Cartographie hydrogéomorphologique : crues récentes sur les bassins versants de l'Aude, la Berre (1999) et le Gard (2002) en France

Christophe Esposito, Sylvain Chave, Jean-Louis Ballais, Virginie Delorme

▶ **To cite this version:**

Christophe Esposito, Sylvain Chave, Jean-Louis Ballais, Virginie Delorme. Cartographie hydrogéomorphologique : crues récentes sur les bassins versants de l'Aude, la Berre (1999) et le Gard (2002) en France. Hors du lit : aléas, risques et mémoires, Sep 2010, Liessies, France. pp.47-60. hal-01571394

HAL Id: hal-01571394
https://amu.hal.science/hal-01571394

Submitted on 2 Aug 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.

Cartographie hydrogéomorphologique :

Crues récentes sur les bassins versants de l'Aude, la Berre (1999) et le Gard (2002) en France.

Par

Christophe Esposito[(1)], Sylvain Chave[(2)], Jean-Louis Ballais[(2,3)], Virginie Delorme[(2,4)]

[(1)] Ministère l'Écologie, de l'Énergie, Développement Durable et de la Mer, CETE Méditerranée, Département REC, CS 70499, F-13593, Aix-en-Provence, cedex
Tel: + 33-442-24 79 57 Fax: + 33-442-24 79 96
E-mail: christophe.esposito@developpement-durable.gouv.fr
[(2)] Université de Provence, CEGA, UMR ESPACE CNRS 6012, 29 avenue Robert Schuman F-13621 Aix-en-Provence cedex 1
E-mail:sylvain.chave@free.fr
[(3)] E-mail: jean-louis.ballais@wanadoo.fr
[(4)] E-mail: v.delorme@fluvialis.com

Résumé: Deux crues rares à exceptionnelles, survenues les 12-13 novembre 1999 et les 8-9 septembre 2002, ont provoqué de lourds bilans matériels (2 milliards d'euros) et humains (58 morts). Leur dimension régionale constitue l'occasion de comparer les limites des zones inondées avec celles d'une approche naturaliste des zones inondables, la cartographie hydrogéomorphologique. Les études réalisées ont permis de satisfaire deux grands objectifs. Nous avons pu mesurer les linéaires pour lesquels la plaine alluviale fonctionnelle de chaque cours a été, remplie, non remplie ou bien dépassée. Les résultats concluent, que ce soit pour le département de l'Aude ou du Gard, à la très large propagation des crues dans la plaine alluviale fonctionnelle des 27 cours d'eau étudiés, montrant ainsi la pertinence de l'approche hydrogéomorphologique des zones inondées. Aussi, nous avons pu vérifier et analyser les causes ayant provoqué les débordements des eaux sur les formes encaissantes pour mettre en évidence les contradictions réalisées au cours de ces deux évènements. Il ressort de cette analyse que les dépassements de la plaine alluviale fonctionnelle sont consécutifs à la présence d'aménagements ou, la lithologie. Les contradictions avec les principes de la cartographie hydrogéomorphologique restent très limités (environ 10 %) et localisés. Les résultats obtenus renforcent la pertinence de la cartographie hydrogéomorphologique qui tend à devenir un outil de plus en plus incontournable pour la détermination des zones inondables.

Mots clés : cartographie hydrogéomorphologique, crue éclair, risque d'inondation, France méditerranéenne, géomorphologie fluviale.

Abstract : On November 12th and 13th, 1999, and September 8th and 9th , 2002 two uncommon hydrometeorological events occurred in the Mediterranean part of France (400 mm and more in 24 hours), generating extensive damages (2 billions euros) and loss of human beings (58 dead). These events are a rare opportunity for comparing the flooding areas mapping with those of the hydrogeomorphological boundaries. Indeed the hydrogeomorphological approach is rising up in the engineering field relative to the natural hazards forecast.
If we superpose the boundaries, on one hand, we can measure the linear of the overflowed and not overflowed alluvial plain by the expansion of the floodwaters and on the other hand, we can proceed to a research on the origins and the process that lead to an overflow. Thanks to graphical and numerical processing, the results obtained show a wide spreading of the floods within the alluvial plains of the twenty-seven rivers studied. Besides, the absence of incoherent cases with the principles of the hydrogeomorphological mapping has been shown. So, this study demonstrates the efficiency and the essential use of this naturalist approach.

Key words : hydrogeomorphological mapping, flash flood, flood hazard, southern France, fluvial geomorphology.

Introduction

L'objet du présent article est d'exposer les résultats d'une recherche entreprise à l'occasion de la survenue de deux épisodes hydrométéorologiques récents, ayant concerné le sud de la France en novembre 1999 et septembre 2002. Ils sont à l'origine d'inondations majeures. L'objectif de cette double recherche est de comparer les limites des zones inondables obtenues par application de la méthode de cartographie hydrogéomorphologique avec celles des zones inondées au cours de ces deux épisodes.

La cartographie hydrogéomorphologique (Masson *et al*, 1996) est une approche naturaliste récente dont les premières applications datent du début des années 1980 (Masson, 1983). Cette approche permet, à partir de la reconnaissance des différents lits d'un cours d'eau, d'identifier les zones inondables pour des crues de fréquence rare à exceptionnelle, c'est-à-dire des inondations comme celle de novembre 1999 et septembre 2002. Pour cela, elle s'appuie sur des concepts de géomorphologie fluviale parmi lesquels celui de *système fluvial* proposé par Schumm (1977).

Appliquée à la prévention du risque d'inondation, la cartographie hydrogéomorphologique permet une détermination qualitative de l'aléa. En effet, compte tenu de l'identification des lits du cours d'eau ainsi que de l'hydrodynamique perçue par l'intermédiaire de la micro-topographie, de l'étude des modelés présents à la surface des lits majeurs, ou bien encore grâce à l'étude sédimentologique des formations, un niveau d'aléa peut être attribué à chacun de ces lits (Garry *et al*, 2002).

Les deux événements hydrométéorologiques (novembre 1999 et septembre 2002) choisis pour réaliser cette recherche font partie des phénomènes les plus remarquables survenus au cours de ces deux derniers siècles (Gaume *et* al, 2003).

En effet, du 12 au 14 novembre 1999 les départements de l'Aude, des Pyrénées-Orientales, du Tarn et de l'Hérault (figure 1a) ont été affectés par des cumuls de précipitations supérieurs à 600 mm (621 mm en 48 heures à Lézignan-Corbières, Aude). Cependant, l'importance de cet épisode est surtout remarquable par les surfaces concernées par ces pluies diluviennes (figure 1b). Des cumuls de plus de 300 mm en 48 heures se sont abattus sur une superficie de l'ordre de 2500 km² et plus de 600 mm sur une superficie de l'ordre de 80 km² (Neppel et Desbordes, 2000). Par conséquent, des crues d'une intensité rare se sont propagées le long de la totalité du réseau hydrographique, causant la mort de 35 personnes et des dégâts estimés à 500 millions d'euros (Lefrou *et al*, 2000), sur le territoire des 226 communes déclarées en état de catastrophe naturelle (Chombard-Gaudin et Usselman, 2000).

Les 8 et 9 septembre 2002 survient un épisode similaire, affectant cette fois-ci les départements du Gard, du Vaucluse et de l'Hérault (figure 1c). Cet épisode est comparable à celui de novembre 1999 en de nombreux points : importance des cumuls pluviométriques (687 mm en 24 heures ont été relevés à Anduze, Gard), extension spatiale de la zone pluvieuse d'une rare ampleur (plus de 650 mm se sont abattus sur une superficie supérieure à 150 km² ; plus de 300 mm ont concerné une superficie de plus de 3200 km²), ainsi qu'un bilan très lourd (22 personnes décédées, 1,2 milliards d'euros de dégâts matériels, Huet *et al*, 2003). Néanmoins, si chacun de ces épisodes prend aujourd'hui une dimension historique, des précédents sont connus comme les crues de 1958 dans le département du Gard (Pardé, 1963) ou celles de 1930 dans le département de l'Aude.

Les inondations provoquées par ces deux épisodes constituent une rare opportunité, à cause de leur dimension régionale, pour vérifier si les limites du lit majeur s'accordent bien avec celles des zones inondées. Après l'exposé de la méthodologie, nous présenterons les résultats obtenus le long des vingt-sept cours d'eau étudiés, tout d'abord par la mesure des linéaires dépassés ou non par les eaux de crues, puis par des analyses réalisées pour rechercher les causes des dépassements isolés.

