

La part respective des facteurs hydroclimatiques et anthropiques dans l'évolution récente (1956–2000) de la bande active du Haut Guil, Queyras, Alpes françaises du Sud

Respective parts of hydroclimatic and anthropic factors in the recent evolution (1956-2000) of the active channel of the Upper Guil, Queyras, Southern French Alps.

Gilles ARNAUD-FASSETTA *
Monique FORT *

Résumé – L'objectif de l'étude est de quantifier la variabilité spatiale 2D de la bande active du Haut Guil (23,3 km) et de considérer les fluctuations hydroclimatiques et l'artificialisation du fond de vallée comme les deux principaux facteurs potentiellement responsables des changements. L'analyse s'appuie sur quatre-vingt sites sélectionnés tous les 250–300 m sur quatre séries de photographies aériennes (1956, 1957, 1999 et 2000). Les variables prises en compte sont la surface et la largeur de la bande active, l'indice de tressage et les infrastructures présentes dans le fond de vallée. Les résultats montrent que la variabilité spatiale de la bande active du Haut Guil est très forte depuis la seconde partie du xx^e siècle. La bande active s'élargit et le tressage se renforce après le passage des événements hydroclimatiques haute magnitude–basse fréquence de juin 1957 ($> Q_{100}$) et juin 2000 (Q_{30}). La bande active se contracte et le tressage diminue entre 1957 et 1999 en raison de l'absence d'événements hydroclimatiques véritablement morphogènes et de la mise en place, dans le fond de vallée, des remblais supportant la route principale Château-Queyras/La Roche Ecroulée. Ce modèle d'évolution est original par rapport à certains modèles décrits dans la littérature. Le modèle d'évolution des bassins de moyenne altitude ne paraît pas être transposable à celui des hauts bassins montagnards, dans lesquels le calibrage des bandes actives reste beaucoup plus dépendant de la variabilité hydroclimatique, en raison de la vigueur des aléas et des difficultés à pouvoir véritablement maîtriser leurs effets hydrogéomorphologiques sur tous les segments des cours d'eau.

Abstract – The aim of the study is to quantify the two-dimensional spatial variability of the active channel of the Upper Guil (23.3 km) and to consider the hydroclimatic fluctuations and the human transformation on the valley bottom as the two main factors potentially responsible for change. The analysis rests on eighty sites chosen at intervals of 250–300 m on four series of aerial photographs (1956, 1957, 1999, and 2000). The variables taken into account are the surface and width of the active channel, the braiding index, and the infrastructures in the valley bottom. Results show that the spatial variability of the active channel of the Upper Guil has been very strong since the second half of the twentieth century. The active channel widens and the braiding is reinforced after the passage of high-magnitude long-frequency hydroclimatic events of June 1957 ($> Q_{100}$) and June 2000 (Q_{30}). In contrast, the active channel contracts and the braiding decreases between 1957 and 1999 as a result of the absence of significant morphogenic hydroclimatic events and the setting up in the valley bottom of embankments supporting the main highway between Château-Queyras and La Roche Ecroulée. This evolutionary model is original compared to certain models described in the literature. The evolutionary model of mid-altitude basins appears not to be adaptable to that of high mountain basins, in which the calibration of active channels remains much more dependent on hydroclimatic variability, by reason of a high degree of hazard factors and difficulties in truly mastering their hydrogeomorphological effects on all stream segments.

Introduction

Les bandes actives des cours d'eau alpins ont connu de profonds changements à la fin du XIX^e siècle (JORDA, 1985 ; BRAVARD et PEIRY, 1993 ; SALVADOR, 1993 ; GAUTIER, 1994 ; PEIRY et NOUGUIER, 1994 ; MIRAMONT *et al.*, 1998 ; BALLANDRAS, 2002). L'épuisement des stocks sédimentaires hérités du Petit Âge Glaciaire (PAG), la réduction du nombre de crues basse fréquence–haute magnitude (BFHM), l'atténuation des pics de crue annuels par le reboisement des interfluves et des fonds de vallée, les grands travaux d'hydraulique et la déprise agropastorale ont contribué à réduire les flux sédimentaires dans le lit des torrents et des rivières alpines. Ces facteurs ont agi *de facto* sur la dynamique des bandes actives. La tendance observée depuis la fin du PAG, et plus généralement à l'échelle du XX^e siècle, va dans le sens d'une contraction des bandes actives et d'une réduction des taux de tressage. Cette tendance se décompose en deux phases distinctes :

1- entre 1850 et 1950, le phénomène de contraction apparaîtrait comme une réponse au tarissement progressif des zones sources et au non-renouvellement des stocks

sédimentaires post-PAG, associés à la réduction de la fréquence des crues BFHM et aux effets des interventions humaines (reboisement, hydraulique) dans les bassins ;

2- entre 1950 et 2000, la contraction des bandes actives est décrite comme un phénomène principalement lié aux effets des actions anthropiques sur le milieu. L'accélération de la contraction des cours d'eau préalpins entre 1950 et 1970 est attribuée par F. LIÉBAULT et H. PIÉGAY (2002) aux changements d'utilisation des sols (reboisement, déprise agricole).

Cependant, les études ne cachent pas la difficulté de pouvoir clairement déterminer le rôle respectif des facteurs hydroclimatiques et humains dans l'évolution récente des bandes actives, dans la mesure où ces deux facteurs agissent de façon simultanée tout en engendrant des effets morphodynamiques souvent diachrones. De plus, leurs impacts sont plus ou moins profonds et durables selon le degré de fragilisation (naturel ou anthropique) des bassins et la nature des processus morphogénétiques qui s'y développent. On touche là à des processus complexes où «effets de seuil dynamique» et «relais spatiotemporels» interfèrent (MACAIRE, 1990 ; JORDA et PROVANSAL, 1996). Or, à l'échelle des cinquante-

