DIX ANS DE RECHERCHES HYDROGEOMORPHOLOGIQUES DANS LE DÉPARTEMENT DE L'AUDE ET UNE QUESTION : COMMENT PARVENIR A REDUIRE LE RISQUE DE CRUE EN DOMAINE MEDITERRANEEN ?

par ARNAUD-FASSETTA Gilles[1], FORT Monique[2]

[1] *Université Paris-Est Créteil Val-de-Marne (Paris 12), CNRS UMR 8591 (LGP Meudon) et UMR 8586 (PRODIG), gilles.arnaud-fassetta@u-pec.fr*

[2] *Université Paris-Diderot (Paris 7), CNRS UMR 8586 (PRODIG), fort@univ-diderot.fr*

Résumé *: Les 12 et 13 novembre 1999, plusieurs départements du sud de la France dont celui de l'Aude ont été touchés par des crues et des inondations de grande ampleur. Sur l'Argent-Double, le Rivassel et l'Orbiel, l'impact hydromorphologique et humain de la crue a montré les limites du système actuel de gestion du risque d'inondation. Après la crise, la situation a mis en lumière l'urgence de mesures destinées à atténuer l'impact de tels événements dans la plaine alluviale et sur les interfluves. Pour cela, le recours à des solutions durables est plus que jamais requis et des propositions ont été faites concernant le réaménagement de la plaine alluviale. Parmi ces propositions, celle consistant à ne prendre en compte que la capacité de stockage de la plaine d'inondation par ailleurs fortement occupée, ne va pas dans le sens d'une atténuation des effets des grosses crues et de la vulnérabilité sociétale. Cette option conduit même à accroître localement la vulnérabilité des populations vivant dans le lit majeur. Des propositions alternatives sont basées sur la prise en compte de la variabilité spatio-temporelle des bandes actives et des changements de tracé pour une meilleure intégration de la dynamique fluviale récente. L'application du concept d'espace de liberté devrait permettre de réduire les débordements, en redonnant une capacité suffisante au chenal, à savoir celle qu'il avait avant sa contraction artificielle de la fin du XIXe et du début du XX^{è} siècles. Une gestion intégrée des flux hydriques et sédimentaires dans les vallées est incontournable, incluant celle des interfluves, du ruissellement pluvial et des risques d'érosion et de pollution éventuellement induits, de la plaine d'inondation, des berges et du chenal où le choix existe entre équipements hydrauliques lourds et gestion douce. Cette dernière solution devrait être systématiquement adoptée là où le cours d'eau a encore un comportement naturel.*

Mots clés *: Hydrogéomorphologie, crue méditerranéenne, géographie des risques, gestion durable*

Abstract: *On November 12-13 1999, several counties of the South of France -among which the Aude Department- were affected by floods and inundations of large magnitude. Along the Argent-Double, Rivassel and Orbiel rivers, the hydro-geomorphic and human impacts of the flood have evidenced the limits of the present system of flood management. Once the crisis was over, the situation left behind highlighted the urgent need of measures aimed to mitigate the impact of such events in the alluvial floodplain and along the hillslopes. For that, the recourse to sustainable solutions is all the more required, such as the new proposals suggested for a new management of the floodplain. Among these proposals, one of them consists in taking in consideration only the storage capacity of the floodplain (characterised by the density of its land-use), a solution not adequate to mitigate the impacts of the largest floods and to reduce the societal vulnerability. Evenmore, this option leads to locally increase the vulnerability of population living in the floodplain. Alternative proposals are based on the consideration of the spatio-temporal variability of the active channel, and of stream pattern changes for a better integration of the recent fluvial dynamics. The application of the concept of the stream-way (or freedom space) should permit to reduce the overflows and to give again to the channel a sufficient capacity,* i.e. *the capacity it had before its artificial contraction that was carried at the end of the XIXth century and beginning of XXth century. More than ever an integrated management of the water and debris fluxes in the valleys is required, that includes (i) hillslopes management and consideration of, pluvial runoff, indirect risks of gullying and water pollution; together with (ii) floodplain management, from river banks to the channel, where several options exist between heavy (and costly) flood control structures and "environmentally friendly", low-cost structures which should be encouraged where the rivers are still natural and free-flowing.*

Keywords: *Hydrogeomorphology, Mediterranean flood, Geography of Risks, Sustainable Management*

1. Introduction

Les travaux que nous avons conduits dans le département de l'Aude, suite à la crue catastrophique de 1999, ont été avant tout une grande aventure scientifique et humaine et nous tenions à commencer par remercier l'ensemble des collaborateurs avec qui nous avons œuvré, des collègues aux étudiants de l'université Paris-Diderot, des riverains aux gestionnaires. En effet, l'Aude a été pour nous,

enseignants chercheurs, un laboratoire à ciel ouvert dévolu à la pédagogie et à la recherche, par le biais des nombreuses missions effectuées après la crue de 1999 tout autant que par les stages de terrain avec les étudiants (un à deux stages par an) aboutissant à des restitutions *in situ* d'analyses et de résultats, en présence d'élus locaux et de responsables de syndicats de bassin (figure 1).

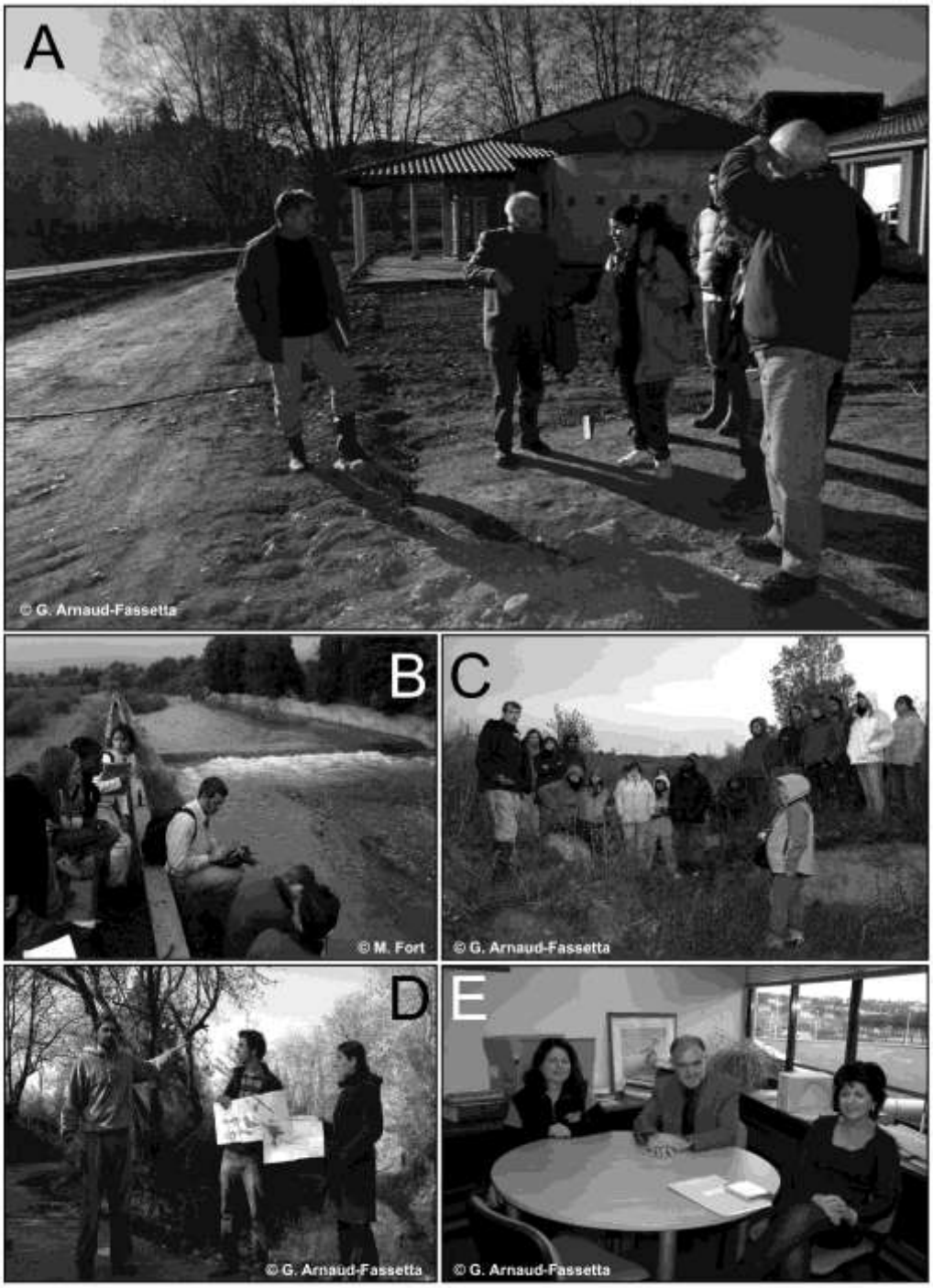

Figure 1. Travaux de terrain, enquêtes auprès des sinistrés (A), relevés de mesures et cartographie avec les étudiants du master EDMR (Espace, dynamique des milieux et risques ; B, D), rencontre avec les techniciens de rivière et les responsables du SMMAR (C, E).

L'intérêt que nous avons accordé aux effets des crues dans cette région est venu de deux principaux faits : 1) cela s'est inscrit dans le prolongement en Languedoc-Roussillon d'études de crues (Ouvèze 1992, Arnaud-Fassetta *et al*., 1993 ; Rhône 1993-1994, Arnaud-Fassetta, 1998, …) survenues en domaine méditerranéen ; 2) la crue de 1999 dans le bassin de l'Aude a permis d'affiner les bases d'une cartographie hydrogéomorphologique réalisée aux échelles fines (Fort *et al*., 2001 ; Arnaud-Fassetta *et*

al., 2002), comme support à l'étude des risques de crue pluviale et fluviale et à la réalisation des Plans de Prévention des risques d'Inondation (PPRI ; Arnaud-Fassetta *et al*., 2004), dans une région par ailleurs fortement marquée par les effets de la forte pression foncière et de la crise viticole, tout autant que par la complexité de la gestion du risque d'inondation.

Cette entreprise n'aurait pas été possible sans un lien étroit entre enseignants chercheurs, étudiants et professionnels, dans le cadre plus général d'une collaboration avec les structures locales. Dans un premier temps (1999-2003), nous avons entrepris de collaborer avec l'unique structure de gestion des crues qui existait dans le bassin, le SIAHBAD (Syndicat Intercommunal d'Aménagement Hydraulique des Berges de l'Argent-Double), piloté par la commune de Peyriac-Minervois. Sur la base d'un travail d'échanges avec les élus locaux et les riverains, l'objectif était de parvenir à définir de la meilleure façon qui soit l'espace de « bon fonctionnement » des rivières et apporter ainsi une aide plus efficace à la gestion de la dynamique fluviale (Plet *et al*., 2002). En parallèle, des collaborations fructueuses étaient établies, d'une part avec la DDE (Direction Départementale de l'Equipement) et le Conseil Général de l'Aude basés à Carcassonne, à l'occasion de l'établissement des PPRI, et d'autre part avec les élus de la commune de La Redorte, auprès desquels nous avons joué le rôle de consultants et apporté notre caution scientifique en validant (ou pas) les projets proposés par les bureaux d'étude, dans la phase post-PPRI. Plus récemment (à partir de 2004), est venu s'ajouter un contrat avec la nouvelle structure interbassins, le SMMAR (Syndicat Mixte des Milieux Aquatiques et des Rivières), dont le directeur, Jacques Chabaud, nous a sollicité à plusieurs reprises et commandité un rapport d'expertise sur le bassin de l'Argent-Double (Arnaud-Fassetta *et al*., 2004).

Cette collaboration avec les différents acteurs du risque d'inondation et partenaires de leur gestion s'est traduite de notre part par un travail à deux niveaux et en deux temps : le retour d'expérience, dans le contexte de « gestion de crise », et la participation à la prévention des crues comme une aide à la gestion des risques (figure 2). Dans cet article, entre autres choix, nous avons tenu à faire valoir la contribution des hydrogéomorphologues dans l'analyse des crues, de leur cause à leurs effets sur les sociétés et leur gestion en termes de prévention, protection et prévision des crues. De cette analyse, débouchant sur la compréhension des phénomènes de crue et la quantification des processus physiques associés, a découlé la possibilité de formuler, données de terrain à l'appui, des propositions d'aménagement et de gestion de l'utilisation des sols des versants à la plaine alluviale et de l'amont du bassin à son exutoire. Les point abordés dans cet article sont donc : l'analyse systémique des facteurs de la crue de 1999, ses impacts morphodynamiques et les différentes stratégies de gestion (en cours et futures) des inondations.

