résolutions spatiale, spectrale et temporelle (Fig. 31). Leur coût est également inférieur à celui d'une mission aérienne dédiée à l'étude d'un site ou d'une vallée. En effet, l'acquisition au sol couvre une plus grande surface que celle d'un cliché issu de l'imagerie aéroportée et les coûts d'acquisition sont partagés au niveau mondial par tous les utilisateurs de la plateforme satellitaire.

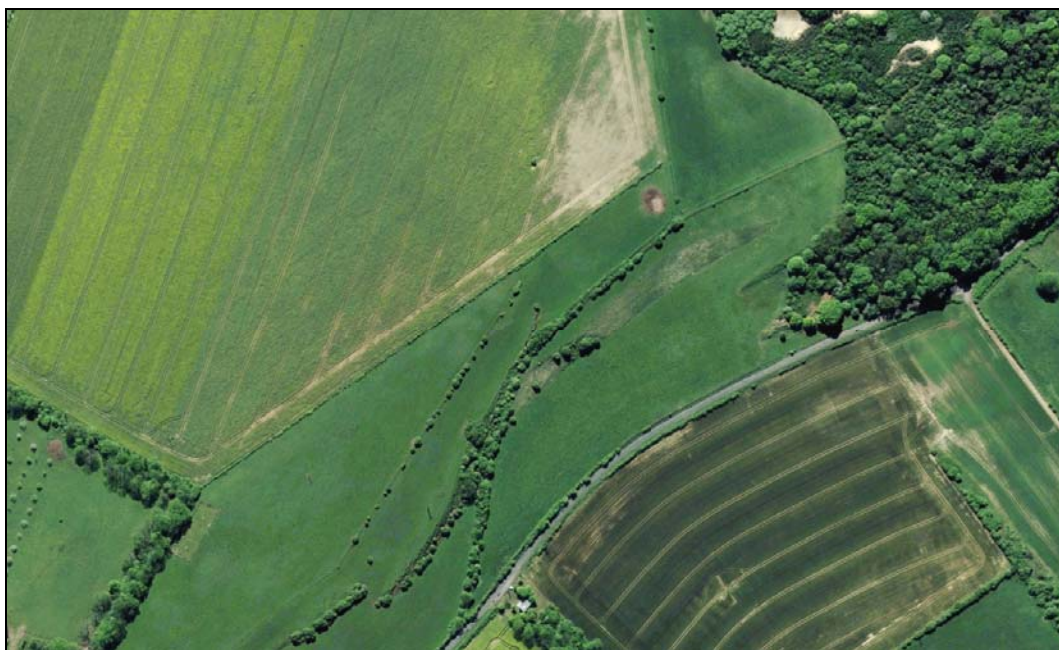


Figure 31 - Potentiel d'interprétation de l'occupation du sol par imagerie satellite Worldview 2 à 50 cm de résolution spatiale.

[Source : Digital Globe, acquisition 17 mai 2010, commune de Lefaux, Pas de Calais]

Concernant la résolution spatiale, la dernière décade a vu l'augmentation croissante de la précision et la diversification des sources des données à très haute résolution spatiale. Depuis la mise en orbite d'Ikonos en 1999 qui ouvre l'ère commerciale de l'imagerie spatiale THRS avec une résolution d'1 m au nadir, d'autres capteurs à très haute résolution spatiale sont venus enrichir les moyens d'observation de la surface terrestre (Fig. 31). Les satellites de la série Worldview proposent ainsi une résolution spatiale de 0,44 m au nadir pour la bande panchromatique et une résolution spatiale de 2,4 m en mode multispectral (bandes spectrales s'étalant du bleu au proche infrarouge). Cette progression de la résolution spatiale a été rendue possible principalement par l'amélioration des performances des capteurs numériques CCD.

Comme pour la résolution spatiale, la dernière décennie a été une période de progression significative de la résolution temporelle. Plusieurs facteurs ont participé à cet essor, comme la multiplication des capteurs dépointables ou comme l'envoi de missions à orbite basse qui diminuent la durée de révolution du satellite autour de la terre. Grâce à ces améliorations, plusieurs satellites offrent une période de retour de quelques jours seulement. En tenant compte des différentes constellations de satellites actuellement en orbite, il est théoriquement possible de visualiser un site à très haute résolution quotidiennement en croisant différentes sources de données et leurs capacités de dépointage.

Avec la mise en orbite de Worldview 2 en 2009, la résolution spectrale des données THRS a également fait un véritable bon en avant. Huit bandes spectrales sont désormais disponibles et permettent une meilleure analyse de l'occupation du sol en réduisant d'éventuelles confusions entre les signatures spectrales de surface qui seraient trop proches dans les quatre bandes spectrales "classiques" du visible et du proche infrarouge. Cette résolution spectrale peut encore être augmentée en utilisant des données issues de capteurs hyperspectraux sur plateforme aéroportée. Cependant, leur utilisation très complexe et l'absence d'archives n'en font pas des données facilement applicables à la méthode hydrogéomorphologique contrairement aux données Worldview.

En télédétection active, les données radar HRS et lidar THRS concurrencent les données optiques satellitaires et aéroportées pour la réalisation de modèles numériques d'élévation. Ces données sont acquises indifféremment de jour comme de nuit car le rayonnement est émis artificiellement au contraire des capteurs passifs qui mesurent la rétrodiffusion du rayonnement naturel (solaire ou terrestre). Pour le radar, la longueur d'onde utilisée à l'émission se situe dans la plage des micro-ondes et permet également de s'affranchir des conditions atmosphériques (nuages et pluie). L'utilisation de données radar est donc particulièrement recommandée lorsqu'on travaille sur des secteurs à forte nébulosité en période de crues ou dans les pays tropicaux.

La résolution spatiale des capteurs radar sur plateforme satellite a très nettement progressé passant ainsi de 30 m à 8 m (respectivement ERS et RADARSAT) dans les années 90 à une résolution de 6,25 m (PALSAR en 2006) puis 1 m (TerraSAR-X en 2007). Ces données radar HRS et THRS offrent une capacité de restitution de la surface topographique très fine, qui permet aisément l'identification des formes fluviales après extraction de la végétation et du bâti. La comparaison d'un produit topographique TerraSAR-X à 5 m avec le modèle numérique SRTM mondial à 90 m est particulièrement démonstrative (Fig. 32).

Dans le cas de TerraSAR-X, un satellite clone nommé Tandem-X vient d'être placé sur orbite parallèle en juin 2010 pour fournir une acquisition simultanée (TerraSAR-X / Tandem-X) des surfaces au sol sous deux angles de vue (acquisition bi-statique). Cette

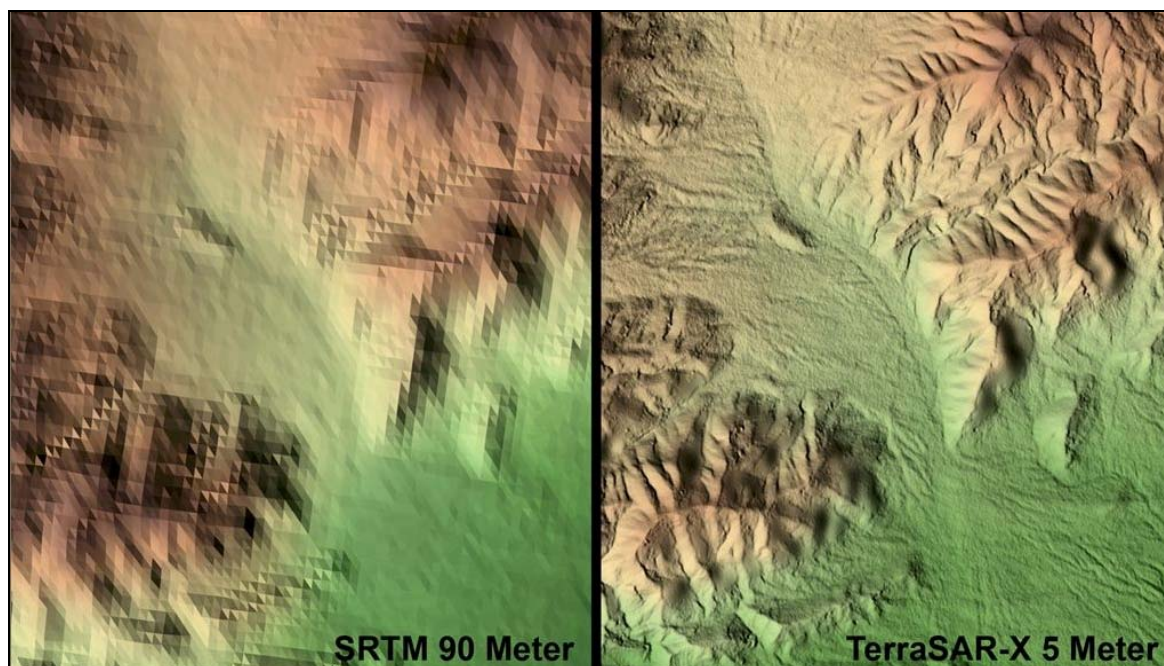


Figure 32 - Progression de la résolution des modèles numériques de surface par interférométrie radar.

[Source : DLR, 7 juillet 2007, résolution originale TerraSAR-X : 1 m échantillonnée à 5 m pour la comparaison]

association unique de deux capteurs permet de réaliser des restitutions radargrammétriques de la topographie à très haute résolution spatiale. D'autres données topographiques récentes, issues cette fois d'acquisition radar aéroportée, constituent également un autre potentiel pour l'application de la méthode hydrogéomorphologique. Ces données commerciales qui couvrent une bonne partie de l'Europe de l'Ouest et de l'Amérique du Nord permettent la restitution d'un modèle numérique d'élévation à une résolution spatiale de 5 m. L'interpolation de ces données sous logiciel de traitement numérique d'image permet de restituer fidèlement la topographie grâce à une bonne densité de points de mesure altimétrique (Fig. 33-a et 33-b).

c. Produits dérivés de la télédétection et leur utilisation dans l'application de la méthode hydrogéomorphologique

Nous avons vu précédemment que deux grands types d'informations peuvent être dérivés du traitement numérique des données issues de la télédétection satellitaire : l'état de surface (occupation du sol, surfaces minérales, couvert végétal, parcellaire) et les modèles numériques d'élévation de surface et de terrain (reconnaissance de formes).

L'analyse des états de surface à partir des données optiques satellites THRS permet d'identifier les formes fluviales dans leur contexte géographique en appliquant les mêmes méthodes que celles utilisées avec les photographies aériennes. Elle permet également l'identification et l'interprétation des discontinuités spatiales dans le parcellaire qui constituent également un des indices géographiques mobilisés par la méthode hydrogéomorphologique (*supra*, p. 62). Avec les capacités de dépointage des capteurs, on peut acquérir des données satellites avec des angles de vue différents dans un délai très court (quelques jours). Il devient donc possible, comme avec les photographies aériennes, de réaliser des couples

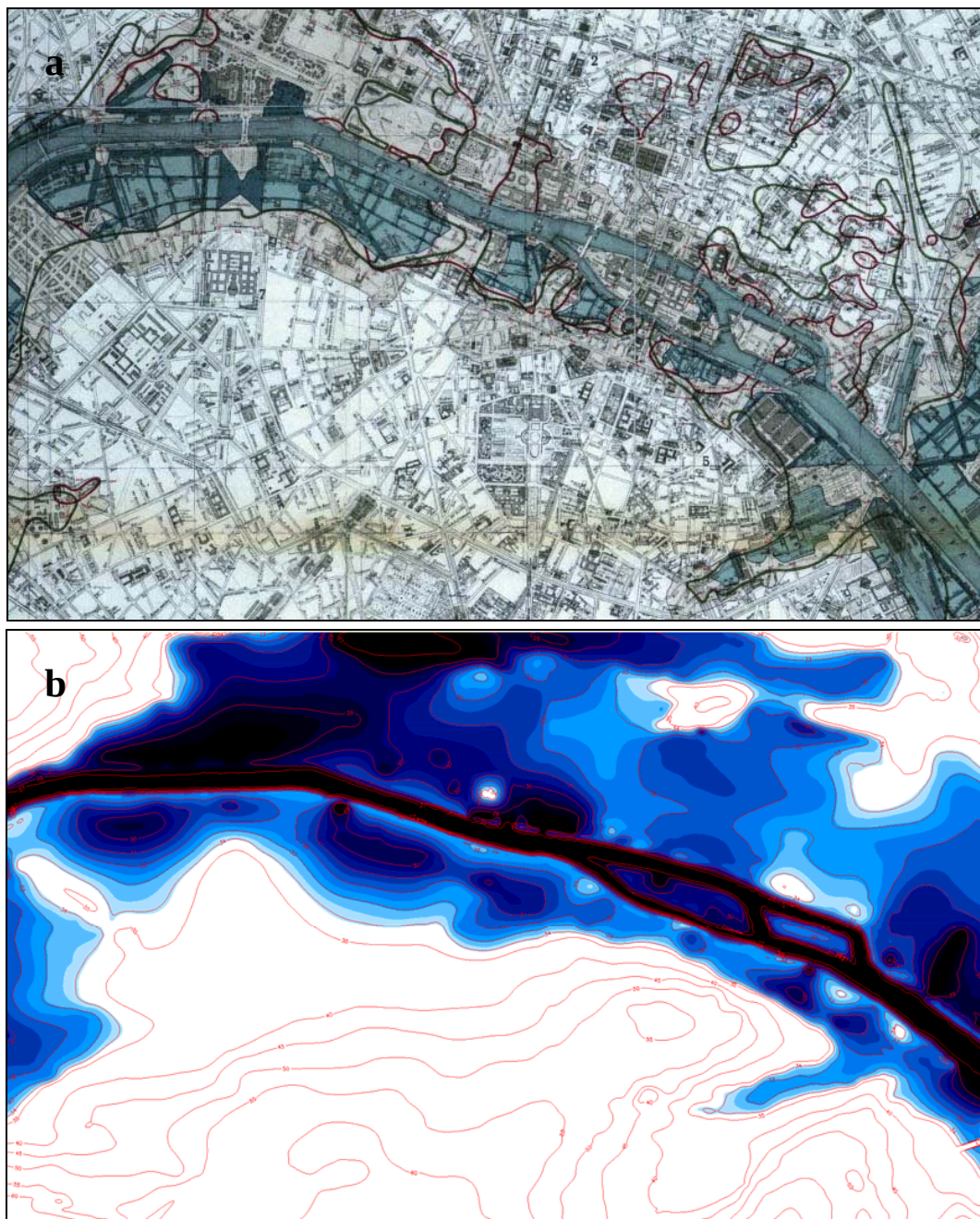


Figure 33 - Cartographie des crues de la Seine à Paris en 1910 (a) et modèle numérique de terrain (b).

[sources : a - Plan Boreux-Tur, rapport A. PICARD, 1910 ; b - données DTM Nextmap®, 2010]

Équidistances des courbes de niveaux 2 m de 25 m à 29 m d'altitude (Seine et berges), 1 m de 30 m à 35 m (principales zones inondables), 5 m de 40 m à 60 m. Les zones en blanc présentent une altitude supérieure à 34 m.

stéréoscopiques. Les informations qui peuvent être extraites de ces données bénéficient cependant d'une plus grande variété de capteurs, dans le visible comme dans l'infrarouge, ce qui est un avantage par rapport aux données issues de la photographie aérienne.

L'analyse des modèles numériques d'élévation (DEM en anglais) permet de restituer la topographie et donc les différentes formes du lit fluvial par interprétation géomorphologique

de celle-ci. Ces données numériques d'élévations sont de plusieurs types, qui méritent d'être précisés. Dans la famille des DEM, il existe des modèles numériques de surface (DSM) et des modèles numériques de terrain (DTM). Le DSM ne correspond qu'à l'altitude de la surface observée. Celle-ci ne se confond pas avec l'altitude de la surface du sol, mais intègre aussi celle de la végétation et des éléments bâtis. L'intégration de ces éléments masque la topographie réelle et limite ainsi l'interprétation directe des formes fluviales. Contrairement au DSM, le DTM ne représente que l'altitude de la surface topographique. Pour obtenir ces données topographiques, il est donc nécessaire d'"effacer" l'influence de la végétation ou du bâti sur les altitudes mesurées.

Les capteurs actifs (radar et lidar) embarqués sur plateforme satellitales ou aéroportées offrent des possibilités très intéressantes pour la restitution de la topographie du sol (B.F. SANDERS, 2007). Ces systèmes actifs sont très sensibles à la rugosité et aux différents états de surface. La mesure effectuée par ces capteurs enregistre ainsi des signatures multiples qui permettent de différencier la réponse du sol de celle des éléments végétaux qui le surplombent pour chaque pixel. Il est également possible de soustraire les altitudes des bâtiments après extraction de leur emprise au sol. Ces nouvelles sources d'information sur la topographie permettent donc de créer de véritables modèles numériques de terrain dont la résolution dépasse très largement celle des données IGN. Les données altimétriques obtenues par le traitement des données radar utilisent le principe de l'interférométrie à partir d'une seule image ou de l'interférométrie différentielle à partir d'acquisitions multiples. La première méthode est adaptée à la réalisation de modèles numériques de surface et de terrain. La seconde est destinée à l'analyse de la dynamique altimétrique de surface et de terrain.

La faible récurrence des couvertures lidar ne permet généralement pas de suivre des phénomènes très dynamiques (sauf missions aéroportées exceptionnelles). Cependant, les données lidar permettent d'aller plus loin dans l'identification et la cartographie des formes fluviales que les données radar (Fig. 34). La résolution spatiale atteint fréquemment 25-30 cm et la résolution verticale est d'ordre centimétrique. Après extraction de la végétation et du bâti, il est donc possible d'accéder aux microformes de relief et aux ruptures de pentes très faibles qui caractérisent souvent le contact entre la bordure externe du lit majeur et la limite des apports de versant dans les plaines alluviales des rivières de faible énergie. Bien que leur utilisation apporte beaucoup à l'interprétation des formes fluviales, l'accessibilité restreinte, tant géographique que temporelle et économique des données lidar, limite leur usage. De plus, cette disponibilité, déjà très limitée dans les pays riches, devient encore plus rare dans les autres régions du globe.

Dans les pays pauvres ou dans les pays pour lesquels les photos aériennes n'existent pas ou sont inaccessibles, les images de Google Earth, gratuites, s'avèrent précieuses, malgré l'impossibilité de choisir les dates les plus efficaces. C'est ainsi qu'il a été possible de cartographier 190 kilomètres de linéaire de la plaine alluviale fonctionnelle du Karakash Darya au Xinjiang (Chine) (Fig. 35). La principale difficulté provenait de l'absence de vision stéréoscopique qui a dû être suppléée par une augmentation significative du temps consacré au terrain, en particulier pour distinguer l'ombre formée par les innombrables haies de peupliers de celle due à la présence d'un talus (M. WULAMU, 2010).

4) Les données relatives aux crues historiques

En France, les données quantitatives relatives aux PSS, aux PHEC et aux relevés des

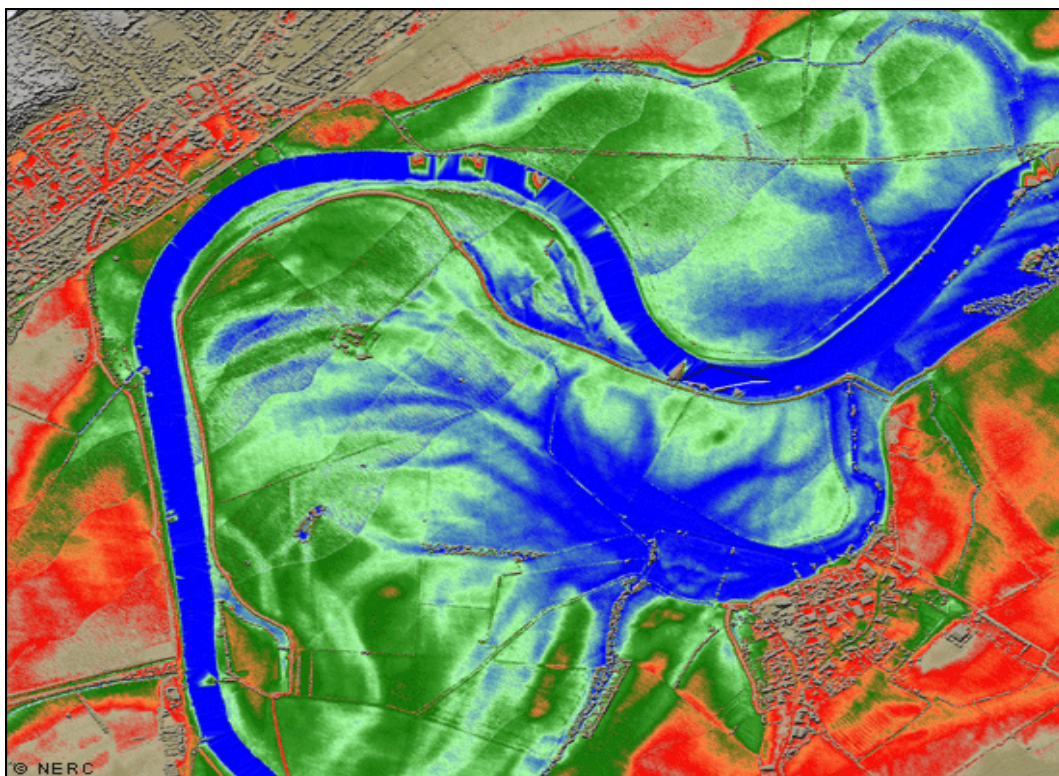


Figure 34 - Image topographique lidar de méandres de la Trent près de Nottingham (Grande-Bretagne).

[Source Lidar imagery© Environment Agency. BGS reprocessed image ©NERC]

Altitudes minimum en bleu, intermédiaires en vert et maximum en rouge.

stations hydrométriques font l'objet d'archivages systématiques et de traitements statistiques par les organismes compétents (Météo France, EDF, DREAL, Agences de l'Eau, DDTM). Elles sont, au moins partiellement, disponibles en banques de données informatisées et comportent dans certains cas des relevés altimétriques des plus hautes eaux observées lors de crues historiques.