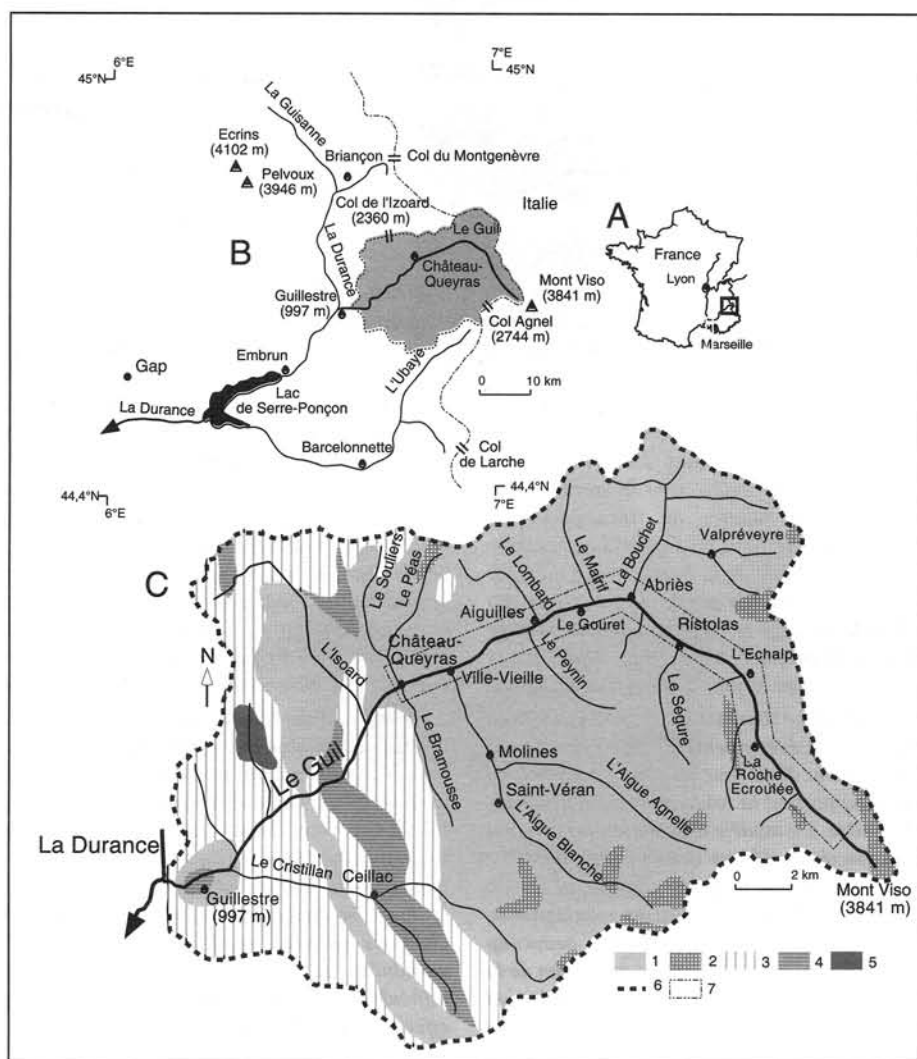


FIG. 1 – LE GUIL ET SON BASSIN-VERSANT

A. Localisation générale de la zone d'étude. B. Localisation du bassin du Guil dans le haut bassin durancien. C. Caractéristiques géologiques et hydrographiques du bassin du Guil. 1 : schistes lustrés ; 2 : complexe ophiolitique ; 3 : calcaires et dolomies ; 4 : grès et conglomérats ; 5 : flyschs ; 6 : limite du bassin-versant du Guil ; 7 : délimitation de la portion de plaine alluviale étudiée.

soixante dernières années, les bassins des Alpes et des Préalpes du Sud n'ont pas forcément tous connu des crues BFHM et leur résilience face aux aléas hydroclimatiques est loin d'être uniforme (TRICART, 1961a). En particulier, on peut s'interroger sur le fait que les hauts bassins montagnards ont pu, à la différence des vallées alpines et préalpines de moyenne altitude, suivre un modèle d'évolution beaucoup moins contraint par les actions anthropiques, en raison de leur connexion directe avec les zones fournisseuses de débris et de la vigueur des aléas hydroclimatiques auxquels ils sont soumis.

Nous avons choisi de tester cette hypothèse sur le haut bassin du Guil, qui offre l'opportunité d'apprécier l'impact respectif du climat (associé à l'hydrologie) et des actions anthropiques sur la dynamique de la bande active d'une rivière torrentielle. L'objectif de cette étude est, à partir de la quantification de la variabilité spatiale 2D de la bande active du Haut Guil, d'évaluer le rôle relatif des fluctuations hydroclimatiques et de l'artificialisation du fond de vallée en tant que principaux facteurs potentiellement responsables de ces changements. Après avoir précisé le contexte géodynamique et humain du bassin-versant et les méthodes d'étude, nous périodiserons la variabilité spatiale 2D de la bande active du Haut Guil entre 1956 et 2000, avant de nous interroger sur la part qu'il faut attribuer aux facteurs hydroclimatiques et anthropiques dans les changements observés.

1. Le Haut Guil et son bassin-versant

Le Guil est une rivière torrentielle qui draine un bassin-versant (730 km²) inscrit dans la zone interne des Alpes occidentales (fig. 1A et 1B). Avec l'Ubaye et la Guisanne, il constitue un des principaux affluents de la Haute Durance. L'étude porte sur le tronçon supérieur du Guil, qui s'étend sur 28,8 km entre le Lac Lestio (2510 m)

et Château-Queyras (1350 m) (fig. 1C). Le bassin ainsi défini (317 km²) reçoit en moyenne 828 mm/an (Abriès) à 714 mm/an (Château-Queyras) de précipitations, valeurs sans doute nettement supérieures en altitude. Les précipitations tombent sous forme de neige pendant l'hiver et de pluies lors de l'incursion fréquente, à la fin du printemps ou au début de l'automne, des masses d'air humides provenant de la Méditerranée (*i.e.* les «coups de Lombarde»). Le régime du Haut Guil est donc de type nivo-pluvial. Le réseau hydrographique est caractérisé par une organisation proche du type rectangulaire (HOWARD, 1967) et l'ordination des écoulements permanents, réalisée à partir de la méthode de A.N. STRAHLER (1952), donne au Haut Guil un rang 4 à Château-Queyras. Le haut bassin du Guil s'inscrit à 90–95 % dans les schistes lustrés de la zone intra-alpine ; le reste de la lithologie est représenté par des ophiolites, des calcaires et des dolomies (fig. 1C). Très sensibles au gel et se délitant facilement du fait de leur forte tectonisation, les schistes fournissent une quantité considérable de débris –essentiellement des «plaquettes» décimétriques et de la «nite»–, qui parviennent par des relais de dynamique et de processus (avalanches, coulées de débris, glissements de terrain) aux bandes actives des drains de rang inférieur puis au Guil. La vallée est marquée par une forte dissymétrie des reliefs, les versants orientés vers l'ouest et le nord-ouest, modérément inclinés et subparallèles au pendage des schistes, s'opposant aux versants tournés vers l'est et le sud-est, très raides et à contre-pendage.