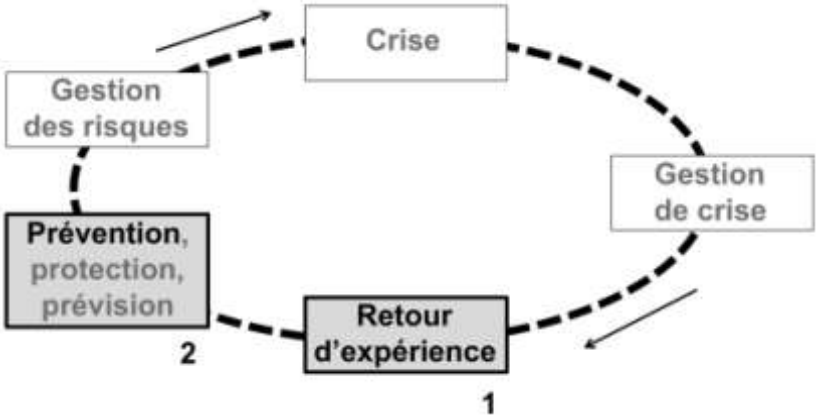

Figure 2. Approche conceptuelle de la crise à la gestion des risques. Implication des universitaires dans le retour d'expérience (étape 1) et la participation à la prévention des crues (étape 2).

2. Retour sur la crue de référence (12-13 novembre 1999) : la contribution des hydrogéomorphologues

Les bassins versants que nous avons choisi d'étudier (Cesse, Ognon, Argent-Double, Rivassel, Clamoux, Orbiel) sont situés en rive gauche de l'Aude, au contact entre la Montagne Noire, essentiellement schisteuse et calcaire, et le piémont du Minervois, dominé par des formations molassiques tertiaires (figure 3).

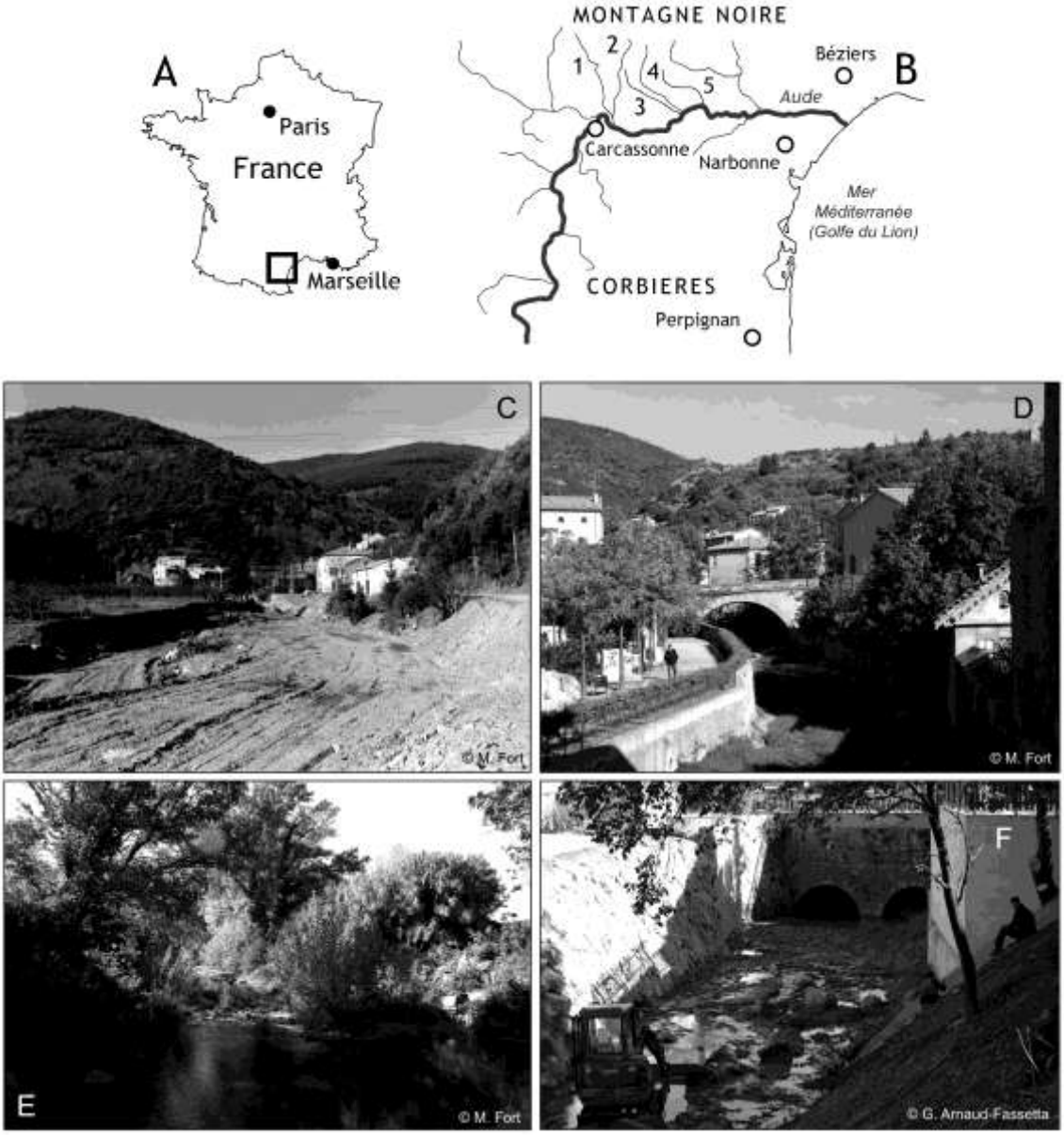

Figure 3. Localisation des bassins versants étudiés et caractéristiques physiques et humaines des fonds de vallée. A : Localisation de la zone d'étude ; B : Hydrographie du bassin de l'Aude (1 : Orbiel ; 2 : Clamoux ; 3 : Rivassel ; 4 : Argent-Double ; 5 : Ognon). C : Rieussec ; D : Caunes-Minervois ; E : Seuil entre Peyriac-Minervois et Rieux-Minervois ; F : La difficile traversée du Rivassel sous le Canal du Midi.

L'Argent-Double a été le bassin-versant que nous avons étudié en priorité car pleinement représentatif des impacts que la crue de 1999 a fait subir aux fonds de vallée et leurs versants adjacents ; les effets de la crue ont pu être mesurés dans deux unités morphostructurales et biogéographiques distinctes (montagne et piémont) ; le bassin s'inscrit dans la zone qui a reçu les plus fortes précipitations (400-500 mm) lors de l'événement ; le Canal du Midi a entravé sérieusement l'écoulement des flux de crue dans la partie aval ; le bassin hydrographique est équipé à La Redorte

d'une station hydrologique dont les données d'archives ont permis le calcul des hauteurs d'eau et débits de référence ; la dynamique récente de l'occupation du sol est à l'image de la région du Minervois (extension des bourgs ruraux, des vignobles et des vergers ; figure 4) ; le bassin était également doté d'une structure intercommunale de gestion des crues, le SIAHBAD, lorsque nous avons débuté nos travaux dans la région.

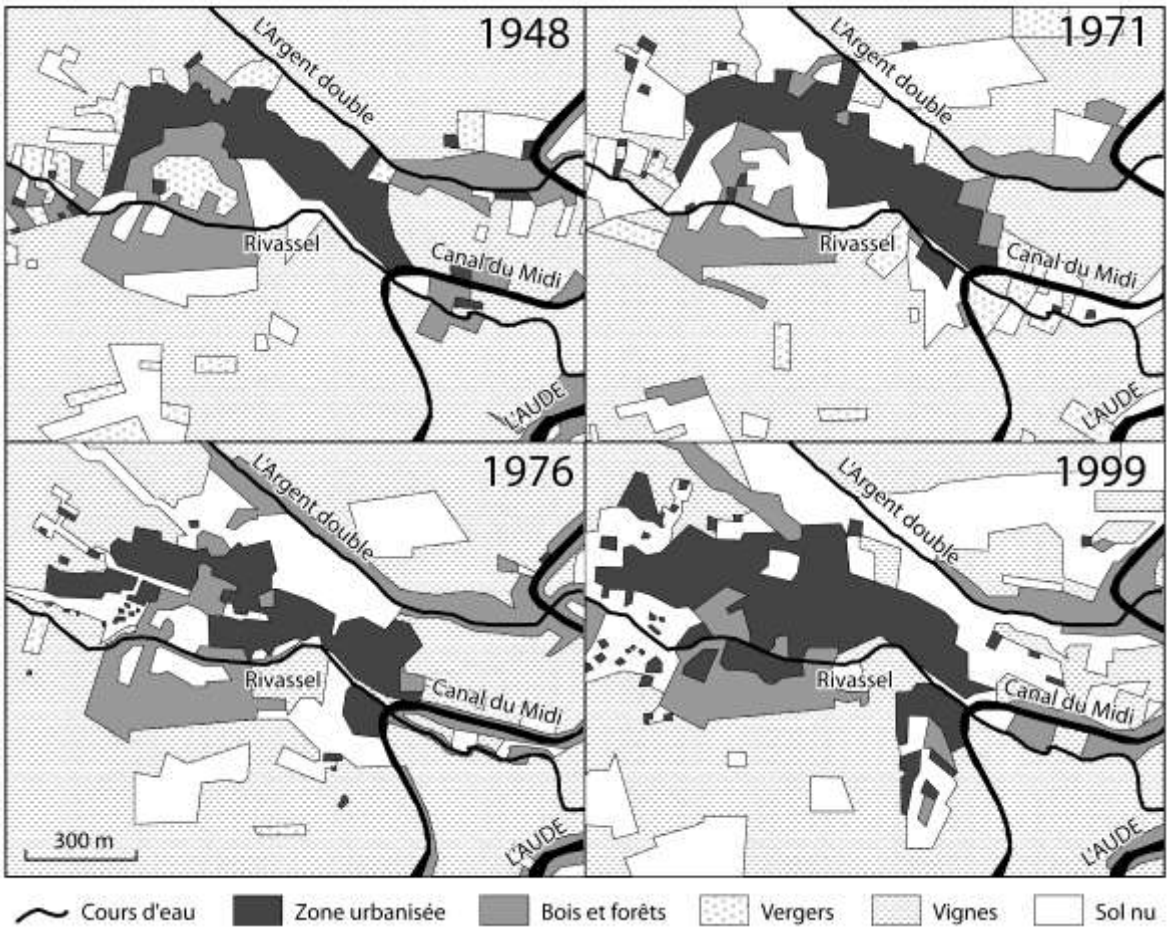

Figure 4. En près de 60 ans, on peut mesurer les changements d'occupation du sol sur la commune de La Redorte : disparition des vergers et progression de l'urbanisation et des sols nus, favorisant le ruissellement (d'après Si Moussa, 2004, M2 EDMR Paris 7).

De petite taille (surfaces < 150 km^2), les bassins versants étudiés, et celui de l'Argent-Double en particulier, sont très sensibles aux aléas hydrologiques du fait de la fragilité des assises lithostructurales et des formations héritées du Quaternaire, des contrastes topographiques, des excès du climat méditerranéen et des modalités d'occupation et d'utilisation récentes des sols. Sur le piémont, les enjeux économiques et humains sont forts du fait du grand nombre de bourgs ruraux installés à proximité ou dans le lit des cours d'eau, de l'occupation croissante des fonds de vallée et des interfluves depuis plusieurs décennies, de l'encombrement récurrent des lits de rivière par la végétation, de l'étendue des vignobles et la réputation des vins qu'ils produisent, de l'importance des vergers, des bois de coupe et des jardins familiaux présents dans la plaine d'inondation et de la présence du Canal du Midi à l'exutoire des bassins. La compréhension de l'aléa de crue et des interactions de tous les paramètres précédemment cités d'une part, et la discussion de leurs effets morphodynamiques d'autre part, passe forcément par une rationalisation de l'analyse.