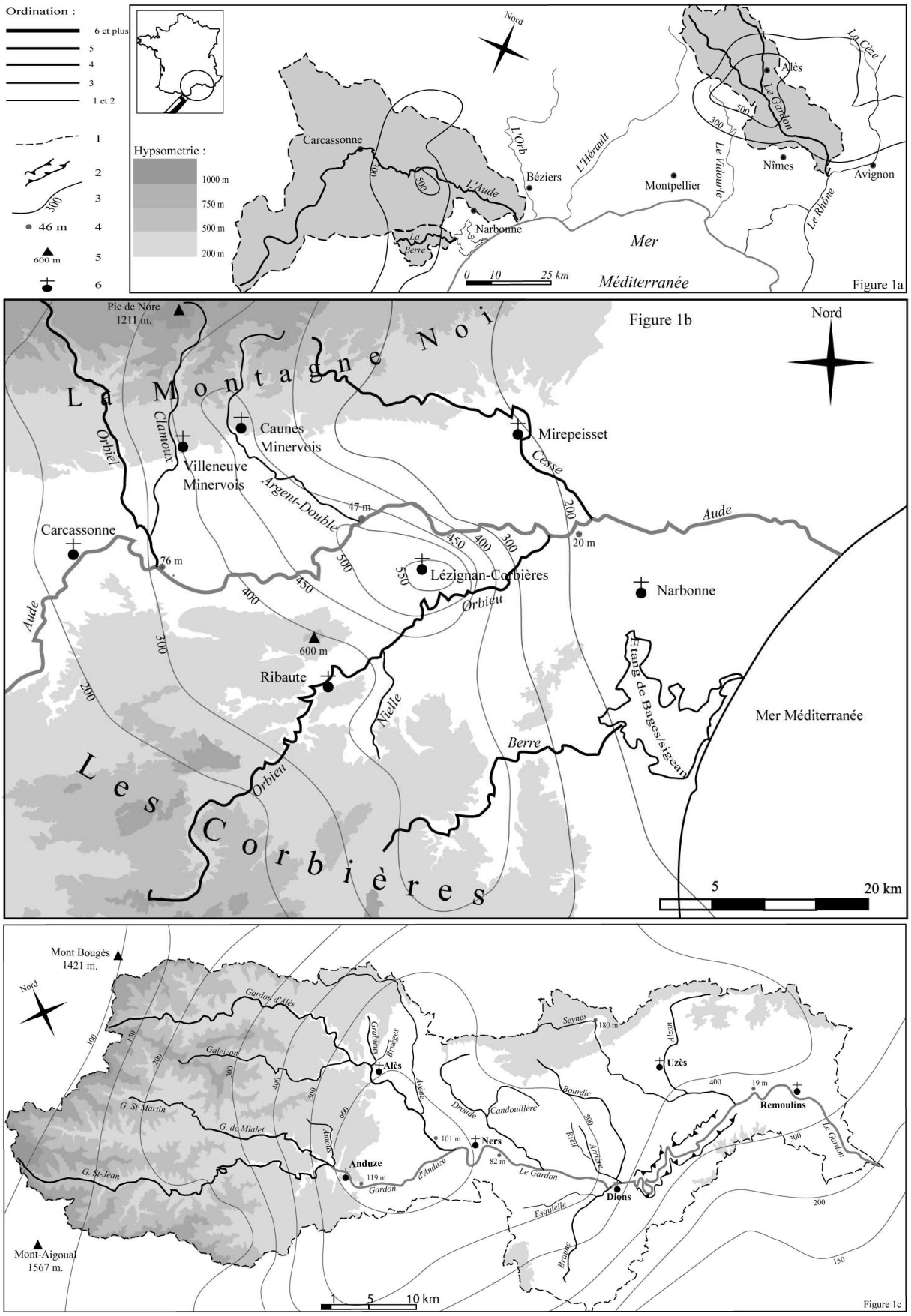

Figure 1 : **Cartes de localisation des cours d'eau étudiés et isohyètes des crues de 1999 dans l'Aude et de 2002 dans le Gard.**

1. Méthodologie

Deux analyses successives ont été effectuées à partir d'une méthode numérique conçue pour déterminer, premièrement la valeur du linéaire de lit majeur qui est resté inférieur à celui de la zone inondée et, deuxièmement, pour recenser tous les secteurs où se sont produits des dépassements. Après avoir localisés et présentés les deux grands ensembles de cours d'eau étudiés, les différentes étapes de la méthode utilisée seront détaillées.

1.1. Les cours d'eau

L'étude porte sur un linéaire total de 492 km, somme du linéaire de 27 cours d'eau localisés dans les départements de l'Aude et du Gard (tableau 1). Leur sélection résulte de la nécessité de constituer une base de données représentative de l'ensemble des drains qui composent un réseau hydrographique, assurant la plus grande significativité des résultats. Ainsi, sont représentés tous les cours d'eau dont l'ordre (Strahler, 1952) est de 1 à 6. Ils drainent des bassins versants dont la superficie est comprise entre 3 et 2000 km².

1.1.1. Cours d'eau des bassins versants de l'Aude et de la Berre

La première étude (Chave, 2002) a été réalisée à la suite des crues de novembre 1999. Elle comporte l'examen de sept cours d'eau du bassin versant de l'Aude soit un linéaire d'environ 154 km (tableau 1). Cette région est structurée en trois grands ensembles géomorphologiques avec les reliefs de la Montagne Noire, au Nord, et ceux des Corbières, au sud, encadrant le bassin sédimentaire drainé par le cours aval de l'Aude, environ 65 km, d'ouest en est (figure 1b).

Les quatre premiers cours d'eau étudiés que sont l'Orbiel, la Clamoux, l'Argent-Double et la Cesse (figure 1b) possèdent des bassins versants que l'on peut découper en deux grandes unités morpho-structurales. Un bassin amont constitué des terrains primaires, où affleurent essentiellement des formations gréseuses, schisteuses. Les cours d'eau y présentent des pentes fortes. L'Argent-Double présente une pente moyenne est comprise entre 21 et 1.7 % (Arnaud-Fassetta *et al*, 2002) alors que pour la Clamoux, elle est comprise entre 10 % et 1 % (Gaume, 2000a). Dans les parties aval, ces cours d'eau drainent le bassin sédimentaire fréquemment recouvert par des colluvions et des alluvions de fond de vallons, sur lesquels sont implantées les vignes. Dans ces formations, les pentes des cours d'eau s'affaiblissent pour devenir proches de ou inférieure à 1 % (Arnaud-Fassetta *et al*, 2002 ; Gaume, 2000a). Ces parties concentrent la quasi-totalité des enjeux susceptibles d'être concernés par le débordement des cours d'eau.

A partir des Corbières s'écoulent les trois autres cours d'eau, c'est-à-dire l'Orbieu et son principal affluent la Nielle (bassin versant de l'Aude), ainsi que la Berre, fleuve côtier se jetant dans l'étang de Bages-Sigean (figure 1b). Le bassin de la Berre s'individualise dans la mesure où il est essentiellement inscrit dans des terrains primaires et secondaires. Les pentes moyennes passent progressivement de 1,8 % dans le bassin amont à 0,26 % à Portel-les-Corbières. Ce cours d'eau se caractérise par un développement de sa plaine alluviale fonctionnelle ponctuel et relativement limité le long de la quasi-totalité de son parcours. Ce n'est en effet qu'à partir de Portel-les-Corbières, à proximité du niveau de base, que cette plaine se développe de façon continue. Le bassin versant de l'Orbieu s'inscrit dans les dépôts du bassin sédimentaire, en particulier dans la molasse de Carcassonne (bassin amont, Nielle et Orbieu) ainsi que dans des dépôts miocènes (bassin aval de la Nielle ; Ellenberger *et al.*, 1987). Le lit mineur de la Nielle présente des pentes moyennes comprises entre 2 % et 4 % dans sa partie amont et inférieures à 1 % dans sa partie aval (Gaume, 2000b).

Rivières	Bassin versant	Rang	Altitude Maximum (m)	Altitude de Jonction	Longueur (km)	Linéaire étudié (km)	Cours d'eau (km)	Densité de drainage ($km.km^2$)	Débit Estimé ($m^3.s^{-1}$)	Débit Spécifique ($m^3.s^{-1}.km^{-2}$)
AUDE / BERRE										
Clamoux	87,0	4	1211	*89	32,4	19,0	119,5	1,37	375 à 400	*4.5
Nielle	127,8	4	530	*57	13,5	8,0	162,0	1,27	800 à 1000	*7.8
Argent Double	110,0	4	1013	38	37,3	22,0	148,7	1,35	400 à 500	*3
Berre	248,5	5	707	0	38,4	32,0	376,6	1,52	1100	12,7
Orbiel	251,8	5	1031	*84	39,2	14,0	354,0	1,41	260 à 380	*1.3
Cesse	269,0	5	1013	*12	50,8	9,0	353,3	1,31	?	?
Orbieu	754,5	5	950	*18	86,0	50,0	890,0	1,18	2000	2,65
GARD										
Rieu	3,3	1	75	67	5,1	1,6	5,1	1,57	?	?
Bruèges	7,2	2	162	138	3,1	2,1	7,3	1,02	?	?
Amous	20,3	3	*266	126	7,9	5,3	29,7	1,46	400	19,7
Arrière	20,6	3	*151	59	8,1	5,4	34,8	1,69	?	?
Esquielle	27,4	2	118	64	8,5	7,4	37,8	1,38	188	6,9
Grabieux	35,2	4	160	136	3,0	3,0	53,6	1,52	700 à 800	19.9 à 22.7
Avène	57,1	3	510	107	29,7	18,9	74,0	1,30	1000	17,5
Candouillère	57,3	3	132	95	9,4	9,4	72,8	1,27	1000	17,5
Galeizon	85,5	4	800	*150	28,7	9,8	154,0	1,80	1500	17,6
Gardon de saint-martin	87,4	4	364	224	12,3	2,3	131,8	1,51	?	?
Seynes	89,3	3	330	44	26,7	14,8	104,6	1,17	?	?
Bourdic	93,1	4	200	53	24,0	12,2	134,6	1,45	1000	10,7
Droude	129,6	4	156	*72	21,4	21,4	163,7	1,26	1500	11,6
Braune	140,1	4	*111	*57	14,2	14,2	148,2	1,06	1500 à 2000	10.7 à 14.3
Alzon	195,2	4	195	24	23,6	20,5	202,6	1,04	?	?
Gardon de mialet	241,7	5	224	130	20,4	20,4	373,7	1,55	600	2,5
Gardon de saint-jean	264,4	5	1060	130	49,3	30,5	402,3	1,52	1500	5,7
Gardon d'alès	443,1	5	823	94	62,5	48,0	652,0	1,47	3000 max	6.8 max
Gardon d'anduze	626,2	6	130	94	17,2	17,2	950,7	1,52	2500	4,0
Gardon	2014,0	6	94	17	74,4	74,4	2615,5	1,30	7000	3,5

Tableau 1 : **Données générales relatives aux 7 cours d'eau des bassins versants de l'Aude et la Berre et aux 20 cours d'eau du bassin versant du Gard.**