Les facteurs potentiels de contrôle de la bande active du Haut Guil sont nombreux : ils sont d'ordre morphostructural, hydrosédimentaire et humain. Largement guidé par la trame structurale et les héritages glaciaires et secondairement par la présence de puissants cônes torrentiels dans le fond de vallée, le Haut Guil adopte un tracé sinueux, avec un indice de sinuosité de 1,29 (RICHARDS, 1982 ; fig. 2). En période d'hydrologie

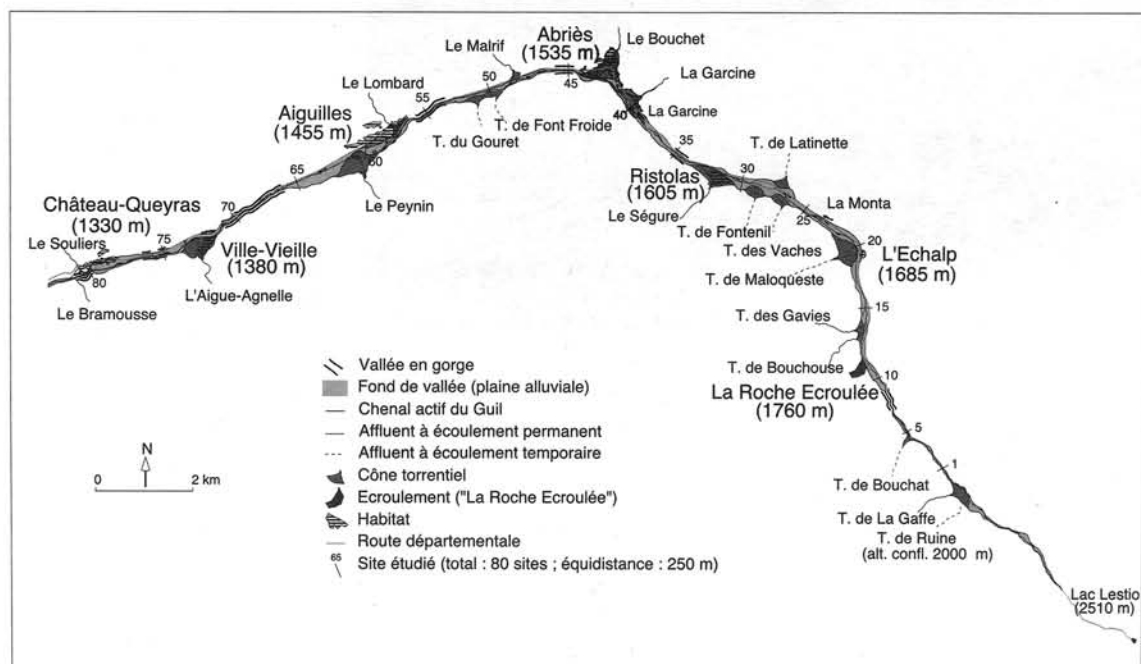


FIG. 2 – CARACTÉRISTIQUES MORPHOSÉDIMENTAIRES, HYDRAULIQUES ET ANTHROPIQUES DU FOND DE LA VALLÉE DU HAUT GUIL

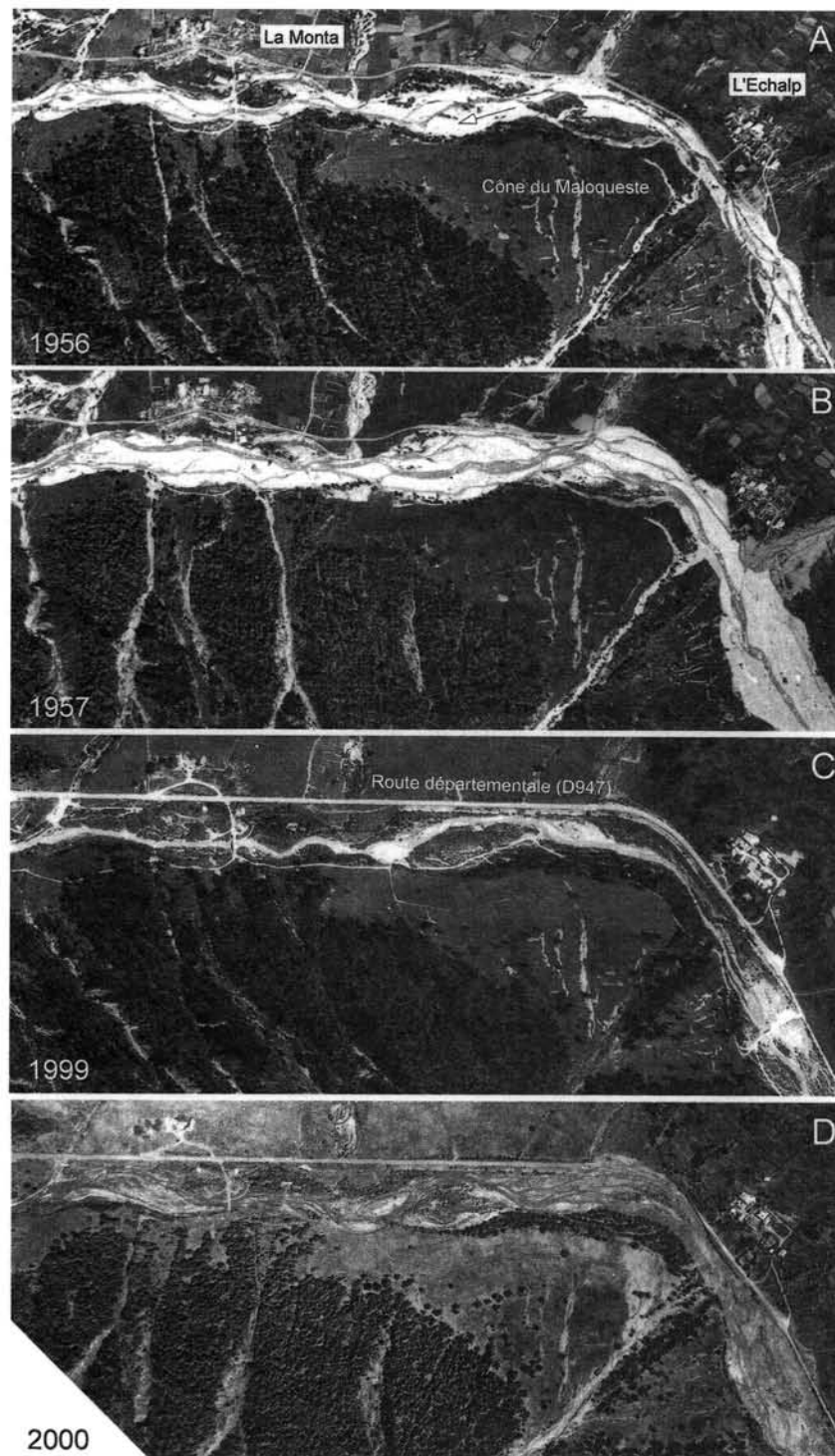


FIG. 3 – ÉVOLUTION RÉCENTE (1956–2000) DE LA BANDE ACTIVE DU HAUT GUIL ENTRE LE HAMEAU DE L'ÉCHALP ET RISTOLAS (SITES 18–24)

A. Noter la contribution des apports latéraux (cruée de 1953) à la recharge de la bande active du Haut Guil. La route D947 suit au plus près la concavité basale des versants.
 B. La cruée de juin 1957 a contribué à l'élargissement considérable de la bande active du Haut Guil. Noter l'importance des apports latéraux sur les deux versants et la destruction quasi systématique de la ripisylve.
 C. La route empiète à présent sur la plaine alluviale. En l'absence de cruée BFHM, la forêt riveraine s'est reconstituée et le Haut Guil adopte un style «sobre» (*i.e.* chenal unique ou tressage à deux chenaux).
 D. La cruée de juin 2000 contribue une nouvelle fois à l'élargissement de la bande active du Haut Guil. Noter la destruction généralisée de la ripisylve et l'élargissement de la bande active en aval de l'Echalp (site 20), au détriment du remblai de la D947, détruit. Noter également l'importance des apports latéraux en rive gauche (*i.e.* rive opposée au remblai de la D947).

modérée, le lit actif du Haut Guil passe de secteurs à chenaux divisés (plaines d'accumulation) à des secteurs à chenal unique [anciennes gorges de raccordement sous-glaciaires (fig. 2) et zones de contournement des cônes torrentiels (fig. 2 et 3)]. La classification de S.A. SCHUMM (1977) place le Haut Guil parmi les rivières en tresses, ce qui implique une forte instabilité latérale de sa bande active (fig. 3). Tout aussi dépendant de la morphostructure, le profil en long du Haut Guil, est caractérisé par une succession de forts gradients (15–26%), plus fréquents cependant dans la zone amont, et de secteurs à pente modérée (1–6%) où il prend alors vraiment les caractéristiques d'une rivière torrentielle. La granularité du matériel de fond du lit est dominée par les galets (63 mm < D_{50} < 172mm ; BOURBON, 2002). En période de cruée, le Haut Guil est capable de modifier totalement la géométrie de sa bande active, du fait d'une compétence et d'une capacité de transport très élevées (ARNAUD-FASSETTA *et al.