



La place de l'hydrogéomorphologie dans les études d'inondation en France méditerranéenne

Gérald Garry, Jean-Louis Ballais, Marcel Masson

► To cite this version:

Gérald Garry, Jean-Louis Ballais, Marcel Masson. La place de l'hydrogéomorphologie dans les études d'inondation en France méditerranéenne. *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 2002, 8 (1), pp.5-16. 10.3406/morfo.2002.1124 . hal-01569658

HAL Id: hal-01569658

<https://amu.hal.science/hal-01569658>

Submitted on 27 Jul 2017

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

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

La place de l'hydrogéomorphologie dans les études d'inondation
en France méditerranéenne / The contribution of
hydrogeomorphology in flood hazard assessment: a review of
the situation in southern France

In: Géomorphologie : relief, processus, environnement. Janvier-mars, vol. 8, n 1. pp. 5-15.

Citer ce document / Cite this document :

Garry Gérald, Ballais Jean-Louis, Masson Marcel. La place de l'hydrogéomorphologie dans les études d'inondation en France méditerranéenne / The contribution of hydrogeomorphology in flood hazard assessment: a review of the situation in southern France. In: Géomorphologie : relief, processus, environnement. Janvier-mars, vol. 8, n 1. pp. 5-15.

doi : 10.3406/morfo.2002.1124

http://www.persee.fr/web/revues/home/prescript/article/morfo_1266-5304_2002_num_8_1_1124

Résumé

Résumé La méthode hydrogéomorphologique de détermination des zones inondables a été mise au point il y a une vingtaine d'années. Son principe en est simple : les limites externes du lit majeur d'un cours d'eau constituent la courbe enveloppe des crues passées de ce cours d'eau. Ces limites externes sont déterminées par l'étude des photographies aériennes et par celle du terrain en combinant la micro-topographie (en particulier l'existence de talus), la granulométrie des dépôts (ceux du lit majeur sont généralement formés de limons et d'argiles) et la couleur de ces dépôts, souvent plus sombres dans le lit majeur que les matériaux de l'encaissant. Certaines formes de l'occupation actuelle ou ancienne des sols (parcellaire, localisation et répartition des sites archéologiques), ainsi que la localisation et la disposition des habitations et des bâtiments d'exploitation et l'implantation des voies de communication, sont également utilisées pour confirmer les limites obtenues. Très longtemps négligée, cette méthode naturaliste est maintenant intégrée dans les méthodes préconisées par les plans de prévention des risques (PPR), en raison de sa fiabilité, de sa facilité de mise en œuvre et de son faible coût. Elle figure maintenant aux côtés d'approches plus traditionnelles, en particulier de la méthode hydrologique-hydraulique nettement plus coûteuse. Les récentes et nombreuses catastrophes qui se sont succédé depuis une douzaine d'années dans le Midi méditerranéen français, de Nîmes (1988) à l'Aude (1999) ont montré, à la fois, l'insuffisance de la méthode hydrologique-hydraulique et la fiabilité de la méthode hydrogéomorphologique. Cependant, la méthode hydrogéomorphologique peut encore être perfectionnée en remplaçant la période actuelle dans le cadre de l'évolution des lits majeurs durant l'Holocène, à l'échelle historique, voire pré-historique. De plus, ses limites intrinsèques, qui ne permettent de déterminer de manière précise ni la hauteur d'eau, ni la vitesse d'écoulement prises en compte pour élaborer les PPR, confirment la nécessité de mettre au point une méthode mixte, efficace et peu coûteuse si possible, pour laquelle les études sont en bonne voie.

Abstract

Abstract The hydrogeomorphological method for delimiting flood risk zones in France was developed some twenty years ago. It is based on a simple principle: the outer limits of a stream's flood plain materialize the outer envelope of past floods. These limits are determined with the use of aerial photographs and field surveys of micro-topography, as well as analyses of deposit granulometry and colour. Indications of present or past land use (fields, location and distribution of archeological sites, houses and farm buildings, roads) are also useful. This field-based method long remained ignored but being reliable, easy to use and inexpensive, it has now been incorporated into the package of methods recommended by French risk prevention plans (PPR). It therefore complements more widespread approaches such as the costly hydrological-hydraulic method. The many recent catastrophes which have occurred over the past twelve years in the Mediterranean regions of southern France, in Nîmes (1988) and in the Aude département (1999) demonstrated both the inadequacy of the hydrological-hydraulic method and the reliability of the hydrogeomorphological method. The hydrogeomorphological method can, however, be improved by setting observations for the present period against information on the more ancient Holocene evolution of flood channels. Furthermore, its intrinsic limits, which make it unable to provide a precise determination of the water depths and flow rates used in PPRs, emphasize the need for developing a hybrid method that is as effective and inexpensive as possible. Such improvements are well under way.

La place de l'hydrogéomorphologie dans les études d'inondation en France méditerranéenne

The contribution of hydrogeomorphology in flood hazard assessment: a review of the situation in southern France

Gérald Garry*, Jean-Louis Ballais**, Marcel Masson***

Résumé

La méthode hydrogéomorphologique de détermination des zones inondables a été mise au point il y a une vingtaine d'années. Son principe en est simple : les limites externes du lit majeur d'un cours d'eau constituent la courbe enveloppe des crues passées de ce cours d'eau. Ces limites externes sont déterminées par l'étude des photographies aériennes et par celle du terrain en combinant la micro-topographie (en particulier l'existence de talus), la granulométrie des dépôts (ceux du lit majeur sont généralement formés de limons et d'argiles) et la couleur de ces dépôts, souvent plus sombres dans le lit majeur que les matériaux de l'encaissant. Certaines formes de l'occupation actuelle ou ancienne des sols (parcellaire, localisation et répartition des sites archéologiques), ainsi que la localisation et la disposition des habitations et des bâtiments d'exploitation et l'implantation des voies de communication, sont également utilisées pour confirmer les limites obtenues. Très longtemps négligée, cette méthode naturaliste est maintenant intégrée dans les méthodes préconisées par les plans de prévention des risques (PPR), en raison de sa fiabilité, de sa facilité de mise en œuvre et de son faible coût. Elle figure maintenant aux côtés d'approches plus traditionnelles, en particulier de la méthode hydrologique-hydraulique nettement plus coûteuse. Les récentes et nombreuses catastrophes qui se sont succédé depuis une douzaine d'années dans le Midi méditerranéen français, de Nîmes (1988) à l'Aude (1999) ont montré, à la fois, l'insuffisance de la méthode hydrologique-hydraulique et la fiabilité de la méthode hydrogéomorphologique. Cependant, la méthode hydrogéomorphologique peut encore être perfectionnée en replaçant la période actuelle dans le cadre de l'évolution des lits majeurs durant l'Holocène, à l'échelle historique, voire pré-historique. De plus, ses limites intrinsèques, qui ne permettent de déterminer de manière précise ni la hauteur d'eau, ni la vitesse d'écoulement prises en compte pour élaborer les PPR, confirment la nécessité de mettre au point une méthode mixte, efficace et peu coûteuse si possible, pour laquelle les études sont en bonne voie.

Mots clés : lit majeur, zones inondables, cartographie, France méditerranéenne.

Abstract

The hydrogeomorphological method for delimiting flood risk zones in France was developed some twenty years ago. It is based on a simple principle: the outer limits of a stream's flood plain materialize the outer envelope of past floods. These limits are determined with the use of aerial photographs and field surveys of micro-topography, as well as analyses of deposit granulometry and colour. Indications of present or past land use (fields, location and distribution of archeological sites, houses and farm buildings, roads) are also useful. This field-based method long remained ignored but being reliable, easy to use and inexpensive, it has now been incorporated into the package of methods recommended by French risk prevention plans (PPR). It therefore complements more widespread approaches such as the costly hydrological-hydraulic method. The many recent catastrophes which have occurred over the past twelve years in the Mediterranean regions of southern France, in Nîmes (1988) and in the Aude département (1999) demonstrated both the inadequacy of the hydrological-hydraulic method and the reliability of the hydrogeomorphological method. The hydrogeomorphological method can, however, be improved by setting observations for the present period against information on the more ancient Holocene evolution of flood channels. Furthermore, its intrinsic limits, which make it unable to provide a precise determination of the water depths and flow rates used in PPRs, emphasize the need for developing a hybrid method that is as effective and inexpensive as possible. Such improvements are well under way.