1.1.2. Cours d'eau du bassin versant du Gard.

La seconde étude (Esposito, 2003) a été réalisée à la suite des crues de septembre 2002. Elle comporte l'analyse de vingt cours d'eau représentant un linéaire de 338 km (tableau 1). Tous les cours d'eau étudiés sont des affluents de la rivière Gardon. Long de 139 km, drainant un bassin versant de 2014 km2, le Gard ou Gardon est une rivière méditerranéenne renommée notamment pour ces crues automnales, appelées les « Gardonnades » (Pardé, 1963 ; Rosicky, 1983). Il constitue l'un des derniers affluents du fleuve Rhône. Si les altitudes sont relativement modestes avec la moitié de la surface du bassin versant qui est inférieure à 200 m (Davy, 1977), la partie amont correspond à la partie sud-est du Massif Central (Debelmas, 1974) avec la terminaison montagneuse cévenole (Mont Aigoual, 1567 m). Les Gardons cévenols de Saint Jean, de Mialet, de Sainte Croix, de Saint Germain, d'Alès et d'Anduze, ainsi que le Galeizon drainent des terrains cristallins ou schisteux (Rosicky, 1983) peu perméables qui favorisent le ruissellement et l'activité de ces torrents. L'ensemble des vallées de ces « Gardons » profondément raviné, dissèque les Cévennes en crêtes étroites et s'ordonne du nord-ouest au sud-est pour constituer les deux grandes artères du réseau : Gardon d'Anduze et Gardon d'Alès. Dans le bassin versant du Gardon d'Anduze, les cours d'eau ont des ordres de 1 à 6 (Esposito, 2003). Ce réseau hydrographique formé de nombreux cours d'eau présente une pente moyenne qui oscille entre 4 et 0.5 % (Davy, 1977).

C'est à l'est de cette faille que se développe la deuxième unité morpho-structurale du bassin versant du Gardon, un bassin sédimentaire. Les Gardons d'Anduze et d'Alès présentent plusieurs affluents (Grabieux, Avène, Amous, de l'ordre 3 à 4) avant leur confluence, à Ners, où se forme le Gardon qui se développe au sein d'une plaine alluviale fonctionnelle atteignant jusqu'à 5 km de largeur, appelée « la Gardonnenque ». Dans ce secteur, les roches sédimentaires sont formées de marnes, de grès et de marnes gréseuses (Berger *et al.*, 1972) propices à la mise en place de versants en pente douce dans le substratum en bordure de la plaine alluviale fonctionnelle des cours d'eau. Plusieurs affluents confluent avec le Gardon (Droude, Candouillère, Bourdic, Braune, Esquielle, Auriol, Arrière et Rieu). Entre Ners et Dions, sur une distance d'environ 17 km, l'épaisseur des alluvions diminue d'amont à l'aval pour laisser apparaître des affleurements calcaires dans le lit du cours d'eau. Dans ce secteur, la topographie est plane avec des pentes variant de 0.1 à 0.2 %. A partir de Dions, le Gardon a creusé ses gorges d'une longueur d'environ 20 km qui se terminent au niveau du Pont du Gard, romain, en amont de Remoulins. Leur pente moyenne est très faible de l'ordre de 0.1 à 0.2 %.

1.2. Méthodologie

Dans les deux espaces étudiés, la cartographie des zones inondées a été dressée par des bureaux d'études (BCEOM, 1999, 2003). Pour la cartographie hydrogéomorphologique, celle concernant les cours d'eau audois a été réalisée dans l'urgence les semaines ayant suivi la catastrophe (Cete-Méditerranée, 2000a). Par contre, celle des cours d'eau gardois a été réalisée durant l'été 2002, juste avant les crues (Carex, 2002). Cette cartographie constitue l'Atlas des Zones Inondables du bassin versant des Gardons. Tous les documents sont réalisés à l'échelle du 1/25000^{e}.

La comparaison des deux limites retenues a été effectuée en deux grandes étapes, grâce à l'emploi d'un logiciel de SIG, seul type d'application apte à superposer plusieurs couches d'informations tout en conservant le géoréférencement des données. La superposition des deux couches d'information a permis de réaliser un ensemble de traitements graphiques organisant la progression méthodologique en deux grandes étapes. La première est la connaissance de l'espace dans lequel se sont propagées les crues survenues en 1999 et en 2002. La seconde étape

se fixe comme objectif de vérifier l'ensemble des cas où cette limite géomorphologique a été dépassée par les zones inondées.

1.2.1. Première étape : mesure des linéaires de dépassement et de non-dépassement

La première étape de la démarche consiste à superposer les deux limites à comparer pour déterminer, le long d'un cours d'eau, la localisation de la limite de la zone inondée par rapport à celle du lit majeur. L'évolution longitudinale des deux limites permet en effet de classer les linéaires en trois types de situations engendrées par le passage de la crue. La première se produit lorsque la limite de la zone inondée se situe au-delà de celle du lit majeur. Dans ce premier cas, le linéaire concerné est appelé le ″linéaire de dépassement″. La seconde est réalisée lorsque les deux limites apparaissent comme superposées, du fait que les écarts, entre elles, restent faibles. Dans ce second cas, le linéaire concerné est appelé le ″linéaire de remplissage″. La troisième situation représente les cas où sont mis en évidence des écarts significatifs entre les deux limites mais cette fois-ci la limite externe du lit majeur étant bien au-delà de la zone inondée. Le linéaire concerné dans ce troisième cas représente le ″linéaire de non-remplissage″.

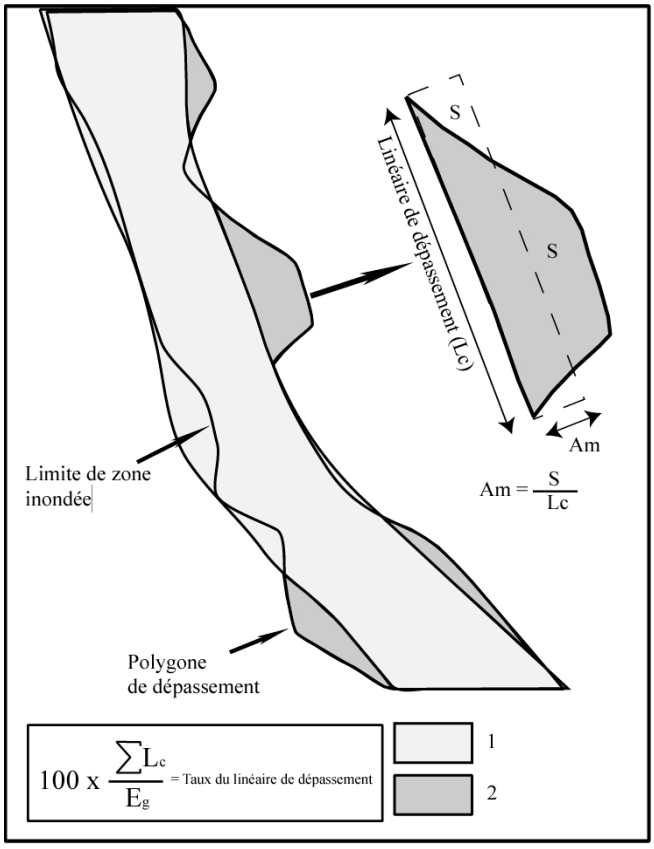

Figure 2 : **Superposition des limites et schématisation des polygones de dépassements.** 1 : plaine alluviale fonctionnelle du cours d'eau ; 2 : surface inondée au-delà de la plaine alluviale fonctionnelle (polygone de dépassement).

L'obtention de la valeur du linéaire concerné par chacun de ces trois types de situation passe par la réalisation d'opérations graphiques. Sont ainsi isolés tous les écarts, même les plus minimes, existants entre les deux limites (figure 2). Chaque cas constitue un objet numérique, que nous avons nommé ″polygone de dépassement″. À chaque polygone peuvent être attribuées diverses informations, soit calculées directement par le logiciel, telles que sa surface, soit obtenues après traitements complémentaires (par exemple, le ″linéaire de dépassement″). Une fois tous les polygones individualisés, les traitements consistent à les transformer en objets polylignes pour que puissent être mesurés les ″linéaires de dépassement″. Ce linéaire correspond à la distance séparant les deux intersections de couches à l'origine de la création du polygone (figure 2). Sa valeur est mesurée par le logiciel. Sur chaque cours d'eau, la somme de ces linéaires unitaires, classée au sein des trois types de situation, rapportée au périmètre du lit majeur conduit à l'estimation du pourcentage de son ″linéaire de dépassement″, de son ″linéaire de remplissage″ et de son ″linéaire de non remplissage″. Le

périmètre du lit majeur de chaque cours d'eau est dénommé ″l'enveloppe géomorphologique″ ; la somme de l'enveloppe de tous les cours d'eau prend le nom ″d'enveloppe géomorphologique totale″ (E_g – figure 2 et tableau 2).