*, 2003). Au total, le Haut Guil atteint des puissances considérables lors des cruées ($50 \text{ Wm}^{-2} < \omega_{30} < 1130 \text{ Wm}^{-2}$; moyenne $\sim 245 \text{ Wm}^{-2}$; ω_{30} = puissance spécifique lors de la cruée trentennale de juin 2000), ce qui le classe parmi les cours d'eau les plus énergiques selon la typologie proposée par G.C. NANSON et J.C. CROKE (1992).

Comme la plupart des bassins-versants des Alpes du Sud, le bassin du Haut Guil a subi, des décennies durant, les effets induits et cumulés des actions anthropiques sur le milieu : déprise agropastorale, reboisement des interfluves et travaux de correction des torrents conduits par le Service de restauration des terrains en montagne (RTM) et l'Office national des forêts (ONF), développement des activités touristiques hivernales et estivales. Dans le fond de vallée, ces actions ont concerné :

1– la mise en place d'infrastructures routières (remblai de la D947, parking, chemins forestiers) et autres ouvrages d'art (ponts) ;

- 2- l'extension de certains équipements (zone d'habitation, camping, zone artisanale) dans la plaine alluviale ;
- 3- le développement des pistes de ski et des remontées-pentes ;
- 4- l'hydraulique fluviale (rectifications, endiguements, seuils, canaux, prise d'eau).

Après la crue de 1957, de lourds investissements ont été alloués à la restauration du lit du Haut Guil mais surtout à celui de ses affluents (Le Ségure, La Garcine, Le Bouchet, Le Lombard, L'Aigue Agnelle), de sorte que l'essentiel du gros équipement hydraulique présent dans la vallée date quasi exclusivement de cette époque. On recense actuellement dans la vallée près de 1200 habitants permanents, regroupés dans plusieurs villages (Ristolas, Abriès, Aiguilles, Ville-Vieille/Château-Queyras). Ce chiffre est souvent multiplié par 10 ou 15 au cours de la saison touristique. Enfin, la coordination des opérations d'aménagement dans la vallée est assurée par le Parc naturel régional du Queyras ; c'est à lui que revient notamment l'élaboration et la mise en application d'un Contrat de rivière.

2. Méthodes d'étude

Afin d'évaluer la variabilité spatiale 2D de la bande active du Haut Guil, nous avons utilisé quatre séries de photographies aériennes : juin-juillet 1956 (IGN ; A23/3537-3697 ; 1/25000), juin-juillet 1957 (IGN ; FR-086/150 ; 1/15000), 9-22 juin 1999 (IGN ; FD05/250 ; 1/25000), 16 juin 2000 (RTM ; AERIAL 08-00.1266/732 ; 1/8000). L'interprétation de ces clichés suppose de prendre en compte :

- le temps séparant les prises de vue du passage des crues dans la vallée et,
- le contexte hydrologique au moment de la prise de vue.