Ces données doivent être complétées par des recherches spécifiques qui nécessitent la consultation de la documentation disponible dans les Services des Archives Départementales. D'accès facile, ces archives fournissent des informations de qualité variable, d'un département à l'autre, en particulier en fonction de leur degré de traitement préalable par les archivistes (M. LIVET, sans date ; V. DURIN, 2001). Les archives communales présentent les mêmes caractéristiques lorsqu'elles sont conservées aux Archives Départementales, ce qui est le cas général. Quand elles demeurent dans la commune d'origine, leur consultation est souvent plus difficile. Ces archives ont parfois conservé la mémoire d'événements hydrologiques marquants, vieux de plusieurs siècles, par exemple la crue de l'Ouvèze en 1616 à Vaison-la-Romaine (G. ARNAUD-FASSETTA *et al.*, 1993).

La recherche de repères de crue (Photos 72, 74 et 75) permet d'apprécier, en particulier, la hauteur d'eau qui a pu recouvrir les lits majeurs, donnée nécessaire pour la quantification de l'aléa inondation. Leur densité est extrêmement variable, en fonction de facteurs culturels, en particulier. Leur conservation, rendue obligatoire en France par la loi BACHELOT (2003), peut être très variable (F. GAZELLE et K. MARONNA, 2009).



Figure 35 - Image Google Earth de la vallée du Karakash Daria (Xinjiang, Chine).
[Source : M. WULAMU, 2010]



Photo 74 - Repères de crues de l'Arno à Florence (Italie). [Cliché : J.L. BALLAIS, 1997]



Photo 75 - Repères de crues de la Vltava à Prague (République tchèque).

[Cliché : J.L. BALLAIS, 2007]

L'intégration des données relatives aux crues historiques constitue une première étape de la quantification de l'aléa inondation.

5) Les observations de terrain

Les observations de terrain restent absolument indispensables afin de vérifier les éléments qui résultent de la photo-interprétation, pour lever les incertitudes dans les cas difficiles et pour étudier certains de ces éléments qui n'apparaissent pas sur les photographies, tels que des limites ou des aménagements masqués par une végétation dense. En effet, les haies et les ripisylves, ainsi que leurs ombres, cachent partiellement ou totalement une partie de la surface de la plaine alluviale fonctionnelle, au point d'interdire toute identification précise par photo-interprétation.

Enfin, certaines informations, comme les caractéristiques granulométriques des formations superficielles et des sols alluviaux, ne sont accessibles que par ce moyen. Dans ce cas, l'observation uniquement visuelle doit s'accompagner d'interventions limitées, au moyen d'un marteau à égriser, par exemple, qui permet de rafraîchir les coupes naturelles, de vérifier la granulométrie et la couleur des formations alluviales (Photo 76) et de prélever des échantillons pour les analyses granulométriques.



Photo 76 - Dépôts du lit majeur exceptionnel de l'Oued Leben (Tunisie centrale).

[Cliché : J.L. BALLAIS, 2005]

II - LA CARTOGRAPHIE DES DONNÉES : LA CARTE HYDROGÉOMORPHOLOGIQUE OU CARTE D'INONDABILITÉ HYDROGÉOMORPHOLOGIQUE

La cartographie hydrogéomorphologique s'inspire très largement des principes de la carte géomorphologique de la France au 1/50 000 proposée par J. TRICART et F. JOLY (RCP 77, 1970). Si la filiation de cette carte hydrogéomorphologique vient bien de la carte géomorphologique, elle prend également la suite de cartographies techniques comme le Plan des Surfaces Submersibles préconisé dès 1925.

À la suite des nombreuses expérimentations, effectuées dans différentes régions de France comme dans les DOM-COM soumis au climat tropical, un début de normalisation a été adopté pour ces cartes au cours des dernières années 1990, dans le but d'appliquer les mêmes légendes, quels que soient les espaces géographiques étudiés. Succédant à une première formalisation officieuse mise au point dans le cadre de la préparation de M. MASSON *et al.* (1996), la légende de la carte hydrogéomorphologique a été officialisée en 2001, au sein d'un groupe de travail organisé par le Ministère de l'Environnement (aujourd'hui MEEDDM) et chargé de produire un Cahier des Charges type de la nouvelle génération d'Atlas des Zones Inondables destinée à couvrir l'ensemble du réseau hydrographique national (J.L. BALLAIS, 2006). C'est ainsi qu'a été décidée l'adjonction des données relatives aux crues historiques, en application de la méthode mise au point en Région Midi-Pyrénées (R. LAMBERT *et al.*, 2001) (Fig. 36).

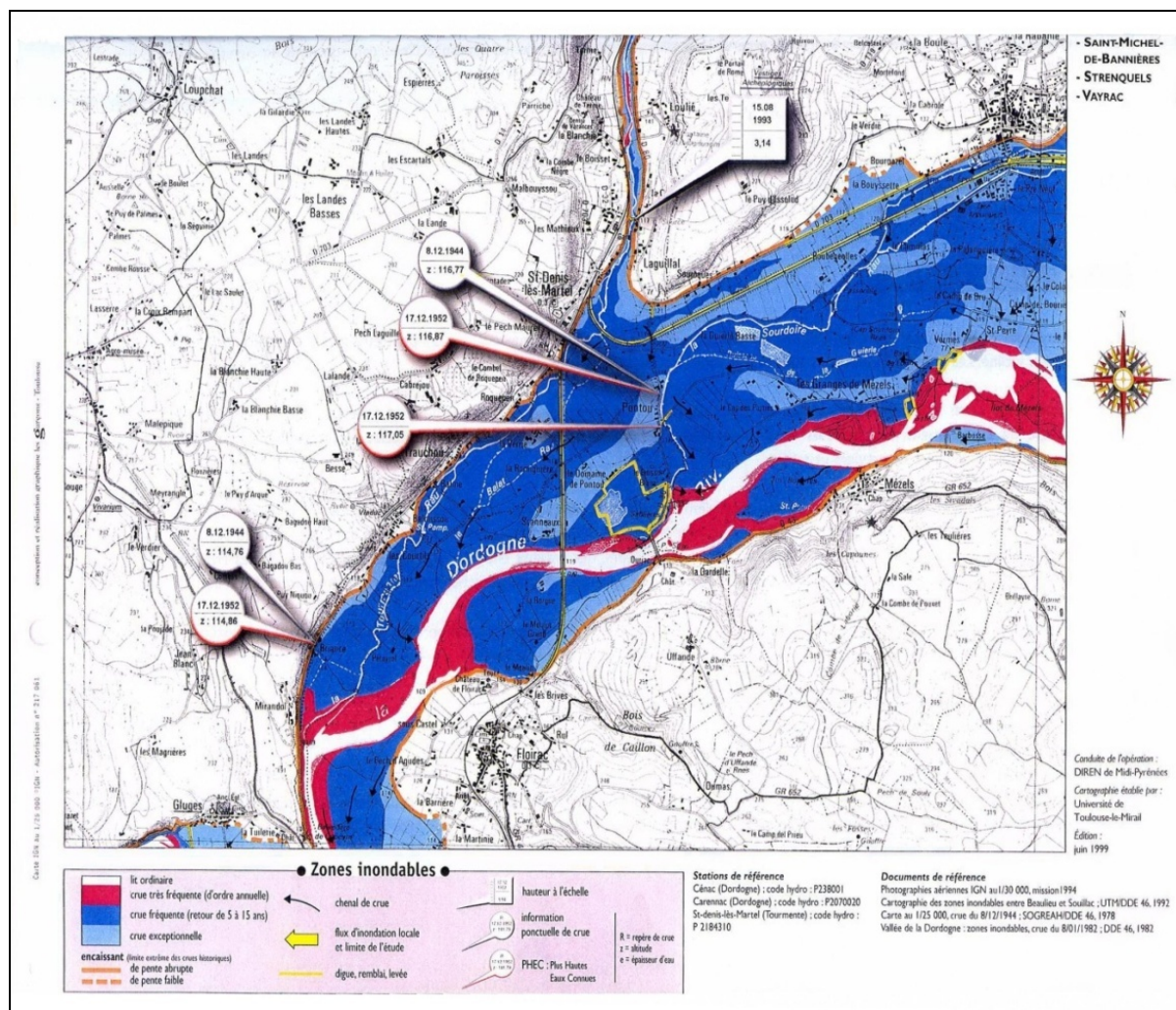


Figure 36 - Carte informative du bassin de la Dordogne.

[Source : DIREN Midi-Pyrénées, 1999]

M. MASSON *et al.* (1996) proposaient, pour présenter cartographiquement les différentes informations rassemblées dans la phase analytique de l'étude hydrogéomorphologique, la réalisation de deux documents complémentaires, dont un exemple est fourni par les figures 37 et 38 : la carte hydrogéomorphologique proprement dite (dénommée à l'époque "carte géomorphologique") et la carte de l'occupation du sol.

Cette conception résultait de la nécessité, en l'absence d'étude hydraulique, de fournir une documentation la plus complète possible aux aménageurs qui ont en charge l'élaboration ou la révision des documents de planification (POS, puis PLU). La carte de l'occupation du sol permettait ainsi de fournir des informations utiles à la fois à l'interprétation du fonctionnement hydraulique et à une première évaluation des enjeux et de la vulnérabilité du secteur étudié.

Cependant la montée en puissance des PPRI à la fin des années 1990 conduisait progressivement à distinguer nettement deux types complémentaires d'application de l'hydrogéomorphologie : les Atlas des Zones Inondables et les PPRI. La formulation des

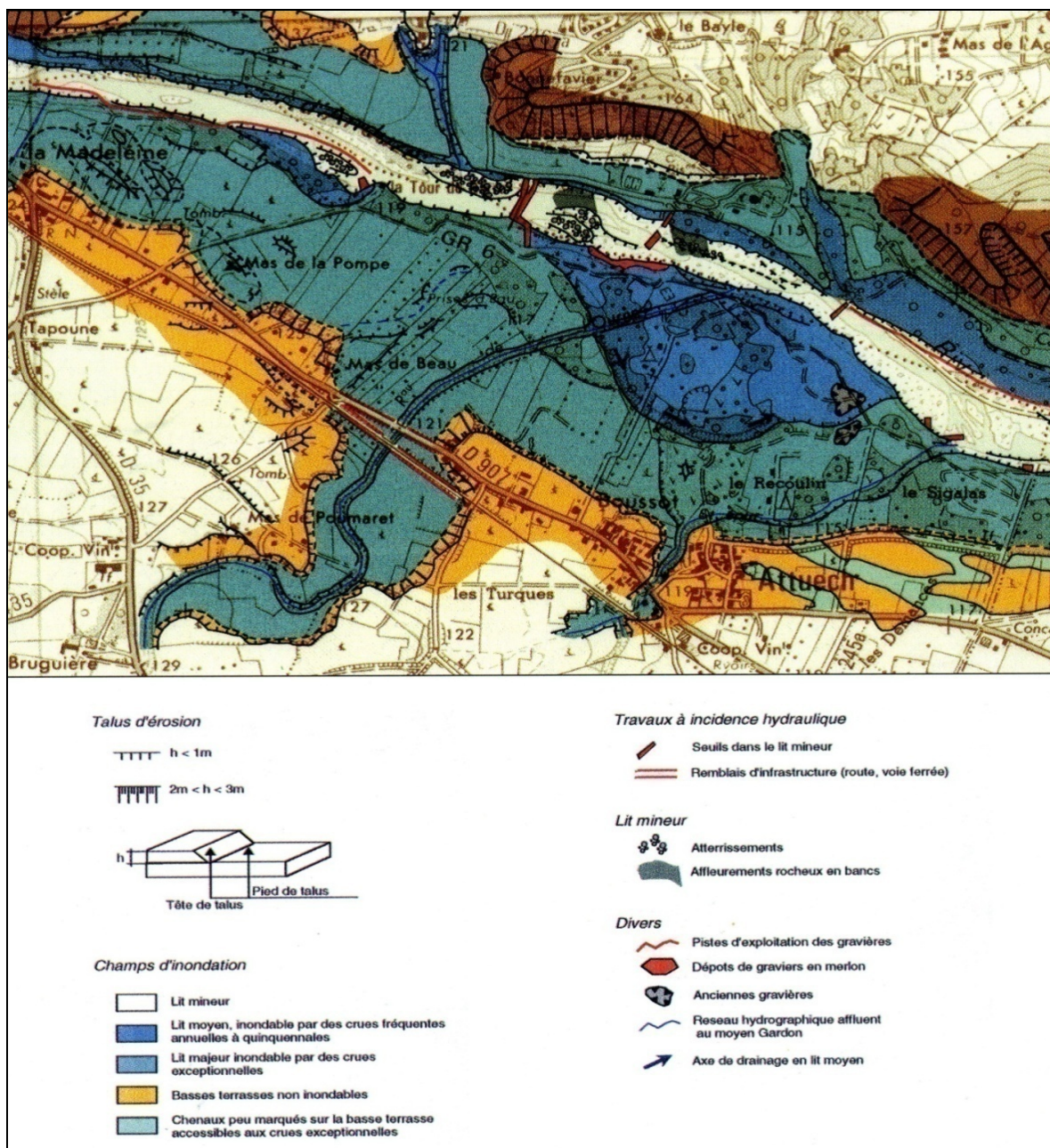


Figure 37 - Carte géomorphologique d'Attuech (Gard).

[Source : M. MASSON *et al.*, 1996]

principes qui devaient régir la nouvelle génération d'Atlas conduisait à définir la notion de carte d'inondabilité hydrogéomorphologique qui se distingue de la formalisation proposée en 1996 par l'introduction des principales données relatives aux crues historiques et par le renoncement à l'élaboration de la carte d'occupation des sols.

Les réflexions du groupe de travail chargé de la mise au point du Cahier des Charges type des Atlas (MEDD, 2002) ont par ailleurs permis de mieux préciser les raisons pour lesquelles certains choix ont dû être faits à cette occasion.

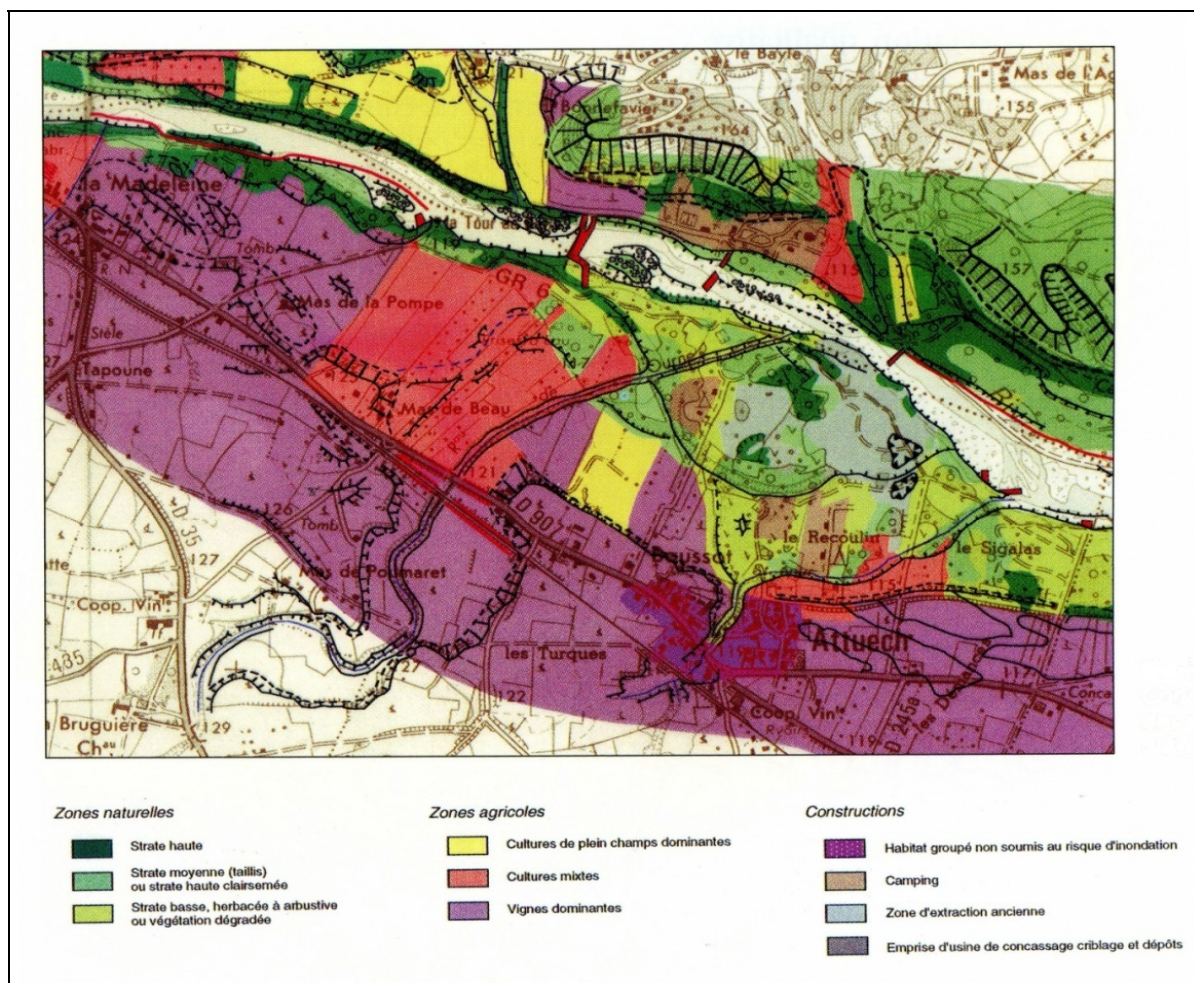


Figure 38 - Carte de l'occupation du sol d'Attuech (Gard).

[Source : M. MASSON *et al.*, 1996]

1) La légende

a. Premières applications

Après plusieurs tests, la cartographie a été appliquée à plusieurs cours d'eau afin de comparer les résultats obtenus avec ceux issus de la modélisation (Lot à Mende (repris dans M. MASSON *et al.*, 1996), Gardon d'Anduze, Lez à l'amont de Montpellier). D'abord accueillie avec scepticisme par les ingénieurs hydrauliciens, elle a progressivement trouvé sa place et elle a été partiellement utilisée après la catastrophe de Nîmes (1988) pour réaliser des diagnostics sur plusieurs communes du Sud-Est (Mende, Nice, Cannes, Saint-Cyprien, *etc.*) et pour rédiger le cahier des charges des atlas des crues torrentielles dans trente départements du sud de la France. Divers essais ont été ainsi tentés, aussi bien en noir qu'en couleurs. En noir (J.L. BALLAIS *et al.*, 1999), des trames plus ou moins denses permettaient de distinguer les trois lits. En couleurs, on a testé les teintes les mieux adaptées à la problématique de l'aléa qui décroît, en général, du lit mineur vers le lit majeur. Cependant, et dans les deux cas, il a été admis dès le départ que le lit mineur devait apparaître en blanc car, en France du moins, s'il est le lieu de l'aléa le plus fort, il est aussi le lieu du risque le plus faible. En revanche,

certaines cartographies en couleurs (S. CHAVE, 2002) ont représenté le lit moyen en bleu soutenu et le lit majeur en vert, teinte qui ne sera pas retenue ensuite.

La légende type (MEDD, 2002) permet *a priori* de traiter tous les cas de figures susceptibles d'être observés dans le cadre d'une étude de zone inondable (Fig. 39). Elle comprend de ce fait un grand nombre de rubriques.

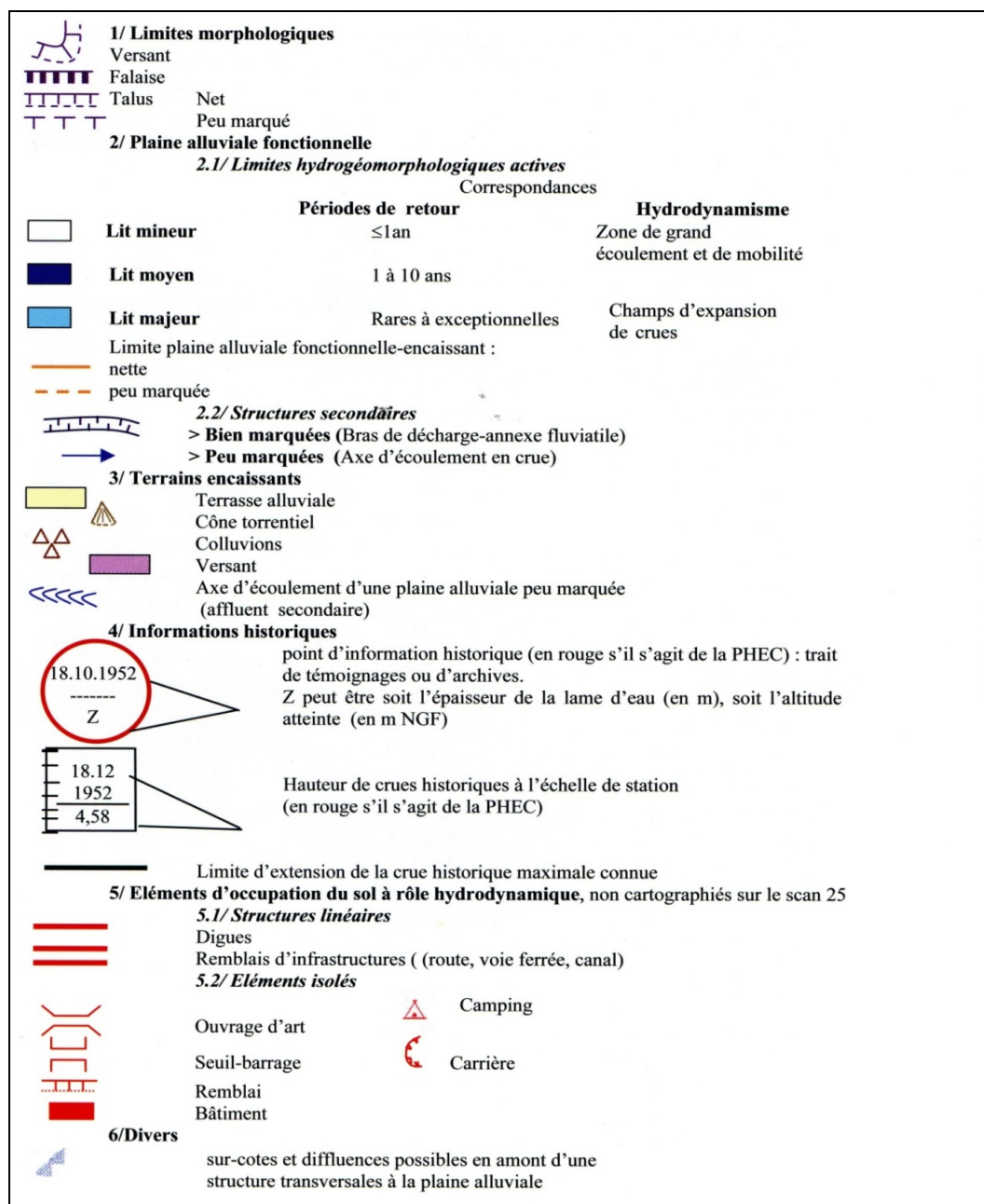


Figure 39 - Légende simplifiée de l'Atlas des Zones Inondables à 1/25 000.