	Bassin versant Aude / Berre		Bassin versant Gard	
	Enveloppe géomorphologique (Eg - km)			
	349,1		746,2	
	Linéaire	Taux	Linéaire	Taux
Total du linéaire de non-dépassenement	232,7	66,7%	473,9	63,5%
< 25 m	106,7	30,6%	283,5	38,0%
> 25 m	126,0	36,1%	190,4	25,5%
Total du linéaire de dépassenement	116,4	33,3%	272,3	36,5%
< 25 m	72,7	20,8%	205,2	27,5%
> 25 m	43,7	12,5%	67,1	9,0%
	Nombre	Taux	Nombre	Taux
Total de polygone de non-dépassenement	625	100,0%	2212	100,0%
< 25 m	541	86,6%	2090	94,5%
> 25 m	84	13,4%	121	5,5%
Total de polygone de dépassenement	632	100,0%	2272	100,0%
< 25 m	581	91,9%	2200	96,8%
> 25 m	51	8,1%	72	3,2%

Tableau 2 : **Tableau de synthèse des linéaires de dépassement et de non-dépassement en relation avec les polygones de dépassement et de non-dépassement.**

1.2.2. Typologie des cas de dépassement

Une fois isolées les trois catégories de linéaire, l'intérêt se porte sur celle qui représente les dépassements. Plus précisément, des analyses supplémentaires ont été effectuées sur les polygones de dépassement pour déterminer les raisons de cette situation. Pour se concentrer sur les cas les plus significatifs, un tri des polygones de dépassements a été réalisé pour éliminer l'information résiduelle. Il a été effectué à l'aide d'un ″seuil de significativité″. Les incertitudes techniques inhérentes à la réalisation de chaque étape de création des deux documents cartographiques permettent de définir la valeur de ce seuil. Ont ainsi été prises en compte les incertitudes imputables au fond cartographique utilisé, celles liées au géoréférencement et à la digitalisation des cartes hydrogéomorphologiques et l'incertitude contenue dans le report de l'information géomorphologique sur la carte topographique. Dans la mesure où certains de ces paramètres sont très difficiles à évaluer en raison de leur inconstance (liés à l'erreur humaine), la valeur retenue pour ce seuil est de 25 mètres. C'est une valeur minimale qui correspond à l'incertitude du report de l'information géomorphologique (1 mm, soit 25 mètres à l'échelle du 1/25000ème) et permet la prise en compte d'un nombre maximum de polygones de dépassement. De ce fait, les polygones de dépassement présentant une amplitude moyenne supérieure à cette valeur seront considérés comme significatifs et feront l'objet de vérifications complémentaires, tant par l'intermédiaire des photographies aériennes que des analyses de terrain.

Reste donc à définir la valeur transversale du dépassement, que nous proposons d'approcher par ″l'amplitude moyenne″ (notée A_m - figure 2). Celle-ci résulte en effet du rapport entre la surface du polygone et de son "linéaire de dépassement" (figure 2) et n'est concevable que si l'on accepte une simplification des polygones. En effet, les caractéristiques géométriques de ces objets numériques, ils sont dans une grande majorité beaucoup plus longs

que larges, nous permettent de les assimiler à des rectangles équivalents en surface et en longueur. Connaissant ces deux valeurs, il devient très facile d'évaluer leur largeur, qui constitue dans cette démarche ″l'amplitude moyenne″. Toutefois, cette simplification n'est pas valable pour les polygones présentant une forme circulaire.

2. Les résultats

2.1. La mesure des linéaires.

Les traitements graphiques (cf. 1.2.1), appliqués aux vingt-sept cours d'eau étudiés permettent de mettre en évidence la très large propagation des eaux de ces deux crues rares à exceptionnelles à l'intérieur des limites de leur plaine alluviale fonctionnelle. Cette première conclusion repose sur les valeurs de linéaires obtenues pour chacune des trois situations constatées après le passage de la crue : les cas de dépassement, les cas de remplissage et les cas de non-remplissage.

La première de ces catégories représente les situations pour lesquelles la limite de la zone inondée se situe au-delà de la plaine alluviale fonctionnelle du cours d'eau. Le taux de ce linéaire de dépassement représente 12,5 % du linéaire de l'enveloppe géomorphologique audoise et moins de 9 % de celui de l'enveloppe gardoise (tableau 2). Ces valeurs sont une moyenne de taux variables puisque, selon les cours d'eau, ils sont compris entre 0 et 37 % et indiquent par conséquent l'existence de disparités en fonction de chaque bassin versant (tableau 3). Ces dépassements apparaissent comme ponctuels puisque 51 de ces situations ont été inventoriées dans l'Aude et 72 dans le Gard. Globalement ils se caractérisent également comme des dépassements limités puisque seulement 5 % de ce linéaire montre une amplitude moyenne supérieure à 60 mètres (figure 3).

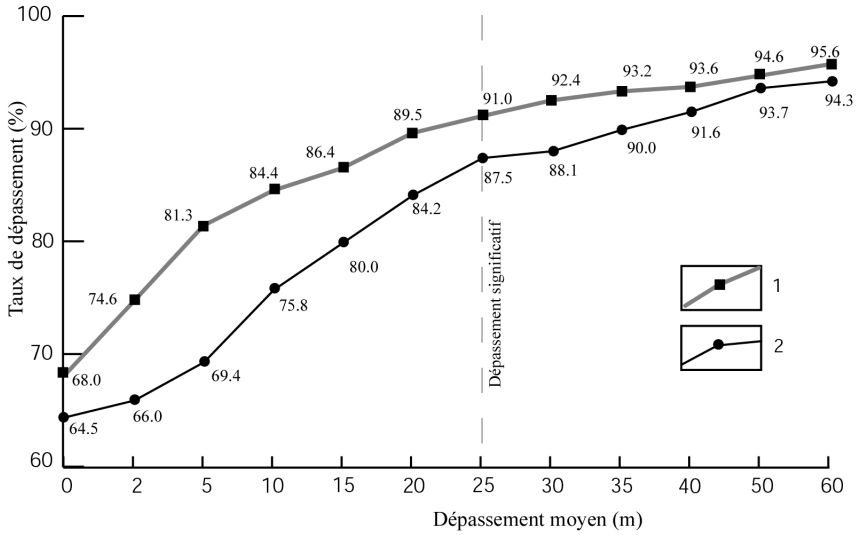

Figure 3 : **Courbe moyenne du taux de non-dépassement des limites de la plaine alluviale fonctionnelle par celles des zones inondées.** 1 : bassin versant du Gard ; 2 : bassins versants de l'Aude et la Berre.

Le remplissage de la plaine alluviale fonctionnelle du cours d'eau, seconde catégorie de résultats obtenus, est réalisé lorsque la limite de la zone inondée est positionnée à plus ou moins 25 m de celle du lit majeur du cours d'eau. Dans ce cas, les écarts entre les deux limites n'étant pas significatifs, la superposition des deux limites est représentée et par conséquent assimilée au remplissage de la plaine alluviale fonctionnelle des cours d'eau. C'est la situation majoritairement observée pour les 27 cours d'eau étudiées. Les résultats montrent en effet que les crues de novembre 1999 ont rempli, en moyenne, à plus de 51 % la plaine alluviale

fonctionnelle des cours d'eau audois et que les crues de septembre 2002 ont rempli à près de 66 % celle des cours d'eau gardois (tableau 2). Dans ce cas également, les taux peuvent varier dans une fourchette de valeurs comprises entre 10 et 93 % de l'enveloppe géomorphologique du cours d'eau (tableau 3).

Enfin, les cas où la plaine alluviale fonctionnelle des cours d'eau n'a pas été entièrement envahie par les eaux restent globalement minoritaires. En effet, ces linéaires de non-remplissage représentent un tiers et un quart de l'enveloppe géomorphologique respectivement audoise et gardoise. Cette troisième catégorie est par ailleurs marquée par l'importance de la variabilité des taux puisque selon les cours d'eau concernés, ils varient 2 à 90 %.

Rivières	Enveloppe Géomorphologique (m)	Taux de remplissage (%)	Taux de dépassement (%)	Taux de non-remplissage (%)
AUDE / BERRE				
Nielle	16708	0%	93%	7%
Orbiel	30120	6%	66%	28%
Cesse	30580	0%	10%	90%
Clamoux	39120	3%	68%	28%
Argent-Double	39630	11%	63%	27%
Berre	86586	10%	58%	32%
Orbieu	106400	26%	30%	44%
GARD				
Rieu	3380	13%	31%	57%
Gardon de St Martin	4543	0%	55%	45%
Bruèges	5151	0%	75%	25%
Arrière	6260	26%	60%	14%
Grabieux	7357	0%	41%	59%
Esquielle	9436	7%	85%	8%
Amous	11268	11%	84%	5%
Galeizon	21824	0%	42%	58%
Bourdic	23056	33%	45%	22%
Braune	27422	37%	54%	9%
Candouillère	27880	8%	91%	2%
Seynes	32445	0%	57%	43%
Avène	39575	3%	54%	43%
Gardon de Mialet	44043	0%	84%	16%
Alzon	45722	8%	57%	35%
Gardon d'Anduze	49614	20%	54%	25%
Droude	57650	7%	76%	17%
Gardon de St Jean	63370	2%	75%	23%
Gardon d'Alès	96664	1%	47%	52%
Gardon	169540	13%	77%	10%

Tableau 3 : **Tableau de synthèse des résultats issus de la première étape de vérification avec les taux de remplissage, non-remplissage et de dépassement.**

Les raisons de cette variabilité observée à l'échelle des bassins versants interrogent car elles révèlent différentes situations lorsque sont combinés les quatre principaux facteurs qui conduisent au remplissage du lit majeur des cours d'eau. Ces facteurs sont évidemment les caractéristiques spatiales (étendue des isohyètes) et temporelles (intensité et cumuls des pluies) des précipitations à l'origine des inondations, auxquelles s'associent les caractéristiques lithologiques et topographiques des bassins versants, mais aussi l'importance des aménagements et des modifications apportées à ces espaces.