2.1. *L'analyse systémique*

L'analyse systémique nous a permis de définir et hiérarchiser l'ensemble des facteurs à l'origine de la crue catastrophique de 1999. Ainsi, trois groupes de facteurs ayant conduit à cette catastrophe ont pu être dégagés (figure 5) :

- *Groupe 1 : les facteurs prédisposants*. Ils sont d'ordre naturel : (1) Les bassins versants inscrits sur le contrefort méridional de la Montagne Noire sont exposés aux dépressions barométriques remontant de la Méditerranée vers le continent ; (2) Les réseaux hydrographiques favorisent l'écoulement vers le SE alors que les dépressions remontent en sens inverse (NW) ; (3) La montagne schisteuse, très pourvoyeuse en débris, s'oppose au piémont inscrit en roches sédimentaires, où les faibles pentes favorisent l'accumulation des débris.

- *Groupe 2 : les facteurs déclenchants*. Ils sont d'ordre météorologique et hydrologique. (4) L'aléa pluviométrique à l'origine de la crue de novembre 1999 fut particulièrement violent mais non exceptionnel. Une dépression centrée sur les Baléares (le 12/11) se décale vers le Golfe du Lion, apportant de l'air chaud et humide (forte instabilité relative) sur la façade méditerranéenne à l'ouest du Rhône alors que sur le nord-ouest de l'Europe, une puissante cellule anticyclonique (> 1035 hPa sur les Iles Britanniques) bloque ces remontées. Les plus fortes valeurs de précipitations (> 200 mm) ont affecté le bassin de l'Aude qui a reçu plus d'un milliard de mètres cubes en moins de 48 h. À partir d'une interpolation du champ pluviométrique réalisée par Météo-France, on a pu estimer que le bassin-versant de l'Argent-Double a reçu environ 300 mm de précipitations en 48 h, soit environ 40 Mm^3. Située au contact montagne/piémont, la station de Caunes-Minervois a enregistré 430 mm en deux jours (12-13/11) ; l'essentiel des précipitations est tombé en 24 h, dont près de 200 mm entre 18 h et 23 h le 12/11, ce qui constitue un record non seulement pour la station mais aussi pour l'événement puisque seule la station de Lézignan-Corbières a enregistré des valeurs sensiblement supérieures (230 mm entre 21 h et 24 h le 12/11, 620 mm en 48 h). (5) Les trombes d'eau qui se sont abattues sur les sous-bassins versants les 12 et 13 novembre 1999 ont naturellement contribué à gonfler le débit de l'Aude (3400 m^3/s) et celui de ses affluents. En l'absence de mesures, les limnimètres ayant été détruits, le débit de pointe (Q) de l'Argent-Double sur le piémont a été estimé entre 191 m^3/s (Caunes-Minervois) et 400 m^3/s à La Redorte (Arnaud-Fassetta *et al*., 2002). Ces valeurs correspondent à un débit de récurrence de 30-50 ans, permettant ainsi de relativiser le caractère exceptionnel de cette crue. Au total, l'importance du débit liquide de l'Argent-Double - quand on sait que son module ne dépasse pas 1,1 m^3/s - a libéré une énergie et une force très vives. La puissance spécifique (ω) et la force tractrice (τ_o) ont été estimées à 2734 W/m^2 et 690 N/m^2 au sortir de la montagne (Caunes-Minervois) et à 592 W/m^2 et 229 N/m^2 à proximité de la confluence avec l'Aude (La Redorte), expliquant ainsi les ajustements morphologiques remarquables observés dans le lit fluvial et sur ses marges (Arnaud-Fassetta et Fort, 2008).

- *Groupe 3 : les facteurs aggravants, naturels ou d'origine humaine*. Il y eut d'abord des facteurs naturels : (6) Des pluies modérées en octobre et début novembre avaient contribué à saturer les sols. Durant la crue, la capacité d'infiltration des eaux de ruissellement a été rapidement réduite, accroissant ainsi les débits et le pic de crue. (7) Dans les secteurs en gorge, très étroits et fortement pentus, la rareté des zones de dissipation de l'onde de crue a permis à l'Argent-Double de garder toute son énergie sur le piémont. (8) Sur le piémont, les confluences ont été déterminantes dans l'apparition des défluviations, comme cela a été observé au débouché des ruisseaux des Lavandières (rive droite), du Saint-Christophe (rive droite) et du Souc (rive gauche). Dans les trois cas, les flots grossis et chargés de ces affluents ont été suffisamment puissants pour freiner l'Argent-Double et en refouler les eaux vers la rive opposée, entraînant du même coup une réduction de sa section mouillée. Ce phénomène, de surcroît accentué par le dépôt des alluvions charriées par les affluents, a provoqué la montée des eaux en amont de la confluence, rendant inévitables le débordement de l'Argent-Double et l'ouverture d'un nouveau chenal sur la rive opposée à l'affluent (Fort *et al*., 2001). (9) Le développement d'une ripisylve a favorisé les embâcles, puis des débâcles qui ont entraîné l'accroissement des pics de crue et l'ouverture de brèches. Il est vrai qu'entretenue, la ripisylve aurait été un facteur de moindre aggravation de la morphogenèse.

Mais des facteurs sociétaux ont ensuite aggravé la situation : (10) Le développement des zones urbanisées (anciennes ou récentes) sur les interfluves (terrasses alluviales quaternaires) a imperméabilisé les surfaces et renforcé le ruissellement. (11) La culture de la vigne, qui maintient le sol à nu, a augmenté la vulnérabilité des sols, et ce d'autant plus que les rangées (disposées dans le sens de la plus grande pente) étaient espacées (3 m pour les vignes récentes) et maintenues désherbées. (12) Dans la plaine alluviale, la substitution des vergers et des vignobles aux prairies originelles a

accru les phénomènes d'érosion (décapage, ravinement) provoqué par les flots débordants. (13) Les structures hydrauliques de protection (gabions, enrochements, murs de pierres sèches, murs de béton, seuils) n'étaient plus guère entretenues par les riverains et le SIAHBAD, ce qui a entraîné au fil du temps leur détérioration partielle, et limité leur efficacité lors de la crue. Leur discontinuité amont-aval a constitué des points de rupture ayant favorisé les ouvertures de brèche. Les murs ont entraîné la réflexion et le renforcement de la puissance de l'onde de crue sur la rive opposée devenue *de facto* plus vulnérable. Les ponts, en favorisant les embâcles, ont contribué à accroître la surface des zones inondées en amont puis à accroître la puissance fluviale et le pic de crue en aval lors des débâcles. Au total, les déficiences de l'aménagement hydraulique de la plaine alluviale ont contribué à une protection très faible des populations installées dans le fond de vallée et à la destruction d'un bon nombre de ces structures.

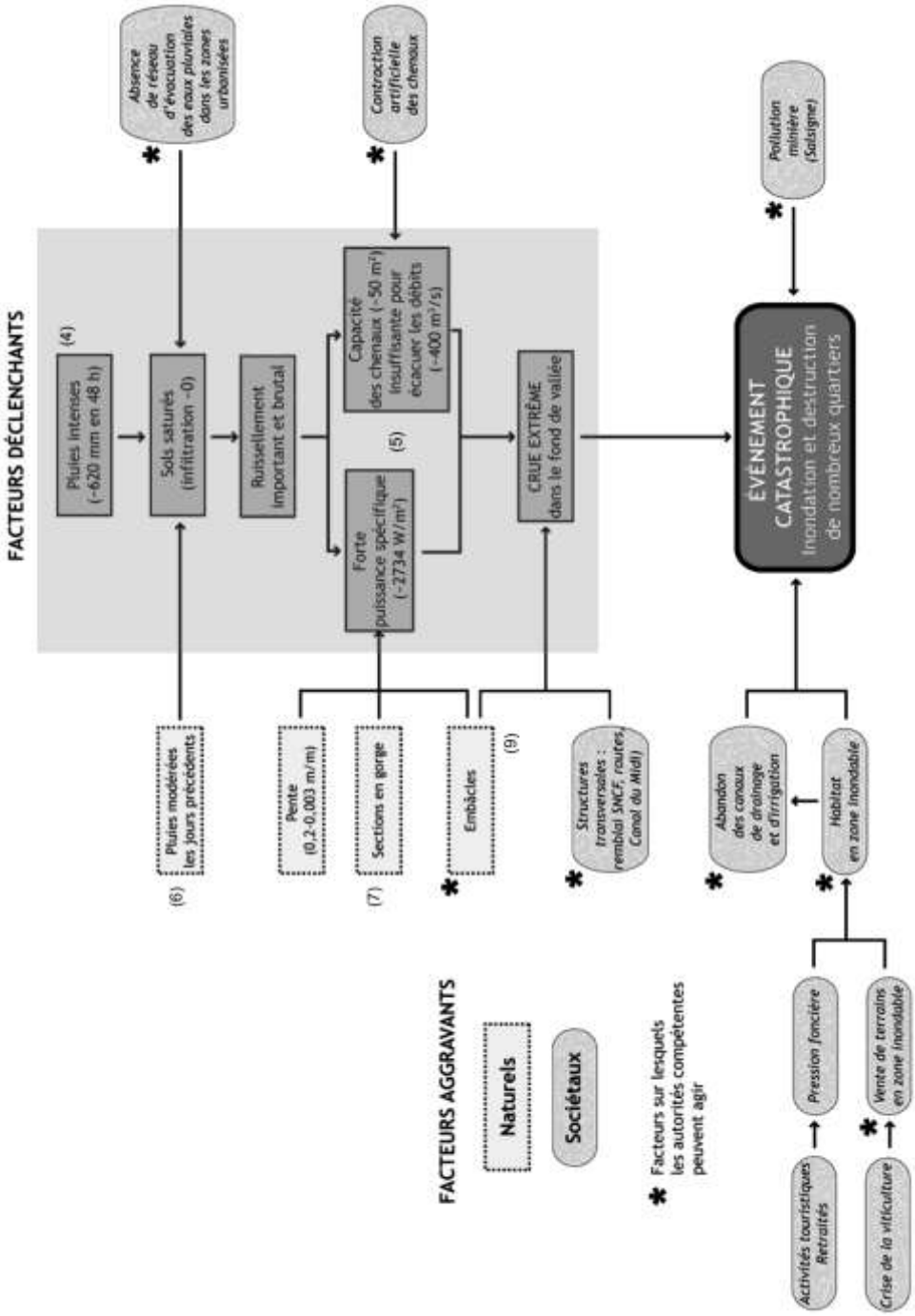

Figure 5. Approche systémique du risque de crue. On a distingué les facteurs déclenchant et aggravants, naturels ou anthropiques. Les chiffres indiqués correspondent aux estimations déduites de la crue de 1999.

2.2. *Photo-interprétation et cartographie de terrain des impacts morphodynamiques*

L'ampleur des dégâts constatés suite à la crue de 1999 traduit un dysfonctionnement de l'hydrosystème anthropisé qui n'était pas préparé à cela. Les indices de ce dysfonctionnement ont été plus nombreux dans la plaine alluviale que sur les versants.

Dans la Montagne Noire schisteuse, des arrachements et des glissements de terrain ponctuels ont été observés sur les versants raides, notamment sur les versants éboulisés plantés de cerisiers. Le matériel érodé est venu s'accumuler sous forme de cônes d'épandage gravelo-sableux au niveau de la concavité basale du versant. Par ailleurs, l'énergie des flots torrentiels a eu pour conséquence le creusement significatif (1-2 m) des planchers alluviaux mais surtout le sapement systématique des levées de berge, aboutissant à un élargissement des chenaux parfois de plusieurs mètres. En amont du hameau de Rieussec, le volume de débris schisteux arraché aux berges du Ruisseau de Gazel a été estimé à 3000 m^3 sur une longueur de 600 m, soit 5 m^3/m linéaire (Fort *et al*., 2001). Ainsi, les débris arrachés aux versants et aux berges ont rejoint les talwegs plus en aval où les flots de boue se sont alors transformés en écoulements hyperconcentrés voire en laves torrentielles, comme celle très destructrice initiée dans la traversée du hameau de Rieussec.