[Source : J.L. BALLAIS, 2006]

La figure 40 présente un exemple de carte au 1/10 000 réalisée suivant ce principe.

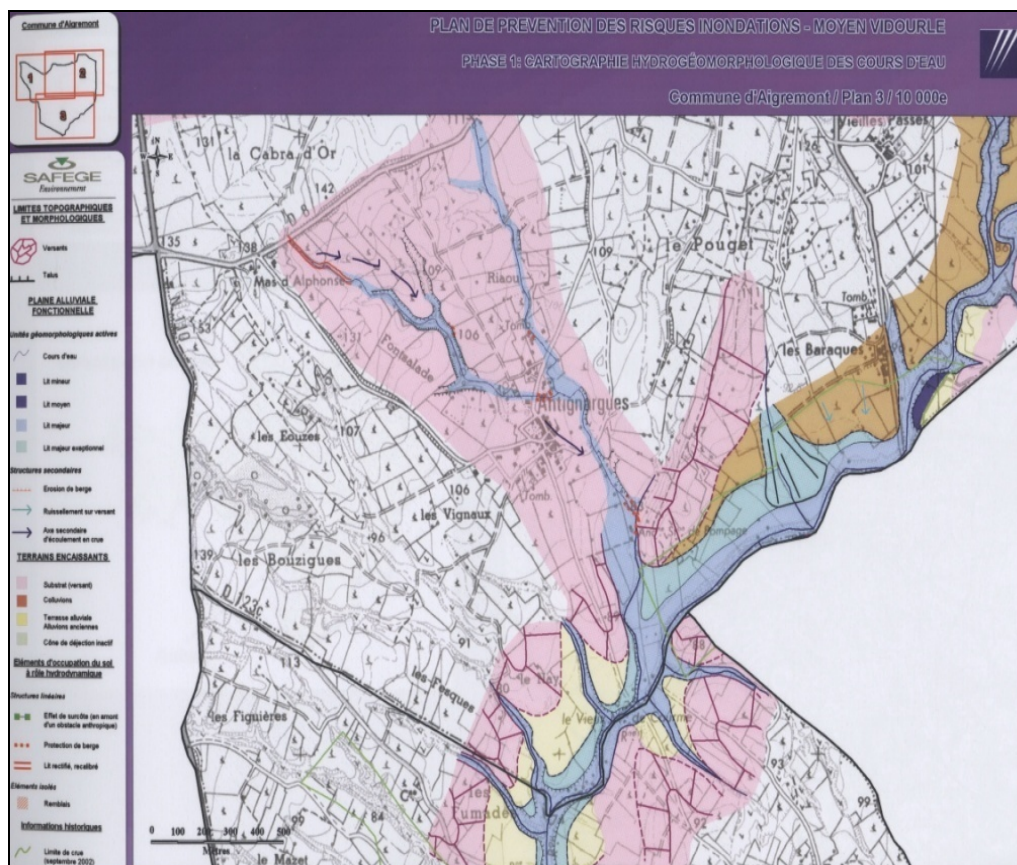


Figure 40 - Cartographie hydrogéomorphologique de la commune d'Aigremont (Gard) à 1/10 000. [Source : SAFEGE, 2006]

À partir de cette légende type, des services décentralisés de l'État ont élaboré leur propre légende afin de l'adapter aux conditions régionales ou locales. Elles peuvent être consultées sur les sites Internet (DIREN-DREAL Languedoc-Roussillon, DIREN-DREAL Provence-Alpes-Côte d'Azur, etc.).

b. La légende de l'Atlas hydrogéomorphologique des Gardons

Pionnière en ce domaine, la DIREN Languedoc-Roussillon a mis au point une légende complexe inspirée de celle de l'Atlas des Zones Inondables (2001), dont l'utilisation pour les Gardons est consultable à partir du serveur cartographique DIREN LR sur le site <http://carto.languedoc-roussillon.environnement.gouv.fr/sites/projets>. En partant des 28 taxons initiaux, la DIREN Languedoc-Roussillon en propose 52 répartis en cinq rubriques qui ne recoupent pas celles de l'Atlas des Zones Inondables : données de cadrage, hydrogéomorphologie, obstacles naturels, obstacles artificiels, crues historiques. Les données de cadrage (8 taxons) regroupent les fonds de carte, les limites administratives, l'hydrographie (dont les plans d'eau). L'hydrogéomorphologie (16 taxons) regroupe la plaine alluviale fonctionnelle (dont le lit majeur exceptionnel, absent de l'Atlas des Zones Inondables) et l'encaissant. Elle ne retient plus la limite de la plaine alluviale fonctionnelle mais trois zones inondables particulières : une zone de débordement sur terrasse ou colluvion, une zone d'incertitude, une zone de versant inondable par surcote. Elle ajoute également le ruissellement sur versant. Les obstacles naturels (8 taxons) comprennent les axes

d'écoulement hors lit mineur, l'érosion de berge, les bourrelets de berge, les talus et l'ensemble forêt riveraine – ripisylve. Les obstacles artificiels (11 taxons) sont les ouvrages en lit mineur, les stations d'épuration, captages et urbanisations diverses, ainsi que les embâcles. Enfin, les crues historiques (10 taxons) regroupent les limites de crues (2002, 2001, 1958), les repères de crues et les photos. Il n'est pas possible dans le cadre limité de cet ouvrage de présenter une analyse détaillée de cette légende et en particulier de l'utilisation des couleurs, souvent conforme aux normes (le rouge pour les enjeux, le bleu pour l'aléa hydrologique), mais qui présente quelques incohérences (le rouge pour les limites communales, par exemple). En fait, la richesse de cette légende est telle que si on reporte tous les taxons prévus sur le scan 25 de l'IGN, la carte devient totalement illisible car trop chargée, comme on peut s'en convaincre en le réalisant soi-même sur le site indiqué ci-dessus. En revanche, si on veut privilégier les informations hydrogéomorphologiques, en utilisant les rubriques 2 et 3 de la légende, on obtient un bon résultat.

c. La nécessité d'améliorer la légende de l'Atlas des Zones Inondables

Une première amélioration peut porter sur des modifications de certains taxons, sur l'homogénéisation des objets représentés et sur leur couleur (J.L. BALLAIS, 2006). C'est ce qu'a déjà largement fait la DIREN Languedoc-Roussillon, ou ce qui a été très rapidement proposé par les bureaux d'étude et les experts scientifiques dans deux cas : la limite de la plaine alluviale fonctionnelle et les colluvions. Cette limite, nous l'avons souligné plusieurs fois, se confond avec la limite externe du lit majeur et, par conséquent, superposer une ligne orange sur une ligne noire n'ajoute rien et n'est pas visible. Les colluvions, par définition, couvrent des surfaces de dimensions variables mais il était peu cohérent de les représenter, à la différence des terrasses alluviales et des versants, par un figuré ponctuel. Très vite, la couleur orange a été conservée pour les représenter, mais par un à-plat.

Il est également nécessaire d'ajouter des taxons. La DIREN Languedoc-Roussillon l'a déjà fait pour le lit majeur exceptionnel. Il faut également ajouter un taxon représentant les glacis fonctionnels reconnus récemment (*supra*, p. 72) et un autre pour les terrasses rocheuses (*infra*, p. 127).

2) Problèmes de cartographie : l'effacement de la limite externe de la plaine alluviale fonctionnelle

Comme nous l'avons vu précédemment, l'effacement de la limite externe de la plaine alluviale fonctionnelle, limite décisive, peut avoir trois causes : l'exhaussement du lit majeur, l'adoucissement du talus de la terrasse alluviale par le ruissellement diffus et le recouvrement de ce talus par le colluvionnement.

a. L'exhaussement du lit majeur

Il peut être illustré avec l'exemple de l'Ouvèze à Roaix (Vaucluse), en rive gauche, le long de l'ancienne route départementale 7 tracée sur la terrasse alluviale du Pléistocène supérieur (J.L. BALLAIS *et al.*, 2009). Le cours d'eau dans ce bief forme un léger méandre et, lors d'inondations, les courants préférentiels traversent le lobe de ce méandre et le recoupent (G. ARNAUD-FASSETTA *et al.*, 1993). La route, qui date de 1856, fait alors barrage aux écoulements, ce qui provoque, à son amont, une sursédimentation ou sédimentation forcée

dans le lit majeur. L'accumulation a été telle qu'aujourd'hui le niveau topographique du lit majeur a atteint celui de la route (voir Photo 64). La terrasse alluviale, naguère non inondable par définition, est devenue inondable du fait de la présence de la route. Il a donc fallu adapter le figuré cartographique et cartographier cet espace comme un lit majeur puisqu'il fonctionne comme tel actuellement. Les exemples de sursédimentation comparables sont très nombreux en domaine méditerranéen, du fait de l'importance des alluvions fines transportées (*supra*, p. 68).

b. L'adoucissement du talus externe par ruissellement diffus

Le talus externe de la plaine alluviale fonctionnelle, nous l'avons vu, constitue une limite spatiale majeure, puisqu'il bloque l'étalement latéral des crues ; il marque la limite du champ d'inondation maximal occupé par les crues les plus importantes. Si c'est souvent une surface à forte inclinaison qui marque une séparation topographique nette entre la plaine alluviale fonctionnelle et son encaissant, il a pu être adouci, biseauté par une érosion aréolaire développée depuis le versant (Fig. 41).

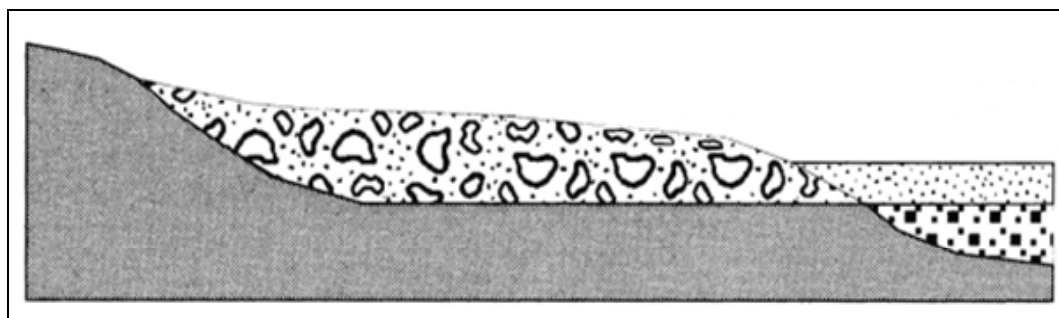


Figure 41 - Adoucissement du talus externe par ruissellement diffus.

[Source : M. MASSON *et al.*, 1996, modifié]

Cette évolution est à l'origine d'une imprécision dans le positionnement de la limite de la zone inondable. En effet, compte tenu de la pente transversale faible, une légère variation des hauteurs d'eau de crue se traduira par une assez forte modification de cette limite. Les conséquences pratiques de cette imprécision seront cependant en général réduites en France, dans la mesure où, sur ces marges de plaine alluviale fonctionnelle, les hauteurs de submersion et les vitesses du courant restent modestes en dehors du domaine méditerranéen.

c. Le recouvrement du talus de la terrasse alluviale par colluvionnement

Il s'agit ici aussi d'un cas très fréquent. Les processus de ruissellement diffus permettent une ablation des matrices fines, en particulier sur les roches et les sols meubles et au sommet du talus des terrasses, puis un transport colluvial qui les accumule au pied de l'encaissant. Ce phénomène aboutit à ce que le contact entre le lit majeur et l'encaissant ne se fait plus par un talus net mais par une longue concavité (Fig. 42) qui peut être accentuée par le passage des engins mécaniques pour le labour des parcelles.

Pour illustrer ce cas, nous prendrons l'exemple d'une coupe sur l'Orbieu, au lieu dit "Les Trois Chemins", en rive gauche, à l'aval de Ferrals les Corbières. Cette coupe se situe dans le

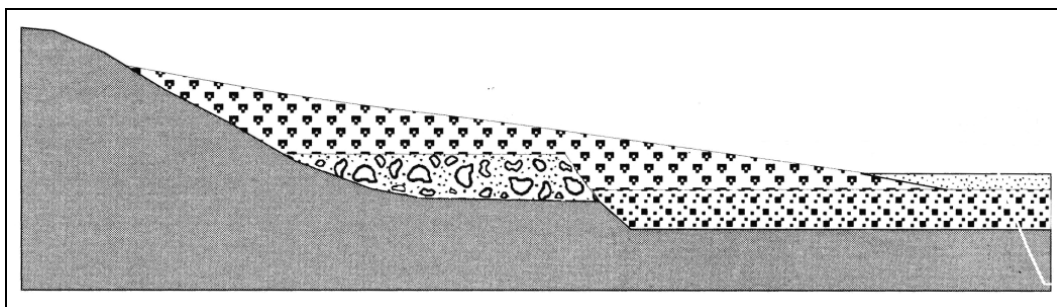


Figure 42 - Recouvrement du talus externe par colluvionnement.

[Source : M. MASSON *et al.*, 1996]

talus externe du lit majeur exceptionnel (S. CHAVE, 2003). Elle présente cinq dépôts successifs, qui forment une alternance de dépôts bruns foncés et de dépôts bruns clairs (Fig. 43). Les dépôts bruns foncés sont constitués d'une matrice limoneuse qui emballe de petits cailloux anguleux. Les dépôts bruns clairs présentent également une matrice limoneuse avec quelques petits galets. Les analyses granulométriques effectuées sur ces dépôts confirment les hypothèses d'attribution des dépôts foncés à des colluvions et des dépôts clairs à des alluvions : la courbe cumulative des sables des échantillons bruns foncés tend vers une droite. Ceci témoigne d'une absence de tri, ce qui est typique des dynamiques colluviales. Les courbes cumulatives des sables des échantillons bruns clairs tendent, quant à elles, vers une sigmoïde. Ce type de courbe témoigne d'une action de tri et est typique des dépôts de lit majeur (*supra*, p. 45). De même, le grain moyen des colluvions (qui dépasse 350 μm) est très supérieur au grain moyen des alluvions (inférieur à 150 μm). Ainsi, au pied de ce talus, tantôt le cours d'eau dépose des alluvions, tantôt les dynamiques transversales apportent des colluvions.

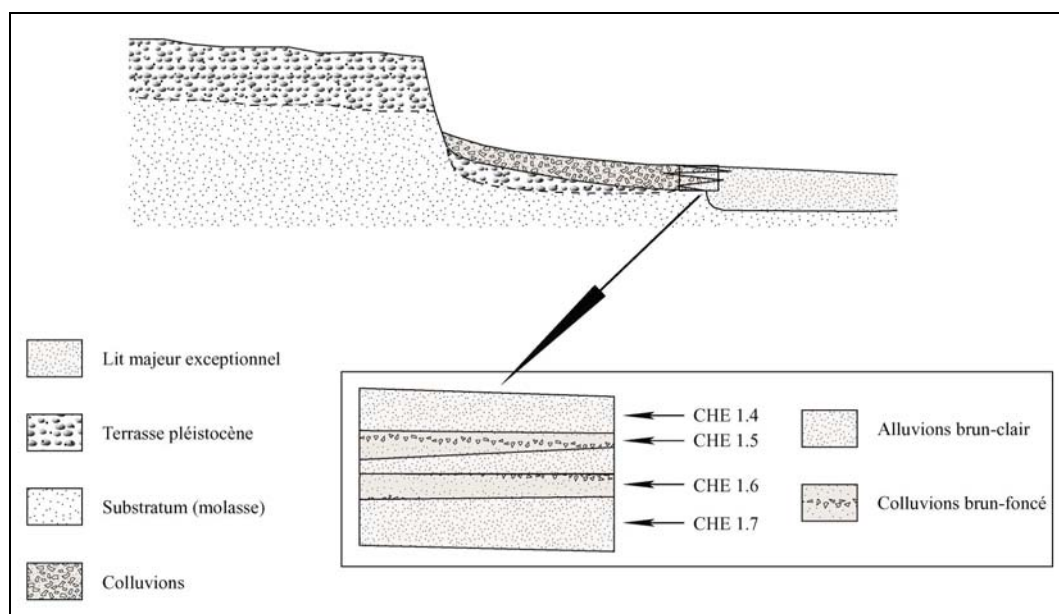


Figure 43 - Coupe de la limite externe du lit majeur exceptionnel de l'Orbieu aux Trois Chemins (Ferrals-les-Corbières, Aude).

[Source : V. DELORME-LAURENT, 2007]

D'un point de vue cartographique, nous avons représenté les colluvions par un aplat orangé et non par les triangles préconisés par la légende de l'Atlas des Zones Inondables qui ne nous semblent pas commodes pour représenter une surface. La limite, ici, n'est pas figurée en trait plein mais en tirets car, selon la hauteur d'eau atteinte, une partie ou la totalité des colluvions peut être recouverte. Cette limite en tirets est positionnée sur la rupture de pente ou, pour ce cas précis, à l'endroit exact où la coupe présente l'alternance d'alluvions et de colluvions.

Les talus nets n'existent donc pas toujours, ils sont souvent tantôt adoucis, tantôt recouverts et laissent place à de longs versants de raccordement concaves. Cependant, il existe d'autres cas où la limite est nette, avec des talus subverticaux, mais où la difficulté pour déterminer l'extension maximale des crues réside dans la présence de niveaux topographiques intermédiaires : lits majeurs exceptionnels et terrasses holocènes.

d. Le lit majeur exceptionnel

Tel que nous le définissons *supra*, p. 31, il n'est pas prévu dans la légende type du MEEDDM français. Dans son étude de l'Orbieu, la SOGREAH PRAUD (2002) n'a d'ailleurs pas cartographié ces espaces en lit majeur exceptionnel, bien qu'ils aient été inondés par une hauteur d'eau supérieure à un mètre (S. CHAVE, 2003) lors de la crue de novembre 1999. La cartographie a ensuite été reprise par S. CHAVE (2003) et modifiée par V. DELORME-LAURENT et J.L. BALLAIS (2006) en tenant compte de l'existence de ces lits majeurs exceptionnels. Comme la DIREN Languedoc-Roussillon, nous avons décidé de cartographier ces espaces en bleu ciel, plus clair que celui utilisé pour les lits majeurs ordinaires (Fig. 44).

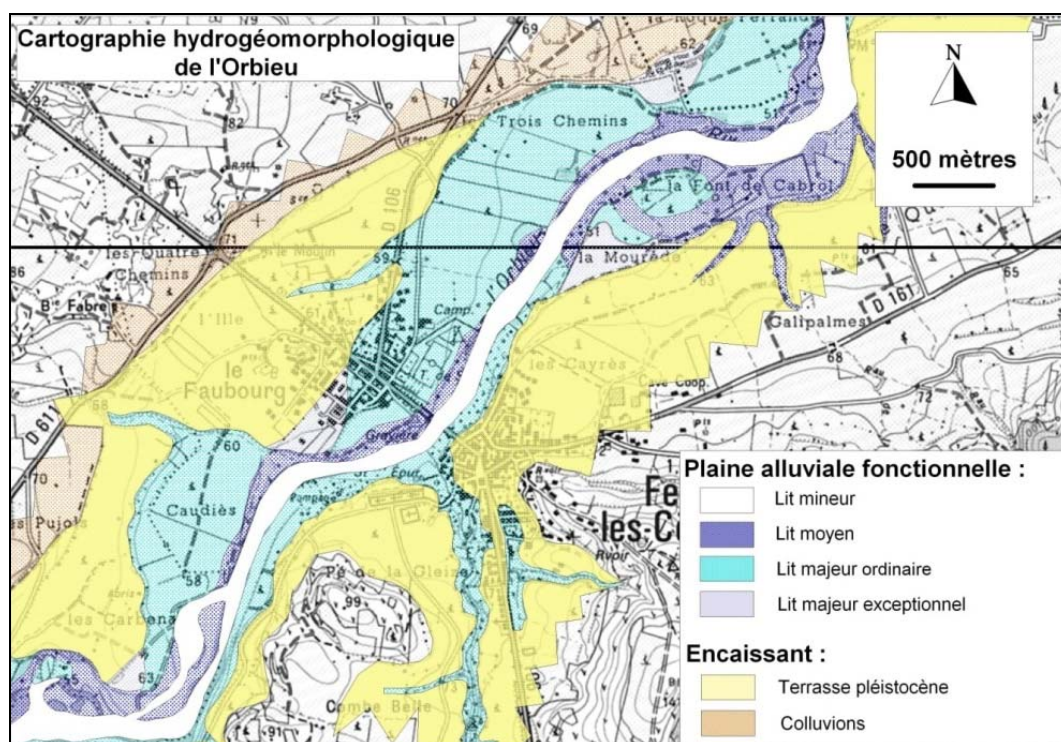


Figure 44 - Carte hydrogéomorphologique de la vallée de l'Orbieu (Aude).