En effet, lorsque les cours d'eau étudiés présentent des taux de remplissage élevés cela signifie généralement une localisation du cours d'eau proche des pluies les plus importantes. Ceci est par exemple le cas de la Nielle (Aude) qui présente un taux de remplissage de 93 %. Ce cours d'eau se situe dans la zone des plus forts cumuls pluviométriques relevés en novembre 1999, puisque le bassin a reçu en totalité plus de 400 mm de pluie (figure 1b). En outre, les études hydrologiques réalisées sur cette rivière mettent en évidence l'importance des débits ayant transité au sein de sa plaine alluviale fonctionnelle (tableau 1). Cette situation reflète une superposition des limites de la crue avec celles du lit majeur sur l'ensemble du linéaire étudié. Le rôle des formations dans lesquelles s'est incisée la plaine alluviale fonctionnelle n'est alors pas négligeable. Dans le cas de la Nielle, le lit majeur est limité à sa bordure par la terrasse alluviale würmienne, et le passage d'une unité à l'autre s'effectue par un talus abrupt, haut d'une quinzaine de mètres, limitant de ce fait les écarts consécutifs à des raccordements progressifs entre le lit majeur et les formes encaissantes. Dans le département du Gard, plusieurs cours d'eau se trouvent dans cette situation. La Candouillère comme l'Esquielle ou l'Amous présentent des taux de remplissage supérieurs à 84 % (tableau 3), significatifs de cumuls de précipitations supérieurs ou égaux à 500 mm. En outre les estimations de valeurs de débit disponibles (Gaume *et al*, 2003) attestent de la puissance des crues puisque les débits spécifiques se situent entre 10 et 20 $m^3/s/km^2$ (tableau 1). Par contre, bien que le Gardon de Mialet soit caractérisé par des taux de remplissage similaires (84 %), sa signification est différente à cause, notamment, de sa situation géographique. En effet, ce cours d'eau se localise dans la partie cévenole du bassin versant du Gardon, c'est-à-dire celle où les cumuls pluviométriques ont été les plus faibles (figure 1c) mais aussi celle où les cours d'eau parviennent dans les plaines situées à l'aval par l'intermédiaire de tracé en gorges. Par conséquent, cela signifie que ce type de cours d'eau est caractérisé par le fait que ses lits mineur et majeur sont généralement confondus, expliquant l'importance du taux de remplissage obtenu.

Les facteurs énoncés auparavant s'appliquent également à l'explicitation des situations de non-remplissage. Ainsi, l'hypothèse généralement privilégiée pour expliquer l'importance des taux obtenus est l'insuffisante pluviométrie survenue sur le bassin versant. En effet, dans ce cas, les volumes précipités ou ruisselants n'ont pas été suffisants pour provoquer l'inondation de la totalité du lit majeur. Un certain nombre de cours d'eau étudiés se situent en effet sur les marges des plus forts cumuls pluviométriques et sont de ce fait caractérisés par des taux de non-remplissage importants. Le cas de la Cesse (figure 1b) fournit un bon exemple de cette situation. Ce cours d'eau, situé sur la marge orientale des cumuls pluviométriques les plus importants survenus en novembre 1999 montre en effet un taux de non remplissage de sa plaine alluviale fonctionnelle de 90 % (tableau 3). Ce taux est représentatif de l'insuffisance des précipitations puisqu'il est confirmé par les estimations de débit fournies après cet événement. Celles-ci, considérées à la station de Mirepeisset (figure 1b) aboutissent à considérer la crue de la Cesse comme une crue d'une fréquence de l'ordre de 20 à 30 ans (Lefrou *et al*, 2000). Dans le bassin versant du Gardon les cours d'eau drainant la partie cévenole s'assimilent au cas de la Cesse puisque c'est la zone où se sont produits les plus faibles cumuls de précipitations. Ainsi, l'importance des taux de non-remplissage observés pour le Gardon d'Alès, le Grabieux ou encore le Galeizon (tableau 3) s'expliquent par cette hypothèse. Toutefois, lorsque les cours d'eau sont suffisamment longs pour être intéressés par plusieurs surfaces pluviométriques contributives, les résultats obtenus masquent quelque peu la réalité. En effet, nombreux sont les cours d'eau caractérisés par une partie de leur bassin versant concernée par des pluies beaucoup plus faibles que l'autre amenant ainsi une évolution contrastée entre la partie amont non remplie à laquelle succède vers l'aval un remplissage progressif des lits majeurs. Les exemples de l'Orbiel dans l'Aude comme de l'Avène ou des Seynes dans le Gard traduisent ces phénomènes. Ensuite, il apparaît que

certaines parties de cours d'eau montrent des situations de non-remplissage alors qu'elles sont concernées par les cumuls les plus importants. Ceci est généralement la conséquence d'aménagements d'importance présents dans les lits majeurs des cours d'eau. Par exemple, pour le Gardon d'Alès dans la traversée de cette ville, la superposition de plusieurs séries d'aménagements (remblaiement, digues, recalibrages) explique aujourd'hui que certaines parties du lit majeur n'aient pas été concernées par les eaux malgré leur caractère inondable.

Au terme de cette première série de résultats, les chiffres obtenus montrent la très large propagation des crues de novembre 1999 et septembre 2002 au sein de la plaine alluviale fonctionnelle des cours d'eau étudiés. Cela signifie donc que les possibilités de prédétermination de ces espaces vulnérables sont tout à fait possibles et réalisables par cette méthode qui implique des coûts tout à fait limités (Masson *et al*, 1996). En outre, les disparités observées dans l'étude de chaque bassin versant montrent que ces possibilités dépendent d'une combinaison de facteurs physiques, liés aux caractéristiques de l'épisode pluviométrique mais aussi à celles du bassin versant sur lequel s'abat la pluie, avec des facteurs anthropiques, liés principalement à l'importance de l'aménagement des plaines alluviales et à la modification de l'écoulement des crues au sein de ces espaces. Par ailleurs, ces résultats montrent l'intérêt de poursuivre ces recherches pour tester les possibilités de relation éventuelle entre les pluies précipitées ou ruisselées et le remplissage du lit majeur des cours d'eau.

2.2. Typologie des cas de dépassement

La mesure des linéaires (cf. 2.1) a mis en évidence l'existence de plusieurs secteurs pour lesquels la limite de la zone inondée se trouve au-delà de celle du lit majeur. Ces polygones, au nombre de 51 pour les cours d'eau audois et de 72 pour les cours d'eau gardois, représentent autant de situations susceptibles de se poser en contradiction avec les principes de la cartographie hydrogéomorphologique, à cause du dépassement de la plaine alluviale fonctionnelle des cours d'eau. Il s'agit donc de vérifier à présent si ces contradictions sont avérées ou si ces polygones sont le résultat d'autres processus. Pour cela, des analyses complémentaires ont été menées sur chacun des 123 polygones. Elles ont été accomplies au moyen des photographies aériennes et des observations de terrain. Au terme de cette seconde phase d'analyses, il ressort que les dépassements s'expliquent par 4 grands types de processus (figure 4) auxquels doivent être rajoutées les erreurs de cartographie.

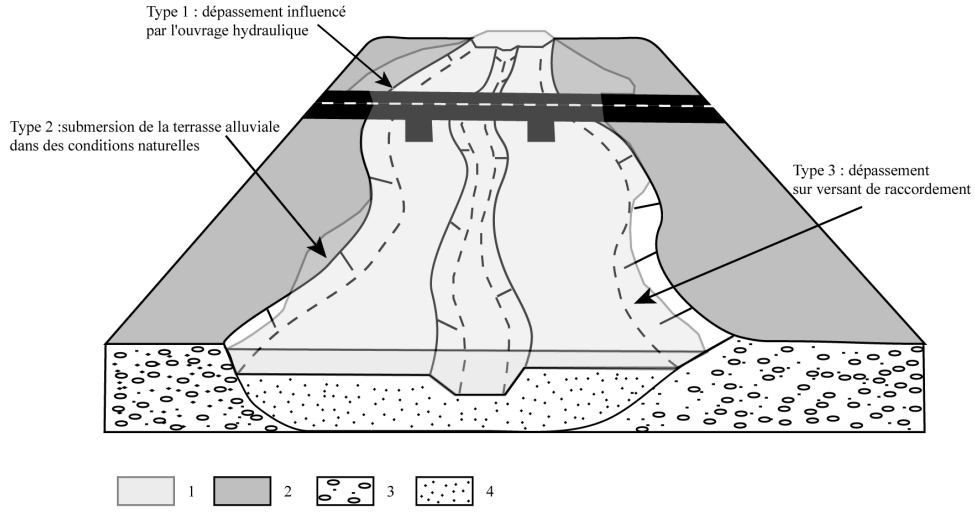

Figure 4 : **Schématisation des types de dépassements à l'échelle d'un tronçon d'un cours d'eau.** 1 : Plaine alluviale fonctionnelle ; 2 : Terrasse alluviale ; 3 : Alluvions anciennes ; 4 : Alluvions récentes.

2.2.1. Type 1 : submersion des terrasses alluviales consécutive à la présence d'aménagements.

Ce premier type de dépassement regroupe l'ensemble des secteurs pour lesquels a été constatée la submersion des terrasses alluviales, celle-ci ayant été causée par la présence d'aménagements modifiant de façon importante le mode de propagation des eaux de crue au sein du lit majeur. Ces ouvrages, qu'ils soient de franchissement (pont, remblais SNCF ou routier, Canal du Midi dans le bassin versant de l'Aude) ou de protection (digues essentiellement), ont provoqué deux situations distinctes de dépassement. La première (type 1a) est liée à la rupture d'un ouvrage qui implique alors la brusque libération des volumes d'eau accumulés à son amont. Les eaux ainsi lâchées peuvent s'étendre jusque sur les formes encadrant le lit majeur du cours d'eau. La seconde (type 1b) fait que l'ouvrage, à cause de l'insuffisance de son dimensionnement ou de son implantation par rapport à la plaine alluviale fonctionnelle du cours d'eau, forme un écran qui modifie la ligne d'eau à son amont immédiat. De ce fait, les eaux sont forcées de s'étendre au-delà de la plaine alluviale fonctionnelle, l'ampleur de cette extension étant alors fonction de la hauteur de l'ouvrage. L'analyse a conclu à l'un ou l'autre de ces phénomènes lorsque des situations de mise en charge, de surverse ou de rupture d'ouvrages ont été constatées par nous ou par les riverains.