Key words: flood plain, flood hazard, mapping, southern France.

* DGUHC, Ministère de l'Équipement, du Logement et des Transports, Arche de la Défense, 92055 Paris la Défense cedex. E-mail : gerald.garry@equipement.gouv.fr

** Institut de Géographie, UMR ESPACE, Université de Provence, 27 avenue Robert Schumann, 13621 Aix-en-Provence cedex 01. E-mail : ballais@aixup.univ-aix.fr

*** CETE Méditerranée, Ministère de l'Équipement, 30 rue Albert Einstein, Les Milles, B.P. 37000, 13791 Aix-en-Provence cedex 3. E-mail : marcel.masson@equipement.gouv.fr

Abridged English version

The hydrogeomorphological method for determining flood plains was developed some twenty years ago. It is based on a simple principle: the flood plain boundaries of a stream correspond to the envelope curve of its past floods (Masson et al., 1996; Lambert et al., 2001). These limits are determined with the use of aerial photographs and field surveys of micro-topography (notably the existence of banks), as well as analyses of deposit granulometry (those in the flood channel usually consisting of silt and clay) and colour (in the flood channel, these are often darker than the surrounding rocks) (Coque, 1993; Masson et al., 1996; Bravard and Petit, 1997). Indications of present or past land use (fields, location and distribution of archeological sites: Bravard et al., 1990; houses and farm buildings: Ballais, 1992; roads) are also useful.

This field-based method was long unknown to planners, but gained wider currency at the beginning of the 1980s (Masson, 1983; Garry, 1983). Following this, it became recognised by flooding experts and identified as an essential part of our understanding of flood plains (Garry, 1994). Considering it is reliable, easy to use and inexpensive, it has been integrated since 1995 into studies designed for drawing up flood risk prevention plans (PPR). It is now found alongside more commonplace but also more costly approaches based on hydrological and hydraulic calculations (Garry and Grasz, 1999). The many catastrophes that have occurred over the past twelve years in the Mediterranean regions of southern France, in Nîmes (1988) and in the Aude département (1999) have demonstrated both the limits of the hydrological-hydraulic method and the reliability of the hydrogeomorphological method.

The floods of November 1999, which seriously affected a large geographical area in four départements in the south of France (Aude, Pyrénées Orientales, Tarn and Hérault), provided an opportunity to compare the limits of the potential flood plains outlined by hydrogeomorphological mapping with areas that were actually flooded. This was performed for an aggregate 350 km of stream length using systematic readings of the flood water marks in the field (unpublished reports, CETE Méditerranée). The water line matched the mapped limits in 80% of the cases. For the remaining 20%, half was less affected by the flooding than predicted (waters remained confined well within the hydrogeomorphological envelope), while the flooding exceeded the hydrogeomorphological limit for the remaining 10%. In the latter case, overflow onto the lowermost alluvial terrace was explained by ponding caused by an obstacle placed across the flood plain (e.g. railway infrastructure, canal).

Beyond the advantages of providing a rapid diagnosis of flood plains, this method challenges certain fundamentals behind planning strategies, especially aspects such as the meaning of flooding frequency, the impact of hydraulic development and the upkeep of waterways, urbanisation in flood plains, the role of changes made in hydraulic development (Fabre et al., 1994) and the related urbanisation policies. Indeed, the proposed method can be used to define nearby areas that are not threatened by flood hazards, and

thus to open discussions on alternative solutions that are part of area planning and development.

Although already fully operational, the predictive performance of the hydrogeomorphological method can be improved even further by considering the present period in the perspective of flood channel evolution at historical or even Holocene timescales.

Introduction

La méthode hydrogéomorphologique est née de la nécessité de mieux gérer les zones exposées aux aléas d'inondation afin d'en réduire la vulnérabilité ou mieux encore de les préserver du risque en y maîtrisant l'urbanisation ou encore de les affecter à l'expansion des crues. Fondée sur une approche naturaliste, elle permet de mettre en évidence des unités géomorphologiques non contestables, façonnées par l'eau, et qui marquent les limites potentielles d'une crue prochaine, sans qu'il soit nécessaire de recourir à une modélisation. Elle est donc un outil à la fois scientifique et pédagogique, car elle offre aux acteurs de l'aménagement durable une nouvelle vision de l'espace. Après avoir rappelé les conditions dans lesquelles la méthode a été développée et s'est progressivement imposée dans les études conduites sous l'autorité de l'État (atlas des zones inondables, plans de prévention des risques d'inondation, etc.), nous résumerons les grands principes directeurs de sa mise en œuvre, puis nous présenterons quelques exemples de son application et des réflexions qu'elle suscite vis-à-vis de l'aménagement du territoire, notamment à travers la cartographie réalisée dans le département de l'Aude après les événements de 1999.

L'émergence scientifique et institutionnelle de l'hydrogéomorphologie

Une première génération de cartes qualitatives

Les inondations sont très fréquentes et touchent de très nombreuses communes en France qui sont estimées aujourd'hui à 18 000 environ. À ce titre, il était normal qu'elles retiennent très tôt l'attention des pouvoirs publics et qu'elles fassent l'objet d'études et de représentations cartographiques. La première génération de cartes a été réalisée sur les fleuves, puis 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 à l'échelle de 1/25 000, ne faisaient que reprendre les limites des plus hautes eaux connues à partir des laisses de crues, 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

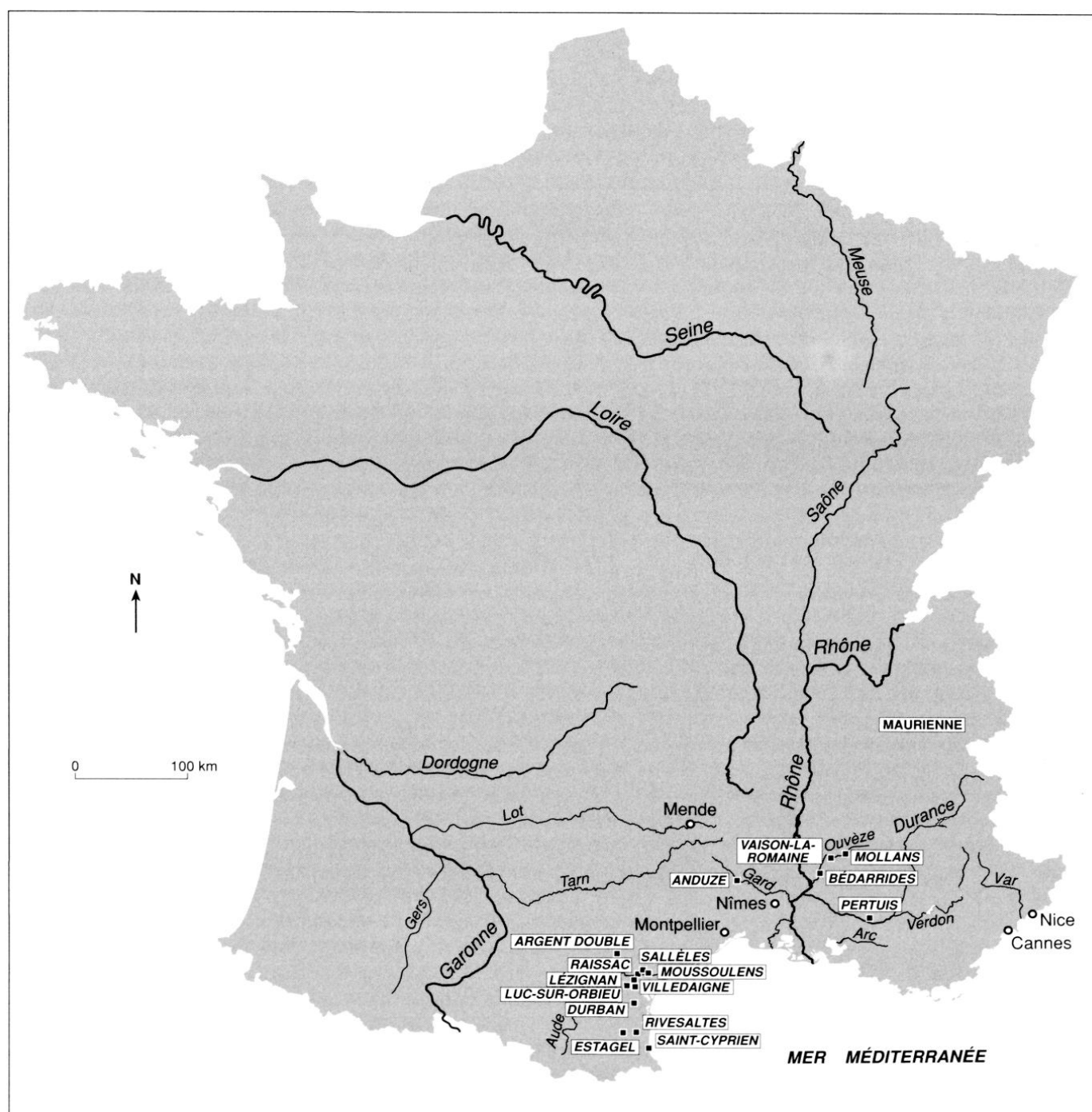
d'activités industrielles vers les années 1970 a provoqué une forte progression de la vulnérabilité qu'il est devenu indispensable de maîtriser. La répétition d'événements dommageables comme les inondations du Gers en 1977 ou celles de la Saône pendant l'hiver 1980-1981 (fig. 1) a été à l'origine de la mise en place d'une véritable politique de prévention qui s'est caractérisée par le développement de la connaissance des aléas, la création d'outils pour assurer l'information des citoyens et par une gestion plus stricte des territoires.