1-La mission aérienne de 1956 a été entreprise quelques années après le passage de deux crues de magnitude modérée (1948 et 1953), dont il reste encore des traces visibles (*i.e.* fraîches) sur les clichés. Ces événements ont élargi quelque peu la bande active du Haut Guil, essentiellement dans son tiers amont. L'année de référence (1956) ne correspond donc pas à une situation modale mais déjà à une situation de crise. Cependant, ce biais, s'il affecte la comparaison entre 1956 et 1999, reste mineur et n'induit pas une distorsion significative de la tendance observée (*cf. infra*). Les jeux de photographies 1957 et 2000 ont été pris après le passage d'une crue BFHM. La série de 1957 a été réalisée plusieurs semaines après le passage de la crue de juin, durée néanmoins insuffisante pour permettre un début de recolonisation végétale. Les traces laissées par la crue sont donc à peine moins «fraîches» que celles identifiées sur les clichés de 2000, pris seulement quelques jours après l'aléa hydroclimatique de juin. Enfin, 1999 fait suite à une longue phase (1957-1999) de relaxation du cours d'eau. Il s'agit cependant d'une période de relaxation «relative» dans la mesure où le Haut Guil a connu durant ces quarante-deux années

quelques crues d'intensité modérée, notamment celle du printemps 1973 (TRICART, 1974).

2- Des hauteurs d'eau fortement variables d'un jeu de photographies à l'autre pourraient fausser le décompte des chenaux et limiter *de facto* l'intérêt de l'étude diachronique. En fait, tous les clichés utilisés ont été pris à la même période de l'année (juin-juillet), à débit équivalent, plusieurs jours à plusieurs semaines après des hautes eaux annuelles ou des crues. De bas niveaux hydrologiques au moment des prises de vue ont donc facilité le travail de photo-interprétation et plus particulièrement les calculs de l'indice de tressage.

Chacune des 39 photographies sélectionnées a été scannée avec une résolution de 1200 dpi. La qualité visuelle des clichés –essentiellement le contraste– a été améliorée avec un logiciel de retouche d'images (*Photoshop*®). Quatre points d'appui (*i.e.* les amers) ont été choisis de façon à rectifier, avec le logiciel *Idrisi*®, la géométrie de chaque photographie, en référence aux cartes topographiques IGN au 1/25 000 de Guillestre et du mont Viso. Quatre-vingt sites, sélectionnés tous les 250-300 m, ont permis l'étude d'un tronçon de 23,3 km. Le taux de couverture du Haut Guil par les photographies aériennes atteint donc 81 %, les tout premiers kilomètres en amont n'ayant pu être pris en compte car non photographiés lors des missions de 1956, 1957 et 2000.

Chaque site a fait l'objet de mesures réalisées sur des transects orientés perpendiculairement à l'axe de la bande active. Les calculs métriques ont été réalisés avec un logiciel de CAO/DAO (*Canvas*®) permettant la mise à l'échelle précise des images traitées et des objets géographiques qui en sont extraits. Trois variables géomorphologiques ont été quantifiées à partir de la photo-interprétation : la largeur et la surface de la bande active et l'indice de tressage. La bande active correspond à l'emprise des chenaux en eau et des bancs de galets non végétalisés (OSTERKAMP et HEDMAN, 1982 ; RUNDLE, 1985). Sa largeur a été mesurée directement à l'écran de l'ordinateur. La surface a été obtenue en déduisant la superficie des îles boisées de la courbe enveloppe de la bande active. Nous avons vérifié la validité des mesures de largeur acquises à partir des photographies aériennes, en les comparant avec des mesures réalisées *in situ* à l'aide d'un théodolite. La marge d'erreur obtenue est relativement satisfaisante, avec des variations de l'ordre de $\pm 8\%$ (moyenne : 4%) (fig. 4). Concernant l'indice de tressage, nous avons fait le choix d'utiliser celui proposé par A.D. HOWARD *et al.* (1970), l'un des mieux adaptés à notre problématique (THORNE, 1997) : il correspond au nombre moyen d'anabranches (*i.e.* chenaux) par section en travers -1.

Par ailleurs, nous avons cherché à déterminer le rôle joué par les aménagements dans la dynamique de la bande active du Haut Guil. À l'échelle du demi-siècle passé, le remblai de la route départementale (D947) joignant Château-Queyras à La Roche Ecroulée, disposé en rive droite du Guil, a joué un rôle essentiel sur la contraction plus ou moins forte de la bande active. Cette structure a donc été prise en compte, en intégrant :

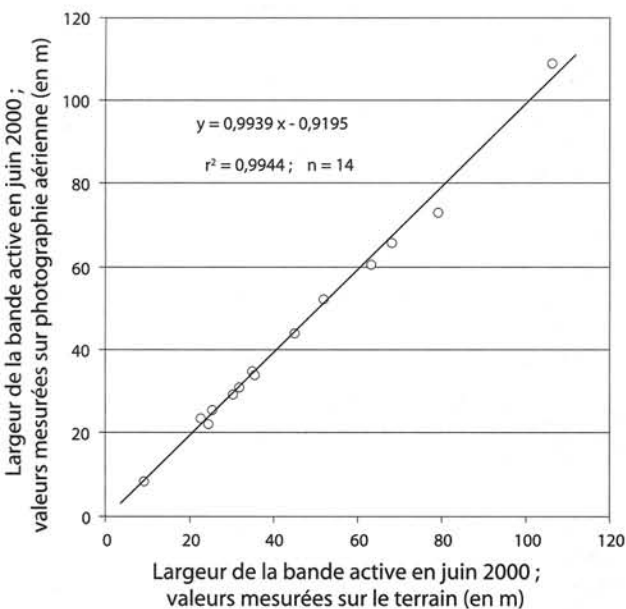


FIG. 4 – CORRÉLATION ENTRE LES VALEURS DE LARGEUR DE LA BANDE ACTIVE DU HAUT GUIL OBTENUES PAR MESURE DIRECTE SUR LE TERRAIN ET DÉDUITES DES PHOTOGRAPHIES AÉRIENNES

- 1- sa présence (ou non) en bordure de la bande active,
- 2- sa destruction (ou non) après le passage d'une crue,
- 3- la largeur de la bande active qui, suite à la mise en place du remblai, a été déconnectée.

Ainsi, nous avons pu apprécier et quantifier sa participation tant au niveau de la contraction (1957–1999) que de l'élargissement (1956–1957, 1999–2000) de la bande active.

Enfin, les données acquises par photo-interprétation ont été étayées par des observations et des données de terrain accumulées entre 1999 et 2003 au cours de sept missions de trois à quinze jours.