Les résultats montrent des écarts sensibles entre les deux zones étudiées. En effet, si environ un tiers du "linéaire de dépassement" significatif s'explique par la présence d'ouvrages dans les plaines audoises (13748 m – tableau 4), il atteint seulement 3 % de ce même linéaire dans les plaines gardoises (2166 m – tableau 4). L'importance du linéaire ainsi concerné dans l'Aude est consécutive, notamment, à la présence du Canal du Midi dans les parties aval des cours d'eau drainant le versant sud de la Montagne Noire. Ceux-ci ont la particularité de devoir franchir ce canal dont l'implantation perpendiculaire par rapport aux écoulements provoque la retenue de volumes d'eau importants. En outre, dans le cas des cours d'eau audois, ces dépassements présentent une amplitude importante, en moyenne supérieure à 242 m (figure 5). Ceci signifie que dans de tels cas, les formes construites par le cours d'eau perdent leur signification hydrologique. Par ailleurs, la faiblesse des linéaires expliqués par ces phénomènes dans le département du Gard ne signifie pas leur absence mais seulement leur insuffisance à provoquer de telles situations.

2.2.2. Type 2 : submersion des terrasses, glacis et cônes dans des conditions naturelles

Lorsque dans des conditions naturelles de propagation des formes encadrantes ont été submergées par les eaux de crue, une contradiction vis à vis des principes de la cartographie hydrogéomorphologique est constatée. Par conditions naturelles est sous-entendu que sur les secteurs identifiés les eaux ne sont influencées par les remous provoqués par les ouvrages hydrauliques ni vers l'amont ni vers l'aval du cours d'eau. Lorsque les eaux s'étalent au-delà du lit majeur du cours d'eau elles se répandent sur des formes topographiques et des formations que l'on peut classer en trois grands types. Tout d'abord, celui qui est le plus répandu, l'extension se fait sur des terrasses (type 2a). Ce sous-type regroupe aussi bien les terrasses alluviales que les terrasses rocheuses. Lorsqu'elles sont absentes, le lit majeur se

raccorde avec des formes de bas versant. Dans certains cas, c'est un glacis qui succède transversalement au lit majeur (type 2b). Dans d'autres cas, la forme résultante est un cône alluvio-colluvial (type 2c).

Dix secteurs ont été identifiés et classés dans ce type 2. Si, parmi les cours d'eau audois, un seul présente ce type de dépassement (l'Orbieu – tableau 4), les linéaires concernés ne représentent qu'une infime partie de l'enveloppe géomorphologique (680 m, soit 1,6 %). De plus, l'amplitude réduite de 26 mètres (figure 5) et les formes de bas de versant concernées les rendent finalement peu significatifs. Par contre, ce n'est plus le cas des 9 secteurs répertoriés le long des cours d'eau gardois. Chaque site présente en effet un intérêt particulier puisque ce sont soit des terrasses alluviales ou rocheuses qui sont concernées. Cet intérêt est d'autant plus grand que les amplitudes de dépassement sont parfois importantes, supérieure à 465 m comme par exemple à Remoulins (cf. 3).

Toutefois, la localisation de ces polygones incite à la recherche d'une explication locale puisque 6 des 8 polygones, c'est-à-dire 79 % de ce linéaire classé en type 2a, se concentrent le long du Gardon entre la sortie de ses gorges et la confluence avec le Rhône (figure 1). Plusieurs hypothèses peuvent être formulées pour expliciter cette situation, au premier rang desquelles apparaît la trop faible capacité de la plaine alluviale fonctionnelle devant l'importance des volumes à évacuer ou bien encore le rôle des nombreux ouvrages d'art se succédant dans cette partie de la plaine. Etant donné que ces situations sont localisées dans la partie aval du Gardon, l'hypothèse privilégiée concerne les conditions de genèse de ces terrasses alluviales. Tous les polygones se situent à proximité des niveaux de base local (confluence avec le Rhône) et général (la Méditerranée), à de faibles altitudes, comprises entre 25 m NGF à la sortie des gorges et 15 m NGF au droit de la confluence. Ces terrasses se sont mises en place au cours du Würm alors que la mer Méditerranée se trouvait 120 m en dessous de son niveau actuel. Par conséquent, le profil longitudinal de ces formes est plus pentu que celui du lit majeur du Gardon. L'hypothèse retenue consiste donc à penser que ces polygones se localisent dans la zone où les terrasses würmiennes passent progressivement sous les alluvions actuelles.

Sans remettre en cause les fondements de la cartographie hydrogéomorphologique, l'identification de ces secteurs implique surtout un réajustement des limites de son application. Elle insiste surtout sur la nécessité d'apporter une attention particulière lors de la cartographie de tels secteurs.

2.2.3. Type 3 : dépassements sur le versant de raccordement entre basse terrasse et lit majeur

Le passage de la plaine alluviale fonctionnelle aux formes hors d'atteinte des crues ne se réalise pas toujours par un talus abrupt. Dans certaines situations, ce contact est progressif, caractérisé par une longue forme convexo-concave étirée sur plusieurs dizaines de mètres de longueur. Ce versant se distingue néanmoins par une pente supérieure à celle du lit majeur. Lorsque les eaux s'étalent au-delà de la partie externe du lit majeur, la limite de l'inondation se situe alors entre la concavité basale et la convexité sommitale. La prise en considération de ce type 3 s'avère nécessaire dans la mesure où, contrairement aux situations référencées en type 2, les formes considérées hors d'atteinte des crues n'ont pas été recouvertes par les eaux. Par ailleurs, et dans quelques cas particuliers, ce versant de raccordement a été aménagé à des fins agricoles. Il a pu ainsi être aplani et l'espace cultivé délimité à l'aval par un talus qui, en fonction l'ampleur de l'inondation, a pu être submergé. Cette configuration a été observée aussi bien dans le cas d'un contact entre lit majeur et terrasse alluviale (type 3a) que d'un contact entre lit majeur et les formations du substratum (type 3b).

Les situations de dépassement expliquées par l'étalement des eaux sur ce versant de raccordement représentent jusqu'à un tiers du linéaire de dépassement significatif de l'enveloppe géomorphologique gardoise, soit environ 24 000 m (tableau 4). Ces situations sont deux fois moins nombreuses dans les bassins versants audois où elles concernent environ le cinquième du linéaire de dépassement significatif. Il apparaît en outre que ces situations engendrent des dépassements d'une amplitude limitée puisque de l'ordre de 60 m en moyenne (figure 5). Elles interviennent lorsque la lithologie est favorable à la mise en place de contact progressif entre plaine alluviale fonctionnelle et encaissant, c'est-à-dire lorsque celui-ci est constitué de formations marneuses. Ceci explique par conséquent la concentration de ce type de polygones dans deux ou trois zones précises du département du Gard. Ainsi, les confluences se situant en Gardonnenque contiennent plus de la moitié de ce linéaire, les cours d'eau drainant les marnes miocènes. Néanmoins, pour plus de précision cartographique, ces résultats montrent la nécessité d'adapter les taxons employés à ces espaces.

2.2.4. Type 4 : dépassements résultant d'erreurs cartographiques

A plusieurs reprises, les analyses effectuées ont conclu à une erreur cartographique puisque l'enquête de terrain montrait la superposition des deux limites sur la partie externe du lit majeur. Ces erreurs ont été constatées aussi bien pour la cartographie hydrogéomorphologique que pour celle des zones inondées. Concernant les erreurs faites sur la limite externe du lit majeur, celles-ci sont le résultat d'une interprétation erronée, incomplète ou insuffisante des secteurs pour lesquels un "polygone de dépassement" est isolé. Elles peuvent être la conséquence, par exemple, de masques, créés par la présence de nuages, d'une végétation abondante ou d'ombres portées, empêchant une interprétation correcte des photographies aériennes. Ces erreurs expliquent une part importante du linéaire de dépassement, soit respectivement 37 % et 27 % de l'enveloppe géomorphologique audoise et gardoise (tableau 4). Concernant les cours d'eau audois, ce sous-type 4a fournit la plus grande explication du linéaire de dépassement total, ce qui peut s'expliquer par la rapidité d'exécution de cette cartographie, intervenue immédiatement après les crues, interdisant l'ensemble des vérifications nécessaires.

Les erreurs de cartographie des zones inondées ont été entérinées lorsque des incohérences manifestes étaient repérées ou bien par déduction faite après enquête auprès des riverains. Elles restent minoritaires avec des taux inférieurs à 10 % du linéaire de dépassement significatif (tableau 4) et d'une ampleur limitée de l'ordre de 50 m (figure 5).

2.2.5. Type 5 : cas non résolus faute d'éléments de vérification

Les analyses effectuées sur huit polygones n'ont pu être conclues de manière pertinente à cause notamment du manque d'éléments de vérification. Cette situation s'est produite, par exemple, dans des secteurs inhabités où il a été impossible de confirmer le positionnement de la limite de la zone inondée. Les secteurs inclus au sein de ce dernier type devront faire l'objet d'investigations ultérieures.

Type de dépassement		Bassin versant AUDE / BERRE			Bassin versant GARD		
		Linéaire total		Nombre de polygones	Linéaire total		Nombre de polygones
		en m	en %		en m	en %	
Dû aux aménagements	1a	4196	9,6	4	0	0,0	0
	1b	9552	21,9	8	2166	3,2	6
En condition naturelle	2a	0	0,0	0	10768	16,1	8
	2b	460	1,1	1	0	0,0	0
	2c	220	0,5	1	0	0,0	0
Sur le versant de raccordement	3a	3891	8,9	7	2685	4,0	3
	3b	3928	9,0	4	21630	32,2	19
Dû aux erreurs cartographiques	4a	16094	36,8	23	18424	27,5	29
	4b	3878	8,9	7	4118	6,1	6
non résolu	5	1472	3,4	4	7284	10,9	4
Total		**43690**	**100,0**	**59**	**67075**	**100,0**	**75**

Tableau 4 : **Typologie des cas de dépassement**. *Numériquement 51 polygones dans les bassins versants de l'Aude et la Berre et 72 dans bassin versant du Gard ont été isolés. Cependant, devant la conjonction d'explications de certain d'entre eux, nous avons procédé à des découpages intra-polygones, augmentant le nombre de 8 unités pour l'Aude et de 3 unités pour le Gard.