1980 : les premiers pas de la carte hydrogéomorphologique

La loi du 13 juillet 1982, relative à l'indemnisation des victimes des catastrophes naturelles, a été l'occasion de définir une stratégie des études de risques. Par réaction à la période précédente, il a été décidé de conduire de façon systématique des études "lourdes", fondées sur des modélisations mathématiques. Toutes les communes affectées 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

Fig. 1 – Carte de localisation.

Fig. 1 – Location map.



en œuvre, trop coûteux et également disproportionné aux besoins. Il était en effet engagé indifféremment sur des petites communes rurales sans enjeu particulier, qui disposaient d'espaces situés en dehors des zones inondables et qui ne délivraient 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 petit 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.

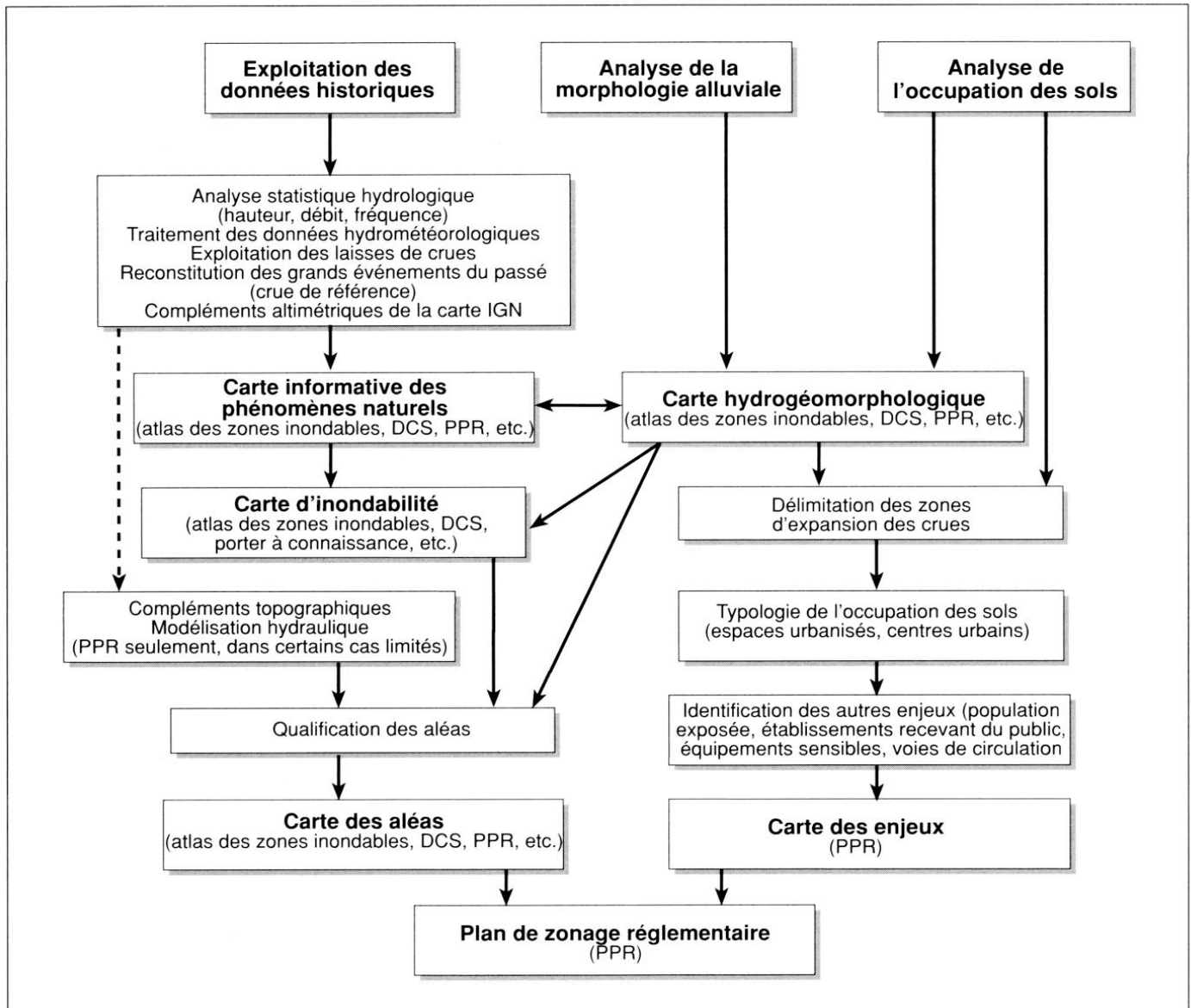
C'est dans ce contexte que la méthode hydrogéomorphologique a franchi ses premiers pas et a évolué (Masson, 1983 ; Garry, 1985). Après plusieurs tests, la méthode, fondée sur l'analyse du terrain par photo-interprétations et observations directes, a été appliquée aux fonds de vallées de plusieurs cours d'eau afin de comparer les résultats obtenus avec ceux

issus de la modélisation (Lot à Mende, Gardon d'Anduze, Lez à l'amont de Montpellier). D'abord accueillie avec scepticisme par les ingénieurs, elle a progressivement trouvé sa place. Elle a ainsi été partiellement utilisée après la catastrophe de Nîmes (Fabre *et al.*, 1994) pour effectuer des diagnostics sur plusieurs communes du sud-est (Mende, Nice, Cannes, Saint-Cyprien, etc.) et elle a donné lieu à la production systématique d'une carte dans les atlas des crues torrentielles qui ont été produits 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 la fin des années 80 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

Tableau 1 – **Place de l'hydrogéomorphologie dans les études du risque d'inondation.**

Table 1 – *The place of hydrogeomorphology in the study of flood hazards.*



mieux sensibiliser l'opinion publique à des phénomènes qui n'étaient généralement pas exceptionnels, mais trop vite oubliés, et d'augmenter les séries de données statistiques pour évaluer avec davantage de fiabilité les périodes de retour des événements (Garry, 1993).