La crue fut encore plus morphogène sur le piémont molassique (Arnaud-Fassetta *et al*., 2002). Sur les bas-versants, des formes d'érosion hydrique s'observent dans de nombreux vergers et vignobles par la présence de rigoles et de ravines dont la profondeur (quelques décimètres à plus d'un mètre) est proportionnelle à la pente. Dans la plaine alluviale de l'Argent-Double, le récurage systématique du lit mineur s'est accompagné d'un élargissement parfois très important de la bande active, du décapage et du défoncement de la plaine d'inondation et de défluviations perpétrées à la faveur de brèches ouvertes dans les levées de berge. Les changements fluviaux ont même atteint le stade de la modification radicale du style fluvial et du tracé du cours d'eau. Dans le détail, les processus furent souvent complexes, associant en un même site érosion et sédimentation. Le secteur du Domaine Pautard, en aval de la confluence entre l'Argent-Double et le Ruisseau du Souc (ou du Cros), en donne une bonne illustration. L'élargissement et l'approfondissement du lit ont presque partout pour origine le sous-calibrage des sections mouillées de pleins bords. Outre la sous-estimation par les aménageurs des excès d'eau à évacuer lors des grosses crues, l'observation des photographies aériennes montre que le chenal était avant la crue de 1999 très encombré de sédiments sablo-limoneux mis en place dans le contexte de régime de basses eaux dominant qui a suivi les crues de 1987 et de 1996. Ce remblaiement avait été favorable à la contraction temporaire du chenal. A ceci s'ajoute le rehaussement du plancher alluvial résultant de l'accumulation progressive des sédiments à l'amont des nombreux seuils bétonnés. La crue de 1999 a donc eu pour premier effet d'accroître les sections mouillées. Dans les secteurs étroits, le lit se présente maintenant parfaitement récuré, le plus souvent jusqu'au substratum. Partout, on observe la dégradation de la ripisylve (troncs inclinés) ou son arrachage, associés à de nombreux sapements de berge.

L'érosion de la plaine d'inondation s'est faite quant à elle selon deux processus distincts, soit par destruction (incision de 40-80 cm sur 10-20 m de largeur) de la partie de plaine alluviale proche du chenal, soit par décapage (20-30 cm) de sa surface sommitale. A plusieurs reprises, le lit majeur a été emprunté et recoupé par des chenaux secondaires (largeur 10-15 m, profondeur 3-5 m) dont le colmatage n'est que partiellement amorcé. Des défluviations ont été observées à l'échelle de quelques centaines de mètres, le plus souvent à l'amont des confluences (ex. : Saint-Christophe/Argent-Double, Souc/Argent-Double) ou à l'entrée des sections étroites favorables aux embâcles. Les eaux sorties du lit mineur par des brèches ouvertes dans les berges ont alors abandonné l'ancien chenal au bénéfice d'un nouveau, ajusté plus finement aux conditions hydrauliques du moment. C'est la somme de ces changements fluviaux qui est à l'origine de l'altération profonde du tracé du cours d'eau. Les modifications du tracé et du style fluvial, qui combinent sur l'Argent-Double des causes multiples (confluence, aménagement, débits excessifs), correspondent aux aires de morphogenèse maximale (AMM) de l'hydrosystème. L'une de ces AMM a pu être cartographiée entre Caunes-Minervois et la confluence avec le Ruisseau de Saint-Christophe après le passage de la crue de novembre 1999. Son analyse révèle comment l'Argent-Double est passé d'un état de stabilité conditionnelle durant lequel le lit mineur était étroit, à charge fine et sinueux, à un état d'instabilité où les chenaux actifs se sont élargis et multipliés, en s'encombrant d'une charge de fond grossière. Ce changement d'état du chenal

se marque par la substitution du tressage au méandrage. En fait, la rivière, artificiellement chenalisée après la crue de 1940, a retrouvé des modalités d'écoulement plus « naturelles », réoccupant un espace de liberté qu'elle avait perdu par contraction et rectification de son lit mineur.

2.3. *La crue de 1999 replacée dans le fonctionnement récent des fonds de vallée : analyse diachronique*

Les bassins versants des affluents de rive gauche de l'Aude, comme bien d'autres situés sur le pourtour de la Méditerranée, sont génétiquement exposés aux crues, dans un contexte de forte variabilité hydrologique et de modifications brutales de la géométrie des bandes actives et du tracé des chenaux. Les archives historiques (cartes et textes) et sédimentaires ont permis de caractériser le fonctionnement hydromorphodynamique récent des fonds de vallée.

Détaillée par les archives historiques, la chronologie des crues survenues dans la partie orientale du département de l'Aude a permis d'évaluer la fréquence des crues et leur saisonnalité sur les 700 dernières années (Arnaud-Fassetta, 2007). Cette période inclut le Petit Age Glaciaire (PAG ; < 1860) et le post-PAG (> 1860). De 1307 à 2006, les soixante crues enregistrées montrent la répartition saisonnière suivante (notée en prenant l'initiale des mois de l'année hydrologique, à partir de septembre) : SON (61,7 %), DJF (20 %), MAM (10 %) et JJA (3,3 %), avec 5 % d'inconnues. Ces résultats sont proches de ceux obtenus par Antoine *et al*. (2001), mais diffèrent de ceux publiés par Verdeil (1999), qui a intégré les crues du bassin amont de l'Aude (régime pluvio-nival) dans ses statistiques. Par ailleurs, alors que la proportion des crues de SON est la même entre les périodes (PAG et post-PAG), les crues de DJF et, dans une moindre mesure, celles de MAM sont plus nombreuses depuis 1910-1930 et il est fait mention de plus d'une crue par an depuis 1940. Le temps moyen entre deux crues est court (12 ans), mais la période de retour peut varier de 0,08 à 271 ans (?), marquant ainsi une très forte variabilité hydrologique. Au cours du XX^{è} siècle, la période de retour des crues, tous niveaux confondus, est inférieure à 3 ans (en moyenne) et le bassin-versant de l'Argent-Double a connu cinq crues importantes (1929, 1940, 1962, 1965, 2005) et deux crues majeures (1930, 1999).

Les anciens dépôts alluviaux ont servi de support aux interprétations paléohydrologiques. Suite à la crue de novembre 1999, l'érosion des berges a mis en affleurement les matériaux peu ou pas altérés sous-tendant les « basses terrasses » de l'Argent-Double et de ses affluents. Deux coupes stratigraphiques, parmi les nombreuses observées in situ, ont été sélectionnées afin de comprendre la magnitude et la fréquence des événements hydrologiques inhérents à la construction de la nappe alluviale. Il ressort de cette étude une succession stratigraphique originale qui rend compte du rythme saccadé, pluri-décennal à pluri-séculaire, de l'activité torrentielle (Fort *et al*., 2001). La présence dans les stratigraphies de bancs de galets très bien lavés, dont les imbrications changent d'orientation d'un niveau à l'autre, est révélatrice de changements fluviaux rapides et de l'ouverture, au milieu de la plaine d'inondation calme, de brèches et de nouveaux chenaux d'écoulement de forte énergie. Les contacts souvent plans et francs entre les différentes unités sédimentaires observées attestent de l'occurrence d'épisodes brutaux de submersion généralisée (crues éclair). La pétrographie des galets retrouvés dans les dépôts suggère une source d'apports double : locale (grès molassiques du piémont) et distale (calcaires et schistes issus du massif ancien), ce qui témoigne à la fois de la compétence des écoulements et de leur pouvoir érosif, y compris dans cette partie de piémont, intermédiaire entre la Montagne Noire et la plaine de l'Aude. La chronostratigraphie des dépôts (succession verticale de milieux à fort contraste dynamique) est donc caractéristique d'un régime hydrologique à forte variabilité inter-annuelle à inter-décennale, à l'image du fonctionnement d'un cours d'eau méditerranéen.

Enfin, l'évolution en plan du chenal de l'Argent-Double a pu être étudiée sur la période 1878-1999 (Arnaud-Fassetta, 2007). Depuis 1878, les variations de tracé, déduites de l'analyse des cartes anciennes et des photographies aériennes, s'observent surtout dans quatre secteurs (aval de Caunes-Minervois, de Peyriac-Minervois et de Rieux-Minervois et amont de La Redorte). Elles s'expriment par des recoupements ou des dédoublements de méandre, des défluviations et des migrations latérales de chenal (figure 6). Entre 1948 et juillet 1999, la largeur moyenne de la bande active de l'Argent-Double, mesurée à partir des photographies aériennes, ne montre pas de très grandes variations : elle

est de 19,2 m en 1948, 17,6 m en 1971, 14,7 m en 1976 et 17,3 m en juillet 1999 (Uemura, 2006). Le fait significatif est l'augmentation très forte de la largeur moyenne de la bande active (40,9 m) après le passage de la crue de novembre 1999.

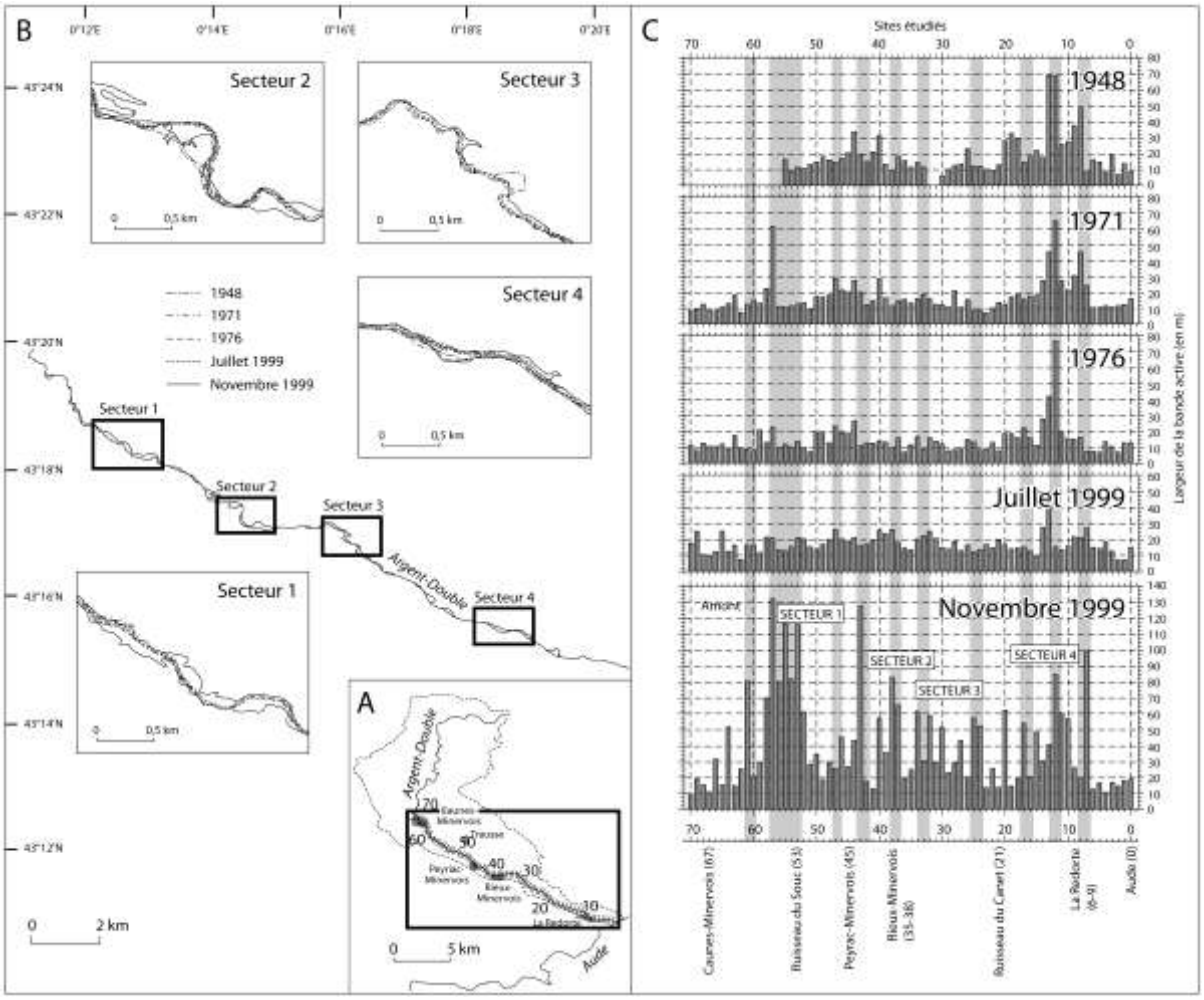

Figure 6. Variations de la largeur de la bande active de l'Argent-Double de Caunes-Minervois à La Redorte depuis 1948 (d'après Uemura, 2006, M2 EDMR Paris 7). Noter l'élargissement significatif en novembre 1999, suite à la crue des 12-13 novembre.