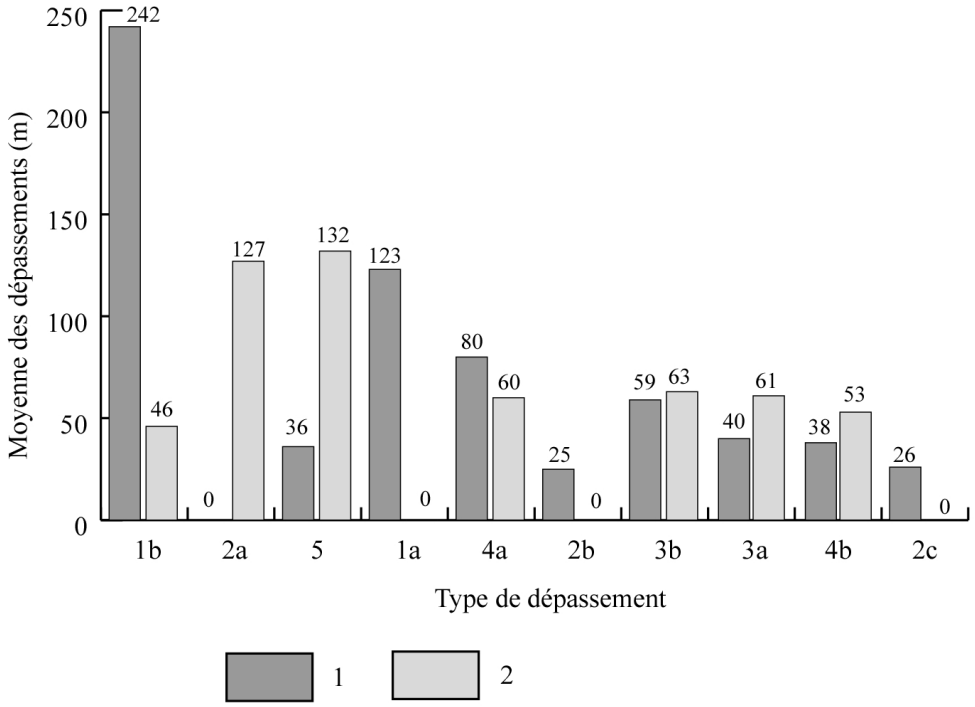

Figure 5 : **Amplitude moyenne par type de dépassement.** 1 : bassins versants de l'Aude et la Berre ; 2 : bassin versant du Gard.

3. Discussion

La pertinence de l'approche hydrogéomorphologique des zones inondables vient d'être démontrée par l'intermédiaire des 27 cours d'eau analysés. Cependant, son application doit être réalisée en considérant trois points clés pouvant être à l'origine de situations *a priori* contradictoires avec ses fondements.

Tout d'abord, le fait que les nappes alluviales pléistocènes se soient accumulées au cours de périodes glaciaires implique, dans la partie aval des cours d'eau proches du niveau de base, que les profils longitudinaux des terrasses et du lit majeur présentent des pentes différentes. En effet, les cours d'eau parvenaient à un niveau marin 120 m plus bas que l'actuel (Campy et Macaire, 1985). Cela signifie qu'il existe forcément un point d'intersection entre ces deux profils, au voisinage duquel peut intervenir la submersion des terrasses alluviales, et au-delà duquel ces formations pléistocènes passent au-dessous du plancher alluvial actuel (Alduc *et al*, 1979). Cette hypothèse s'applique à la terrasse alluviale rissienne sur laquelle s'est implantée la ville de Remoulins (figure 6), inondée en quasi-totalité par plusieurs dizaines de centimètres d'eau (documents vidéographiques), lors de la crue de septembre 2002. Un cas similaire a également été identifié le long de la Cèze dans la traversée de la ville de Bagnols-sur-Cèze. Dans ce cas, l'inondation se produit lors des crues rares sur une terrasse d'âge würmien, comme en attestent les cartographies dressées après la crue de 1958 (H2geau, 2003).

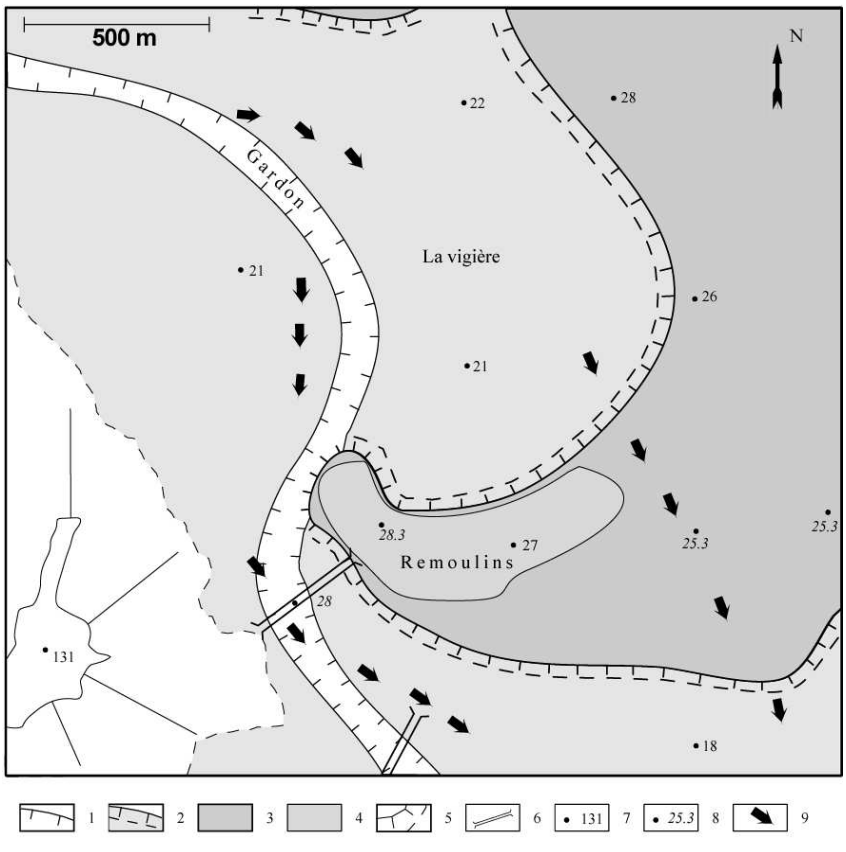

Figure 6 : **Remoulins : Schéma représentatif de la situation**
1 : Talus de lit mineur
2 : Talus de lit majeur
3 : Terrasse alluviale
4 : Centre Ville
5 : Encaissant
6 : Ouvrage d'art
7 : Cote NGF
8 : Cote PHEC
9 : Hydrodynamisme.

Ensuite, la question de la construction actuelle des lits majeurs comporte un intérêt considérable. En effet, les crues rares à exceptionnelles sont susceptibles d'accumuler des volumes de sédiments importants à la surface du lit majeur. De récentes études, basées sur la datation au moyen de radio-isotopes, ont mesuré les accumulations produites le long du Gardon d'Anduze et de l'Ouvèze (Vaucluse). Ainsi, les crues de 1958 (Gardon) et de 1992 (Ouvèze) ont déposé 30 cm d'alluvions, atteignant 48 cm à la suite de deux crues successives survenues en 1992 et 1994 (Bonté *and al*, 2001). Concernant le cas de Remoulins, de tels processus sont tout à fait envisageables du fait notamment de la situation géographique favorable, engendrée par le resserrement sur lequel a été bâti le pont routier franchissant le Gardon. Ces processus d'accumulation apparaissent

d'abord avec l'importance des dénivelées, de l'ordre de 3 mètres, entre l'amont et l'aval du resserrement (figure 6). Ce premier constat est ensuite confirmé par des observations qualitatives effectuées sur les collets des arbres fruitiers plantés aux alentours du lieu-dit la Vigière, cachés par une accumulation sédimentaire certainement produite au cours des deux ou trois dernières décennies, si l'on en juge par l'âge probable de ces arbres.

En outre, ces processus d'accumulation peuvent être amplifiés par les ouvrages hydrauliques implantés dans le lit majeur du cours d'eau. Ceux-ci, en barrant les écoulements, forcent la charge transportée à s'accumuler à leur amont, parfois jusqu'à l'ennoyage de la basse terrasse alluviale. Tel est le cas mis en évidence le long de la partie aval de l'Argent-Double lorsque celui franchit le Canal du Midi. Une dénivelée comprise entre 3 et 4 mètres a été mesurée entre l'amont et l'aval de ce canal, que nous attribuons à la sursédimentation engendrée depuis son implantation (17ème siècle). Par conséquent, la terrasse alluviale würmienne surplombant le lit majeur de plus de 2 mètres à l'aval de l'ouvrage, disparaît sous la surface du lit majeur à son amont (Chave, 2003 ; Delorme *et al*, 2009).

Enfin, comme le suggère le concept de système fluvial, la variable climatique qui le contrôle doit rester stable pour maintenir l'accord entre la forme et les valeurs hydrologiques qui l'ont mise en place. Le réchauffement climatique fait depuis plusieurs décennies l'objet de très nombreuses études tentant d'apporter des précisions sur les tendances climatiques futures et leurs implications zonales. Pour le bassin méditerranéen, la tendance actuelle est celle de la stabilité des conditions climatiques, aucune tendance à une augmentation ou une diminution des précipitations n'étant décelable sur le long terme (Norrant et Douguedroit, 2003).