Depuis 1995 : la cartographie hydrogéomorphologique est 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 remettre à plat une stratégie d'étude des inondations qui tienne compte des expériences acquises depuis vingt ans. Dorénavant, les différentes approches ne sont plus perçues en termes de concurrence, mais de complémentarité. Les ministères de l'Équipement et de l'Environnement ont mis au point une méthode unique d'investigations qui permet d'optimiser les moyens au regard des besoins. Les études sont ainsi engagées dans un ordre logique de complexité croissante, du qualitatif au quantitatif, et développées jusqu'à ce que la précision des résultats soit en accord avec les attentes et les enjeux : document à finalité d'information préventive, technique ou réglementaire (Garry et Graszak, 1999).

Cette logique est présentée dans le tableau 1. Toute étude doit commencer par une analyse de la morphologie de la plaine alluviale et des crues historiques. Cette première étape se traduit par deux cartes "de base" 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, hydrogéomorphologiques, d'inondabilité et d'aléas répondent au cahier des charges qui a été établi pour dresser les atlas des zones inondables, à la demande du ministère de l'Environnement. Elles correspondent aussi à l'information nécessaire pour établir le dossier communal synthétique (DCS), document d'information préventive élaboré sous l'autorité du préfet. Elles peuvent également faire l'objet d'un "porter à connaissance" afin

d'intégrer les zones inondables dans les plans locaux d'urbanisme (PLU), définis par la loi "Solidarité et Renouvellement Urbains" (SRU) du 13 décembre 2000 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.

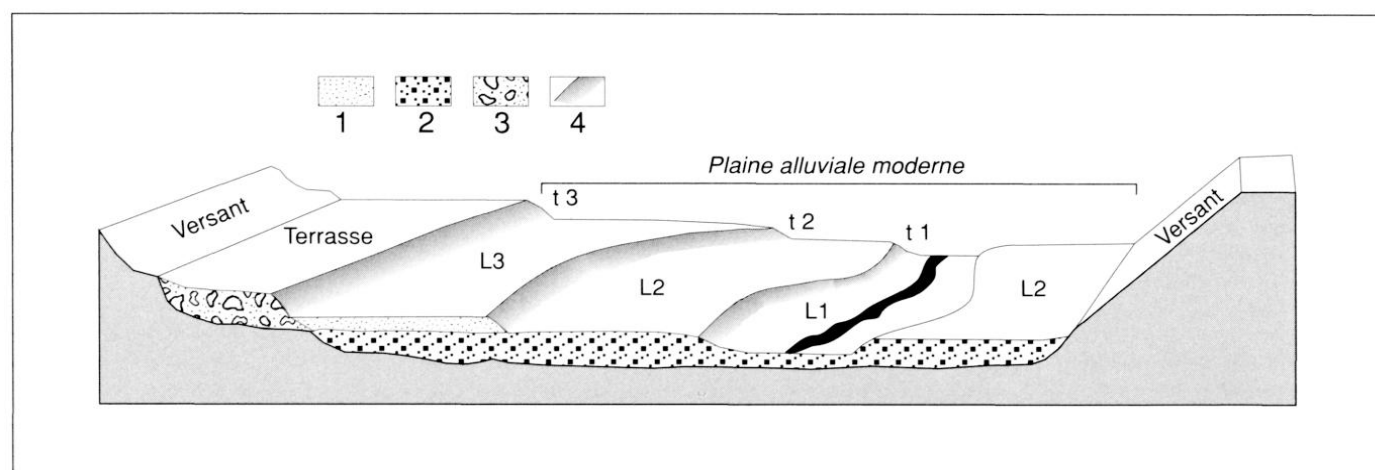
Les principes de la méthode

L'hydrogéomorphologie

Les bases conceptuelles de la méthode hydrogéomorphologique sont extrêmement simples et figurent dans tous les manuels de géomorphologie (Coque, 1993). Les cours d'eau se caractérisent généralement par l'existence de trois lits : le lit mineur, le lit moyen et le lit majeur (fig. 2). Le lit mineur est constamment occupé (Bravard et Petit, 1997), sauf exception, comme dans le cas des oueds (Ballais, 1995 ; Veyret, 1998). Le lit majeur permet l'expansion des crues rares ou exceptionnelles. Le lit moyen, intermédiaire entre les deux précédents, est modelé par les crues fréquentes (périodes de retour de 1 à 5 ans, voire 10 ans). Bien caractérisé dans les régions à pluviométrie contrastée et dans les traversées de piedmonts de massifs montagneux, il ne se distingue pas toujours nettement du lit majeur dans le cas de rivières de plaine et de contexte climatique régulier. En conséquence, les limites externes du lit majeur d'un cours d'eau constituent la courbe enveloppe de ses crues passées

Fig. 2 – **Relations topographiques entre les différents lits** (d'après Masson *et al.*, 1996). 1 : limons de crue ; 2 : alluvions sablo-graveleuses de plaine alluviale fonctionnelle ; 3 : alluvions sablo-graveleuses de terrasse alluviale ; L1 : lit mineur ; L2 : lit moyen ; L3 : lit majeur ; t1 : limite des crues non débordantes ; t2 : limite du champ d'inondation des crues fréquentes ; t3 : limite du champ d'inondation des crues exceptionnelles.

Fig. 2 – **Topographic relationship between the different beds** (after Masson *et al.*, 1996). 1: flood loam; 2: sandy-gravelly deposits (active alluvial plain); 3: sandy-gravelly deposits (alluvial terrace); L1: low flow channel; L2: intermediate flow channel; L3: flood channel; t1: limit of non-overflowing floods; t2: limit of frequent floods; t3: limit of exceptional floods.



(Lambert *et al.*, 2001). Déterminer la zone inondable par un cours d'eau revient donc à déterminer les limites de son lit majeur. Ses limites externes sont repérées par l'étude stéréoscopique des photographies aériennes et par celle du terrain en combinant la micro-topographie avec la granulométrie et la couleur des dépôts.

Cas général

Le lit majeur est généralement surélevé par rapport au lit moyen, lui-même surélevé par rapport au lit mineur. La dénivellation de quelques décimètres au-dessus du lit moyen se marque par un talus d'érosion en pente forte, souvent subverticale, bien visible en photo-interprétation stéréoscopique. La limite externe du lit majeur est également souvent constituée par une rupture de pente liée au talus d'érosion d'âge pléistocène supérieur, généralement net, mais parfois masqué par des matériaux liés à l'évolution de l'encaissant (terrasse alluviale ou substratum généralement) et en particulier par des apports colluviaux. Des annexes fluviales (bras) pouvant être assimilées au lit moyen traversent le lit majeur dans certaines configurations géomorphologiques. Leur articulation avec le lit mineur correspond aux premières zones de débordement des crues. La granulométrie des dépôts superficiels du lit majeur, recouvrant des alluvions grossières holocènes, est caractéristique d'écoulements lents, voire de phénomènes de décantation, limons et argiles, alors que l'encaissant est caractérisé par la roche en place, des alluvions grossières (formations du Pléistocène supérieur) ou des formations hétérométriques (colluvions). Enfin, ces dépôts fins de lit majeur ont des couleurs souvent sombres, dues à la richesse en matière organique et aux phénomènes de réduction alors que l'encaissant, mieux oxygéné, se caractérise par des dépôts ocres, plus clairs. Ce cas est surtout bien développé sur les tronçons intermédiaires des cours d'eau, à l'exception des petits bassins versants.

Les variations vers l'amont et vers l'aval

Vers l'amont, très généralement, la plaine alluviale se réduit et les apports latéraux augmentent. La réduction de la plaine alluviale atteint son maximum dans les gorges (Tarn, Verdon), où elle peut totalement disparaître. Il n'existe plus alors qu'un seul lit. Dans les vallées importantes, des apports latéraux massifs, constitués

par les affluents, prennent souvent la forme de cônes, comme dans les Alpes (Tricart, 1974). Ces cônes peuvent s'avancer jusqu'au cours d'eau axial et même le repousser vers la rive opposée de la plaine alluviale, voire le barrer et constituer un lac éphémère comme en Maurienne. Sur les petits cours d'eau, comme les affluents de l'Arc dans le département des Bouches-du-Rhône, l'amont est souvent constitué par un vallon sec en berceau (fig. 3) dont la forme résulte d'apports massifs de colluvions et pour partie de la répétition des labours pendant des siècles. Dans ce cas, la limite de la zone inondable est constituée, comme précédemment, par la limite entre les limons du lit et les colluvions des versants.