[Source : V. DELORME-LAURENT et J.L. BALLAIS, 2006]

e. La terrasse holocène

D'un point de vue cartographique (V. DELORME-LAURENT et J.L. BALLAIS, 2006), il est important de bien faire la distinction entre un lit majeur exceptionnel et une terrasse alluviale holocène car même si les formations qui les constituent se ressemblent beaucoup, l'un est toujours fonctionnel et l'autre ne l'est plus. Dans le cas de l'existence d'une terrasse holocène, la limite de la zone inondable est donc située au pied de son talus et non pas au pied du talus de la dernière terrasse pléistocène, et si la limite est nette, elle est figurée par un trait plein. Afin de faire ressortir cette forme sur la carte, en tant que partie de l'encaissant, il a donc été nécessaire de créer un nouveau figuré (Fig. 45). Puisqu'il s'agit d'une terrasse alluviale, nous l'avons représentée en jaune mais comme elle n'est pas pléistocène, ce jaune est plus soutenu que celui qui représente les terrasses pléistocènes, selon les principes de la carte géomorphologique (RCP 77, 1970). Dans le cas des terrasses rocheuses (Fig. 45), pour les mêmes raisons que précédemment, il est nécessaire de faire figurer ces formes et nous avons dû créer un taxon puisque ce cas n'était pas non plus prévu dans l'Atlas des Zones Inondables. Il s'agit d'un aplat jaune, pour rappeler qu'il s'agit d'une terrasse, auquel est superposée une trame rose qui rappelle la couleur du substrat.

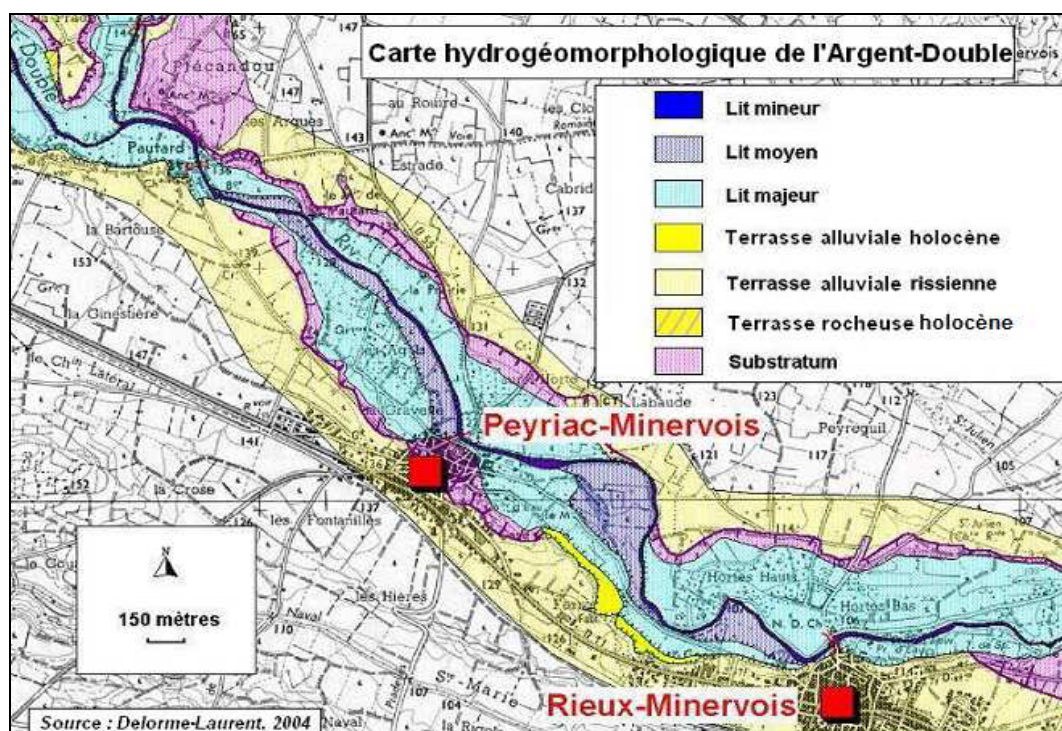


Figure 45 - Cartographie hydrogéomorphologique de la vallée de l'Argent-Double (Aude). [Source : V. DELORME-LAURENT, 2007]

f. Les vallons secs

Dans les vallons secs, on ne peut différencier que les axes principaux d'écoulements et la zone d'extension maximale des eaux de crue. Globalement, ces deux éléments se rattachent à des unités hydrogéomorphologiques connues : axes principaux d'écoulement ou lits mineurs et zones inondées ou lits majeurs des écoulements exceptionnels.

Plusieurs remarques s'imposent cependant (E. HAUCHARD, 2002-a, 2002-b). D'abord, ce que l'on peut assimiler à un lit mineur correspond bien évidemment au talweg naturel, mais il existe aussi d'autres lits mineurs qui correspondent à des limites de parcelles cultivées, surtout lorsque plusieurs bras se suivent parallèlement. Ces lits mineurs peuvent éventuellement s'installer sur une fourrière de bas de parcelle en limite de talweg naturel, ou encore le long d'un petit talus lié à une haie, toujours à proximité immédiate d'un vrai talweg. Ensuite, ils peuvent aussi s'installer sur une déraie de charrue, ou un drain involontairement mis en place. Sur des sections de talwegs encore peu encaissés, la notion de lit mineur demeure tout de même très incertaine, d'autant que les facteurs anthropiques sont ici très largement dominants. Les paramètres agronomiques influencent donc ces axes d'écoulement et leur nombre. Il est en revanche parfaitement impossible d'établir une distinction entre lit moyen et lit majeur pour ces zones inondées, y compris en s'appuyant sur la microtopographie locale. Enfin, l'extension de ce lit majeur est très imprécise en raison du raccord très progressif entre lui et les versants peu entaillés. On se situe bien aux limites de la méthode hydrogéomorphologique.

Ces caractéristiques permettent finalement de placer les limites maximales du lit majeur au pied des versants des terrasses alluviales, au pied des versants des rives concaves et au pied des versants en pentes fortes. Ce lit majeur correspond alors au fond plat ou légèrement en berceau du vallon sec. Lors des crues, les eaux s'étalent sur toute la largeur du lit majeur ainsi délimité, la lame d'eau possédant une très faible épaisseur. Il est tout à fait possible qu'un facteur aggravant, qu'il soit physique (bourrelet de rive, cône de colluvionnement) ou anthropique (remblai de route), crée un phénomène de barrage qui fasse localement monter les eaux. Ce processus de montée des eaux est alors très localisé, immédiatement à l'amont de l'élément perturbateur, mais il peut être brutal et la hauteur d'eau conséquente (jusqu'à plusieurs mètres en Pays de Caux – Seine-Maritime).

Au total, la méthode hydrogéomorphologique peut s'appliquer avec des restrictions pour plusieurs raisons : premièrement, parce qu'on ne peut définir qu'un (ou plusieurs) lit mineur et un lit majeur sans autre limite hydrogéomorphologique intermédiaire ; deuxièmement, parce qu'il n'existe pas une limite absolument tranchée du lit majeur des ruissellements exceptionnels ; troisièmement, parce que la méthodologie n'a de sens que dans les secteurs de talwegs d'ordre 3 ou 4 (*supra*, p. 16). Une zone de transition correspond à l'endroit où le vallon s'encaisse, où les pentes s'accroissent, où les lits mineurs commencent éventuellement à surcreuser le fond de vallon, c'est-à-dire lorsque les ruissellements commencent à représenter un aléa fort.

3) Les réalisations hors de France

Hors de France, la première carte a été réalisée à l'échelle de 1/10000 sur l'oued Bou Merzoug au sud de Constantine, en Algérie (A. ZEBIRI, 1994 – Fig. 46), dans le cadre d'un accord-programme entre l'Université d'Aix-Marseille II et l'Université de Constantine. Destinée à être publiée en noir et blanc, elle distingue, au sein de la plaine alluviale fonctionnelle, trois lits : le lit mineur, en noir, le lit moyen en gris foncé et le lit majeur d'inondation en gris clair. La teinte noire a l'inconvénient de masquer les autres composants du lit mineur, mais l'étrécit de ce dernier le limite considérablement. À l'inverse, elle attire l'attention sur le risque qui, ici, n'est pas nul car des habitations précaires, au moins temporaires, sont installées en été en bordure du chenal d'étiage. Des talus sont distingués, entre les lits et à l'intérieur du lit majeur. Hors de la plaine alluviale, la carte distingue une basse terrasse (très probablement holocène) et un versant en pente forte. Il faut attendre

ensuite 2007 pour qu'une cartographie systématique à l'échelle de 1/10000 soit effectuée le long de l'oued Mekeraa par le bureau d'études français Ginger et publiée par la Wilaya de Sidi Bel Abbès (Direction de l'hydraulique, 2006 ; B. HALLOUCHE, 2007 ; B. HALLOUCHE *et al.*, 2008). La légende de cet ensemble de cartes suit très étroitement celle mise au point en 2002.

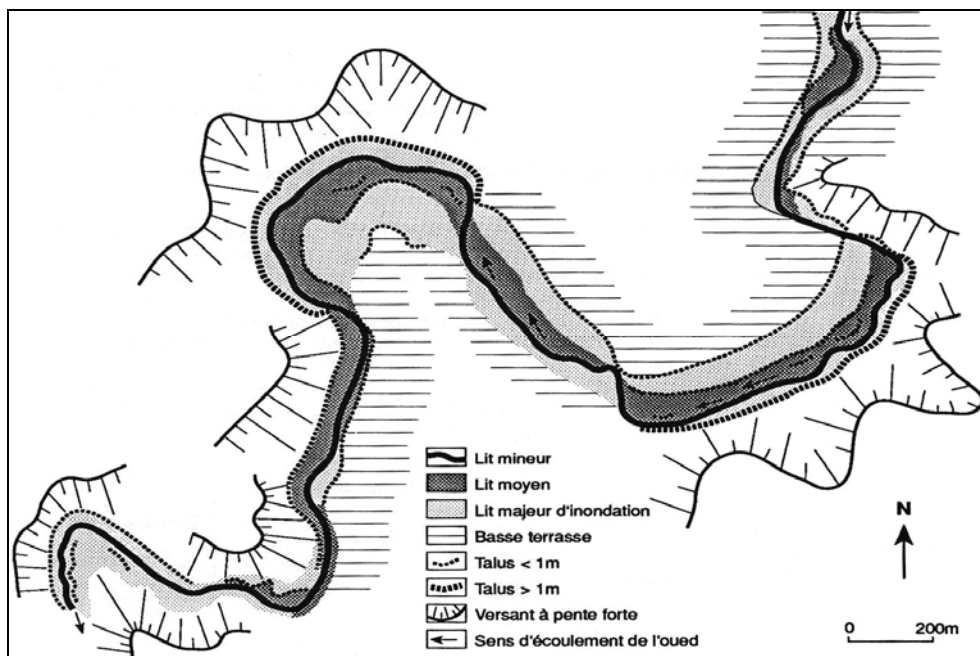


Figure 46 - Morphologie des lits de l'oued Bou Merzoug (Algérie).

[Source : A. ZEBIRI, 1994]

En Italie du Nord, F. LUINO a proposé une première carte en noir et blanc (1998) (Fig. 47) qui se bornait à délimiter la plaine alluviale, sujette à des inondations sévères.

Puis avec deux collègues (2002), il a procédé à une analyse géomorphologique dans le but de cartographier les aires inondables par l'Oglio, en reconstituant l'évolution de la rivière depuis 50 ans, grâce à une étude approfondie des différentes missions de photographies aériennes couplée à un travail de terrain le long du lit qui définit les limites de la zone inondable et la compare avec la zone inondée en septembre 1960. La carte géomorphologique au 1/10000 représente, en hachures verticales bleues, le lit de l'Oglio (siège de la crue ordinaire) limité par les berges naturelles ou les travaux d'aménagement et en hachures horizontales vertes, l'aire habituellement inondée dans le passé (d'après les archives), qui comprend les formes restaurables de la rivière (anciens chenaux). Ces limites correspondent aux différences morphologiques dans le niveau du sol ou à des aménagements de contrôle du flot. Des hachures rouges obliques indiquent les aires inondables pour des événements catastrophiques, limitées par des éléments morphologiques : hautes terrasses, murs rocheux, *etc.*

Au Canada, une première étude expérimentale vient d'être publiée sur la Rivière au Renard (Québec), à la suite de l'inondation du 9 août 2007 (M.A. LELIÈVRE *et al.*, 2008). Après une présentation détaillée de la méthode hydrogéomorphologique mise au point en France, elle propose un premier exemple de cartographie qui distingue le lit mineur en bleu, le

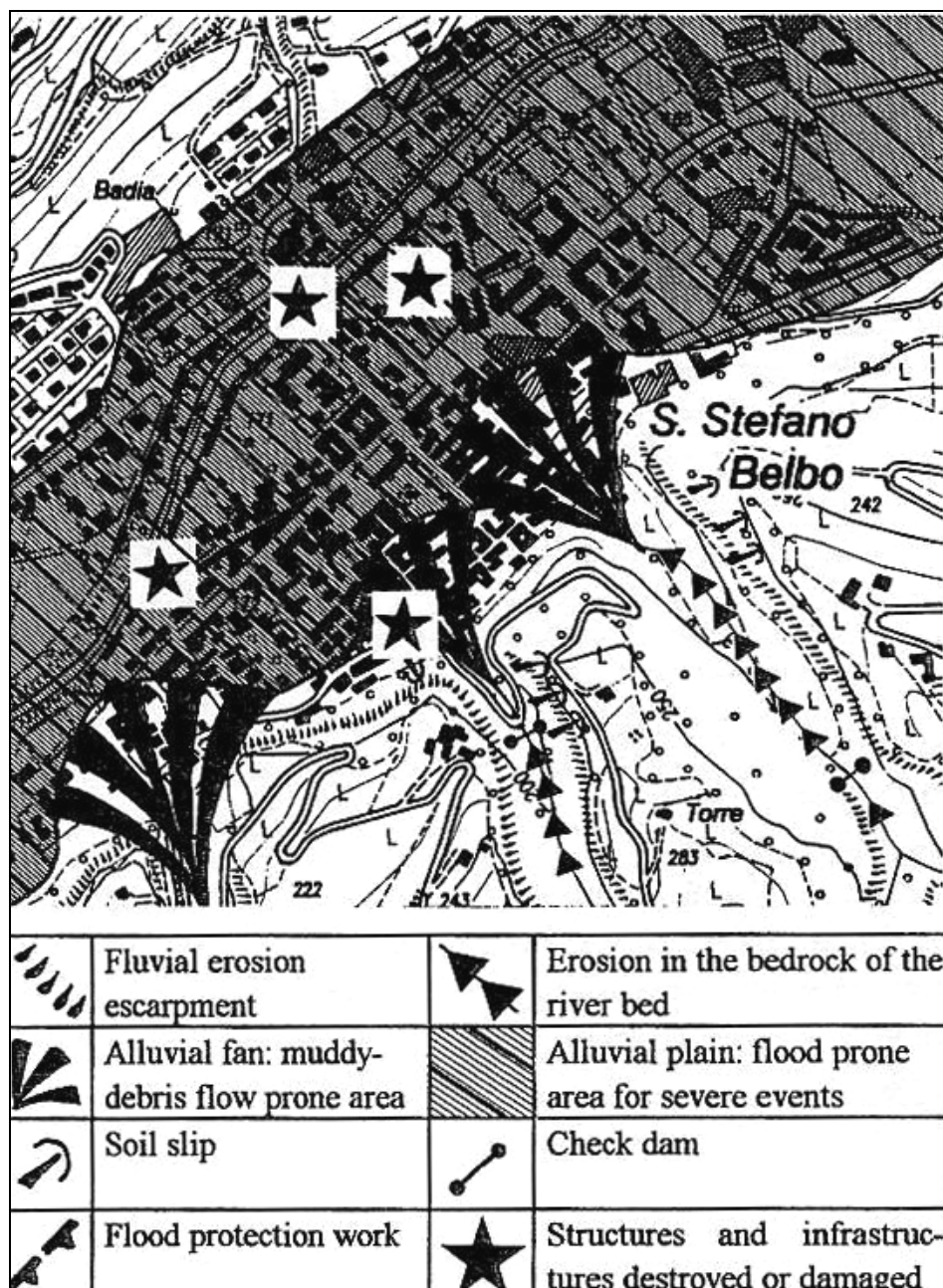


Figure 47 - Carte de San Stefano Belbo (Nord-Ouest de l'Italie).

[Source : F. LUINO, 1998]

lit moyen en lilas et le lit majeur en vert (Fig. 48) et elle souligne la complémentarité de la méthode hydrogéomorphologique avec la méthode de l'hydrologie statistique classique. De nouvelles études hydrogéomorphologiques sont en projet, toujours dans la même région.

En Espagne, un groupe de géomorphologues a réalisé une carte intégrée dans la méthodologie résumée dans un schéma *infra* (voir Fig. 51) (J. LASTRA *et al.*, 2008). La "geomorphological method" pratiquée fait explicitement référence aux travaux français. La carte, non publiée, distingue quatre « terrasses inondables » : basse, moyenne, haute et très haute.

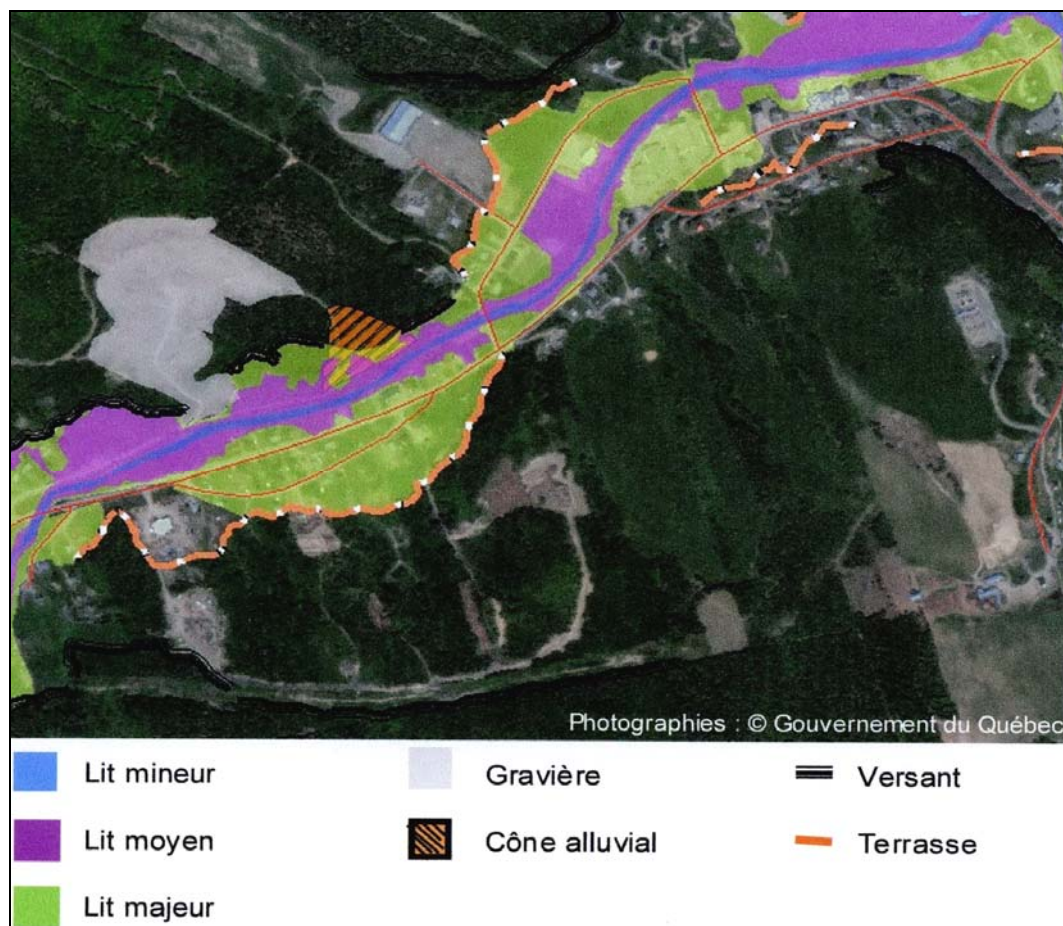


Figure 48 - Cartographie hydrogéomorphologique de la vallée de la Rivière au Renard (Québec, Canada).

[Source : M.A. LELIÈVRE *et al.*, 2008]

La première carte hydrogéomorphologique réalisée en Tunisie vient d'être présentée dans une thèse toute récente (W. CHOUARI, 2009). Après un chapitre consacré à l'exposition de la méthode hydrogéomorphologique, l'auteur présente la cartographie hydrogéomorphologique de la plaine alluviale récente de Jdaïda (p. 350 à 369) illustrée par sa figure 158, carte géomorphologique de la plaine alluviale moderne de Jdaïda qui ne distingue qu'un lit mineur et un lit majeur. Si cette carte s'inspire très clairement de M. MASSON *et al.* (1996), elle reste encore très schématique.

Enfin, un ensemble de plusieurs dizaines de cartes à échelle variable vient d'être levé sur le Karakash Darya (Xinjiang, Chine) (M. WULAMU, 2010). Ces cartes présentent l'originalité d'utiliser comme support des images de Google Earth car les cartes topographiques à bonne échelle (qui existent peut-être) et les photos aériennes (dont l'existence n'est pas assurée) ne sont pas disponibles. La légende de ces cartes s'inspire très étroitement de celle de 2002 (Fig. 49).