En conclusion, assurer la gestion d'un cours d'eau passe par une bonne connaissance des mécanismes qui sous-tendent son fonctionnement hydrodynamique. Dans le cas des affluents de rive gauche de l'Aude, l'approche diachronique et l'analyse de la crue de 1999 ont montré que le comportement des rivières lors des crues était tout à fait prévisible. La cartographie diachronique a montré que les points faibles de l'hydrosystème sont toujours situés dans les mêmes secteurs et/ou dans les mêmes configurations géographiques (méandres, confluences, secteurs de forte discontinuité des structures hydrauliques de protection). Basé sur une approche systémique, le modèle de fonctionnement des plaines alluviales a mis en exergue les points sur lesquels il était possible d'intervenir pour atténuer le risque d'inondation : réduction des embâcles, diminution du nombre de structures transversales, entretien des systèmes de drainage, réduction de l'habitat dans la zone inondable, développement des réseaux d'évacuation des eaux pluviales, réduction des sections de chenal artificiellement contractées… *De facto*, l'analyse de ce système en cascade permet de pointer les facteurs sur lesquels les autorités compétentes peuvent agir, sur la base de propositions émanant de spécialistes de l'environnement (figure 5).

3. Quelles stratégies après la crue de 1999 ?

Après la crue de 1999, plusieurs schémas de restauration de la plaine alluviale ont été élaborés afin d'améliorer les conditions d'écoulement des eaux de crue dans le chenal et de drainage dans la plaine

d'inondation. Face aux crues dans la plaine alluviale, trois types de stratégie ont été mis en pratique : la « résistance », le « repli stratégique » et l' « alternative » (*i.e.*, laisser faire la rivière).

3.1. *La « résistance » (dure ou douce)*

Parmi les mesures adoptées durant les années 1999-2003, celles choisies par les autorités compétentes (*i.e.*, le SIAHBAD) ont seulement consisté à restaurer la capacité du chenal à basses eaux.

Ces mesures entrent dans la rubrique de la « résistance dure » lorsque l'approche est de type ingénierie, afin de restaurer la capacité du chenal pour les débits ordinaires, sans considération des grandes crues ni de la vulnérabilité des populations en aval. Ainsi, dans la plaine d'inondation, de nombreuses brèches de berge (chenaux de recoupement de méandre) ont été artificiellement et très vite remblayées (Caunes-Minervois, Peyriac-Minervois, Rieux-Minervois). Tout aussi rapide a été le nivellement des surfaces sur lesquelles des replantations de vigne ont été programmées (amont de la confluence Ruisseau du Souc et Argent-Double). Rien n'a été véritablement entrepris pour améliorer l'écoulement du pluvial vers la rivière. Lors des opérations de restauration du chenal menées après la crue de 1999 (Caunes-Minervois, Peyriac-Minervois, Rieux-Minervois), on a conservé la même capacité du chenal. Cette dernière ayant été largement insuffisante lors de la crue de 1999, il y a de grandes chances qu'elle le soit à nouveau lors des prochaines crues de récurrence trentenale ou supérieure. Des merlons, des gabions et des enrochements, de nature et d'efficacité distinctes, ont été construits selon des alignements qui reprennent le tracé des anciennes berges mais pas au-delà.

Un travail de « résistance douce » s'est opéré lorsqu'il s'est agi de reprofiler des berges et de recalibrer légèrement les sections transversales des chenaux, comme en témoigne le cas de La Redorte (figure 7).

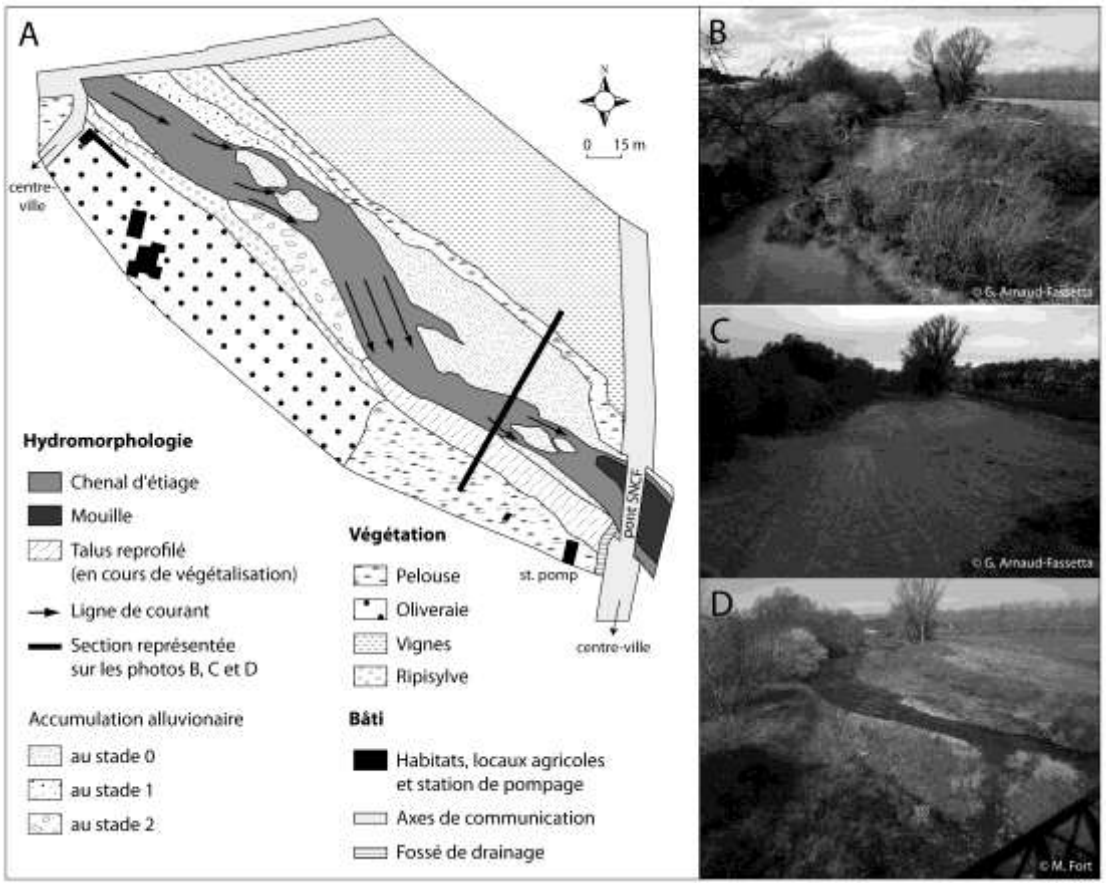

Figure 7. Reprofilage des berges et recalibrage léger des sections en amont de La Redorte, un exemple de « résistance douce ». A : Carte hydrogéomorphologique (d'après Huertas, 2009, M1 GSE Paris 7, collaboration avec Mathilde Pouillat, technicienne de rivière au SMMAR) ; B, C, D : photographies du lit de l'Argent-Double prises respectivement en 2002, 2008 et 2010.

Aujourd'hui encore et de façon générale, le chenal n'est entretenu (curage, déboisement et taille des arbres) que dans les secteurs visibles par un maximum de personnes, de part et d'autre des ponts par exemple ; ailleurs, la reconquête forestière est très rapide et peut devenir un problème en cas de nouvelle crue (embâcles, accroissement de la rugosité et diminution de la capacité).

Au delà des mesures de résistance, défensives, la « contre-attaque » (*i.e.*, mesures offensives) par le remblaiement des berges (merlons, digues en terre, gravats de nature diverse) n'est pas forcément la meilleure solution car la rivière reprend vite ses droits, en élargissant son lit si les débris sont de petite taille ou en accroissant la puissance spécifique des crues vers l'aval si les débris sont de grande taille, sans compter les problèmes de pollution des eaux courantes, stagnantes ou souterraines, suite à leur contamination par les décharges sauvages et/ou les sites contenant des produits hautement toxiques. Le phénomène des déchets sur berge a été quantifié par Bayaert et Picard (2008) et Picard (2009), leur cartographie montrant l'extension du phénomène dans trois bassins versants du Minervois (figure 8).

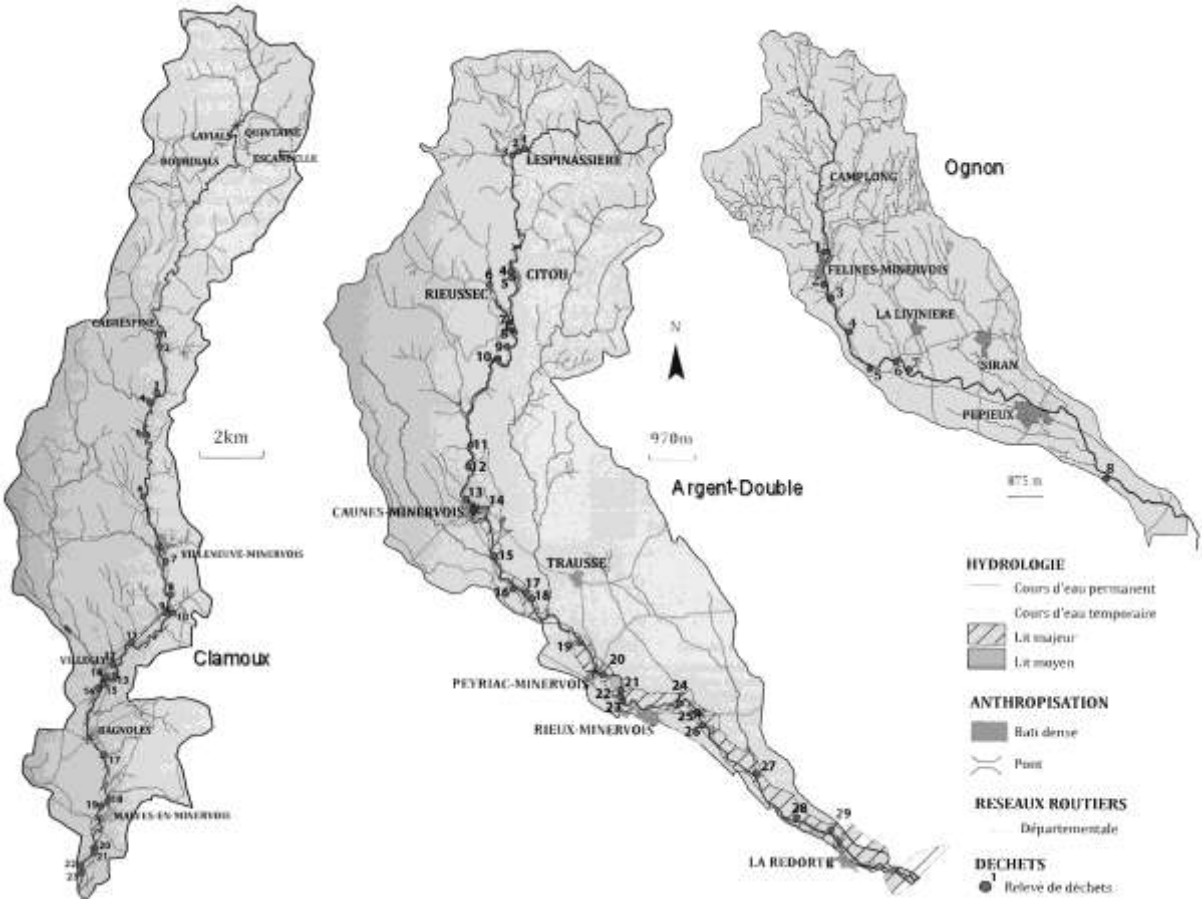

Figure 8. Cartographie des décharges sauvages (gravats, déchets agricoles, produits polluants, etc.) : relevés réalisés au cours des printemps 2008 et 2009 (d'après Bayaert et Picard, 2008, M1 GSE Paris 7, et Picard, 2009, M2 EDMR Paris 7).