Vers l'aval, les cours d'eau principaux présentent souvent une morphologie différente de celle du cours moyen (Loire moyenne, Ouvèze en amont de Bédarrides, basse plaine de l'Aude à l'aval de Moussoulens) : la diminution de la pente provoque une diminution de la granulométrie, de sorte que le lit moyen lui-même est constitué de dépôts fins qui s'accumulent immédiatement sur les bords du lit mineur. Il s'ensuit la disparition progressive du lit moyen, puis, plus à l'aval, la formation de bourrelets de berges caractéristiques des lits en toit (fig. 4). Le lit majeur, toujours localisé à l'extérieur du lit moyen, est alors en contrebas de celui-ci, à

Fig. 3 – Vallon en berceau dans le bassin de l'Arc (Bouches-du-Rhône) d'après Masson *et al.*, 1996. 1 : limons de crue ; 2 : colluvions.

Fig. 3 – *Shallow valley in the Arc catchment (Bouches-du-Rhône) after Masson et al., 1996. 1: flood silt; 2: colluvium.*

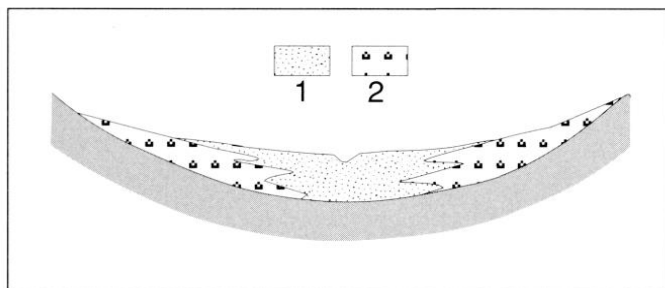
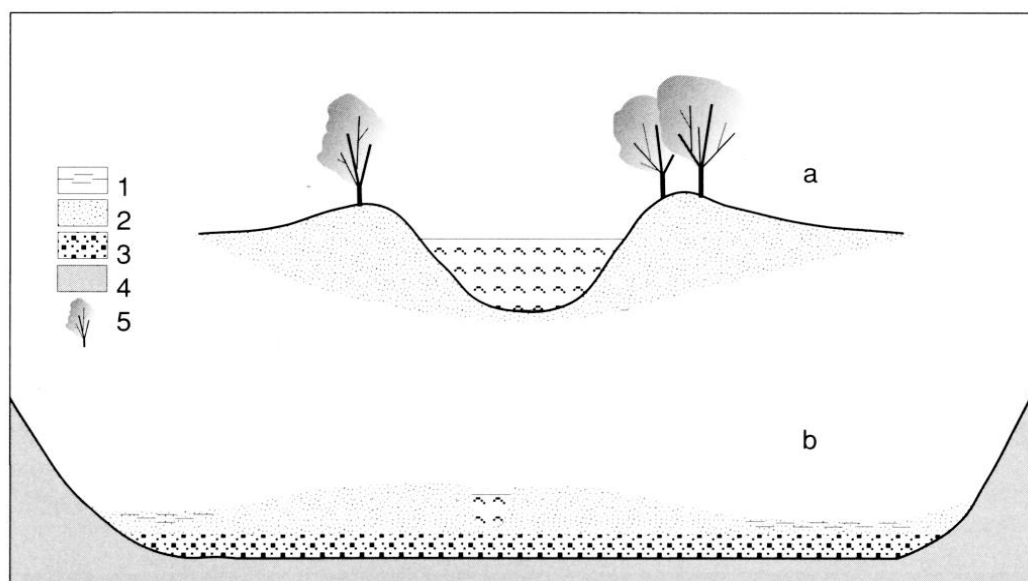


Fig. 4 – Bourrelets de berges (a) et profil transversal en toit (b). 1 : argiles ; 2 : limons ; 3 : galets ; 4 : substrat ; 5 : ripisylve.

Fig. 4 – *Natural levee (a) and roof-shaped transverse profile (b). 1: clays; 2: loam; 3: pebbles; 4: bedrock; 5: riverine forest.*



l'inverse des situations précédentes. Les dépôts du lit majeur se distinguent plus difficilement de ceux du lit moyen, mais toujours nettement de l'encaissant.

Les indices complémentaires d'inondabilité

L'occupation du sol

Très souvent, la ripisylve (Amoros et Petts, 1993) constitue une indication de l'étendue du lit moyen. Elle a, en revanche, été éliminée du lit majeur par des labours, des pâturages et de la vigne, dont le parcellaire diffère souvent du parcellaire de l'encaissant, soit par les dimensions des parcelles, soit par leur orientation, soit encore par les deux.

Le plus souvent, les voies de communication et les noyaux de peuplement anciens évitent le lit majeur, ce qui en fait un critère complémentaire pour délimiter les zones inondables. Cependant, la réalité est parfois plus complexe car des constructions anciennes peuvent se situer en zone inondable comme à Vaison-la-Romaine (Ballais et Ségura, 1999) et à Mollans sur l'Ouvèze, à Anduze et à Cardet sur le Gardon d'Anduze, mais aussi dans la vallée de la Meuse, du Lot et de bien d'autres cours d'eau français. En revanche, ces constructions présentent systématiquement des formes d'adaptation aux inondations : niveau d'habitation au premier étage alors que le rez-de-chaussée est occupé par des remises, caves ou garages ou, plus simplement, batardeaux placés aux portes de ce rez-de-chaussée.

Les recherches historiques

La recherche de témoignages sur les crues historiques relève plutôt de la compétence des historiens et leurs travaux donnent d'excellents résultats (Meffre *in* Arnaud-Fassetta *et al.*, 1993) mais rares sont ceux qui s'y intéressent, ce qui nous a poussés à tenter de les suppléer. On peut ainsi, sans trop de difficultés, remonter au XVII^e siècle grâce aux archives (Salvador, 2001) et donc comparer parfois la surface couverte par une inondation donnée avec celle du lit majeur. Jusqu'à présent, nous n'avons pas observé de cas de débordement historique au-delà de la limite externe du lit majeur.

L'archéologie est aussi précieuse (Bravard *et al.*, 1990) quand elle permet de comparer le niveau actuel du lit majeur à celui contemporain de la construction d'une chapelle ou d'une cathédrale romane, comme dans les Pyrénées Orientales, à Vaison-la-Romaine (Ballais, 1992), ou encore d'une ferme sous Louis XIII dans les Gardons. Il en ressort que les lits majeurs ont tendance à se surélever depuis deux millénaires, au moins dans le Midi méditerranéen français.

L'efficacité avérée de la cartographie hydrogéomorphologique

Si la cartographie hydrogéomorphologique a sans doute longtemps été considérée comme naturaliste, insuffisamment basée sur les sciences dites exactes par les hydrauliciens et les aménageurs, la démonstration de son efficacité en matière de diagnostic du risque d'inondation a pu être faite à de nombreuses reprises, malheureusement au hasard

de catastrophes. Tel a été le cas en particulier pour la vallée de l'Eze, sur les communes de Pertuis et la Tour d'Aygues (Vaucluse) en 1993, ainsi que, successivement, pour les vallées du Var sur la commune de Nice et celle du Lot sur la commune de Mende en 1994, celle de l'Agly sur les communes de Rivesaltes et de Saint Laurent de la Salenque (Pyrénées-Orientales) en 1999 (rapports d'études non publiés, CETE Méditerranée) (fig. 1). À chaque fois, la délimitation des zones inondables, réalisée quelques mois (ou quelques années pour Rivesaltes) avant la catastrophe, a été confirmée en tous points par les observations postérieures à la crue.