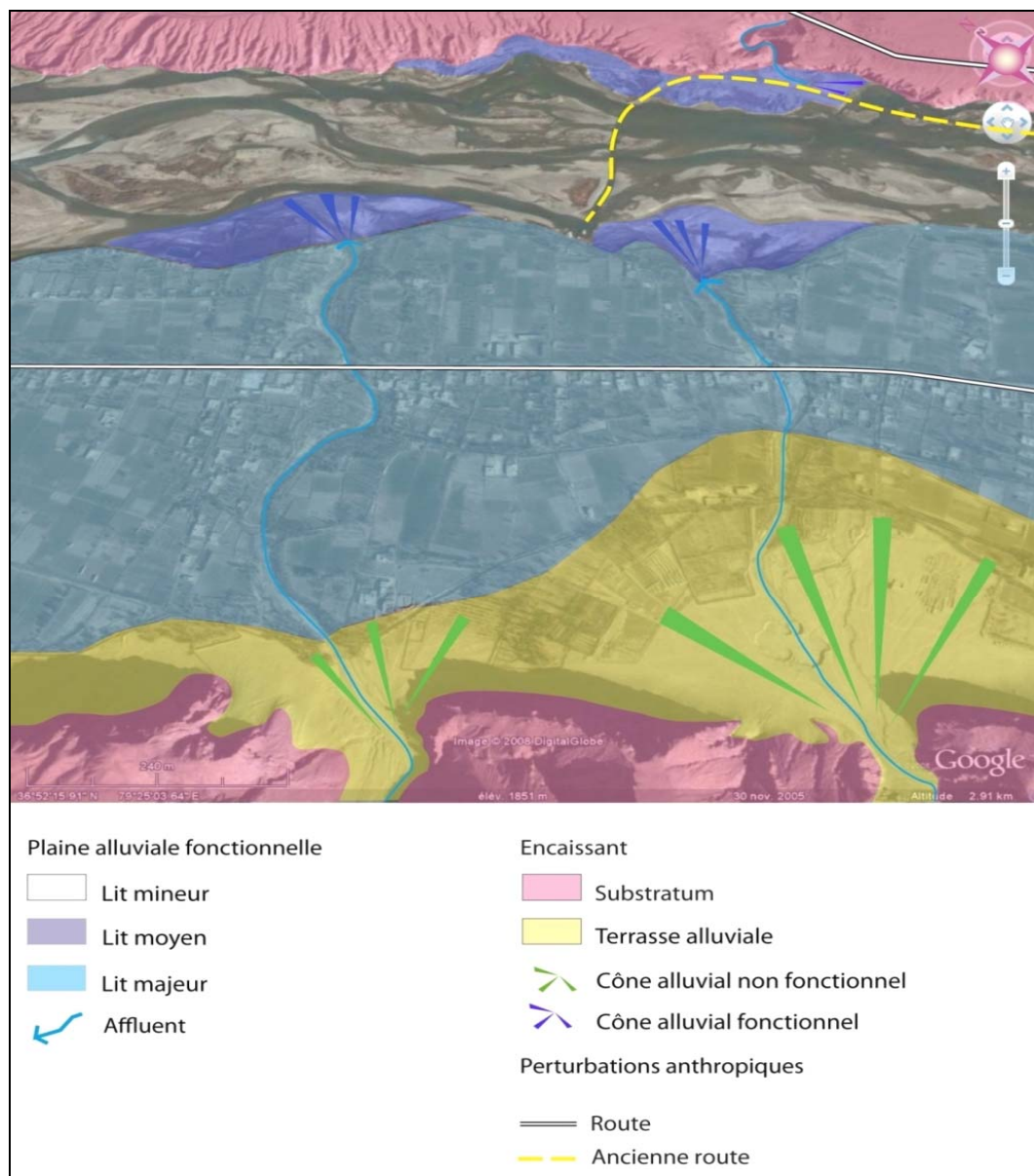


Figure 49 - Carte hydrogéomorphologique de la vallée du Karakash Darya à Langru (Xinjiang, Chine). [Source : M. WULAMU, 2010]

III - L'INTERPRÉTATION DES CARTES HYDROGÉOMORPHOLOGIQUES

1) L'interprétation qualitative

Elle consiste à affecter aux unités hydrogéomorphologiques une caractérisation en termes de niveau d'exposition à l'aléa. Ainsi le lit moyen d'un cours d'eau à régime torrentiel, en climat méditerranéen, devra être considéré comme exposé à l'aléa maximal, puisqu'il sera *a priori* affecté par toutes les crues inondantes, de la plus fréquente à la plus exceptionnelle,

avec les hauteurs d'eau et les vitesses de courant les plus élevées de la plaine alluviale fonctionnelle.

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, qui dépendent fortement des caractéristiques du bief étudié. En première analyse, on doit évidemment considérer tout lit majeur 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 la construction dans ce lit, soit, en cas d'enjeux socio-économiques importants, à préciser le niveau de l'aléa au moyen d'une étude hydraulique spécifique.

Dans un second temps, des observations complémentaires peuvent permettre d'affiner la cartographie de ce lit majeur. Par exemple, des situations géomorphologiques particulières, souvent représentées en domaine méditerranéen, incitent 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 (A. MONTAGNÉ, 2003). Tel est le cas, par exemple, lorsque cette unité hydrogéomorphologique joue le rôle de premier champ d'expansion d'un cours d'eau à forte pente, ou lorsqu'elle se situe immédiatement à l'amont d'un rétrécissement naturel ou artificiel de la plaine alluviale fonctionnelle, 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 notée, en application du principe de précaution.

Il est évident qu'il sera nécessaire autant que possible d'étayer ces interprétations par l'utilisation 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.

2) L'interprétation semi-quantitative

Elle intègre dans la démarche méthodologique des données quantitatives qui sont relatives à la connaissance hydrologique du bassin versant (pluviométrie, ruissellement, débits spécifiques et débits théoriques des crues rares et exceptionnelles) et aux 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 et vitesses du courant.

Partie II - Chapitre II

LA MÉTHODE INTÉGRÉE

I - ORIGINES DE LA MÉTHODE INTÉGRÉE

La situation institutionnelle actuelle en France, qui consiste à spécialiser d'une part l'hydrogéomorphologie pour la réalisation des Atlas des Zones Inondables, et d'autre part la modélisation hydraulique pour celle des PPR, ne permet pas de tirer parti au mieux des connaissances acquises par chacune des deux méthodes. Le constat de cette situation est qu'il n'existe pas encore pour le moment de doctrine globale qui propose aux maîtres d'ouvrages et aux bureaux d'études une méthodologie qui permette d'associer rationnellement ces deux méthodes et par conséquent de développer des synergies entre elles. Pourtant, en ingénierie de l'environnement, l'hydraulicien et le géomorphologue travaillent ensemble et peuvent enrichir mutuellement leurs travaux et aboutir à des conclusions communes lorsqu'il s'agit de diagnostic d'aléa hydrologique.

C'est pour tenter de proposer une méthode qui intègre les apports de chaque discipline que le CÉTÉ Méditerranée a entrepris, il y a quelques années, avec l'aide de la DGUHC du Ministère de l'Équipement, de l'Université de Provence et de bureaux d'études (CAREX ENVIRONNEMENT, devenu SIEE PACA, et le BCEOM) d'établir des articulations entre les deux méthodes. Les premiers résultats obtenus fournissent les bases d'une démarche méthodologique globale qui a permis de moduler et de mettre en synergie les possibilités offertes par chacune d'elle et de concevoir une méthode, appelée "Méthode intégrée", qui associe étroitement les apports de l'hydrogéomorphologie et ceux d'une modélisation simplifiée (S. CHAVE, 2003 ; S. CHAVE et J.L. BALLAIS, 2006).

II - PRINCIPES DE LA MÉTHODE INTÉGRÉE

La limite de la plaine alluviale fonctionnelle peut être utilisée pour rechercher les paramètres qui caractérisent l'aléa et qu'on peut affecter à telle ou telle zone soumise à l'inondation. Les perspectives sont également liées à la recherche d'une signification hydrologique de la plaine alluviale fonctionnelle des cours d'eau, c'est-à-dire au calcul du *débit hydrogéomorphologique* qui est le débit nécessaire au remplissage de cette plaine alluviale fonctionnelle.

La valeur de ce débit est obtenue sur un bief de cours d'eau et ensuite comparée aux valeurs de débit connues pour ce type de cours d'eau, ce qui permet de situer, en termes d'occurrence, la capacité de la plaine alluviale fonctionnelle. L'obtention de ce débit obéit à des critères précis qui ont été utilisés dans les premiers calculs expérimentaux. Le calcul de la gamme des débits a pour objectif de déterminer deux débits essentiels : le débit

hydrogéomorphologique minimum qu'il faut propager dans le modèle hydraulique HEC-RAS afin de recouvrir d'eau l'ensemble de la plaine alluviale fonctionnelle et le débit hydrogéomorphologique maximum qui peut être propagé dans cette plaine alluviale fonctionnelle, soit une valeur de débit qui occasionne le débordement de l'eau sur la terrasse alluviale ou sur tout autre forme ou formation de l'encaissant.

La méthode de calcul employée a pour objectif de traduire, sans toutefois passer par les fréquences, l'adéquation longitudinale des formes et des lignes d'eau calculées par le modèle. Pour y parvenir, il faut considérer deux paramètres de validation : la comparaison de l'altitude des pieds et sommets de talus avec celle de la ligne d'eau pour un débit donné et parvenir à représenter l'évolution amont-aval de la ligne d'eau le long du bief considéré avec celle de l'altitude de chaque pied et de chaque sommet de talus (Fig. 50). La lecture de ce comparatif permet de constater le respect des principes énoncés ci-devant. Pour être exacte, cette superposition a été réalisée en attribuant le même référentiel spatial à chaque élément de la comparaison. La ligne d'eau est construite à partir de l'abscisse du talweg alors que les pieds et sommets des talus de chaque rive disposent de l'abscisse de chaque talus (cette abscisse est d'autant plus différente que les lits majeurs sont larges et sinueux). La dernière opération de calcul réalisée a eu pour objectif de s'assurer de la réalité de chaque point de la ligne d'eau avec les formes concernées.

III - PREMIÈRES APPLICATIONS

Cette méthode, qui combine la géomorphologie, l'hydrologie et l'hydraulique, a été testée à plusieurs reprises sur des biefs de cours d'eau situés en différents points du territoire français.

Dans le département de l'Aude, elle a été appliquée sur des cours d'eau concernés par les crues de novembre 1999 : l'Orbieu et l'Argent-Double. Dans le cas de l'Orbieu, les calculs effectués permettent de se situer dans des gammes de débit comparables aux estimations annoncées par la SOGREAH PRAUD (2002). La gamme de valeurs obtenue, comprise entre 2500 et 3000 m³/s, permet d'ajuster les lignes d'eau calculées par le modèle HEC-RAS aux talus qui bornent la plaine alluviale fonctionnelle. Dans le cas de l'Argent-Double, les calculs ont permis également d'ajuster les mêmes formes, avec toutefois des conditions d'expérimentation compliquées par la prise en compte simultanée de plusieurs biefs séparés par une zone de confluence. Même dans ce type de situation plus complexe, les résultats obtenus correspondent à des valeurs tout à fait vraisemblables pour ce type de bassin versant en milieu méditerranéen.

Dans le département du Vaucluse, la méthode intégrée a été expérimentée sur deux biefs, le long de l'Ouvèze, à proximité de Vaison-la-Romaine. Sur le bief centré sur la ville, la même méthodologie (méthode hydrogéomorphologique plus modélisation avec HEC-RAS) permet d'estimer le débit hydrogéomorphologique entre 1100 et 1300 m³/s (CAREX, 2004), soit une valeur très compatible avec celle estimée lors de la crue rare du 22 septembre 1992 (G. ARNAUD-FASSETTA *et al.*, 1993). Sur le deuxième bief, entre Vaison-la-Romaine et Violès, la même méthode fournit un débit hydrogéomorphologique minimum (ou débit hydrogéomorphologique s.s.) de 1300 m³/s, qui confirme les résultats antérieurs. Le débit

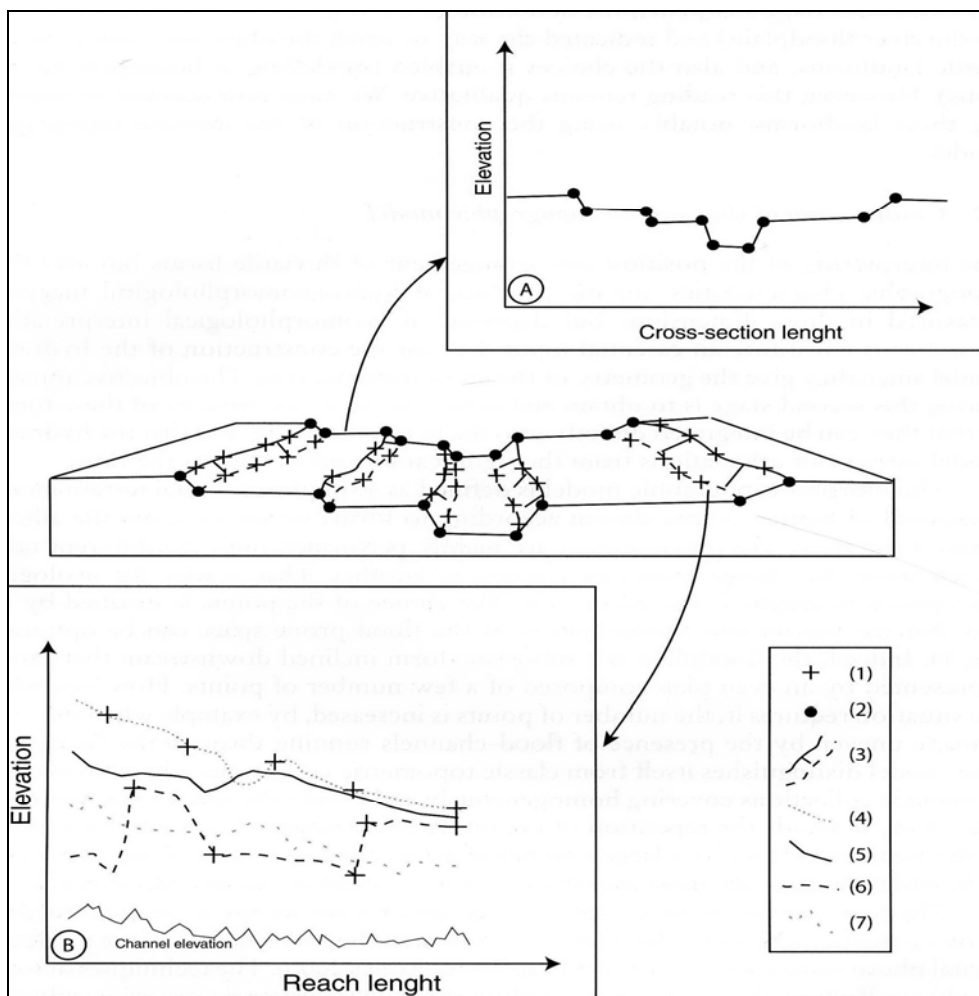


Figure 50 - Le modèle morpho-topographique et sa contribution à la méthode intégrée.

[Source : S. CHAVE et J.L. BALLAIS, 2006]

A : coupes transversales. B : profils longitudinaux. 1 : point de mesure sur le profil longitudinal.
 2 : point de mesure sur la coupe transversale. 3 : talus. 4 : profil longitudinal gauche du sommet du talus. 5 : profil longitudinal droit du sommet du talus. 6 : profil longitudinal droit de la base du talus. 7 : profil longitudinal gauche de la base du talus.

hydrogéomorphologique maximum, c'est à dire qui permet à l'inondation de déborder sur la plus basse terrasse alluviale, est alors de 1500 m³/s (BCEOM, 2004).

Dans le département de la Meuse, sur la Meuse, il s'est agi d'une première application de la méthode intégrée hors du domaine méditerranéen où elle a été mise au point. Le test a porté sur le secteur entre Vilosnes-Haraumont et Pouilly sur Meuse. Selon les biefs, le débit hydrogéomorphologique varie de 400 à 800 m³/s et le débit hydrogéomorphologique maximum de 1200 à 1400 m³/s. Ces débits sont cohérents avec les débits maxima mesurés à Stenay au XX^{ème} siècle : 581 m³/s le 21 novembre 1983 et 500 m³/s le 30 janvier 1995 (BCEOM, 2005).

Ces calculs expérimentaux permettent de dresser aujourd'hui une première synthèse de l'apport de ces travaux :

- En termes de méthodologie : la méthode employée, qui utilise les outils de l'hydraulicien, constitue une alternative aux calculs classiquement réalisés dans les études d'inondabilité et d'aléa. Elle présente l'avantage d'intégrer un plus grand nombre de paramètres sur lesquels est basé le diagnostic de l'aléa. De ce fait, l'approche pluridisciplinaire ainsi proposée permet de limiter les secteurs pour lesquels un diagnostic incomplet était proposé.
- En termes de diagnostic de l'aléa : il permet, à l'image des méthodes classiques, de déterminer, avec les incertitudes que cela comporte, les hauteurs de submersion et les vitesses moyennes de l'écoulement.
- En termes de fréquence d'inondation : il apporte une alternative pluridisciplinaire à la crue de projet, déterminée de façon statistique, et dont la pertinence est directement reliée aux données disponibles sur le cours d'eau en question. L'intérêt est donc majeur pour les cours d'eau non équipés de stations de mesure.
- Du point de vue géomorphologique, les résultats confirment la signification de l'inondabilité de la plaine alluviale fonctionnelle et justifient les travaux qui œuvrent dans la connaissance micro topographique précise du passage de la plaine alluviale fonctionnelle aux terrains encaissants.

La méthode employée présente enfin quelques limites d'application qui sont notamment relatives à celle des outils employés. Le modèle hydraulique utilisé ne peut en effet être transposé que difficilement à des zones aval de cours d'eau qui présentent généralement un lit en toit, et par conséquent des conditions d'écoulement éloignées de celles qu'on peut modéliser par un calcul de lignes d'eau monodimensionnel. De même, les secteurs qui présentent de multiples confluences risquent d'être difficiles à modéliser précisément.

Hors de France, cette méthode commence à être pratiquée dans les Asturies, en Espagne (Fig. 51) (J. LASTRA *et al.*, 2008).

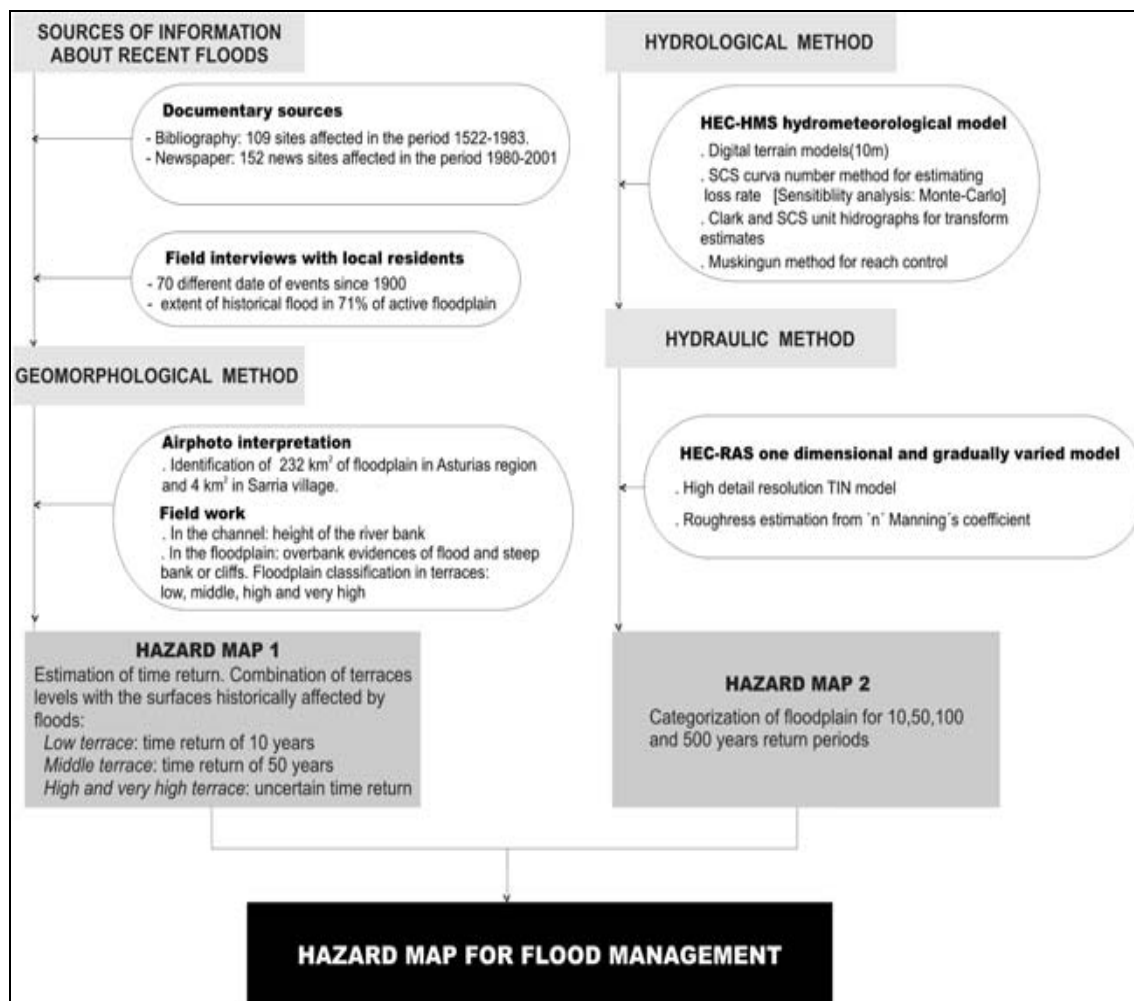


Figure 51 - Schéma méthodologique de l'étude des zones inondables dans les Asturies (Espagne).