3. La variabilité spatiale 2D de la bande active du Haut Guil entre 1956 et 2000

De façon générale, on constate entre 1956 et 2000 une forte variabilité longitudinale de la largeur de la bande active [coefficient de variation (V) : 0,52–0,63] et de l'indice de tressage (V : 0,72–1,10). Une corrélation positive entre l'intensité du tressage et la largeur de la bande active est mise en évidence, quelle que soit la période étudiée (fig. 8). La bande active s'élargit en même temps que l'indice de tressage se renforce dans les secteurs de plaine alors qu'elle se contracte dans les gorges ou dans les secteurs de confluence, là où le taux de tressage tend précisément à se réduire, voire à s'annuler. Des facteurs locaux peuvent intervenir en réduisant sa largeur –c'est le cas des ponts– ou au contraire l'accroître, comme en aval du cône du Peynin (site 62) où l'onde de crue du Guil est réfléchiée depuis le remblai de la D947 vers le front du cône en aval du pont (fig. 2). La variabilité spatiale 2D de la bande active dépend enfin

pour beaucoup de l'évolution du régime hydrosédimentaire du Haut Guil. La périodisation qui suit va permettre d'analyser le rôle des crues et la capacité de récupération de la rivière entre deux événements hydroclimatiques majeurs.

3.1. Période 1956–1957

En juin–juillet 1956, la bande active du Haut Guil représente une surface de 5,542 km² (fig. 5) et sa largeur varie de 7 à 87 m, pour une valeur moyenne de 31 m (fig. 6A). L'indice de tressage, en moyenne faible (0,94), est nul dans certaines gorges alors que la valeur maximale (4,00) est atteinte dans la plaine de La Salce (site 11) ; le tressage est plus développé dans le tiers amont de la rivière (fig. 7A).

Les 13–14 juin 1957, la vallée du Guil est balayée par une crue considérée comme l'aléa hydroclimatique de référence (débit maximal à Abriès : 220 m³ s⁻¹ > Q_{100}). La crue affecte la quasi-totalité du fond de vallée, provoquant, par sa compétence extrême (*i.e.* blocs de 35 tonnes charriés dans les gorges de Château-Queyras), une forte remobilisation du matériel du lit ainsi que de nombreux sapements de berge et autres avalanches, glissements de terrain et coulées de débris sur les versants (TRICART, 1958 et 1961b). L'importance des apports sédimentaires par les drains inférieurs aboutit à une forte aggradation des cônes torrentiels. Au total, l'ensemble de l'hydrosystème subit une extraordinaire métamorphose (*sensu* SCHUMM, 1977) et de lourds dommages, estimés à 100 millions de francs (TRICART, 1961a), soit ~15 millions d'euros.

L'analyse déduite des photographies aériennes montre que la crue de juin 1957 contribue à accroître fortement la surface (14,982 km²) de la bande active du Haut Guil (fig. 5) ; celle-ci augmente de 170 % par rapport à celle de 1956. L'élargissement est généralisé sur tout le tronçon. La largeur de la bande active en juin–juillet 1957, comprise entre 7 m et 198 m pour une valeur moyenne de 71 m (fig. 6B), augmente ainsi dans des proportions importantes (4–1158 %) par rapport à celle de juin–juillet 1956. Des variations importantes sont enregistrées non seulement dans les secteurs de plaine (Les Faisans, La Chayme, Aiguilles, Les Planissaux, Château-Queyras)