3.2. *Envisager le « repli » (recul stratégique)*

Quelques initiatives individuelles ont été intéressantes de ce point de vue, à l'image de celles conduites sur le Domaine Pautard, installé à cheval sur le versant et la plaine alluviale de l'Argent-Double à Peyriac-Minervois (Arnaud-Fassetta et Fort, 2009). Dans un premier temps (quelques mois après la crue de 1999), le propriétaire avait envisagé de mettre en place, dans la plaine d'inondation, une base de loisirs axée sur l'utilisation de l'eau de la rivière. Il a finalement et raisonnablement opté pour une reconversion « durable » de la plaine alluviale, à savoir une remise en prairie de la plaine d'inondation, pratique qui était systématique avant la Deuxième Guerre mondiale dans la région.

3.3. *L' « alternative » (laisser faire la rivière tout en l'aidant à suivre une trajectoire prédéfinie)*

Dans les secteurs sans enjeu, il est possible de maintenir un espace de mobilité latérale suffisant pour que le chenal réduise sa capacité de transport et dissipe son énergie par étalement de son lit. En tant qu'élément permettant d'augmenter la rugosité hydraulique (frein à l'écoulement) et constituant un piège naturel à sédiments (rupture de charge), des opérations de reboisement de la ripisylve peuvent contribuer également et localement à réduire l'énergie et la capacité de transport du cours d'eau. On adopte alors une stratégie qui combine à la fois le « laisser faire la rivière » tout en l'aidant quand même un peu de façon à contrôler la trajectoire que l'on souhaite lui faire prendre. Un exemple pertinent de l'application de ce principe est donné par les travaux conduits sur la Clamoux par Matthieu Dupuis, technicien de rivière au SMMAR, et par Demouth et Vandemeulebrouck (2008 ; figure 9).

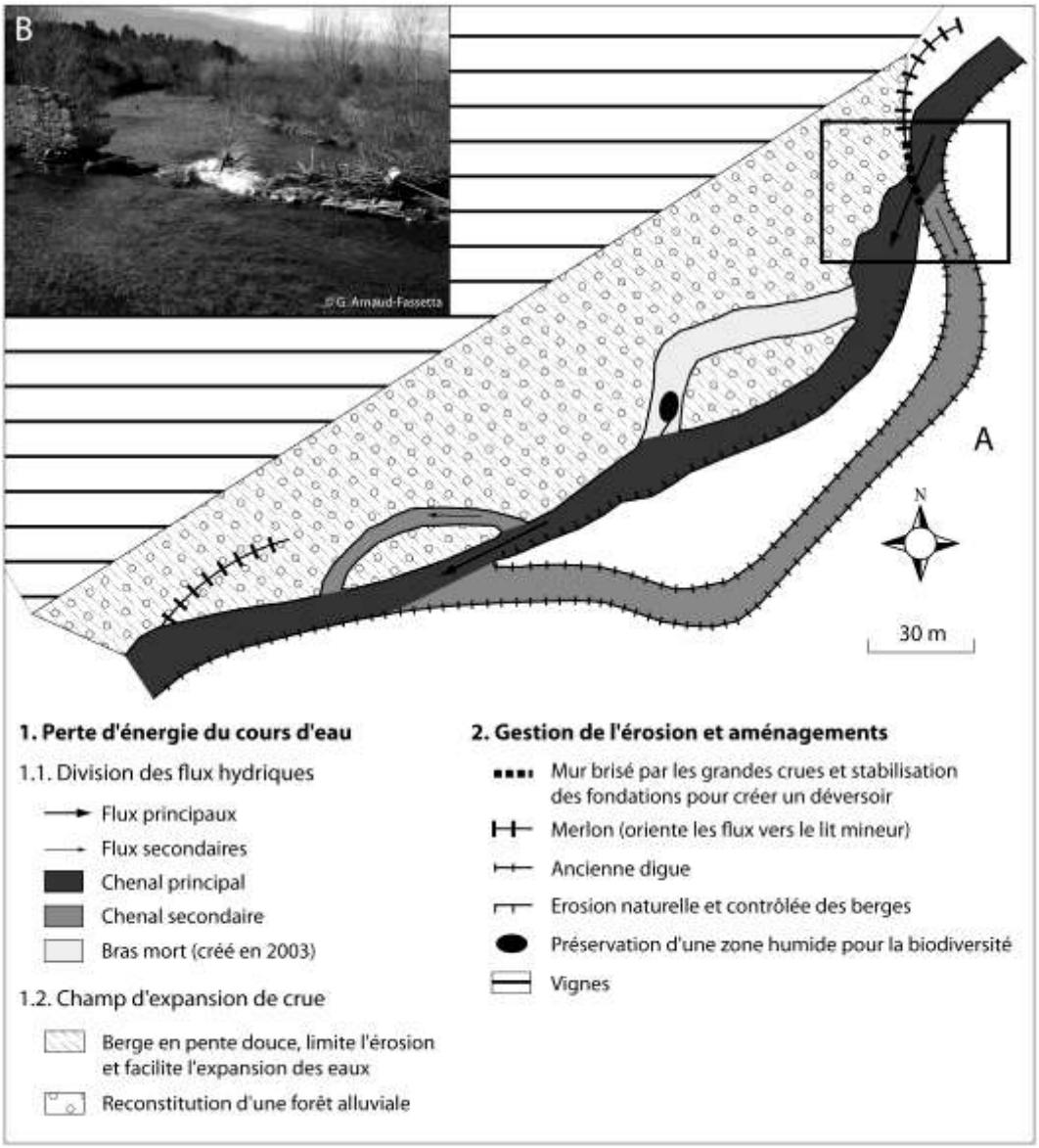

Figure 9. Exemple d'intervention pour laisser la rivière suivre une trajectoire prédéfinie. A : Carte hydrogéomorphologique du fond de vallée de la Clamoux, en amont de Villegly (modifié d'après Demouth et Vandemeulebrouck, 2008, M1 GSE Paris 7, adapté des travaux de Mathieu Dupuis, technicien de rivière au SMMAR). B : Détail de la zone de dédoublement de chenal (sur la gauche, en gris foncé sur la carte A, chenal antérieur à 1999, devenu secondaire depuis ; dans l'axe de la photo, en gris clair sur la carte A, chenal ouvert par la crue de 1999, devenu principal pour plusieurs raisons : pente hydraulique plus forte, incision du plancher alluvial, maintien volontaire de sa connexion amont par la brèche ouverte en 1999).

Ici, la question posée est bien celle de l'espace de liberté dont a besoin la rivière pour fonctionner correctement tout en minimisant les risques pour l'aval urbanisé. Le maintien d'un espace de mobilité suffisant de la bande active passe par d'adaptation du concept d' « espace de liberté » et d' « espace de mobilité fonctionnel » (Malavoi *et al*., 1998). La méthode de cartographie intègre 6 étapes (figure 10) : la délimitation de la surface maximale d'inondation (*i.e*., plaine alluviale moderne déduite de la carte géologique) ; la délimitation de l'amplitude d'équilibre du chenal, théorique si l'on multiplie sa largeur ordinaire par 10 ou réelle si l'on considère la courbe enveloppe de la bande active de la dernière grosse crue, déduite des observations de terrain et de la photo-interprétation) ; la délimitation de l'espace de liberté du chenal (*i.e*., zone de divagation des chenaux modernes déduite de l'étude des archives sédimentaires et des cartes anciennes) ; la délimitation de l'espace de divagation résiduel du chenal (*i.e*., là où le chenal ne peut plus aller à cause des aménagements) ; la délimitation des zones potentiellement érodables au cours des futures décennies (*i.e*., concavités de méandre et zones de recoupement) ; la délimitation de l'espace de mobilité fonctionnel, constituant la carte de synthèse des étapes précédentes.

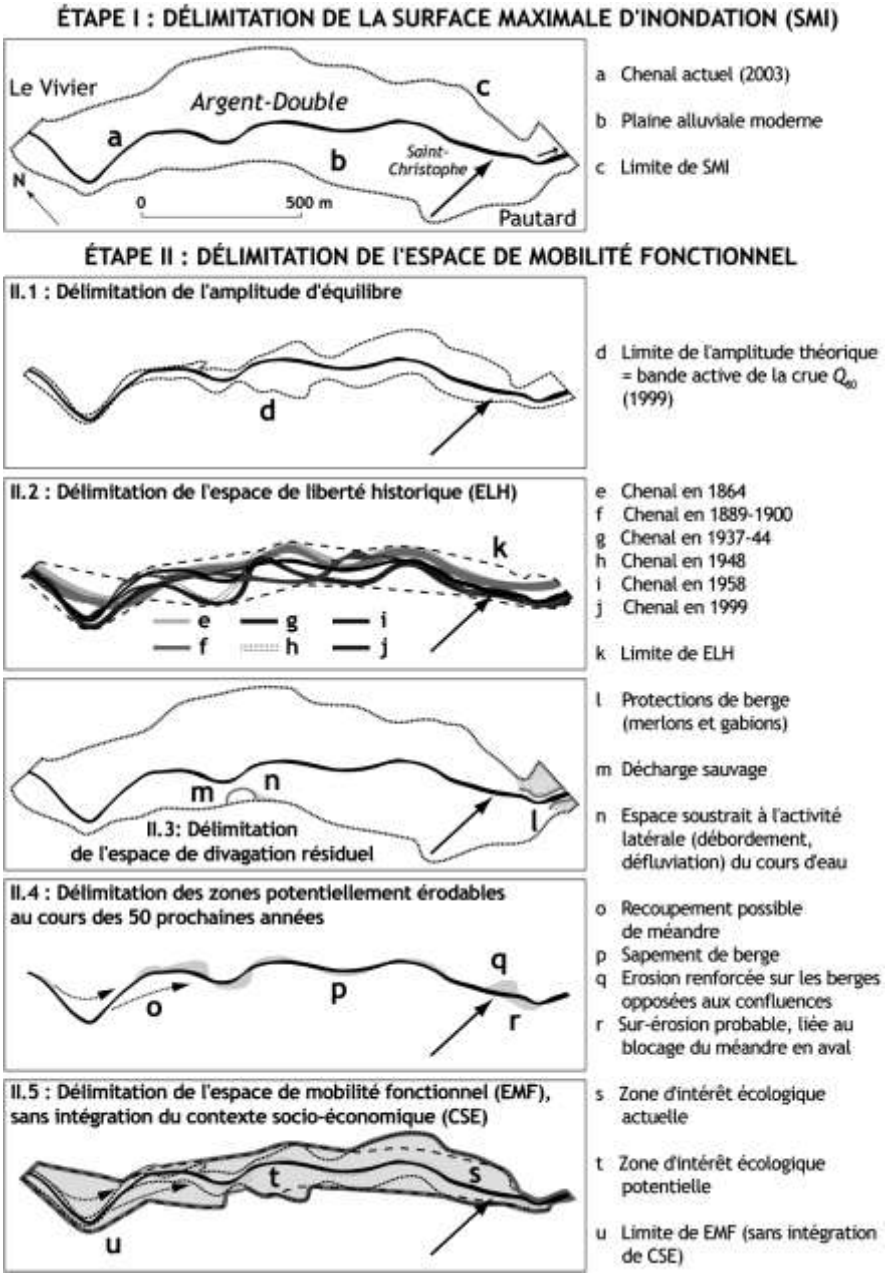

Figure 10. Caractérisation de l'espace de mobilité fonctionnel de l'Argent-Double dans la plaine alluviale située en aval de Caunes-Minervois (secteur de la décharge sauvage ; adapté à partir des recommandations de Malavoi et al., 1998).