La signification hydraulique des limites des unités hydrogéomorphologiques : le cas des inondations de novembre 1999

Une vérification a pu être effectuée, cette fois-ci en dressant des cartes, toujours en application stricte des principes de la méthode, à la suite des crues qui ont affecté les départements de l'Aude, des Pyrénées Orientales, du Tarn et de l'Hérault en novembre 1999 (rapport d'étude non publié, CETE Méditerranée). Cette cartographie, fondée sur l'interprétation des photographies aériennes au 1/15 000 que l'IGN a prises quelques jours après l'événement, a porté sur les aspects suivants : hydrogéomorphologie et morphodynamique (érosions - sédimentations) engendrées par ces crues, occupation des sols, localisation et identification des dégâts. Les résultats obtenus ont pu être comparés avec les limites des zones inondées cartographiées par les Directions départementales de l'Équipement à partir des relevés des laisses de crues, et avec les limites des plans de surfaces submersibles (PSS) établis à la suite des grandes crues de 1940, 1930 et 1896, qui ont touché diverses parties du territoire affecté par les crues de novembre 1999. Cette analyse a permis de recueillir de multiples observations portant à la fois sur l'évaluation de la méthode hydrogéomorphologique et sur des problématiques relatives aux stratégies d'aménagement. Pour la première fois, il nous a été possible de comparer ces limites à celles de très grandes crues et de surcroît sur un linéaire de 350 kilomètres de cours d'eau. En effet, dans deux études antérieures (Eze, Lot), la crue observée, bien qu'importante, ne correspondait qu'à une fréquence cinquantennale ou centennale et n'atteignait pas la limite du lit majeur géomorphologique. À Nice, aucune comparaison détaillée n'avait été effectuée.

Le principal enseignement des crues de novembre 1999, au-delà de la confirmation de l'inondabilité globale des zones cartographiées, est la concordance entre les limites externes de lit majeur et celles de ces crues. Cette concordance concerne 80 % du linéaire étudié (fig. 5). Elle découle en premier lieu du fait que, conformément à la situation géomorphologique la plus communément rencontrée, la limite du lit majeur est constituée par le talus d'érosion, très pentu, résultant de l'entaille würmienne dans le milieu physique encaissant. Elle confirme le fait que ces crues font partie de la gamme la plus élevée des événements hydrologiques qui ont pu affecter ces vallées dans le passé.

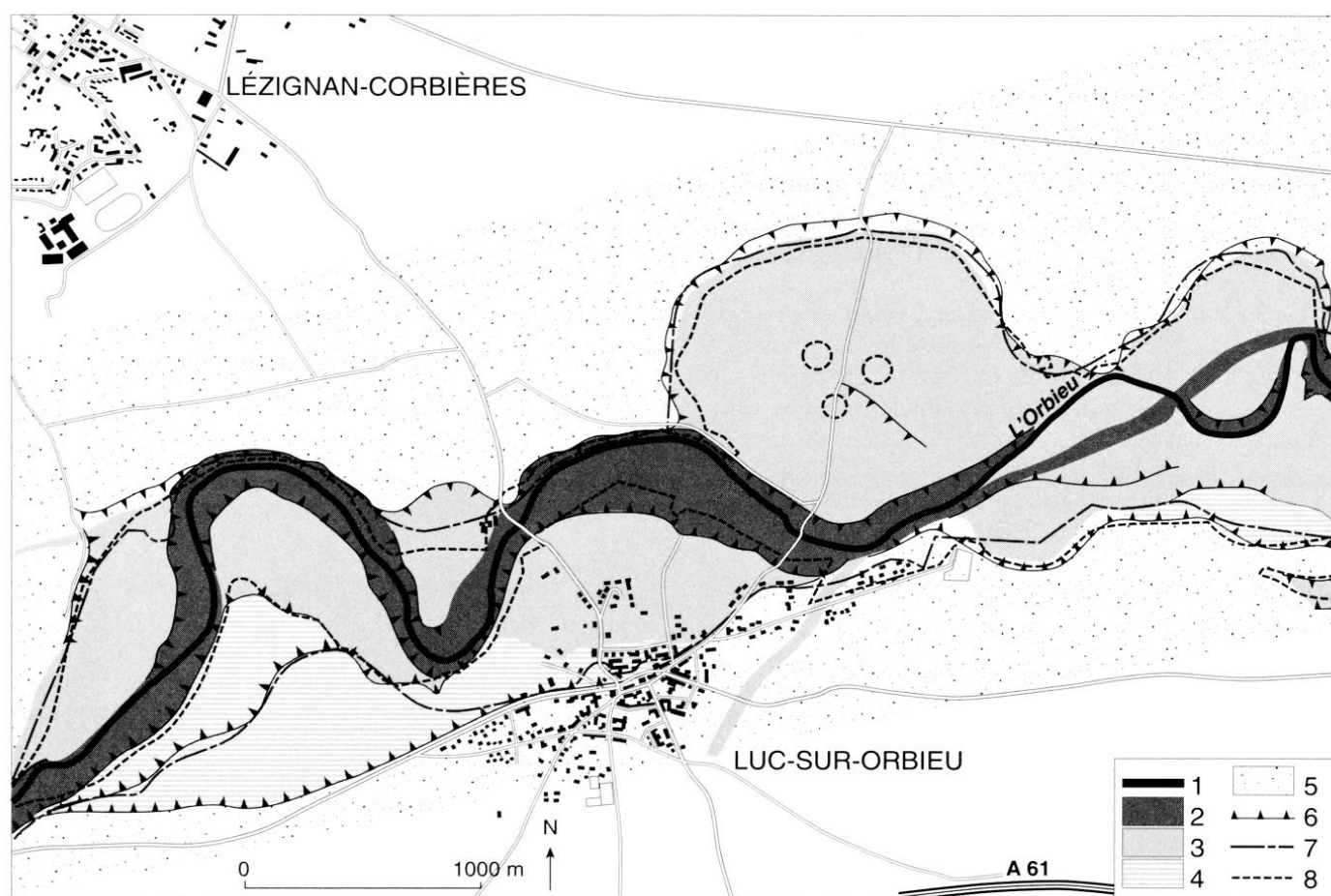


Fig. 5 – Carte hydrogéomorphologique le long d'un tronçon de l'Orbieu. 1 : lit mineur ; 2 : lit moyen ; 3 : lit majeur ; 4 : zone d'incertitude ; 5 : terrasse alluviale ; 6 : rebord de terrasse ; 7 : limite des laisses de crue (novembre 1999) ; 8 : limite des crues de 1930 et 1986 (PSS).

Fig. 5 – Hydrogeomorphological map along a reach of the Orbieu river. 1: low flow channel; 2: intermediate flow channel; 3: flood channel; 4: uncertainty zone; 5: alluvial terrace; 6: terrace scarp; 7: limit of flood marks (November 1999); 8: limit of the 1930 and 1986 floods (PSS).

Le linéaire restant correspond pour partie, soit à des tronçons de vallées où la crue n'a pas atteint son débit maximal, soit à des imprécisions affectant, selon les cas, la cartographie hydrogéomorphologique ou le relevé des laisses de crues. Ces imprécisions sont ponctuelles et ne jouent que sur 10 à 20 mètres de largeur en moyenne.