[Source : J. LASTRA *et al.*, 2008]

Partie II - Chapitre III

L'AMÉNAGEMENT DES ZONES INONDABLES

La méthode hydrogéomorphologique recèle des potentialités considérables pour l'aménagement des zones inondables. Dans le cadre réglementaire français contraignant, M. MASSON *et al.* (1996) les ont explorées (p. 76-83) et nous y renvoyons, car les applications possibles sont restées très marginales depuis quinze ans. En revanche, le développement des études sur les lits majeurs permet d'insister sur les conséquences de leur exhaussement au cours du temps et sur celles de leur fonctionnement au cours des crues exceptionnelles.

I - LES CONSÉQUENCES DE L'EXHAUSSEMENT DES LITS MAJEURS

La tendance à l'exhaussement des lits majeurs conduit au réexamen des séries statistiques et à la prise en considération de l'évolution de l'inondabilité de sites fluviaux (J.L. BALLAIS *et al.*, 2004).

1) Le réexamen des analyses statistiques

La tendance à l'exhaussement des lits majeurs présente un grand intérêt en termes d'aménagement, particulièrement en ce qui concerne la prévention des inondations. En effet, ils remettent en question le principe, jamais énoncé, mais qui sous-tend implicitement les études du risque d'inondation fondées sur la connaissance des crues historiques, à savoir l'invariabilité des conditions de formation des crues enregistrées depuis 100 à 200 ans, voire plus. Dans cette hypothèse et en l'absence de nivellements topographiques correspondant aux crues anciennes, les calculs de probabilités, qui déterminent les hauteurs d'eau en fonction des périodes de retour types (crues dites "de projet") de 10, 50 ou 100 ans, sont effectués à partir d'une base topographique supposée constante, qui est celle du niveau topographique actuel de la plaine alluviale.

Dans ces conditions, le fait que les crues passées aient pu s'étendre sur un plancher alluvial de niveau topographique inférieur à l'actuel impose de revoir à la hausse tous les calculs qui permettent de déterminer les lignes d'eau de ces crues de projet. La dérive potentielle est importante si l'on tient compte des résultats présentés *supra*, p. 86.

Cette situation donne sens au constat mis en évidence par des études hydrologiques qui font état de cotes de ligne d'eau de crue croissantes depuis 100 ou 200 ans (voir Photo 63). Il y aurait donc lieu dans ces cas de réévaluer les calculs hydrauliques, particulièrement ceux concernant les fréquences faibles (crue centennale et crue exceptionnelle), et dans le sens d'un

accroissement de l'aléa avec le temps. Cette révision doit alors s'appuyer sur une analyse du rythme de la sédimentation au cours de la période de référence et sur une projection de cette tendance dans l'avenir.

Une conséquence secondaire de ce constat réside dans la prudence à observer vis-à-vis de la précision avec laquelle sont fournis les résultats des calculs hydrauliques. Il s'avère nécessaire d'évaluer leur marge d'erreur, qui peut être d'autant plus importante que la connaissance de l'évolution du lit majeur est plus approximative.

Il reste à prendre en compte le fait que l'évolution de ce lit majeur varie sans doute fortement de l'amont à l'aval d'une vallée et d'une vallée à l'autre. Certainement limitée dans la zone d'ablation, elle est maximale dans les zones de transfert et de dépôt. Elle varie également en fonction de la lithologie, du climat, de la couverture végétale et de l'occupation du sol qui caractérisent le bassin versant. Certaines de ces variables, nous l'avons vu, peuvent s'être modifiées fortement au cours de la période contemporaine. Tous ces aspects devront donc être intégrés désormais dans les études prévisionnelles de l'aléa de l'inondation.

2) L'évolution de l'inondabilité de sites fluviaux

En termes de risque et d'aménagement, les considérations précédentes donnent un nouvel éclairage aux situations d'inondabilité auxquels sont soumis les sites fluviaux et, avec eux, les agglomérations. Ainsi peut s'expliquer le fait que des noyaux urbains anciens soient aujourd'hui inondables.

Cette situation est vraisemblablement généralisée à toutes les agglomérations implantées dans la partie aval des bassins versants, c'est-à-dire là où la sédimentation détritique fine est la plus active. Elle est également prévisible, plus à l'amont, dans des conditions géomorphologiques particulières, comme à l'entrée de gorges qui imposent une surélévation des lignes d'eau en crue ou dans des secteurs affectés par des mouvements néotectoniques ou lorsque le bassin versant fournit d'abondantes quantités de formations fines. Le constat de cette situation nécessite la mise au point de nouvelles stratégies de protection de zones anciennement construites sur ces sites qui ont subi une évolution géomorphologique accélérée.

II - LE FONCTIONNEMENT DES COURS D'EAU LORS DES CRUES EXCEPTIONNELLES

Confirmant et amplifiant les observations réalisées précédemment, les crues de 1999 dans l'Aude et les départements voisins et de 2002 dans le Gard, remettent fortement en question les bases mêmes des stratégies de prévision de l'inondabilité des plaines alluviales en France sur plusieurs points importants, notamment sur la notion de fréquence des crues, l'impact des aménagements hydrauliques et l'entretien des cours d'eau, la qualification des aléas, les modifications apportées aux aménagements hydrauliques et les choix d'urbanisation (G. GARRY *et al.*, 2002).

De sérieux doutes pesaient déjà sur la pertinence de la différenciation des fréquences de crue, souvent poussée jusqu'au pointillisme (périodes de retour de 2, 5, 10, 20, 30, 50 et 100 ans, voire 250 ans, 1000 ans, et plus), alors que la cartographie hydrogéomorphologique ne permet de mettre en évidence que 4 unités fonctionnelles dans une plaine alluviale fonctionnelle.

La détermination des débits de la crue centennale pour un cours d'eau donné est parfois réévaluée périodiquement pour tenir compte des modifications statistiques nécessitées par de nouvelles crues. Or les crues de 1999 et de 2002 confirment largement les incertitudes liées à la détermination de la crue centennale, du moins dans le cas, le plus fréquent, où les données relatives aux crues historiques s'avèrent trop peu nombreuses et fiables pour autoriser une exploitation statistique correcte. Les inondations de grande ampleur subies par des extensions urbaines récentes implantées au-delà des limites des crues centennales (dans la vallée de la Berre) ou de la plus grande crue connue (vallée de l'Orbieu) montrent l'importance des marges d'erreur de ces méthodes. Ces imprécisions tiennent à la fois à l'extension de l'emploi de calculs des probabilités à des cas où l'échantillon utilisé est de trop petite taille, et à la représentativité insuffisante de la crue dite centennale dans un système hydrologique fonctionnant selon le principe de tout ou rien, c'est-à-dire une alternance de pluies intenses de courte durée et de très faible fréquence et de périodes sèches très longues. Ces remarques sont particulièrement valables en domaine méditerranéen. Elles le sont sans doute aussi ailleurs, du moins pour les petits bassins versants (de quelques kilomètres carrés à quelques dizaines de kilomètres carrés), de taille comparable à celle des noyaux pluviaux d'intensité maximale qui peuvent les affecter.

Si les aménagements hydrauliques (Photos 77 et 78) et l'entretien des cours d'eau peuvent s'avérer efficaces vis-à-vis de crues de magnitude faible à moyenne, ils s'avèrent inopérants pour des crues rares à exceptionnelles. Ils peuvent même contribuer à amplifier ces crues, en supprimant la fonctionnalité de leurs champs d'expansion jouée par les lits majeurs dans les parties du bassin versant moins affectées par les intensités pluviométriques maximales, mais qui contribuent à la formation des débits extrêmes à l'aval.

Les secteurs qualifiés, en France, d'aléas moyens à faibles, correspondent aux lits majeurs, considérés comme constructibles sous certaines conditions. Or, les crues de 1999 (Orbieu), 2000 (Pô) et 2002 (Gardon et Cèze) montrent que ces lits majeurs peuvent être recoupés par des courants violents qui empruntent la ligne de plus grande pente, en particulier dans le cas de méandres bien formés (Orbieu, Pô). Il en va de même dans les parties aval des vallées, où des lits en toit peuvent donner lieu à des avulsions brutales, à la suite ou non de ruptures de digues (basses plaines de l'Aude).

Dans le passé, des extensions urbaines construites en zone inondable, donc en contradiction avec les données géomorphologiques, ont en général été accompagnées d'aménagements aptes en principe à assurer la protection nécessaire en cas de crue. Comme à Nîmes en 1988 (G. FABRE *et al.*, 1994), les crues récentes ont permis de mettre en évidence plusieurs cas où ces aménagements ont été, soit effacés, soit altérés et rendus en grande partie inefficaces par défaut d'entretien, abandon ou destruction dans un passé récent : Sallèles, Lézignan, Durban, Villeneuve (Aude), Estagel (Pyrénées-Orientales).

En règle générale, cependant, les cas observés dans les départements de l'Aude et des Pyrénées-Orientales mettent en évidence des constructions anciennes implantées hors des zones inondables, souvent sur une terrasse alluviale, et *a contrario* des extensions urbaines



**Photo 77 - Aménagement de l'Ouvèze à Vaison-la-Romaine (Vaucluse)
après la crue de 1992. [Cliché : J.L. BALLAIS, 1998]**



**Photo 78 - Remodelage et endiguement du Groseau au Crestet (Vaucluse)
après la crue de 1992. [Cliché : J.L. BALLAIS, 1994]**

qui empiètent plus ou moins largement sur le lit majeur, voire sur le lit moyen. Parallèlement, la cartographie hydrogéomorphologique montre l'existence, à proximité immédiate de ces agglomérations, de vastes espaces *a priori* favorables aux développements urbains, par exemple sur les terrasses alluviales. Ce constat a servi, peu de temps après la catastrophe de 2002, à amorcer une réflexion relative aux espaces propices au redéploiement urbain nécessitant par l'abandon de ceux qui, construits ou en voie de l'être, avaient été dévastés par les crues.

Ainsi la nécessité de faire évoluer les méthodes de diagnostic du risque d'inondation et d'aménagement des espaces fluviaux, ainsi que la possibilité d'orienter de manière plus rationnelle le développement spatial urbain, conduisent à proposer une réorientation des stratégies d'aménagement dans deux sens. Le premier est un renforcement de la prévention par une application stricte de la réglementation pour prendre comme critères, au-delà de la crue centennale ou de la crue de référence, la limite hydrogéomorphologique du lit majeur et l'hydrodynamique du cours d'eau liées à ses crues exceptionnelles. Le deuxième est l'étude et la mise en œuvre de solutions alternatives de projets de développement qui mobilisent l'espace communal, voire intercommunal, de manière plus large et plus souple.

La méthode hydrogéomorphologique, et plus largement la géomorphologie appliquée, ont un rôle majeur à jouer dans cette évolution.

CONCLUSION GÉNÉRALE

La problématique du risque d'inondation conduit à observer les objets familiers des plaines d'inondation fonctionnelles d'un point de vue différent des points de vue pratiqués généralement en dynamique fluviale. L'intérêt porté à la microtopographie et à ses variations permet ainsi de distinguer jusqu'à quatre lits pour un cours d'eau dont, en particulier, un lit moyen et un lit majeur exceptionnel, qui n'existent cependant pas toujours quel que soit l'ordre ou la zone du cours d'eau. Cette problématique d'inondabilité nous oblige à porter une attention particulière à la limite externe de la zone inondable. Présentement en cours de développement, elle a déjà apporté de nouveaux résultats par la mise en évidence de lits majeurs exceptionnels dans la zone de transfert de certains cours d'eau. La découverte de ces nouveaux objets géomorphologiques, en nombre encore très limité, permet de s'interroger sur les conditions qui doivent être réunies pour permettre leur genèse et donc d'en rechercher d'autres exemples, d'abord dans le Midi méditerranéen français. Il sera alors possible de mettre en évidence de nouvelles unités topographiques subhorizontales, très recherchées par les promoteurs immobiliers, mais inondables.

La méthode hydrogéomorphologique a désormais prouvé incontestablement ses apports à la connaissance des zones inondables et plus largement au comportement des territoires vis-à-vis de l'écoulement des eaux en fonction de leurs caractéristiques (pentes, nature des roches, des sols, de l'occupation des sols, *etc.*). Il s'agit donc d'un véritable outil d'étude et de gestion des milieux qui permet d'implanter des projets de développement et d'aménagement urbain dans un cadre durable. Elle ouvre un champ d'application nouveau, tant aux professionnels qu'aux chercheurs.

La nécessité de la connaissance précise des caractéristiques de l'aléa, la hauteur et la vitesse de l'eau, a conduit à la mise au point de la méthode intégrée, basée sur le concept de débit hydrogéomorphologique, dont les premières expérimentations sont prometteuses. L'approfondissement de ce concept devra permettre de préciser les caractéristiques de l'aléa (en particulier en France), mais aussi de stimuler la réflexion sur les débits possibles et leur rôle morphogène dans l'ensemble de la plaine alluviale fonctionnelle.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AIMON H. (2003) - *Détermination d'un niveau intermédiaire dans la plaine alluviale du Gardon (St Geniès-de-Malgoirès, Gard)*. Mémoire de DEA, Université de Provence, 91 p.
- ALLINNE C. (2007) - Les villes romaines face aux inondations. La place des données archéologiques dans l'étude des risques fluviaux. *Géomorphologie*, n° 1, p. 67-84.
- ARNAUD-FASSETTA G., BALLAIS J.L., BÉGUIN É., JORDA M., MEFFRE J.C., PROVANSAL M., RODITIS J.C. et SUANEZ S. (1993) - 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*, n° 2, p. 34-48.
- ASTIER J. (1992) - De l'aiguat del 40 à la gardonnade. In : *L'Aiguat del 40*, J. BÉCAT, G. SOUTADÉ édit, Édit. Generalitat de Catalunya, Barcelone, p. 119-127.
- ASTRADE L. (2000) - Les crues de la Saône. In : *Les régions françaises face aux extrêmes hydrologiques. Gestion des excès et de la pénurie*, sous la direction de J.P. BRAVARD, Édit. SEDES, Paris, p. 54-69.
- BALLAIS J.L. (1972) - *La dépression de la Sebkhet en Noual. Étude géomorphologique*. Thèse de 3^{ème} cycle, Université Paris I, 271 p.
- BALLAIS J.L. (1973) - Les inondations de 1969 en Tunisie méridionale. *Bull. Soc. Hist. Nat. Afr. Nord*, t. 64, fasc. 3 et 4, p. 99-128.
- BALLAIS J.L. (1981) - *Recherches géomorphologiques dans les Aurès (Algérie)*. Thèse de Doctorat d'État, Université Paris I, 627 p. + 13 cartes h.-t.
- BALLAIS J.L. (1991) - Vitesses d'accumulation et d'entaille des terrasses alluviales holocènes et historiques au Maghreb oriental. *Physio-Géo*, n° 22-23, p. 89-94.
- BALLAIS J.L. (1995) - Alluvial Holocene terraces in eastern Maghreb: Climate and anthropogenic controls. In : *Mediterranean Quaternary River Environments* J. LEWIN, M.M. MACKLIN et J.C. WOODWARD édit, Édit. A.A. BALKEMA, Rotterdam, p. 183-194.
- BALLAIS J.L. (1996) - L'âge du modelé de roubines dans les Préalpes du Sud : l'exemple de la région de Digne. *Géomorphologie*, n° 4, p. 61-68.
- BALLAIS J.L. (2006) - La cartographie hydrogéomorphologique. *BAGF – Géographies*, n° 4, p. 461-468.
- BALLAIS J.L. (2008) - Paysages méditerranéens. In : *Les formations superficielles*, Y. DEWOLF et G. BOURRIÉ coordinateurs, Édit. Ellipses, Paris, p. 565-578.
- BALLAIS J.L. (2009-a) - Les rapports entre Vaison-la-Romaine et l'Ouvèze (V^{ème} s. av. J.C. - XXI^{ème} s. ap. J.C.). In : *"OL' MAN RIVER" Geo-archaeological aspects of rivers and river plains*, M. DE DAPPER, F. VERMEULEN, S. DEPREZ et D. TAELEMAN édit., Argu-series 5, Édit. Academia Press, Gand, p. 37-52.

- BALLAIS J.L. (2009-b) - L'érosion hydrique dans les oliveraies de la Sierra Mágina. Perspectives pour un développement durable. In : *El Olivar : Paisaje, Patrimonio y Desarrollo Sostenible*, E. ARAQUE JIMENÉZ édit., Édit. Asociación para el Desarrollo Rural de la Sierra Mágina, Cambil, p. 117-139.
- BALLAIS J.L., BELLION Y. et GUIRAUD R. (1984) - La représentation du Quaternaire sur les cartes géologiques au 50000^{ème}. *Bull. serv. Carte géol. Algérie*, n° 50, p. 45-50.
- BALLAIS J.L. et CRAMBES A. (1992) - Morphogenèse holocène, géosystèmes et anthropisation sur la Sainte-Victoire. *Méditerranée*, n° 1.2, p. 29-41.
- BALLAIS J.L. et SÉGURA P. (1999) - La catastrophe de Vaison-la-Romaine (22 septembre 1992) : une inondation dans un géosystème anthropisé. In : *Risques naturels*, P. GABERT et J. VAUDOUR édit., Éditions du CTHS, Paris, p. 41-48.
- BALLAIS J.L., TORRES T. et FIANDINO M. (1999) - L'inondation de la Touloubre (Bouches-du-Rhône) de septembre 1993 dans son contexte historique. In : *Risques naturels*, P. GABERT, J. VAUDOUR édit., Éditions du CTHS, Paris, p. 49-65.
- BALLAIS J.L., BENAZZOUZ M.T. et BENMOHAMMADI A. (2003) - Environmental dynamics and land occupation in the Saharan margins of the Holocene Maghreb. In: *The Mediterranean World. Environment and History*, É. FOUACHE édit., Édit. ELSEVIER, Paris, p. 341-351.
- BALLAIS J.L., BONTÉ P., MASSON M., GARRY G., BEN KEHIA H., EYRAUD C. et GHAM A. (2004) - L'évolution du risque d'inondation par les cours d'eau méditerranéens français : le rôle de l'accumulation dans le lit majeur. *BAGF – Géographies*, n° 1, p. 64-74.
- BALLAIS J.L. et CHAVE S. (2005) - *Rapport sur la cartographie hydrogéomorphologique de communes du Gard en vue de leur PPR Inondation*. Édit. BRLI, Nîmes, 4 p.
- BALLAIS J.L., GARRY G. et MASSON M. (2005) - Contribution de l'hydrogéomorphologie à l'évaluation du risque d'inondation : le cas du Midi méditerranéen français. *Comptes Rendus Géoscience*, n° 337, p. 1120-1130.
- BALLAIS J.L., CHAVE S., DELORME-LAURENT V. et ESPOSITO C. (2009) - Hydrogéomorphologie et inondabilité. *Géographie physique et Quaternaire*, vol. 61, n° 1, 2007, p. 75-84.
- BCEOM (2004) - *Méthode intégrée. Application de la méthode intégrée à l'Ouvèze : secteur de Vaison-la-Romaine à Violès*. Rapport final au CÉTÉ Méditerranée, Aix-en-Provence, 111 p.
- BCEOM (2005) - *Méthode intégrée. Application de la méthode intégrée à la Meuse : secteur de Vilosnes-Haraumont à Pouilly sur Meuse*. Rapport d'étude au 1^{er} septembre 2005 au CÉTÉ Méditerranée, Aix-en-Provence, 47 p.
- BÉCAT J. et SOUTADÉ G. édit. (1992) - *L'aiguat del 40*. Édit. Generalitat de Catalunya, Barcelone, 484 p.
- BÉCAT J. et GUAL R. (1992) - Imatges, testimoniatges i elements d'anàlisi de l'aiguat del 40 a la Catalunya Nord. In *L'Aiguat del 40*, J. BÉCAT et G. SOUTADÉ édit., Édit. Generalitat de Catalunya, Barcelone, p. 11-53.

-
- BELTRANDO G. (2004) - *Les climats. Processus, variabilité et risques*. Édit. Armand COLIN, Paris, 261 p.
- BIROT P. (1981) - *Les processus d'érosion à la surface des continents*. Édit. MASSON, Paris, 605 p.
- BONTÉ P., BALLAIS J.L., MASSON M., BEN KEHIA H., EYRAUD C., GARRY G. et GHRAM A. (2001) - Datations au ^{137}Cs , ^{134}Cs et ^{210}Pb de dépôts de crues du XX^{ème} siècle. In : *Datation*, J.N. BARRANDON, P. GUIBERT et V. MICHEL édit., XXI^{èmes} Rencontres internationales d'archéologie et d'histoire d'Antibes, Édit. APDCA, Antibes, p. 141-157.
- BOYER S. (2001) - *Les inondations du Gardon d'Anduze de la période moderne à nos jours*. Mémoire de maîtrise, Université de Provence, 73 p.
- BRANKA A. (2002) - *Étude des zones inondables du bassin versant du Gardon entre Vers et Dions*. Mémoire de D.E.A., Université de Provence, 88 p.
- BRAVARD J.P. et PETIT F. (1997) - *Les cours d'eau. Dynamique du système fluvial*. Édit. A. COLIN, Paris, 222 p.
- CALVET M. (1992) – Crues catastrophiques et vitesse de l'érosion dans les Pyrénées-Orientales. Montagnes fragiles : du mythe à la réalité. In : *L'Aiguat del 40*, J. BÉCAT et G. SOUTADÉ édit. Édit. Generalitat de Catalunya, Barcelone, p. 93-101.
- CALVET M., SERRAT P., LEMARTINEL B. et MARICHAL R. (2002) - Les cours d'eau des Pyrénées orientales depuis 15000 ans. État des connaissances et perspectives de recherche. In : *Les fleuves ont une histoire*, sous la direction de J.P. BRAVARD et M. MAGNY, Édit. Errance, Paris, p. 279-294.
- CAMPY M. et MACAIRE J.J. (1989) - *Géologie des formations superficielles*. Édit. MASSON, Paris, 433 p.
- CAREX (2004) - *Application de la méthode intégrée à un tronçon de l'Ouvèze. Rapport de synthèse* au CÉTÉ Méditerranée, Aix-en-Provence, 70 p.
- CÉTÉ Méditerranée (1997) - *Environnement et aménagement d'un cours d'eau méditerranéen ; étude de cas : les Gardons*. Aix-en-Provence, 89 p.
- CÉTÉ Méditerranée (2001) - *Aménagement hydraulique du secteur de Sallèles d'Aude et Cuxac d'Aude ; modélisation 2D ; rapport d'avancement ; modélisation numérique de terrain et calculs en lit mineur*. Rapport, Aix-en-Provence, 54 p. (cédérom).
- CÉTÉ Méditerranée (2003). - *Crues de novembre 1999 dans l'Aude, l'Hérault, les Pyrénées-Orientales et le Tarn. Retour d'expérience*. Rapport, Aix-en-Provence, 86 p. (CD-Rom).
- CGDD (Commissariat Général au Développement Durable) (2009) - Assurance des risques naturels en France : sous quelles conditions les assureurs peuvent-ils inciter à la prévention des catastrophes naturelles. *Études & documents*, n° 1, 130 p.
- CHAMOUX C. (2003) - *Techniques alternatives en assainissement pluvial : de la théorie à la pratique*. Thèse de l'Université de Nice, 499 p.
- CHAVE S. (2002) - Pertinence de la cartographie hydrogéomorphologique dans l'approche des inondations rares à exceptionnelles : exemples de sept bassins fluviaux dans les Corbières et le Minervois. *Géomorphologie*, n° 4, p. 297-306.