Au final, la mise en pratique de ce concept nous a permis de quantifier la largeur optimale nécessaire pour permettre au chenal de divaguer librement et sans risque induit dans la plaine alluviale (Arnaud-Fassetta et Fort, 2009). Testé en amont de Peyriac-Minervois, les résultats montrent que l'espace de mobilité du chenal varie de 22 m à 186 m (moyenne 124 m). La section du chenal pourrait donc être facilement recalibrée en respectant cet ordre de grandeur, d'autant qu'il s'agit d'une zone de dissipation naturelle des crues et qu'aucun enjeu n'y est présent. La même remarque s'applique au bassin de l'Ognon sur lequel un travail similaire a été conduit (Vandemeulebrouck, 2009). L'espace de liberté rejoint ainsi l'espace de bon fonctionnement du cours d'eau.

Dans les zones urbanisées, il est nécessaire de contrôler la géographie des accumulations de bois morts et autres déchets pouvant constituer des embâcles là où on ne le souhaite pas (*i.e.*, sections fluviales naturellement étroites, structures transverses). Des pièges à sédiments et à troncs d'arbre peuvent être installés dans l'axe de chenaux de crue, en amont des zones à enjeux forts comme cela a été fait sur la Clamoux à Villegly, permettant de retenir les débris tout en maintenant le principe de dissipation des flux de crue par étalement dans la plaine alluviale (figure 11D).

Figure 11. Barrage de retenue collinaire en amont du bassin du Rivassel (Laure-Minervois ; A), bassin de rétention des eaux pluviales sur l'interfluve Rivassel/Argent-Double (La Redorte ; B), cheminement des eaux de ruissellement dans le lotissement de Pech Ratié (Conques-sur-Orbiel ; C) et piège à sédiments et à troncs d'arbres pour contrôler la géographie des embâcles dans le bassin de la Clamoux (Villegly ; D).

Ces mesures où l'on n'intervient qu'à minima sur la charge solide doivent s'accompagner de mesures destinées à limiter le volume des apports latéraux en provenance des sous-bassins versants. Ainsi, la mise en place ou la restauration de barrages collinaires, comme celui de Laure-Minervois (figure 11A), permet de retenir l'eau dans les petits bassins versants en amont des zones urbanisées. La prévention des crues fluviales passe aussi par la gestion des eaux pluviales. En ville, cela signifie que le réseau d'évacuation du pluvial doit non seulement exister mais aussi être correctement calibré par rapports aux entrants d'eau (pluie, ruissellement cumulé) et aux capacités d'infiltration des sols, en général très faible en Minervois, voire nulle en ville. La gestion des eaux pluviales en milieu urbain passe aussi par la mise en place de bassins de rétention, comme cela a été fait à La Redorte (figure 11B). Leur bon calibrage est essentiel. Bien calibrer, c'est comprendre d'où arrivent les eaux (*i.e.*, définir le bassin d'alimentation) et cartographier le cheminement et le volume des eaux de

ruissellement. Ce travail sur le ruissellement pluvial a été effectué à Conques-sur-Orbiel par Giuliani (2009), qui s'est attaché, sur le terrain, à définir et à cartographier les zones d'alimentation et le cheminement des eaux à l'échelle des lotissements (figures 11C et 12), aboutissant à une carte du risque lié au ruissellement pluvial à l'échelle communale, travail qui a débouché aussi sur des propositions pour minimiser les impacts et les volumes d'eau à la rivière (figures 13).

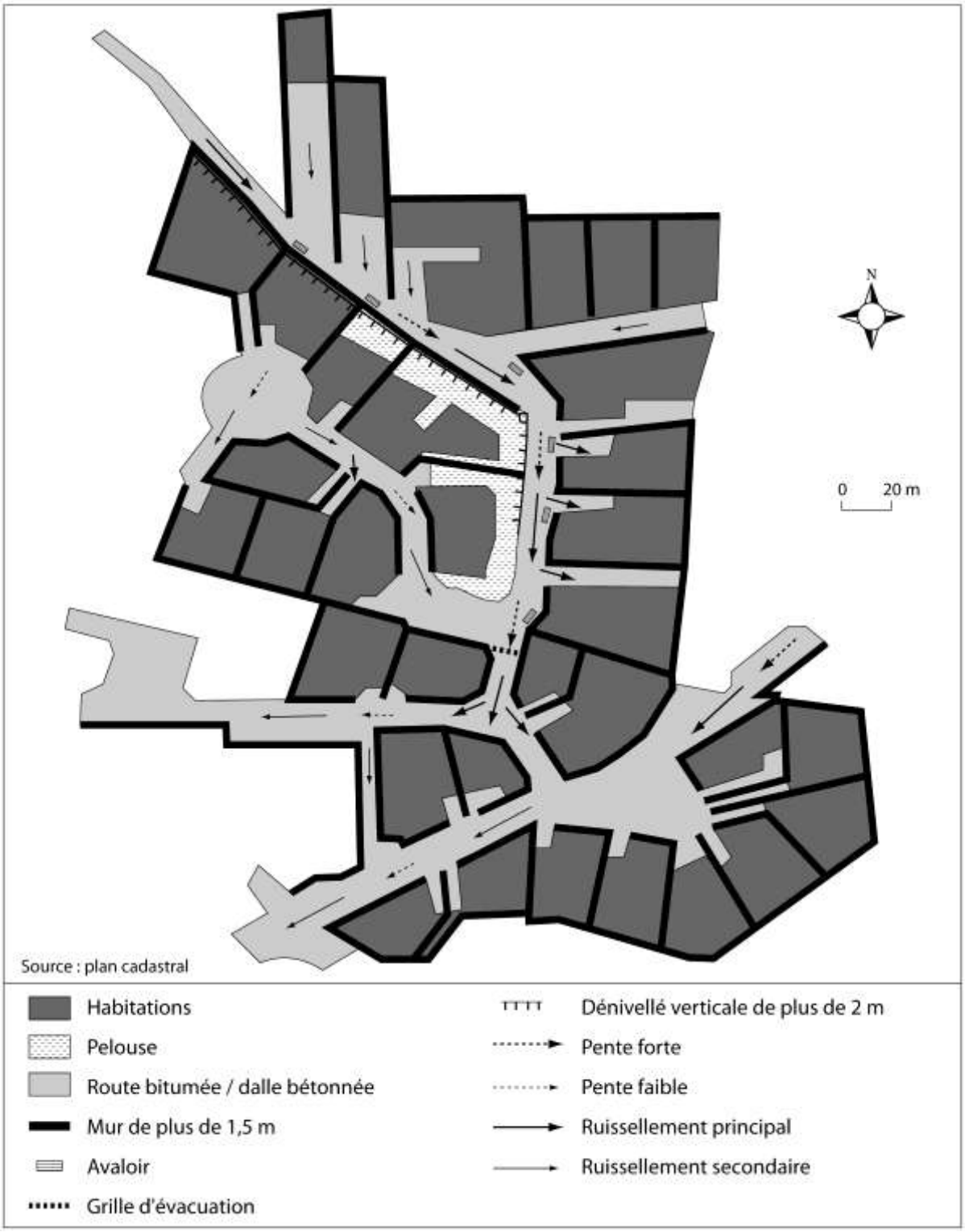

Figure 12. Ruissellement pluvial dans la zone urbaine de Conques-sur-Orbiel, lotissement de Pech Ratié (d'après Giuliani, 2009, M1 GSE Paris 7).

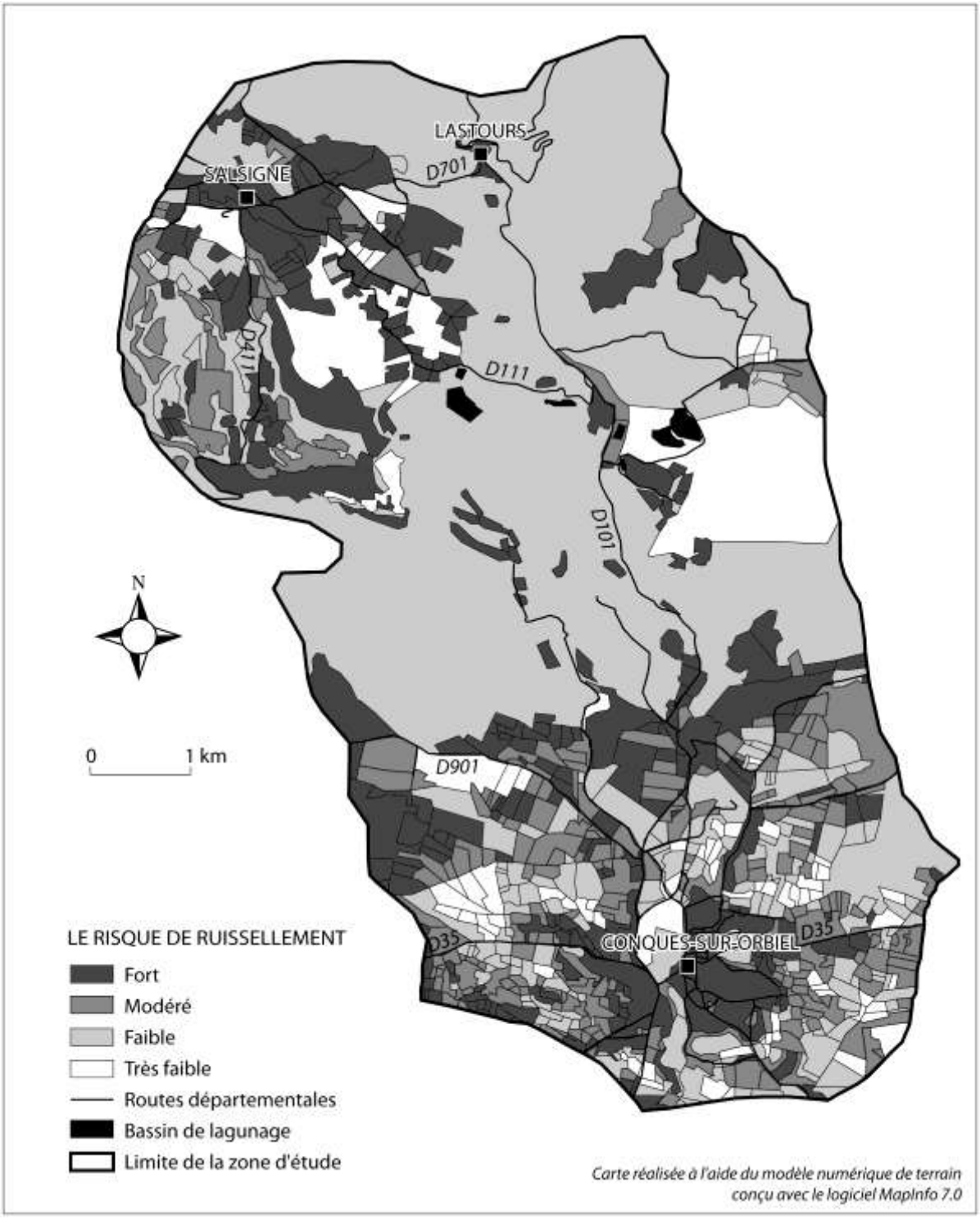

Figure 13. Estimation du risque de ruissellement dans le bassin de l'Orbiel (retombée de la Montagne Noire et piémont). Noter un risque fort à Salsigne et les répercussions potentielles à Conques-sur-Orbiel (d'après Giuliani, 2009, M1 GSE Paris 7).

4. Conclusions

Cette synthèse de dix années d'étude a montré la diversité tout autant que le haut degré de complexité des stratégies envisageables pour tenter de minimiser le risque d'inondation dans le département de l'Aude, après le passage de la crue catastrophique de 1999. Résistance, repli, solutions alternatives ? Le choix de la stratégie est autant scientifique que social et politique. Les scientifiques, pour leur part, préconisent une gestion intégrant plusieurs groupes de mesures insécables, allant du

pluvial au fluvial, car la réussite des projets de prévention des crues passe avant tout par leur bonne cohérence à l'échelle du bassin-versant.