Pour 10 % environ du linéaire, l'inondation a dépassé, et parfois très largement, la limite du lit majeur géomorphologique. Celui-ci pourrait donc, en première analyse, ne pas intégrer les crues exceptionnelles. Or, il ressort très nettement de l'analyse que ces débordements sont systématiquement liés à la présence d'obstacles à l'écoulement des eaux. Ces obstacles provoquent une surélévation de la ligne d'eau à l'amont. À ce sujet, l'analyse détaillée met en évidence deux situations distinctes mais complémentaires. Le cas simple est celui d'un franchissement de la plaine alluviale, par une infrastructure routière ou ferroviaire équipée d'un ouvrage hydraulique de dimensions insuffisantes pour assurer l'écoulement des débits de grandes crues. Ainsi, dans le cas de la voie ferrée Narbonne-Carcassonne franchissant l'Orbieu à Villedaigne, la surélévation de la ligne d'eau s'est propagée sur une distance de trois kilomètres à l'amont de l'ouvrage, submergeant la terrasse rissienne (carte géolo-

gique au 1/50 000 de Lézignan-Corbières) surélevée de 5 m environ au-dessus du lit majeur sur une largeur de 200 à 400 mètres, en rive gauche. Le cas plus complexe résulte d'un effet de barrage dû à la même cause que précédemment, mais amplifié par la surélévation du niveau topographique de la plaine alluviale moderne par suite de l'accumulation de dépôts sédimentaires. La vallée de l'Aude présente une illustration remarquable de ce phénomène, du fait de l'ancienneté des ouvrages de franchissement qui barrent certaines plaines alluviales : 200 ans environ pour le canal de jonction traversant en remblai le lit majeur de l'Aude, plus de 300 ans pour le canal du Midi qui recoupe plusieurs vallées affluentes de rive gauche de l'Aude. Dans ces cas, le stockage temporaire des eaux de crue en amont des obstacles provoque la sédimentation des matières en suspension. Il s'ensuit, sur une longue période, une modification géomorphologique de la plaine alluviale. Ainsi, dans le cas de l'Argent Double, le talus séparant le lit majeur de la terrasse rissienne, très marqué à l'aval de l'ouvrage, est effacé à l'amont, ce qui provoque l'extension du champ d'inondation sur la terrasse (fig. 6).

Ces observations viennent compléter des résultats déjà acquis sur d'autres vallées comme celles du Gardon d'Anduze

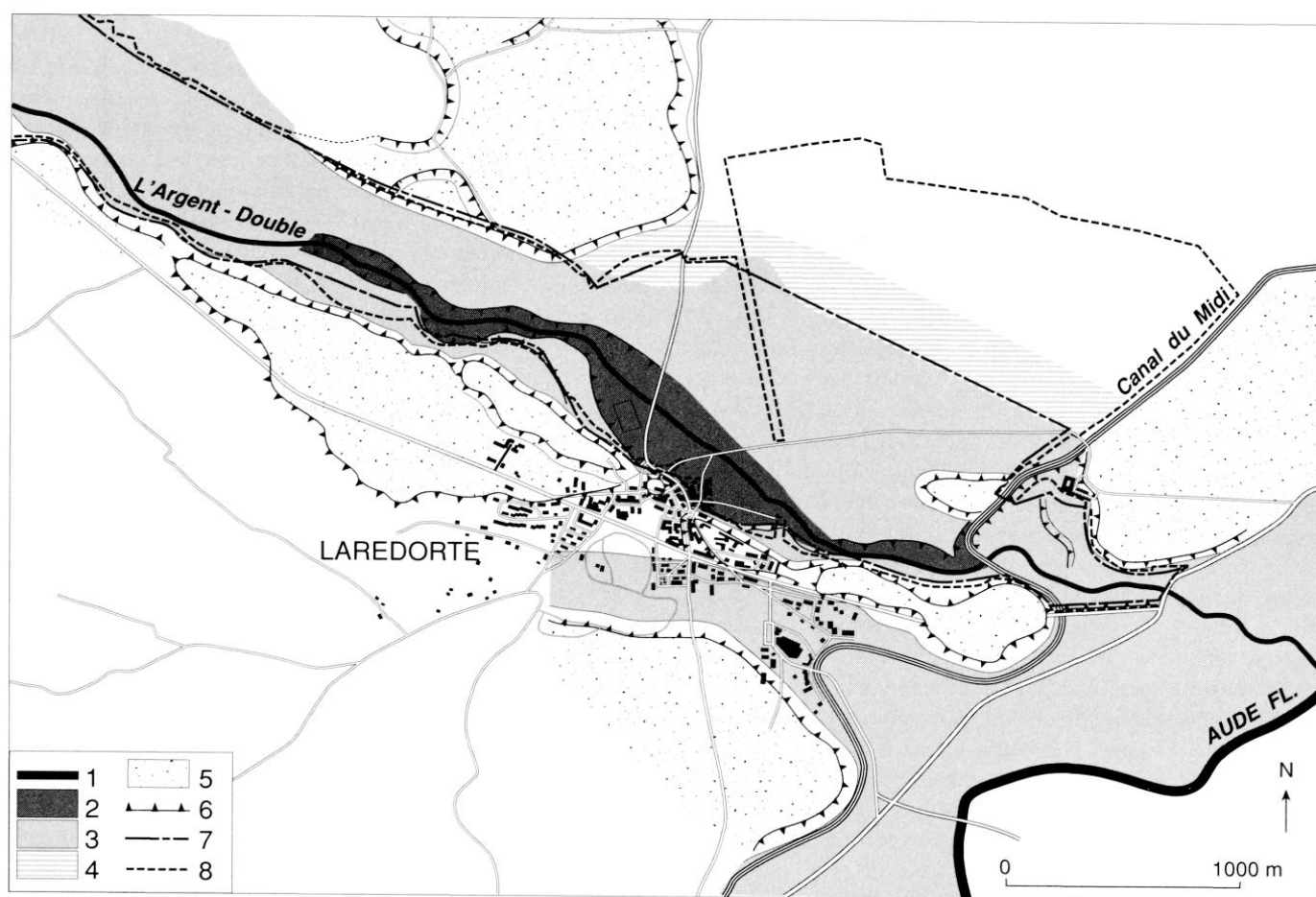


Fig. 6 – Carte hydrogéomorphologique le long d'un tronçon de l'Argent Double : extension du champ d'inondation sur une terrasse en amont du remblai du Canal du Midi du fait de la surélévation du lit majeur par accumulation sédimentaire. 1 : lit mineur ; 2 : lit moyen ; 3 : lit majeur ; 4 : zone d'incertitude ; 5 : terrasse alluviale ; 6 : rebord de terrasse ; 7 : limite des laisses de crue (novembre 1999) ; 8 : limite des crues de 1930 et 1986 (PSS).

Fig. 6 – Hydrogeomorphological map along a reach of the Argent Double: extension of flood plain over an alluvial terrace upstream from the embankment of the Canal du Midi, which determines a raising of the flood channel as a consequence of sedimentation. 1: low flow channel; 2: intermediate flow channel; 3: flood channel; 4: uncertainty zone; 5: alluvial terrace; 6: terrace scarp; 7: limit of flood marks (November 1999); 8: limit of the 1930 and 1986 floods (PSS).

ou de l'Ouvèze, où sans même la présence d'obstacles transversaux anthropiques, des sédimentations rapides ont pu être observées et partiellement datées par la mesure d'isotopes radioactifs et les recoupements avec des relevés de fouilles. Il est ainsi apparu que l'épaisseur des dépôts pouvait atteindre 0,20 à 0,30 mètres pour une seule grande crue (celle de 1958 sur les Gardons, en particulier). Ce phénomène explique l'inondabilité de plusieurs villages des plaines de l'Aude, à l'amont du canal de jonction. Certains d'entre eux, pourtant implantés initialement sur la terrasse rissienne, ont été recouverts de 1 à 2 mètres d'eau (cas de Sallèles et de Raissac). Le phénomène, qui affecte peu ou prou un linéaire sans doute important (mais aujourd'hui non encore déterminé) de vallées françaises, imposera à coup sûr à l'avenir de reconsidérer les stratégies actuelles de prévention et de protection (Masson, 1993). Il pose entre autres le problème de la fiabilité des résultats des traitements statistiques portant sur les crues historiques, lesquelles sont aujourd'hui prises en compte selon l'hypothèse implicite de l'absence d'évolution des lits majeurs.

La remise en question de certains fondements des stratégies d'aménagement

La prévision de l'inondabilité des plaines alluviales constitue la pierre d'angle des stratégies *a priori* rationnelles prévalant pour l'aménagement des plaines alluviales. Or, confirmant et amplifiant les observations réalisées depuis une dizaine d'années, les crues de novembre 1999 remettent fortement en question les bases même de ces stratégies 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.

De sérieux doutes pesaient déjà sur la pertinence de la différenciation des fréquences de crues, souvent poussée jusqu'au pointillisme (périodes de retour de 2, 5, 10, 20, 30, 50 et 100 ans, voire 250 ou 1000 ans), alors que la cartographie hydrogéomorphologique ne permet de mettre en évidence que 3 à 4 unités fonctionnelles dans une plaine alluviale moderne.