-
- CHAVE S. (2003) - *Élaboration d'une méthode intégrée de diagnostique du risque hydrologique*. Thèse de l'Université de Provence, 284 p.
- CHAVE S. et BALLAIS J.L. (2006) - From hydrogeomorphology to hydraulics computations : a multidisciplinary approach of the flood hazard diagnosis in the Mediterranean zone. *Zeitschrift für Geomorphologie*, N.F., vol. 50, n° 4, p. 523-540.
- CHOUARI W. (2009) - *Environnement et risques naturels dans le Grand Tunis. Approche cartographique*. Thèse de l'Université Paris-Diderot, 407 + XXI p., cartes HT.
- COQUE R. (1977) - *Géomorphologie*. Édit. A. COLIN, Paris, 430 p.
- COSANDEY C., sous la direction de (2003) - *Les eaux courantes. Géographie et environnement*. Édit. BELIN, Paris, 240 p.
- DAVIS W.M. (1899) - The geographical cycle. *Geographical Journal*, n° 14, p. 481-504.
- DELORME F. (2004) - *La sédimentation en lit majeur : mise en évidence, caractérisation, origines et impacts sur l'inondabilité*. Mémoire de DEA, Université de Provence, 68 p.
- DELORME F., DELORME-LAURENT V., BALLAIS J.L., BONTÉ P. (2009) - L'évolution de la basse vallée de l'Argent-Double pendant l'époque historique. In: *"OL' MAN RIVER" Geoarchaeological aspects of rivers and river plains*, M. DE DAPPER, F. VERMEULEN, S. DEPREZ et D. TAELEMAN édit, Argu-series 5, Édit. Academia Press, Gand, p. 281-296.
- DELORME-LAURENT, V., (2007) - *Contribution à la méthode hydrogéomorphologique de détermination des zones inondables*. Thèse de l'Université de Provence, 830 p.
- DELORME-LAURENT V., BALLAIS J.-L. (2006) – Les problèmes de la détermination de la limite externe de la zone inondable dans le midi méditerranéen français. *Bulletin de l'Association de Géographes Français - Géographies*, n° 4, p. 469-476.
- DERRUAU M. (1962) - *Précis de géomorphologie*. Édit. MASSON, Paris, 411 p.
- DERRUAU M. (1974) - *Les formes du relief terrestre*. Édit. MASSON, Paris, 120 p.
- DESBORDES M. (2010) - Hydrologie opérationnelle : le poids des incertitudes. *Journée Karst, Crues et Risques associés* (Montpellier, 2010), Maison des Sciences de l'Eau, Montpellier, sous presse.
- DIREN Midi-Pyrénées (1996) - *Méthodologie de cartographie informative des zones inondables*.
- DION R. (1961) - *Histoire des levées de la Loire*. Édit. Chez l'Auteur, Paris, 312 p.
- Direction de l'hydraulique de la Wilaya (DHW) de Sidi Bel Abbés (2006) - *Plan d'aménagement de la plaine de Sidi Bel Abbés contre les inondations*. Rapport, 60 p.
- DUPONT N. et PENVEN M.J. (2005) - *Définition des indicateurs pour une cartographie de la courbe enveloppe des inondations dans le cadre de l'utilisation de la méthode hydrogéomorphologique*. Rapport définitif à la DIREN Bretagne, 35 p.
- DURANT W. (1963) - L'Apogée de Byzance. La Civilisation islamique. In : *Histoire de la Civilisation*, Édit. Rencontre, Lausanne, vol. 10, 609 p.

- DURIN V. (2001). - *Recherches géomorphologiques et historiques sur la plaine alluviale de l'Ouvèze (84) entre Entrechaux et Bédarrides. Impact de la sédimentation sur l'évolution de l'inondabilité*. Mémoire de DEA, Université de Provence, 124 p.
- Éditions de la ville de Nîmes (1989) - *Nîmes, le 3 octobre 1988*, 108 p.
- ESPOSITO C. (2003) - *Crues de septembre 2002 sur le bassin versant du Gardon. Étude comparative entre les limites de la cartographie hydrogéomorphologique et le relevé de la zone inondée*. Mémoire de DEA, Université de Provence, 145 p.
- ESPOSITO C., CHAVE S., BALLAIS J.L. et DELORME-LAURENT V. (2009) - Hydrogeomorphological Mapping and Recent Floods in France. *Proceedings of the Ninth International Conference on the Mediterranean Coastal Environment – MEDCOAST 09*, (Sochi, Russie), E. OGHAN édit., p. 1053-1064.
- FABRE G., LEQUEUX J.M. et SCHEURER P. (1994) - Hydraulique pluviale à Nîmes après le 3 octobre 1988. *La Houille Blanche*, vol. 8, p. 6-11.
- FAVRE N. (2004) - *L'évolution du risque d'inondation dans la vallée de l'Hers Mort*. Mémoire de Maîtrise, Université Toulouse - Le Mirail, 167 p. Site internet : http://www.aquadoc.fr/article.php3?id_article=410.
- FEHRI N. (2003) - *Les rapports entre les processus morphogéniques et les pratiques agropastorales dans la plaine oléicole de Sfax : exemple du bassin versant de l'oued Chaâl-Tarfaoui*. Thèse de l'Université de Provence, 338 p.
- FERNANDEZ-LAVADO C., FURDADA G. et MARQUES M.A. (2007) - Geomorphological method in the elaboration of hazard maps for flash-floods in the municipality of Jucuaran (El Salvador). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 7, n° 4, p. 455-465.
- FIANDINO M. (2003) - *Apports de matières en suspension par les fleuves côtiers à l'Etang de Berre (Bouches-du-Rhône, France) : Quantification des flux, identification des zones sources, étude des relations avec les conditions hydrologiques*. Thèse de l'Université de Provence, 325 p.
- GABERT P. et NICOD J. (1982) - Inondations et urbanisation en milieu méditerranéen. L'exemple des crues récentes de l'Arc et de l'Huveaune. *Méditerranée*, n° 3.4, p. 11-24.
- GARRY G. (1985) - *Photo-interprétation et cartographie des zones inondables*. Édit. STU, Paris, 74 p.
- GARRY G. et LE MOIGNE M. (1991) - *Environnement et aménagement, cartes utiles : 1. Le recueil des données cartographiques*. Édit. STU, Paris, 176 p.
- GARRY G., GOUFFAN J.M. et LE MOIGNE M. (1992) - *Environnement et aménagement : 3. L'usage des Photographies aériennes*. Édit. STU, Paris, 154 p.
- GARRY G., BALLAIS J.L. et MASSON M. (2002) - La place de l'hydrogéomorphologie dans les études d'inondation en France méditerranéenne. *Géomorphologie*, n° 1, p. 5-15.
- GARTET A. (2007) - *Risques naturels, anthropiques et technologiques dans l'agglomération de Fès et son arrière pays*. Thèse de Doctorat d'État, Université Sidi Mohamed Ben Abdellah, Fès, 454 p.

- GAUTIER E. (1992) - *Recherches sur la morphologie et la dynamique fluviales dans le bassin du Buëch (Alpes-du-Sud)*. Thèse de l'Université Paris X-Nanterre, 439 p.
- GAUTIER E. et COSTARD F. (2000) - Les systèmes fluviaux à chenaux anastomosés en milieu périglaciaire : la Léna et ses principaux affluents. *Géographie physique et Quaternaire*, vol. 54, n° 3, p. 327-342.
- GAZELLE F. (2004) - Les crues de l'Hers Mort. *Aquadoc France* : http://www.aquadoc.fr/article.php3?id_article=162&var_recherche=stations.
- GAZELLE F. et MARONNA K. (2009) - Conservation et disparition des repères de crue – Exemple des repères apposés après la crue de 1930 en Lot-et-Garonne et dans le sud du Tarn. *Physio-Géo*, vol. 3, p. 21-33.
- GRAF W.L. (1983) - The arroyo problem – palaeohydrology and palaeohydraulics in the short term. In: *Background to Palaeohydrology*, K.J. GREGORY édité, Édité. John WILEY and Sons, Chichester, p. 279-302.
- GROVE A.T. et RACKHAM O. (2001) - *The Nature of Mediterranean Europe. An Ecological History*. Édité. Yale University Press, New Haven et Londres, 383 p.
- GUPTA, A. (1983) - High-magnitude floods and stream channel responses. In : *Modern and Ancient Fluvial Systems*, J.D. COLLINSON et J. LEWIN édité., Publication of the International Association of Sedimentologists, vol. 6, BLACKWELL Publishing, Oxford, p. 219-227.
- HALLOUCHE B. (2007) - *Cartographie des zones inondables de la plaine de Sidi Bel Abbès par l'approche hydrogéomorphologique*. Mémoire de Magister, Université de Sidi Bel Abbès, 119 p. + annexes.
- HALLOUCHE B., MOUEDDENE K. et BENYAHIA M. (2008) - Apport de l'hydrogéomorphologie dans la cartographie des zones inondables : exemple de la plaine de Sidi Bel Abbès (Algérie nord occidentale), 20^{ème} Colloque des Bassins sédimentaires Marocains (Oujda, Maroc, 2008), sous presse.
- HAUCHARD E. (2001) - *De la dynamique non linéaire à la dynamique du relief en géomorphologie - Application aux bassins-versants de la marge nord occidentale du Bassin de Paris*. Thèse de l'Université de Rouen, 508 p.
- HAUCHARD E. (2002-a) - *Plan de prévention des risques d'inondation par débordement et ruissellement. Méthodologie pour la définition de l'aléa ruissellement. Approche hydrogéomorphologique*. Rapport à DDE 76, Laboratoire MTG - Université de Rouen, p. 56-99.
- HAUCHARD E. (2002-b) - *Note sur la méthodologie pour la délimitation des zones inondables des vallons secs en fonction de l'aléa ruissellement à partir des cartes topographiques au 1/25000 de l'IGN*. Rapport à la DDE 76, Rouen, 4 p.
- HARVEY A.M., ALEXANDER R.W. et JAMES P.A. (1984) - Lichens, soil development and the age of Holocene valley floor landforms: Howgill Fells, Cumbria. *Geografiska Annaler*, vol. 66A, n° 4, p. 353-366.
- LAHMAR K. (2004) - *Étude sédimentologique de trois carottes prélevées dans la zone de confluence de l'Aude / la Cesse, et propositions des aménagements futurs*. Mémoire de DEA, Université de Provence, 139 p.

- LAMBERT R. (1987) - Présentation d'une carte de la crue inondante du 8 juillet 1977 dans la région d'Auch au 1/10000. *Actes du Colloque "Crues et inondations"*, Édit. CÉRÉG, Strasbourg, p. 213-221.
- LAMBERT R. et PRUNET C. (2000) - L'approche géographique de l'inondation. L'exemple de la Garonne à l'aval de Toulouse. In : *Les régions françaises face aux extrêmes hydrologiques. Gestion des excès et de la pénurie*, sous la direction de J.P. BRAVARD, Édit. SEDES, Paris, p. 39-53.
- LAMBERT R., GAZELLE M., GHOLAMI M. et PRUNET C. (2001) - La cartographie informative des zones inondables. L'exemple de Midi-Pyrénées. *Actes du colloque "Au chevet d'une catastrophe"*, Presses Universitaires de Perpignan, Perpignan, p. 147-164.
- LASTRA J., FERNANDEZ E., DIEZ-HERRERO A. et MARQUINEZ J. (2008) - Flood hazard delineation combining geomorphological and hydrological methods: an example in the Northern Iberian Peninsula. *Natural Hazards*, vol. 45, n° 2, p. 277-293.
- LAURENT V. (2003) - *Détermination des niveaux intermédiaires de l'Argent-Double (Aude) : inondabilité et morphogénèse*. Mémoire de DEA, Université de Provence, 295 p.
- LECOMPTE J.P. (2000) - Turcies et levées dans la haute vallée d'Anjou du IX^e au XVI^e siècle. *Archives d'Anjou*, n° 4, p. 87-116.
- LEFROU C., coordinateur (2001) - *Rapport de la mission interministérielle d'expertise des inondations de la Somme en 2001*. Édit. Ministère de l'Intérieur, Paris, 79 p.
- LEGUAY J.P. (2005) - *Les catastrophes au Moyen Âge*. Édit. Jean-Paul GISSEROT, s. l., 224 p.
- LELIÈVRE M.A., BUFFIN-BÉLANGER T. et MORNEAU, F. (2008) - L'approche hydrogéomorphologique pour la cartographie des zones à risque d'inondation dans les vallées de petites et moyennes tailles : un exemple commenté pour la vallée de la Rivière-au-Renard. In : *Comptes rendus de la 4e Conférence canadienne sur les géorisques: des causes à la gestion*, J. LOCAT, D. PERRET, D. TURMEL, D. DEMERS et S. LEROUÉIL édit., Édit. Presses de l'Université Laval, Québec, 8 p.
- LEOPOLD L.B., WOLMAN M.G. et MILLER J.P. (1964) - *Fluvial Processes in Geomorphology*. Édit. W.H. FREEMAN, San Francisco, 522 p.
- LÉONARD M. (2003) - *L'érosion hydrique des sols cultivés : analyse systémique et propositions de gestion. Application aux vignobles d'Ardèche méridionale*. Thèse de l'Université Joseph FOURIER, Grenoble, 2 vol, 546 p.
- LE ROY LADURIE E. (1967) - *Histoire du climat depuis l'an mil*. Édit. FLAMMARION, Paris, 2 vol. : 288 p. + 255 p.
- LEWIN J. (1978) - Floodplain geomorphology. *Progress in Physical Geography*, vol. 2, n° 3, p. 408-437.
- LIVET M. (sans date) - *Apport de l'information historique à l'appréciation du risque hydrologique extrême. Cas de l'agglomération clermontoise*. Édit. Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées, Clermont-Ferrand, 17 p. + 13 fig.
- LUINO F. (1998) - Study on some villages damaged by natural processes in NW Italy. *Proceedings Eight International Congress International Association for Engineering Geology and Environment*, D. MOORE et O. HUNGR édit., Édit. A.A. BALKEMA, Rotterdam, p. 1065-1070.

- LUINO F., BELLONI A. et PADOVAN N. (2002) - Historical and geomorphological analysis as a research tool for the identification of flood-prone zones and its role in the revision of town planning: the Oglio basin (Valcamonica-Northern Italy). *In : Engineering Geology for Developing Countries*, J.L. VAN ROOY, C.A. JERMY édit., Édit. IAEG, Durban, p. 602-611.
- MABILLE G. et PETIT F. (1986) - 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"*, Édit. CÉRÉG, Strasbourg, p. 279-293.
- MAINGUET M. (2003) - *Les pays secs. Environnement et développement*. Édit. Ellipses, Paris, 160 p.
- MALAVOI J.R. (2004) - *Délimitation des espaces de mobilité de l'Orb au sens du SDAGE RMC et de l'arrêté 2001 "Gravières" (juillet 2004)*. Rapport à SMVO, 108 p.
- MARTIN C. (2010) - Les inondations du 15 juin 2010 dans le Centre Var : réflexion sur un épisode exceptionnel. *Études de Géographie Physique*, vol. XXXVII, p. 41-76.
- MASSON M. (1983) - *Essai de cartographie des champs d'inondation par photo-interprétation*. Rapport. CÉTÉ Méditerranée-STU, Aix-en-Provence, 47 p.
- MASSON M. (1993) - Après Vaison-la-Romaine. Pour une approche pluridisciplinaire de la prévision et de la planification. *Revue de Géomorphologie Dynamique*, t. XLII, n° 2, p. 73-77.
- MASSON M., GARRY G. et BALLAIS J.L. (1996) - *Cartographie des zones inondables. Approche hydrogéomorphologique*. Édit. Villes et Territoires, Paris, 100 p.
- Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement, Ministère de l'Équipement, des Transports et du Logement (1999) - *Plans de Prévention des Risques naturels (PPR). Risques d'inondation. Guide méthodologique*. Édit. La Documentation française, Paris, 123 p.
- MEDD (2001) - *Termes de référence d'un CCTP des Atlas des Zones Inondables*. Ministère de l'Écologie et du Développement durable, Paris, 104 p.
- MONTAGNÉ A. (2002) - *Historique des inondations dans les Basses-Plaines de l'Aude du XIV^{ème} siècle à nos jours*. Mémoire de maîtrise, Université de Provence.
- MONTAGNÉ A. (2003) - *Analyse des processus morphodynamiques dans le lit majeur des cours d'eau méditerranéens en vue de leur intégration dans une cartographie simplifiée de l'aléa inondation : exemples du Gardon et de l'Ouvèze*. Mémoire de DEA, Université de Provence, 125 p.
- MUSSOT R. (1992) - Crue d'octobre 1940 et lits fluviaux : observations et remarques complémentaires. *In : L'Aiguat del 40*, J. BÉCAT et G. SOUTADÉ édit., Édit. Generalitat de Catalunya, Barcelone, p. 103-114.
- NANSON G.C. et CROKE J.C. (1992) - A genetic classification of floodplains. *Geomorphology*, n° 4, p. 459-486.
- NANSON G.C., TOOTH S. et KNIGHTON A.D. (2002) - A Global Perspective on Dryland Rivers : Perceptions, Misconceptions and Distinctions. *In : Dryland Rivers. Hydrology and Geomorphology of Semi-Arid Channels*, L.J. BULL et M.J. KIRKBY édit., Édit. John WILEY and Sons, Chichester, p. 17-54.

- PENVEN M.J., DUPONT N. et MARGUERIE D. (2008) - Mosaïque spatiale des fonds alluviaux et fonctionnement hydro-géomorphologique du lit majeur lors des inondations. In : *Inondations dans le bassin de la Vilaine : paramètres hydrogéomorphologiques et flux terrigènes*, sous la direction de A. CRAVE, Rapport scientifique IAV, p. 93-179.
- PICKUP G. (1991) - Event Frequency and Landscape Stability on the Floodplain Systems of Arid Central Australia. *Quaternary Science Review*, vol. 10, n° 5, p. 463-473.
- PIÉGAY H. (1995) - *Dynamiques et gestion de la ripisylve de cinq cours d'eau à charge grossière du bassin du Rhône (l'Ain, l'Ardèche, le Giffre, l'Ouvèze et l'Ubaye). XIX^e-XX^e siècles*. Thèse de l'Université Paris IV, 529 p.
- PIÉGAY H. et STROFFEK S. (2000) - La gestion physique des rivières dans le bassin Rhône-Méditerranée-Corse : des extrêmes... au milieu. In : *Les régions françaises face aux extrêmes hydrologique. Gestion des excès et de la pénurie*, sous la direction de J.P. BRAVARD, Édit. SEDES, Paris, p. 247-274.
- PIÉGAY H., ARNAUD D. et SOUCHON Y. (2003) - Effets de la végétation riveraine sur la géométrie des lits fluviaux : études de cas dans le Massif Central (France). *Géomorphologie*, n° 2, p. 111-128.
- RCP 77 (1970) - *Légende pour la carte géomorphologique de la France au 1/50000*. Édit. CNRS, Paris, 78 p.
- ROBERTSON-RINTOUL M.S.E. (1986) - A quantitative soil-stratigraphic approach to the correlation and dating of post-glacial river terraces in Glen Feshie, Western Cairngorms. *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 11, p. 605-617.
- ROCHE M.F. (1986) - *Dictionnaire français d'hydrologie de surface avec équivalents en anglais-espagnol-allemand*. Édit. MASSON, Paris, 288 p.
- SANDERS B.F. (2007) - Evaluation of on-line DEMs for flood inundation modeling. *Advances in Water Resources*, vol. 30, n° 8, p. 1831-1843.
- SCHUMM S.A. (1977) - *The fluvial system*. Édit. John WILEY and Sons, New-York, 338 p.
- SHEFFER N.A., RICO M., ENZEL Y., BENITO G. et GRODEK T. (2008) - The palaeoflood record of the Gardon river, France: A comparison with the extreme 2002 flood event. *Geomorphology*, n° 98, p. 71-83
- SMITH R.F. et BOARDMAN J. (1989) - The Use of Soil Information in the Assessment of the Incidence and Magnitude of Historical Flood Events in Upland Britain. In: *Floods. Hydrological, Sedimentological and Geomorphological Implications*, K. BEVEN et P. CARLING édit., Édit. John WILEY and Sons, Chichester, p. 185-197.
- SNISHCHENKO, B.F. et SNISHCHENKO D. V. (1986) - Identification of river channel types and elements of their morphology using material of aerospace survey. *Soviet meteorology and hydrology*, vol. 11, p. 97-100.
- SOGREAH PRAUD (2002) - *Plan de Prévention des Risques d'Inondation : bassin de l'Orbieu*. Rapport à la DDE de l'Aude, Note de présentation et atlas cartographique, application par anticipation, 28 p.
- STRAHLER N. (1952) - Quantitative analyses of watershed geomorphology. *American Geophysical Union Transaction*, vol. 38, p. 913-920.