4. Conclusion

Malgré les limites discutées auparavant, la cartographie hydrogéomorphologique apparaît aujourd'hui comme le moyen le plus fiable de prédétermination des crues majeures survenant fréquemment en milieu méditerranéen. En prenant l'exemple des deux dernières en date, dans l'Aude en 1999 et dans le Gard en 2002, l'étude du positionnement de la limite externe du lit majeur par rapport à celle de la zone inondée montre que 87 à 91% du linéaire de lit majeur se trouve au-delà de la limite de zone inondée. Cela signifie aussi par conséquent que ce genre d'évènements apparaît tout à fait prévisible spatialement.

Ces résultats sont obtenus à partir de l'étude de 27 cours d'eau méditerranéens représentatifs des drains dont l'ordre va de 1 à 6, drainant des superficies allant de 3 à 2000 km2. Cet échantillon de cours d'eau a permis de mettre également en évidence qu'en fonction de l'hétérogénéité de la pluviométrie mais aussi en fonction d'autres paramètres comme la lithologie, la pente et l'aménagement des plaines alluviales, la limite du lit majeur se confond avec celle de la zone inondée sur près de la moitié du linéaire des cours d'eau audois et plus de deux tiers de celui des cours d'eau gardois. En outre, l'analyse des cas où la limite de la zone inondée se trouve au-delà de celle du lit majeur a montré que cela était la conséquence soit de la présence d'aménagements modifiant de façon importante l'écoulement des eaux, soit le résultat d'erreurs cartographiques, soit enfin de l'insuffisante prise en compte du versant de raccordement. Dans tous les cas les situations se posant en contradiction avec les principes de la cartographie hydrogéomorphologique restent insignifiantes sur les cours d'eau audois ou s'expliquent précisément par des conditions géomorphologiques locales comme sur les cours d'eau gardois.

Les résultats renforcent par conséquent la nécessité d'appliquer cette approche dans l'élaboration des documents informant ou réglementant les espaces concernés par le risque d'inondation. Ils justifient en outre la nécessité d'aborder ces problèmes de façon pluridisciplinaire pour optimiser l'étude de l'aléa, comme cela est le cas des premières réalisations de l'application de la méthode intégrée. (Chave 2003).

5. Références bibliographiques

Alduc, D. Auffret, J.P. Carpentier, G. Lautridou, J.P., Lefebre, D. Porchet, M.: 1979, Nouvelles données sur le Pléistocène de la basse vallée de la Seine et son prolongement sous-marin en Manche orientale, *Bull. d'Inform. des Géologues du Bassin Parisien*, 16, 12, 27-34.

Arnaud-Fassetta, G. et al.: 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*, pp.17-33.

BCEOM : 1999, *Repérage et cartographie des crues des 12 et 13 novembre 1999*, Rapport d'étude, Direction Départementale de l'Equipement de l'Aude, 5 p.

BCEOM : 2003, *Inventaire cartographique des dégâts, Crue du Gard et du Vaucluse des 8 et 9 septembre 2002, Proposition d'intervention hiérarchisée, Bassin versant des Gardons*, Rapport d'étude, Direction Régionale de l'Environnement Languedoc-Roussillon, 56 p.

Berger, G. Lemperrière, P. Séguret, M.: 1972, *Carte géologique de la France, 1/50000ème, n° 938, Anduze*, BRGM, Orléans.

Bonté, P. Ballais, J.L. Masson, M. Ben Kehia, H. Eyraud, C. Garry, G. Ghram, A.: 2001, Datations au ^{137}Cs, ^{134}Cs et ^{210}Pb de dépôts de crue du XXe siècle, Barrandon, J.N. Guilbert, P. Michel, V. (éds), XXIe *Rencontres Internationales d'Archéologie et d'Histoire*, Antibes, ADPCA, pp. 141-157.

Bravard, J.P., Petit, F.: 1997, *Les cours d'eau, dynamique du système fluvial*, Armand Collin, collection U, Paris, 239 p.

Campy, M., Macaire, J.J.: 1989, *Géologie des formations superficielles*, Masson, Paris, 433 p.

Carex Environnement: 2002, *Atlas des zones inondables du bassin versant des Gardons*, Rapport d'étude provisoire, Direction Régionale de l'Environnement Languedoc-Roussillon, 155 p.

CETE-Méditerranée: 2000a, *Inventaire cartographique des désordres dans les départements de l'Aude, de l'Hérault, des Pyrénées-Orientales et du Tarn*, 96 p.

CETE-Méditerranée: 2000b, *Commune de Durban-Corbières, propositions de variantes d'aménagement après les inondations des 12 et 13 novembre 1999*. Etude hydraulique de la Berre. Rapport d'étude, Direction Départementale de l'Équipement de l'Aude, 16 pages.

Chave, S.: 2003, *Elaboration d'une méthode intégrée du diagnostic du risque hydrologique*, thèse de doctorat, Université de Provence, Aix-en-Provence, 284 p.

Chave, S.: 2002, Contribution à la validation numérique de la cartographie hydrogéomorphologique, *Géomorphologie*, 4, pp. 297-306.

Chombard-Gaudin C., Usselmann P. (2000) – Inondations dans l'Aude : Risque et cadre réglementaire de la prévention, *Mappemonde*, 57, pp. 27-31.

Davy, L.: 1977, Les Gardons : étude hydrologique, *Bulletin de la Société languedocienne de Géographie*, 1-2, 10 p.

Debelmas, J.: 1974, *Géologie de la France ; vieux massifs et grands bassins sédimentaires*, Doin, 1, 293 p.

Delorme F., Delorme-Laurent V., Ballais J.-L., Bonté P., (2009). L'évolution de la Basse Vallée de L'argent-Double pendant l'époque Historique. In (De Dapper M., Vermeulen F., Deprez S., Taelman D. Ed.) *Ol' Man River. Geo-archeological Aspects of Rivers and River Plains. Archaeological Reports Ghent University 5*, Academia Press, Ghent, 281-296.

Ellenberger, S. Freytet, P. Plaziat, J.C. Bessière, G. Viallard, P. Berger, G.M. Marchal, J.P.: 1987, *Carte géologique de la France, 1/50000ème, N° 1060, Capendu*, BRGM, Orléans.

Esposito, C.: 2003, *Crues de septembre 2002 sur le bassin versant du Gardon, Étude comparative entre les limites de la cartographie hydrogéomorphologique et le relevé de la zone inondée*, mémoire de DEA, Université de Provence, Aix-en-Provence, 40 p.

Garry, G. Ballais, J.L. Masson, M.: 2002, La place de l'hydrogéomorphologie dans les études d'inondation en France méditerranéenne, *Géomorphologie*, 1, pp. 5-15.

Gaume, E.: 2000a, *Analyse du comportement hydrologique des parties amont des bassins versants lors des crues des 12 et 13 novembre 1999 dans l'Aude, les Pyrénées Orientales et le Tarn : le bassin versant de la Clamoux.* Rapport, Cereve, Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement, 49 pages.

Gaume, E.: 2000b, *Analyse du comportement hydrologique des parties amont des bassins versants lors des crues des 12 et 13 novembre 1999 dans l'Aude, les Pyrénées Orientales et le Tarn : le bassin versant de la Nielle.* Rapport, Cereve, Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement, 49 pages

Gaume, E. Livet, M.: 2001 – *Etude de la disparité des comportements hydrologiques des petits bassins versants lors des événements extrêmes*, Rapport final, programme RIO 1, Cereve, Cete de Lyon, MATE, 181 pages.

Gaume, E. Payraste, O. Rosa da Silva, B.: 2003, *Analyse hydrologique des crues des 8 et 9 septembre 2002*, rapport, Cereve, Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable, 95 pages.

Huet, P. Martin, X. Prime, J.L. Foin, P ; Laurain, C ; Cannard, P.: 2003, *Retour d'expérience des crues de septembre 2002 dans les départements du Gard, de l'Hérault, du Vaucluse, des Bouches-du-Rhône, de l'Ardèche et de la Drôme*, Conseil Général des Ponts et Chaussées, Inspection Générale de l'Environnement, Inspection Générale de l'Administration, Conseil Général du Génir Rural des Eaux et des Forêts, 130 p.

Lefrou, C. Martin, X. Labarthe, J.P. Varret, J. Mazière, B. Tordjman, R. Feuteun, R.: 2000, *Les crues des 12, 13 et 14 Novembre 1999 dans les départements de l'Aude, de l'Hérault, des Pyrénées-Orientales et du Tarn*, Conseil Général des Ponts et Chaussées, Inspection Générale de l'Environnement, 95 p.

Masson, M. : 1983, *Essai de cartographie des champs d'inondation par photo-interprétation*, rapport d'étude, Cete-Méditerranée, STU, 47 pages.

Masson, M. Garry, G. Ballais, J.L.: 1996, *Cartographie des zones inondables, approche hydrogéomorphologique*,, Villes et Territoires, Paris, 100 p.

Neppel, L. Desbordes, M.: 2000, *Analyse de l'épisode pluvieux du 12 et 13 novembre 1999*, Rapport d'étude, tome 2, Hydrosciences-Montpellier, 59 pages.

Norrant, C. Douguedroit, A.: 2003, Tendances récentes des précipitations et des pressions de surface dans le Bassin méditerranéen, *Annales de Géographie*, 631, 298-304.

Pardé, M.: 1963, Les crues cévenoles catastrophiques de septembre-octobre 1958, *Annales de Géographie*, 392, pp. 472-479.

Pardé, M.: sd, Le régime des rivières du Massif Central depuis le début du siècle, *Mélanges géographiques offerts à Ph Arbos*, Clermont-Ferrand, pp. 201-209.

Rozycki, J.: 1983, *Les vallées du Gardon : étude des formes et formations plio-quaternaires*, thèse de doctorat, Université d'Aix-en-Provence, Aix, 232 pages.

Schumm, S.A: 1977, *The Fluvial System*, John Wiley and sons, New-York, 338 pages.

Strahler, A.N: 1952, Quantitive analyses of wathershed geomorphology, *American geophysical union transaction*, 38, pp. 913-920.