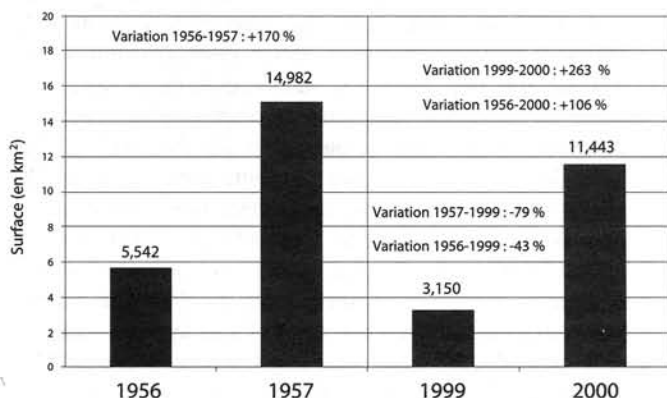


FIG. 5 – ÉVOLUTION DE LA SURFACE DE LA BANDE ACTIVE DU HAUT GUIL ENTRE 1956 ET 2000

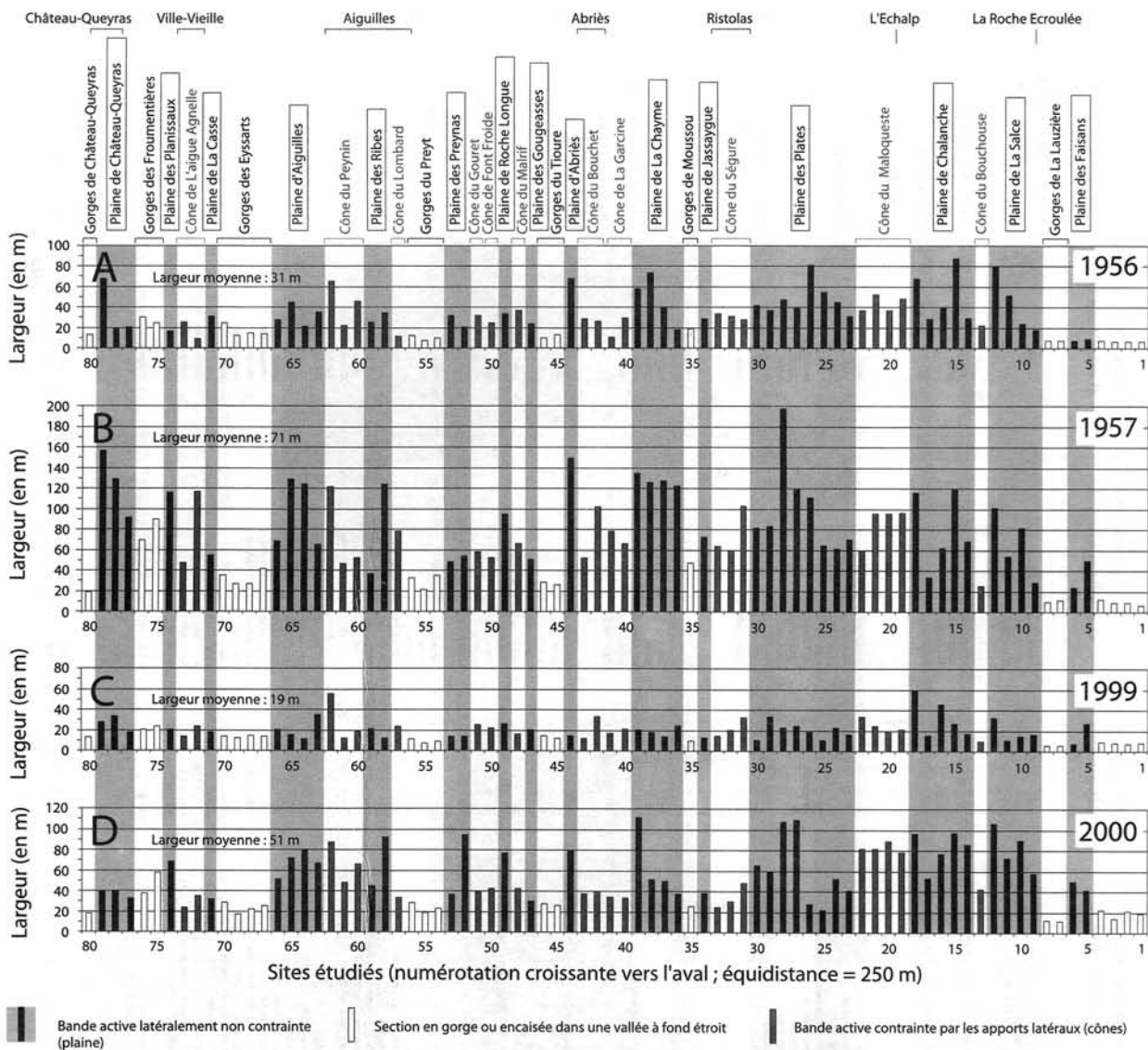


FIG. 6 – ÉVOLUTION DE LA LARGEUR DE LA BANDE ACTIVE DU HAUT GUIL ENTRE 1956 ET 2000

mais aussi dans l'axe des cônes torrentiels (La Garcine, Le Lombard, L'Aigue Agnelle) dont les fronts, qui constituent de véritables resserrements sédimentaires lors du pic de crue, sont sapés en fin de crue. Les variations maximales de largeur se situent au niveau des cônes, celui de l'Aigue Agnelle en particulier. On notera que les valeurs extrêmes d'élargissement progressent graduellement vers l'aval, conformément à l'accroissement de la capacité de la rivière. Enfin, la crue de juin 1957 contribue à renforcer l'indice de tressage, qui affiche des valeurs comprises entre 0 et 9,00 pour une valeur moyenne de 2,46 (fig. 7B).

3.2. Période 1957–1999

Cette période est représentative de l'évolution de la bande active du Haut Guil entre deux crues BFHM. En juin 1999, la surface de la bande active (3,150 km²) ne représente plus que 21 % de la surface en juin–juillet 1957 (fig. 5). Ce phénomène s'accompagne d'une réduction significative de l'indice de tressage (valeurs comprises entre 0 et 2,33 ; moyenne de 0,50 ; fig. 7C) ainsi que de la contraction systématique de la bande active. Celle-ci

affiche en juin 1999 une largeur comprise entre 6 m et 59 m (moyenne : 19 m ; fig. 6C), soit une variation de -8 % à -91 % par rapport à juin–juillet 1957.

Hormis sur quelques sites (5, 57 et 72), l'intensité de la contraction est telle qu'elle permet à la bande active 1999 de rester en deçà des limites de celle en 1956. Ainsi, sa surface en 1999 représente seulement un peu plus de la moitié (57 %) de celle en 1956 (fig. 5). On explique cette exacerbation de la contraction :

- 1- par les aménagements (*i.e.* le remblai de la D947) mis en place postérieurement à la crue de 1957 et,
- 2- par l'absence d'événements hydroclimatiques véritablement morphogènes durant la période (*cf. supra*).

3.3. Période 1999–2000

Du 10 au 14 juin 2000, le bassin du Haut Guil est le siège d'une nouvelle crue BFHM. De fortes pluies, associées comme en 1957 à un phénomène de Lombarde, sont à l'origine de cet aléa. À Abriès, les précipitations atteignent par deux fois des valeurs maximales : le 10 juin 2000 (cumul sur vingt-quatre heures : 90 mm ; intensité