-
- THOMASSET C. (2006) - La construction du pont médiéval dans deux romans contemporains. *In : Les Ponts au Moyen Âge*, sous la direction de D. JAMES-RAOUL et C. THOMASSET, Édit. PUPS, Paris, p. 19-41.
- TOLCHER H.M. (1998) - *Drought or Deluge, Man in the Cooper's Creek Region*. Édit. Fast Books, Glebe, 267 p.
- TOUABI O. (2004) - *Étude des formes et des formations à la confluence du Bayon et du Ruisseau de Roques-Hautes sur le piémont sud de la montagne Sainte Victoire (Bouches-du-Rhône)*. Mémoire de DEA, Université de Provence, 64 p. + annexes.
- TRICART J. (1958) - La crue de la mi-juin 1957 sur le Guil, l'Ubaye et la Cerveyrette. *Revue de Géographie Alpine*, vol. 4, p. 565-627.
- TRICART J. (1960) - Mise au point : les types de lits fluviaux. *L'Information Géographique*, n° 5, p. 210-214.
- TRICART J. (1974) - Phénomènes démesurés et régime permanent dans les bassins montagnards (Queyras et Ubaye, Alpes françaises). *Revue de Géomorphologie Dynamique*, vol. 3, p. 99-114.
- TRICART J. (1977) - Types de lits fluviaux en Amazonie brésilienne. *Annales de Géographie*, n° 473, p. 1-54.
- TRICART J. et FRÉCAUT R. (1983) - Le Pantanal : un exemple de plaine où le réseau hydrographique est mal défini. *Communication au colloque "L'Hydrologie des régions plates"* (Olavarria, Argentine, 1983) 23 p.
- WHITE S., GARCIA-RUIZ J.M., MARTI C., VALERO B., PAZERREA M. et GOMEZ-VILLAR A. (1997) - The 1996 Biescas campsite disaster in the central Spanish Pyrenees, and its temporal and spatial context. *Hydrological Processes*, vol. 11, n° 14, p. 1797-1812.
- WARD R. (1978) - *Floods. A Geographical Perspective*. Édit. MACMILLAN, Londres, 244 p.
- WULAMU M. (2010) - *Les risques d'inondation dans la région du Xinjiang (Chine) : cas du Karakash-Darya*. Thèse de l'Université de Provence, 344 p.
- YAMSKIKH A.F., YAMSKIKH A.A. et BROWN A.G. (1999) - Siberian-type Quaternary floodplain sedimentation: The example of the Yenisei river. *In : Fluvial Processes and Environmental Change*, A.G. BROWN et T.A. QUINE édit., Édit. John WILEY and Sons, Chichester, p. 241-252.
- ZEBIRI A. (1994) - Evaluation du risque d'inondation à Constantine : méthodologie d'approche. *Méditerranée*, 3.4, p. 23-30.

TABLE DES FIGURES

Figure 1 - Relations topographiques entre les différents lits	p. 16
Figure 2 - Coupe d'un chenal de lit moyen	22
Figure 3 - Carte de localisation des cours d'eau du Midi méditerranéen français	33
Figure 4 - Cône alluvial	36
Figure 5 - Schéma de cônes alluviaux barrant l'écoulement du cours d'eau principal	37
Figure 6 - Vallon en berceau	39
Figure 7 - Bourrelets de berge et lit en toit	41
Figure 8 - Caractéristiques granulométriques du lit moyen du Karakash Darya à Egresay (Xinjiang, Chine)	44
Figure 9 - Distribution granulométrique de la fraction sableuse du lit moyen de l'Argent-Double à Rieux-Minervois (Aude)	45
Figure 10 - Caractéristiques granulométriques des dépôts du lit majeur de l'Ouvèze à Roaix (Vaucluse)	45
Figure 11 - Caractéristiques granulométriques du lit majeur du Karakash Darya à Egresay (Xinjiang, Chine)	46
Figure 12 - Distribution granulométrique de la fraction sableuse des échantillons du lit majeur exceptionnel prélevés au lieu-dit "Les Trois Chemins" (Ferrals-les-Corbières, Aude)	47
Figure 13 - Distribution granulométrique de la fraction sableuse d'un échantillon du lit majeur exceptionnel de l'oued Leben au nord de Mezzouna (Tunisie)	48
Figure 14 - Différenciation granulométrique entre alluvions et colluvions, lit majeur exceptionnel de l'Orbieu, Les Trois Chemins, Ferrals-les-Corbières (Aude)	49
Figure 15 - Profil longitudinal schématique de la vallée des Gardons (Gard)	53
Figure 16- Toposéquences des types de prairies de la vallée de la Meuse	54
Figure 17 - Agglomérations anciennes et zones inondables	56
Figure 18 - Parcellaire de la vallée du Karakash Darya au sud de Moyou (Xinjiang, Chine)	57
Fig. 19 - Croquis synthétique de la structuration sédimentaire du fond alluvial du Meu	66
Fig. 20 - Mosaïque des corps sédimentaires dans le secteur de la Poulanière.	67
Figure 21 - Distribution granulométrique de la fraction sableuse d'un échantillon de la terrasse moderne de l'Argent-Double à Rieux-Minervois (Aude)	69
Figure 22 - Carte hydrogéomorphologique du Karakash Darya à Kawak (Xinjiang, Chine)	73
Figure 23 - Exhaussement du lit majeur de l'Argent-Double au cours du XX ^{ème} siècle à La Redorte (Aude)	81
Figure 24 - Conséquences de l'aménagement du bassin versant du Geer (Belgique) sur la périodicité des crues	85

Figure 25 - Accumulation dans le lit majeur du Gardon d'Anduze au cours du XX ^{ème} siècle (Attuech, Gard)	89
Figure 26 - Courbe moyenne du taux de non dépassement des limites de la plaine alluviale fonctionnelle (déterminées par la méthode hydrogéomorphologique) par celles des zones inondées par sept cours d'eau en novembre 1999 (1 : Aude) et en septembre 2002 (2 : Gardon)	93
Figure 27 - Superposition des limites et schématisation des polygones de dépassement	94
Figure 28 - Tableau de synthèse des résultats issus de la première étape de vérification pour sept cours d'eau des Corbières et du Minervois	94
Figure 29 - Extrait de la Carte de Cassini de Vesoul (1760)	106
Figure 30 - Évolution du lit mineur du Gardon d'Anduze (Gard) au XIX ^{ème} siècle	107
Figure 31 - Potentiel d'interprétation de l'occupation du sol par imagerie satellite Worldview 2 à 50 cm de résolution spatiale	109
Figure 32 - Progression de la résolution des modèles numériques de surface par interférométrie radar	111
Figure 33 - Cartographie des crues de la Seine à Paris en 1910 (a) et modèle numérique de terrain (b)	112
Figure 34 - Image topographique lidar de méandres de la Trent près de Nottingham (Grande-Bretagne)	114
Figure 35 - Image Google Earth de la vallée du Karakash Daria (Xinjiang, Chine)	115
Figure 36 - Carte informative du bassin de la Dordogne	118
Figure 37 - Carte géomorphologique d'Attuech (Gard)	119
Figure 38 - Carte de l'occupation du sol d'Attuech (Gard)	121
Figure 39- Légende simplifiée de l'Atlas des Zones Inondables à 1/25000	121
Figure 40 - Cartographie hydrogéomorphologique de la commune d'Aigremont (Gard) à 1/10000	122
Figure 41 - Adoucissement du talus externe par ruissellement diffus	124
Figure 42 - Recouvrement du talus externe par colluvionnement	125
Figure 43 - Coupe de la limite externe du lit majeur exceptionnel de l'Orbieu aux Trois Chemins (Ferrals-les-Corbières, Aude)	125
Figure 44 - Carte hydrogéomorphologique de la vallée de l'Orbieu (Aude)	126
Figure 45 - Cartographie hydrogéomorphologique de la vallée de l'Argent-Double (Aude)	127
Figure 46 - Morphologie des lits de l'oued Bou Merzoug (Algérie)	129
Figure 47 - Carte de San Stefano Bebo (Nord-Ouest de l'Italie)	130
Figure 48 - Cartographie hydrogéomorphologique de la vallée de la Rivière au Renard (Québec, Canada)	131
Figure 49 - Carte hydrogéomorphologique de la vallée du Karakash Darya à Langru (Xinjiang, Chine)	132
Figure 50 - Le modèle morpho-topographique et sa contribution à la méthode intégrée	137
Figure 51 - Schéma méthodologique de l'étude des zones inondables dans les Asturies (Espagne)	139

TABLE DES PHOTOS

Photo 1 - Le lit mineur du Nil en Haute-Égypte	p. 17
Photo 2 - Le lit mineur de la Charente à Saintes	18
Photo 3 - Le lit mineur de la Daxigu He dans les Tianshan (Xinjiang, Chine)	18
Photo 4 - La Droude (Gard) en crue non débordante le 15 mars 2002	19
Photo 5 - Chenal d'étiage de la Fitzroy River à Geikie Gorge (Western Australia, Australie)	19
Photo 6 - L'Amou Daria en Ouzbékistan	20
Photo 7 - L'Asse à Oraison (Alpes-de-Haute-Provence)	21
Photo 8 - Chenal de crue dans le lit moyen du Karakash Darya à Kawak (Xinjiang, Chine)	21
Photo 9 - Le Nil en Haute-Égypte	23
Photo 10 - Lit moyen du Karakash Darya au sud de Bostan Tograk (Xinjiang, Chine)	23
Photo 11 - Le Loir (lit mineur et lit majeur) à Saint-Avit-les-Guespières (Eure-et-Loir)	24
Photo 12 - Le lit majeur de l'Ognon à Ollans (Doubs)	24
Photo 13 - Dépôts de la crue de 2002 dans le lit majeur du Gardon d'Anduze	25
Photo 14 - Chenaux dans le lit majeur de l'Ognon à Bouhans-les-Montbozon (Haute-Saône)	26
Photo 15 - Chenaux dans le lit majeur de la Dives en crue à Dives-sur-Mer (Calvados)	26
Photo 16 - Vallée du Pô : sillons et dépôts de la crue de 2000	27
Photo 17 - Vallée du Pô : chenaux creusés pendant la crue de 2000.	28
Photo 18 - "Jet de rive" sur le lit majeur de l'Auzon à Mazan (Vaucluse) lors de la crue de 1994	28
Photo 19 - "Jet de rive" sur le lit majeur de l'oued el Kheroua (Tunisie centrale)	29
Photo 20 - Lit majeur de l'Ouvèze à l'aval de Vaison-la-Romaine (Vaucluse) après la crue du 22 septembre 1992	29
Photo 21 - Lit majeur du Groseau au Crestet (Vaucluse) après la crue du 22 septembre 1992	30
Photo 22 - Marmite creusée par la crue du 22 septembre 1992 dans le lit majeur de l'Ouvèze à l'aval de Vaison-la-Romaine (Vaucluse)	30
Photo 23 - Lit majeur exceptionnel de la Cèze à Saint-André-de-Roquepertuis (Gard)	31
Photo 24 - Lit majeur exceptionnel de l'oued Batha (Tunisie centrale)	32
Photo 25 - Cône alluvial à Luz-Saint-Sauveur (Hautes-Pyrénées)	35
Photo 26 - Cône de Stovepipe, Death Valley (Californie, U.S.A.)	36
Photo 27 - Glacis pléistocènes du piémont méridional des Aurès (Algérie)	38
Photo 28 - Glacis fonctionnel de Cardet, vallée du Gardon d'Anduze (Gard)	38
Photo 29 - Vallon en berceau : la combe Vertoillot à Cognières (Haute-Saône)	39
Photo 30 - Tressage sur la Bléone au Moustaret (Alpes-de-Haute-Provence)	40

Photo 31 - Bourrelet de berge en rive gauche de l'Ognon à Pont-sur-l'Ognon (Haute-Saône)	42
Photo 32 - Coupe du lit moyen de la Cèze à Saint-André-de-Roquepertuis (Gard)	43
Photo 33 - Terrasse alluviale du Karakash Darya à Langru (Xinjiang, Chine)	49
Photo 34 - Grand Canyon du Colorado (Arizona, États-Unis).	50
Photo 35 - La Cèze à La Roque-sur-Cèze (Gard)	51
Photo 36 - Lit majeur rocheux de la Chamberlain River près d'El Questro (Western Australia, Australie)	51
Photo 37 - Vallée de la Krona à Plivitce (Croatie)	52
Photo 38 - Le pont de Russan à Sainte-Anastasie (Gard) à demi-submergé pendant la crue du Gardon en 2002	53
Photo 39 - Ripisylve du lit moyen de la Loire à Montsoreau (Maine-et-Loire)	55
Photo 40 - Lit majeur de la Loire à Savigny-en-Véron (Indre-et-Loire)	55
Photo 41 - La ferme Saint-Antoine, au centre, dans le lit majeur de l'Èze à Pertuis (Vaucluse)	57
Photo 42 - Batardeaux à Quissac (Gard)	58
Photo 43 - Digue de Caderousse (Vaucluse)	59
Photo 44 - La chapelle de Villerase dans le lit majeur du Réart à Alenya (Pyrénées-Orientales)	60
Photo 45 - Chevet de la cathédrale Notre-Dame à Vaison-la-Romaine (Vaucluse).	60
Photo 46 - Épi sur l'Ouvèze à Vaison-la-Romaine (Vaucluse)	61
Photo 47 - Limonage dans le lit moyen du Karakash Darya (Xinjiang, Chine)	62
Photo 48 - La Cèze endiguée à Bessèges (Gard)	63
Photo 49 - La plaine alluviale fonctionnelle du Pô (Italie). Adaptation du parcellaire aux anciens méandres	63
Photo 50 - Le lit majeur du Rhône à Saint-Maurice-de-Gourdans (Ain)	64
Photo 51 - La Somme à Frise (Somme)	65
Photo 52 - Lit majeur de la Vilaine à Masserac (Ille et Vilaine).	66
Photo 53 - L'oued Chaâl-Tarfaoui (Tunisie)	70
Photo 54 - Lit mineur à sec de l'oued Tamerza (Tunisie)	70
Photo 55 - Crue d'un oued à La Grand-Combe (Gard) en mars 2002	71
Photo 56 - Bancs de galets de l'oued el Kheroua (Tunisie centrale)	71
Photo 57 - Épandages dans la plaine d'El Outaya (Algérie)	72
Photo 58 - La Chamberlain River à El Questro (Western Australia, Australie)	74
Photo 59 - La Tepla à Karlovy Vary (République tchèque)	76
Photo 60 - Le Sals à Rennes-les-Bains (Aude)	77
Photo 61 - Pont de Sant Joan de les Abadesses (Catalogne, Espagne)	78
Photo 62 - Thomond Bridge sur le Shannon à Limerick (Irlande)	79
Photo 63 - Repère de la crue de l'Aude en 1999 à Raissac (Aude)	79
Photo 64 - Sursédimentation dans le lit majeur de l'Ouvèze, à l'amont d'une route (à droite), à Roaix (Vaucluse)	80
Photo 65- Vallon sec d'un sous-affluent du Gardon (Gard)	83
Photo 66 - Aménagement des lits de l'Ouvèze à Vaison-la-Romaine (Vaucluse) après la crue du 22 septembre 1992	84

Photo 67 - Vignes à Saint-Chaptes (Gard)	84
Photo 68 - Pont sur l'oued Za (Maroc)	86
Photo 69 - Entaille contemporaine du lit mineur du rio Cuadros (Bedmar, Andalousie, Espagne)	87
Photo 70 - Prélèvement des dépôts de la crue de 2002 à Attuech (Gard)	88
Photo 71 - Dépôts de crue sableux de l'oued el Hallouf (Tunisie) conservés dans un abri sous roche	95
Photo 72 - Repères de crues du Vidourle à Quissac (Gard)	96
Photo 73 - Pont de Luc-sur-Orbieu (Aude) détruit par la crue de novembre 1999	98
Photo 74 - Repères de crues de l'Arno à Florence (Italie)	115
Photo 75 - Repères de crues de la Vltava à Prague (République tchèque)	116
Photo 76 - Dépôts du lit majeur exceptionnel de l'Oued Leben (Tunisie centrale)	117
Photo 77 - Aménagement de l'Ouvèze à Vaison-la-Romaine (Vaucluse) après la crue de 1992	144
Photo 78 - Remodelage et endiguement du Groseau au Crestet (Vaucluse) après la crue de 1992	144

TABLE DES MATIÈRES

AVANT-PROPOS	p. 3
INTRODUCTION	5
Partie I - LA MÉTHODE HYDROGÉOMORPHOLOGIQUE	9
Chapitre I - UNE NOUVELLE MÉTHODE	11
I - La nécessité d'une nouvelle méthode	11
II - Une lente émergence scientifique et institutionnelle	12
1) Les premières cartes qualitatives (1935-1982)	12
2) Les débuts de la méthode hydrogéomorphologique (1983-1995)	12
3) Depuis 1995, la méthode hydrogéomorphologique fait partie intégrante de l'étude des zones inondables	13
Chapitre II - LES PRINCIPES DE LA MÉTHODE HYDROGÉOMORPHOLOGIQUE	15
I - Le rôle fondamental de la géomorphologie	15
1) La morphologie	15
a. Les lits	16
b. Les terrasses alluviales	33
c. La zone d'ablation	34
d. La partie moyenne : la zone de transfert	39
e. La partie aval : la zone d'accumulation	40
2) La sédimentologie	41
3) Le rôle de la géologie	50
a. La lithologie	50
b. La tectonique	52
II - Les critères complémentaires	53
1) La couverture végétale naturelle	53
2) L'occupation humaine	55
a. La localisation des constructions	56
b. Les vestiges historiques et archéologiques	59
c. L'adaptation de l'activité agricole aux caractéristiques de la plaine alluviale	61
d. La structure du parcellaire	62
III - Les facteurs de variation	64
1) Les variations en fonction des grandes zones climatiques	64
2) Les facteurs anthropiques	74
a. Les travaux et ouvrages hydrauliques	74
b. Les pratiques agricoles	82
c. L'imperméabilisation des sols due à l'urbanisation	85
d. Conclusion	85
IV) L'évolution des unités hydrogéomorphologiques à l'échelle historique	86
1) L'évolution des lits mineurs	86

2) L'évolution des lits majeurs	87
Chapitre III - LA CORRESPONDANCE ENTRE L' HYDROGÉOMORPHOLOGIE ET LE FONCTIONNEMENT HYDRAULIQUE	91
I - Les correspondances globales entre les unités hydrogéomorphologiques et l'hydraulique des crues	91
1) Les délimitations des espaces concernés par les différents types de crues	91
2) L'évaluation des hauteurs d'eau et des vitesses d'écoulement	95
II - L'hydrogéomorphologie et la modélisation	99
CONCLUSION	101
Partie II - LES APPLICATIONS DE LA MÉTHODE HYDROGÉOMORPHOLOGIQUE	103
Chapitre I - LA CARTOGRAPHIE DES ZONES INONDABLES	105
I - Rappel critique des moyens techniques d'acquisition des données	105
1) Les cartes	105
2) Les photographies aériennes	107
3) L'imagerie satellite	108
a. La télédétection et les contraintes d'accès aux données géographiques	108
b. Nouveaux capteurs satellitaires - nouvelles perspectives pour l'hydrogéomorphologie	109
c. Produits dérivés de la télédétection et leur utilisation dans l'application de la méthode hydrogéomorphologique	111
4) Les données relatives aux crues historiques	113
5) Les observations de terrain	116
II - La cartographie des données : la carte hydrogéomorphologique ou carte d'inondabilité hydrogéomorphologique	
1) La légende	120
a. Premières applications	120
b. La légende de l'Atlas hydrogéomorphologique des Gardons	122
c. La nécessité d'améliorer la légende de l'Atlas des Zones Inondables	123
2) Problèmes de cartographie : l'effacement de la limite externe de la plaine alluviale fonctionnelle	123
a. L'exhaussement du lit majeur	123
b. L'adoucissement du talus externe par ruissellement diffus	124
c. Le recouvrement du talus de la terrasse alluviale par colluvionnement	124
d. Le lit majeur exceptionnel	126
e. La terrasse holocène	127
f. Les vallons secs	127
3) Les réalisations hors de France	128
III - L'interprétation des cartes hydrogéomorphologiques	132
1) L'interprétation qualitative	132
2) L'interprétation semi-quantitative	133
Chapitre II - LA MÉTHODE INTÉGRÉE	135
I - Origines de la méthode intégrée	135
II - Principes de la méthode intégrée	135

III - Premières applications	136
Chapitre III - L'AMÉNAGEMENT	141
I - Les conséquences de l'exhaussement des lits majeurs	141
1) Le réexamen des analyses statistiques	141
2) L'évolution de l'inondabilité de sites fluviaux	142
II - Le fonctionnement des cours d'eau lors des crues exceptionnelles	142
CONCLUSION GÉNÉRALE	147
Références bibliographiques	149
Table des figures	159
Table des photos	161
Table des matières	165

Auteurs : Jean-Louis BALLAIS, Sylvain CHAVE, Nadia DUPONT, Éric MASSON et Marie-Josée PENVEN.

Édition : Claude MARTIN (Physio-Géo).

Citation : BALLAIS J.L., CHAVE S., DUPONT N., MASSON É. PENVEN M.J. (2011) - *La méthode hydrogéomorphologique de détermination des zones inondables*. Physio-Géo (www.physio-geo.fr), collection "Ouvrages", 168 p.

Remerciements : Nous remercions vivement les auteurs, services décentralisés de l'État, organismes et sociétés de nous avoir aimablement permis de reproduire leurs photos, figures et cartes.