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 novembre 1999 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 urbanisations récentes implantées au-delà des limites des crues centennales (cas de la Berre) ou de la plus grande crue connue (cas de l'Orbieu) montrent l'importance des marges d'erreur liées à ces approches. Ces imprécisions tiennent à la fois à l'extension de l'emploi des calculs de 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 contexte hydrologique fonctionnant selon le principe du tout ou rien, c'est-à-dire avec 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 régions méditerranéennes, où la limite hydrogéomorphologique constitue, semble-t-il, la seule référence fiable. 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 et l'entretien des cours d'eau peuvent s'avérer efficaces vis-à-vis de crues d'intensité 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 des champs d'expansion des crues des lits majeurs dans les parties du bassin versant moins affectées par les intensités pluviométriques maximales mais contribuant à la formation des débits extrêmes à l'aval.

Les secteurs qualifiés d'aléas moyens à faibles correspondent aux lits majeurs, considérés comme urbanisables sous certaines conditions. Or, les crues de 1999 montrent que ces lits majeurs peuvent être recoupés par des courants violents empruntant la ligne de plus grande pente, en particulier dans le cas de méandres bien formés, comme pour l'Orbieu (lotissement de Luc-sur-Orbieu). Il en va de même dans les parties aval des vallées, où des lits en toit peuvent donner lieu à des changements brutaux de tracé, à la suite ou non de ruptures de digues (cas des basses plaines de l'Aude).

Dans le passé, des urbanisations 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 (Fabre *et al.*, 1994), les crues de 1999 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, dans l'Aude ou Estagel dans les Pyrénées Orientales, etc.).

En règle générale, les cas observés dans l'Aude et les Pyrénées-Orientales mettent en évidence des constructions urbaines anciennes implantées hors des zones inondables,

souvent sur une terrasse alluviale, et *a contrario* des extensions urbaines empiétant plus ou moins largement sur le lit majeur, voire sur le lit moyen. Parallèlement, la cartographie géomorphologique montre l'existence, à proximité immédiate de ces urbanisations, de vastes espaces *a priori* favorables à l'expansion urbaine, par exemple sur les terrasses alluviales. Ce constat a servi, peu de temps après la catastrophe, à amorcer une réflexion relative aux espaces propices au redéploiement urbain nécessité par l'abandon de ceux qui, construits ou en voie de l'être, avaient été dévastés par les crues. Sur les communes de Durban et de Villeneuve-Corbières, choisies à titre expérimental, la démonstration a ainsi pu être faite de l'efficacité de cette démarche, engagée sur la base d'une cartographie géomorphologique appliquée et menée à terme au moyen d'approches plus urbanistiques et environnementalistes.

Ainsi, le constat, d'une part de la nécessité de faire évoluer les méthodes de diagnostic du risque d'inondation et d'aménagement des espaces fluviaux, et d'autre part de la possibilité, vérifiée plus succinctement à maintes autres reprises, d'orienter de manière plus rationnelle le développement spatial urbain, conduit à proposer une réorientation des stratégies d'aménagement dans le sens :

- d'un renforcement de la prévention, par une application stricte des Plans de Prévention des Risques (PPR) d'inondation, pour prendre en compte, au-delà de la crue centennale ou de la crue de référence, la limite hydrogéomorphologique du lit majeur et l'hydrodynamique de la rivière liées à ses crues exceptionnelles ;

- de l'étude et de la mise en œuvre, au travers de projets de développement et des plans locaux d'urbanisme (PLU), de solutions alternatives, mobilisant l'espace communal, voire intercommunal, de manière plus large et plus souple.

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

Conclusion

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 (rivières et ruissellement urbain) 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 et s'inscrit, de ce fait, parfaitement dans la logique développée au sein de la loi Solidarité et Renouvellement Urbains. Elle ouvre un champ d'application nouveau, tant aux professionnels qu'aux étudiants, et doit être, à ce titre, largement diffusée et enseignée à l'université.

Références

Amoros C., Petts G.E. (sous la direction de) (1993) – *Hydrosystèmes fluviaux*. Coll. Écologie, Masson, Paris, 300 p.

- Arnaud-Fassetta G., Ballais J.L., Béghin E., Jorda M., Meffre J.C., Provansal M., Roditis J.C., 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* 2, 34-48.
- Ballais J.-L. (1992)** – Rapport sur les observations effectuées dans le secteur de Pomorol à Vaison-la-Romaine le 29 juin 1992. 2 p., inédit.
- Ballais J.L. (1995)** – Alluvial Holocene terraces in eastern Maghreb: Climate and anthropogenic controls. In J. Lewin, M.M. Macklin, J.C. Woodward (eds) *Mediterranean Quaternary River Environments*, A.A. Balkema, Rotterdam, 183-194.
- Ballais J.L., Séguin P. (1999)** – La catastrophe de Vaison-la-Romaine (22 septembre 1992) : une inondation dans un géosystème anthropisé, In P. Gabert, J. Vaudour (eds) *Risques naturels*, éditions du CTHS, Paris, 41-48.
- Bravard J.P., Bot-Helly A., Helly B., Savay-Guerraz H. (1990)** – Le site de Vienne (38), Saint-Romain (69), Sainte-Colombe (69). L'évolution de la plaine alluviale du Rhône, de l'Âge du Fer à la fin de l'Antiquité : proposition d'interprétation. *Archéologie et Espaces*, APDCA, Juan-les-Pins, 437-452.
- Bravard J.P., Petit F. (1997)** – Les cours d'eau, dynamique du système fluvial. Armand Colin, Paris, 222 p.
- Coque R. (1993)** – *Géomorphologie*, A. Colin, Paris, 452 p.
- Fabre G., Lequeux J.M., Scheurer P. (1994)** – Hydraulique pluviale à Nîmes après le 3 octobre 1988. *La Houille Blanche*, 8, 6-11.
- Garry G. (1985)** – *Photo-interprétation et cartographie des zones inondables*. Ministère de l'Environnement, Ministère de l'Équipement, éditions du STU, Paris, 74 p.
- Garry G. (1993)** – *Le risque d'inondation en France. Recherche d'une approche globale du risque d'inondation et de sa traduction cartographique dans une perspective de prévention*. Thèse de Doctorat de l'Université de Paris I, Panthéon-Sorbonne, 509 p.
- Garry G. (1994)** – Évolution et rôle de la cartographie dans la gestion des zones inondables en France. *Mappemonde*, 4, 10-16.
- Garry G., Grasz E. (1999)** – *Plans de Prévention des Risques Naturels (PPR) : risques d'inondation, Guide méthodologique*. Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement, Ministère de l'Équipement, Documentation Française, Paris, 123 p.
- Lambert R., Gazelle F., Gholami M., 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, 147-164.
- Masson M. (1983)** – *Essai de cartographie des champs d'inondation par photo-interprétation*. Rapport CETE Méditerranée, STU, Paris, 47 p.
- Masson M. (1993)** – Après Vaison-la-Romaine : Pour une approche pluridisciplinaire de la prévision et de la planification. *Revue de Géomorphologie dynamique*, 2, 73-77.
- Masson M., Garry G., Ballais J.-L. (1996)** – *Cartographie des zones inondables. Approche hydrogéomorphologique*. Editions Villes et Territoires, Paris La Défense, 100 p.
- Salvador P.-G. (2001)** – L'évolution holocène de la plaine alluviale de l'Isère dans l'ombilic de Moirans (Isère, France). *Quaternaire*, 12, 1/2, 127-135.
- Tricart J. (1974)** – Phénomènes démesurés et régime permanent dans les bassins montagnards (Queyras et Ubaye, Alpes françaises). *Revue de Géomorphologie dynamique*, 3, 99-114.
- Veyret Y. (sous la direction de) (1998)** – *L'érosion entre nature et société*. Dossiers des Images Economiques du Monde, SEDES, Paris, 339 p.

Manuscrit reçu le 15 février 2001, accepté le 15 septembre 2001