En effet, les solutions durables pour réduire significativement le risque de crue dans le département de l'Aude et, au delà, en domaine méditerranéen, passent par l'adoption d'un certain nombre de mesures :

- *Une gestion s'impose à l'échelle du bassin-versant*. Les pratiques destinées à atténuer les risques de crue s'inscrivent dans une stratégie globale de lutte contre les inondations, qui nécessite de traiter l'hydrosystème dans son intégralité spatiale, avec toutes ses composantes, naturelles et humaines. La compréhension du fonctionnement de l'aléa dans le cadre de son bassin versant est un préalable à toute élaboration d'un plan global de gestion ; en permettant la délimitation d'espaces réservés prioritairement à la rivière en crue, l'approche « naturaliste » permet aussi de poser aux responsables de vraies questions (discontinuités des structures de protection, non prise en compte d'un espace de mobilité de la rivière suffisant, entretien du lit après travaux, etc.). À la politique de travaux de protection rapprochée, faciles à légitimer pour un élu auprès de ses administrés, doit succéder une réflexion globale, qui débouche sur des solutions satisfaisantes pour développer une véritable solidarité entre l'amont et l'aval du bassin-versant. Dans le cas des affluents de rive gauche de l'Aude, la maîtrise d'ouvrage doit être aux mains de structures trans-départementales telles le SMMAR, qui regroupe depuis 2004 plusieurs syndicats de gestion des bassins versants. Seuls des maîtres d'ouvrage ayant une forte légitimité politique sur l'ensemble du bassin versant seront capables d'imposer l'intérêt collectif sur les intérêts communaux et individuels.

- *Il est nécessaire de maintenir un espace de mobilité suffisant du chenal*. Dans l'Aude, quelques initiatives individuelles ont été intéressantes de ce point de vue, à l'image de celles conduites sur le Domaine Pautard. Le maintien d'un espace de mobilité suffisant de la bande active passe aussi par d'autres options, basées sur les concepts d'« espace de liberté » et d' « espace de mobilité fonctionnel », dont l'application s'avère être non seulement pertinente en domaine méditerranéen mais une alternative intéressante à la méthode hydrogéomorphologique préconisée par le Ministère de l'Environnement (Masson *et al*., 2006).

- *Elargir le chenal de façon à ce qu'il absorbe une grande partie des crues peut être une solution*. Pour calibrer la capacité du chenal, nous avons développé une méthode intégrant les indicateurs morphosédimentaires (prise en compte de dépôts marquant l'extension de la bande active) à la modélisation hydraulique (« modèle hydraulique monodimentionnel à casiers ») avec le logiciel *InfoWorks, for River Systems* (IWRS). Testé sur le tronçon de l'Argent-Double situé en amont de Peyriac-Minervois, le modèle hydraulique est en construction (Quisserne *et al*., 2006). Son application devrait permettre de définir la géométrie du chenal optimale pour absorber la crue Q_{30} à Q_{100}, c'est-à-dire celle qu'il avait avant la phase de contraction artificielle de la fin du XIX^{è} siècle et de la première moitié du XX^{è} siècle.

- *De la nécessité des mesures destinées à maîtriser le foncier*. Dans la plaine alluviale, la densité d'occupation a surtout augmenté depuis les décennies 1960-1970. L'urbanisation de la plaine alluviale s'est faite essentiellement au détriment de la plaine d'inondation, espace jusqu'alors dévolu à des usages tolérant la submersion (prairies et pâturages). La contrainte liée à l'extension récente du bâti oblige à redéfinir un nouvel espace de mobilité fonctionnel de la bande active qui devrait pouvoir être intégré dans les cartes de l'aléa inondation des PPRI. En définitive, le contrôle des espaces fluviaux concernés par les élargissements de chenal et par la mise en place de zones d'expansion de crue renvoie à la question du foncier. Les outils juridiques existants suggèrent que la solution la plus sûre pour maîtriser l'hydrodynamique et les risques d'inondation est l'acquisition par la puissance publique des terrains concernés.

Au total, cette recherche amène à questionner la pertinence des méthodes utilisées par les aménageurs et les autorités compétentes pour réduire le risque de crue et d'inondation. Elle met aussi en évidence la nécessité d'une approche multi-disciplinaire ou multi-domaines (aménagement, ingénierie hydraulique, hydrogéomorphologie) permettant des actions concertées et efficaces conduites à l'échelle des bassins versants, sans lesquelles aucune véritable mesure de protection ne pourra être assurée pour les populations riveraines des cours d'eau. Dans le département de l'Aude, les

nouvelles crues de novembre 2005 et de janvier 2006 auront une fois de plus pointé l'urgence de prendre les mesures qui s'imposent pour atténuer le risque d'inondation. Autant de raisons de prolonger notre investissement scientifique et pédagogique dans ce département en collaboration avec le SMMAR, avec la mise en place d'un ou de plusieurs observatoires de mesures sur des sites pilotes, qui devraient permettre non seulement de pérenniser l'accueil réservé aux étudiants de Paris mais aussi d'élargir les thématiques de recherche dans l'esprit de la Directive Cadre Européenne relative à la loi sur l'eau et à la biodiversité des milieux.

Remerciements

Nous tenons à adresser nos plus vifs remerciements à Frédéric Ogé, pour l'énergie qu'il a dépensée dans l'organisation du colloque « Risques naturels en Méditerranée occidentale », aux membres du SMMAR et du SIAHBAD pour leur soutien, ainsi que les nombreux particuliers qui nous ont accueillis et ont accepté de répondre à nos questions, enfin à François Bétard, pour son aide à la finalisation assistée par ordinateur des figures 4, 6, 7, 9, 12 et 13.

Références bibliographiques

Antoine J.-M., Desailly B., Gazelle F., 2001 : Les crues meurtrières, du Roussillon aux Cévennes. *Annales de Géographie*, **622**, 597-623.

Arnaud-Fassetta G., 1998 : *Dynamiques fluviales holocènes dans le delta du Rhône*. Thèse de géographie physique, Université de Provence (Aix-Marseille 1), 329 p.

Arnaud-Fassetta G., 2007 : *L'hydrogéomorphologie fluviale, des hauts bassins montagnards aux plaines côtières : entre géographie des risques, géarchéologie et géosciences*. Habilitation à diriger des recherches (HDR) en géographie physique, université Paris-Diderot (Paris 7), 3 vol., 35 p., 435 p. et 357 p.

Arnaud-Fassetta G., Fort M., 2008 : The space of good functionment in fluvial geomorphology, a tool for mitigating flood risk. Application to the left-bank tributaries of the Aude River, Mediterranean France. European Geosciences Union Symposium, Vienna, 15 April. *Geophysical Research Abstracts*, **10**, 1 p.

Arnaud-Fassetta G., Fort M., 2009 : The integration of space of good functionment in fluvial geomorphology, as a tool for mitigating flood risk. Application to the left-bank tributaries of the Aude River, Mediterranean France. *In* (Gumiero B., Rinaldi M., Fokkens B. Eds.) *IVth ECRR International Conference on River Restoration 2008*. Centro Italiano per la Riqualificazione Fluviale, 313-322.

Arnaud-Fassetta G., Ballais J.-L., Beguin 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*, **62-2**, 33-48.

Arnaud-Fassetta G., Beltrando G., Fort M., Plet A., André G., Clément D., Dagan M., Méring C., Quisserne D., Rycx Y., 2002 : La catastrophe hydrologique de novembre 1999 dans le bassin-versant de l'Argent Double (Aude, France) : de l'aléa pluviométrique à la gestion des risques pluviaux et fluviaux. *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, **1**, 17-34.

Arnaud-Fassetta G., Fort M., Plet A., Si Moussa S., 2004 : *Les bassins versants de l'Argent-Double et du Rivassel (Aude) : cartographie haute résolution (1/10 000ème) de l'aléa de crue des 12-13 novembre 1999, fonctionnement et dysfonctionnements hydrauliques observés, propositions d'aménagement de la plaine alluviale*. Rapport d'expertise pour le compte du Syndicat Mixte des Milieux Aquatiques et des Rivières/Conseil Général de l'Aude, 74 p.

Bayaert F., Picard F., 2008 : *La problématique des déchets dans les bassins versants de l'Argent-Double et de la Clamoux*. Mémoire de Master 1 Géographie, spécialité Environnement, université Paris-Diderot (Paris 7), 161 p.

Demouth O., Vandemeulebrouck P., 2008 : *Opportunités, mise en place et résultats de la gestion « douce » face au risque d'inondation sur le bassin versant de l'Orbiel*. Mémoire de Master 1 Géographie, spécialité Environnement, université Paris-Diderot (Paris 7), 143 p.

Fort M., Arnaud-Fassetta G., Beltrando G., Plet A., André G., Mering C., 2001 : Impacts hydromorphologiques des fortes précipitations des 12-13 novembre 1999 sur la retombée méridionale de la Montagne Noire : l'exemple de l'Argent Double (Aude). *In* (Médi-Terra Ed.) *Au chevet d'une catastrophe. Les inondations des 12 et 13 novembre 1999 dans le Sud de la France. Actes du colloque de Perpignan, 26-28 juin 2000*. Presses Universitaires de Perpignan, Perpignan, 41-52.

Giuliani J.-S., 2009 : *Etude du ruissellement dans le bassin-versant de l'Orbiel*. Mémoire de Master 1 Géographie, spécialité Environnement, université Paris-Diderot (Paris 7), 61 p.

Huertas R., 2009 : *Les atterrissements sur l'Argent-Double : hydrogéomorphologie appliquée et gestion associée dans le cadre du risque d'inondation*. Mémoire de Master 1 Géographie, spécialité Environnement, université Paris-Diderot (Paris 7), 65 p.

Malavoi J.-R., Bravard J.-P., Piégay H., Héroin E., Ramez P., 1998 : *Détermination de l'espace de liberté des cours d'eau*. Guide Technique n°2, Bassin Rhône Méditerranée Corse, DIREN Rhône-Alpes, 40 p.

Masson M., Garry G., Ballais J.-L., 2006 : *Cartographie des zones inondables, approche géomorphologique*. Les éditions Villes et territoires, Paris La Défense, 100 p.

Picard F., 2009 : *États des lieux et diagnostic des berges de l'Argent Double et de l'Ognon*. Impacts, gestion et risques hydrologiques. Mémoire du Master 2R Espace, Dynamique des milieux et Risques, université Paris-Diderot (Paris 7), 133 p.

Plet A., Arnaud-Fassetta G., Beltrando G., Fort M., 2002 : Contraintes hydrologiques et gestion des territoires dans le Minervois. Retour d'expérience après la crue de novembre 1999. *Actes du colloque « Hydrosystèmes, paysages, territoires », 6-8 septembre 2001, Lille*. Commission des Hydrosystèmes Continentaux du Comité National Français de Géographie, CD-rom.

Quisserne D., Arnaud-Fassetta G., Fort M., Davidson R., Texier P., 2006 : The use of 1-D hydraulic models in fluvial geomorphology, as a tool for quantifying and mitigating flood risk. Application to the Argent-Double River, a left-bank tributary of the Aude River, Mediterranean France. European Geosciences Union Symposium, Vienna, 3-7 April 2006. *Geophysical Research Abstracts*, **8**, 1 p.

Si Moussa S., 2004 : *Impact des facteurs hydrogéomorphologiques et anthropiques sur le phénomène d'inondation (exemple de La Redorte dans le Minervois)*. Mémoire du DEA Géomorphologie, Relief, Dynamique de la surface, Risques naturels, Université Paris 7-Denis Diderot, 72 p.

Uemura Y., 2006 : *Etude diachronique des changements de tracé et de la bande active de l'Argent-Double, bassin-versant de l'Aude*. Mémoire du Master 2 Recherche Espace, Dynamique des milieux et Risques, Université Paris 7-Denis Diderot, 58 p.

Vandemeulebrouck P., 2009 : *Espace de liberté et gestion « douce » : deux concepts naturalistes complémentaires dans la lutte contre les inondations appliqués au bassin-versant de l'Ognon (Aude, France)*. Mémoire du Master 2R Espace, Dynamique des milieux et Risques, université Paris-Diderot (Paris 7), 90 p.

Verdeil P., 1999 : Les crues de l'Aude au cours des temps. *Spele Aude*, **8**, 34-45.

RISQUES NATURELS EN MEDITERRANEE OCCIDENTALE

ACTES

du

COLLOQUE INTERNATIONAL

organisé

du 16 au 21 novembre 2009

à

Carcassonne, Aude, Languedoc-Roussillon, France

Monique FORT & Frédéric OGE
éditeurs

UMR 8586 – CNRS