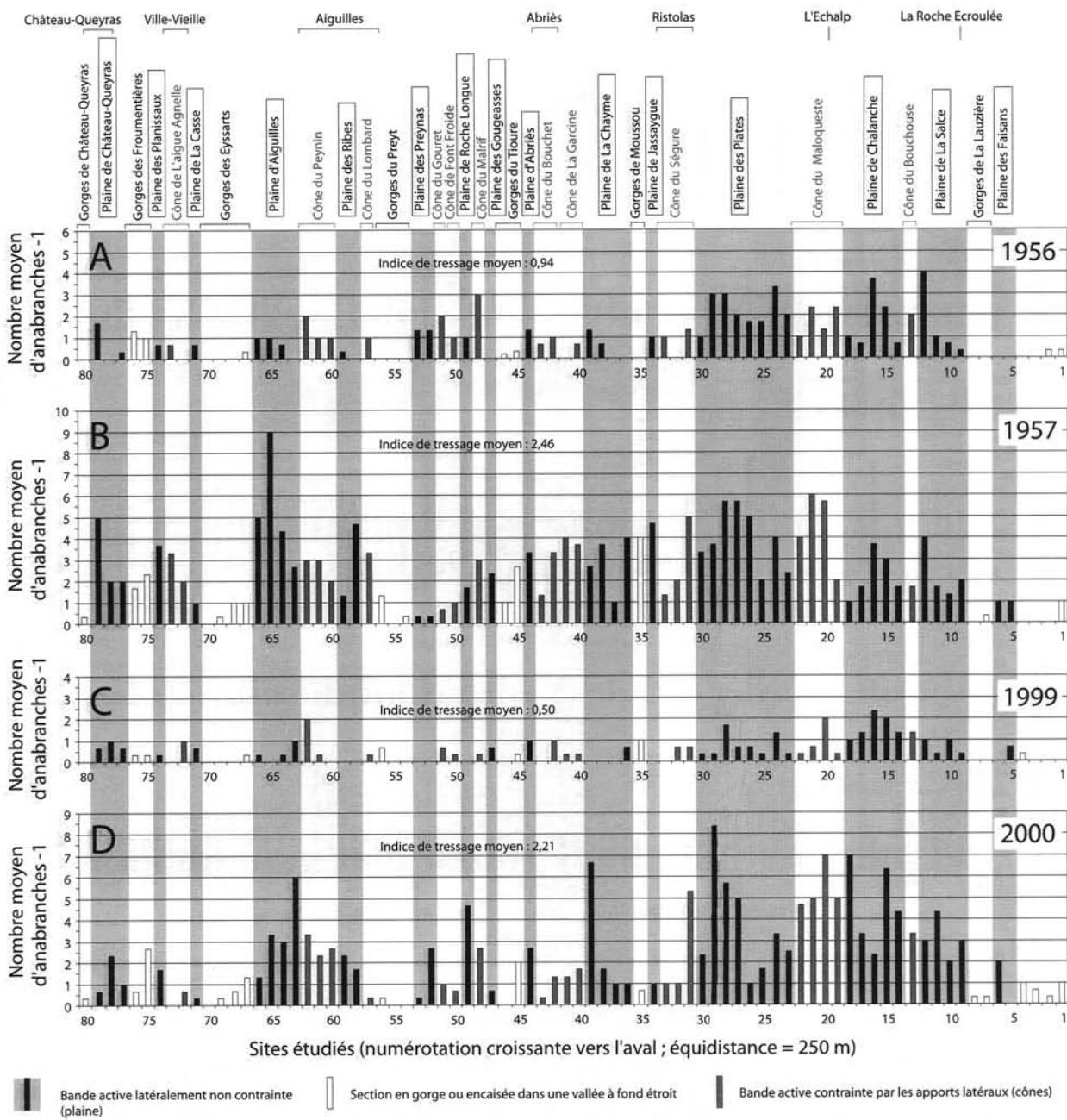


FIG. 7 – ÉVOLUTION DE L'INDICE DE TRESSAGE DU HAUT GUIL ENTRE 1956 ET 2000
L'indice de tressage est défini par le nombre moyen d'anabranches -1 (HOWARD *et al.*, 1970).

horaire maximale : 13,6 mm h⁻¹) et le 13 juin 2000 (89 mm ; 17,3 mm h⁻¹). Ces valeurs restent bien inférieures à celles enregistrées le 14 juin 1957 (202 mm ; 30 mm h⁻¹). Cependant, le cumul des précipitations sur quatre jours aboutit à des valeurs sensiblement équivalentes (293 mm les 12–15 juin 1957 contre 268 mm les 10–13 juin 2000). Contrairement à juin 1957, où les pluies ont été généralisées à l'ensemble du bassin, les cellules pluvieuses de juin 2000 se fixent essentiellement dans le secteur amont du Haut Guil, autour du mont Viso, alors que la plupart des versants sont déjà déneigés. Au total, l'impact hydrogéomorphologique de cette crue de récurrence trentennale (débit maximal à Abriès : 120 m³ s⁻¹) est important : submersion et engravement des plaines alluviales, sapements de berge répétés, modifications significatives du tracé des chenaux, gros dégâts matériels

estimés pour les seuls ponts, endiguements, remblais et route D947 à ~4,6 millions d'euros (FORT *et al.*, 2002 ; ARNAUD-FASSETTA *et al.*, 2003). Les effets morphodynamiques de cette crue sont d'autant plus remarquables que celle-ci est survenue après une phase de « calme hydrologique », à la différence de 1957, où la déstabilisation de l'hydrosystème avait été préparée par les crues de 1948 et 1953 (*cf.* ripisylve discontinue et clairsemée sur les photographies aériennes de 1956). L'ampleur de la métamorphose du fond de vallée est confirmée par les résultats de cette étude.

La crue de juin 2000 entraîne une augmentation considérable de la surface de la bande active (11,443 km²), soit un accroissement de 263 % par rapport à celle de 1999. L'augmentation en surface de la bande active s'accompagne d'un renforcement du tressage, dont

l'indice évolue de 0 à 8,33 pour une valeur moyenne de 2,21 (fig. @7D et 8D). On explique le renforcement de l'indice de tressage dans les plaines amont du fait de la recharge sédimentaire de la bande active du Haut Guil par les affluents. Un tel phénomène a par exemple été décrit par D.G. SMITH (1973) dans les Rocheuses canadiennes. L'intensité du tressage demeure proportionnelle à l'accroissement de la largeur de la bande active, qui atteint en moyenne 51 m, avec des variations comprises entre 12 m et 112 m dans la plaine de La Chayme (sites 37–39, fig. 6D). Ces résultats confirment donc une tendance à l'élargissement par rapport à juin 1999.

Au total, si l'on dresse le bilan de l'évolution de la bande active du Haut Guil, on constate que celle-ci a plus que doublé (106 %) entre 1956 et 2000 (fig. 5).

4. Quelle part attribuer à la variabilité hydro-climatique et au facteur humain ?

4.1. Le rôle de la variabilité hydroclimatique récente

Les crues BFHM jouent un rôle déterminant dans la dynamique latérale de la bande active et plus largement dans la morphogenèse du fond de vallée. Ceci a pu être montré par deux fois en quarante-cinq ans, lors des crues de 1957 et de 2000. L'impact hydrogéomorphologique des crues BFHM est en général proportionnel à la magnitude de l'aléa. Ainsi, la crue de 1957 a été globalement plus morphogène que celle de 2000.

Cependant, on notera que la crue de 2000, même si elle n'a pas atteint le débit record de celle de 1957, reste quand même l'aléa qui a engendré la plus grande variation de surface de la bande active (+263 % entre 1999 et 2000 contre +170 % entre 1956 et 1957). Ce résultat est bien sûr à nuancer dans la mesure où, à la différence de la situation en 2000, la crue de 1957 est survenue dans un contexte où la bande active avait été élargie lors du passage, quelques années auparavant (en 1948 et 1953), par deux crues de magnitude modérée. Malgré cela, par rapport à la crue de 1957, la crue de 2000 a été plus morphogène dans le quart amont du Haut Guil [de la source du Guil à la plaine de Chalanche (sites 14–19)]. Ceci est confirmé par l'indice de tressage, dont les valeurs en 2000 dépassent celles de 1957 (fig. 7B et 7D) et par les variations 1957–2000 de la

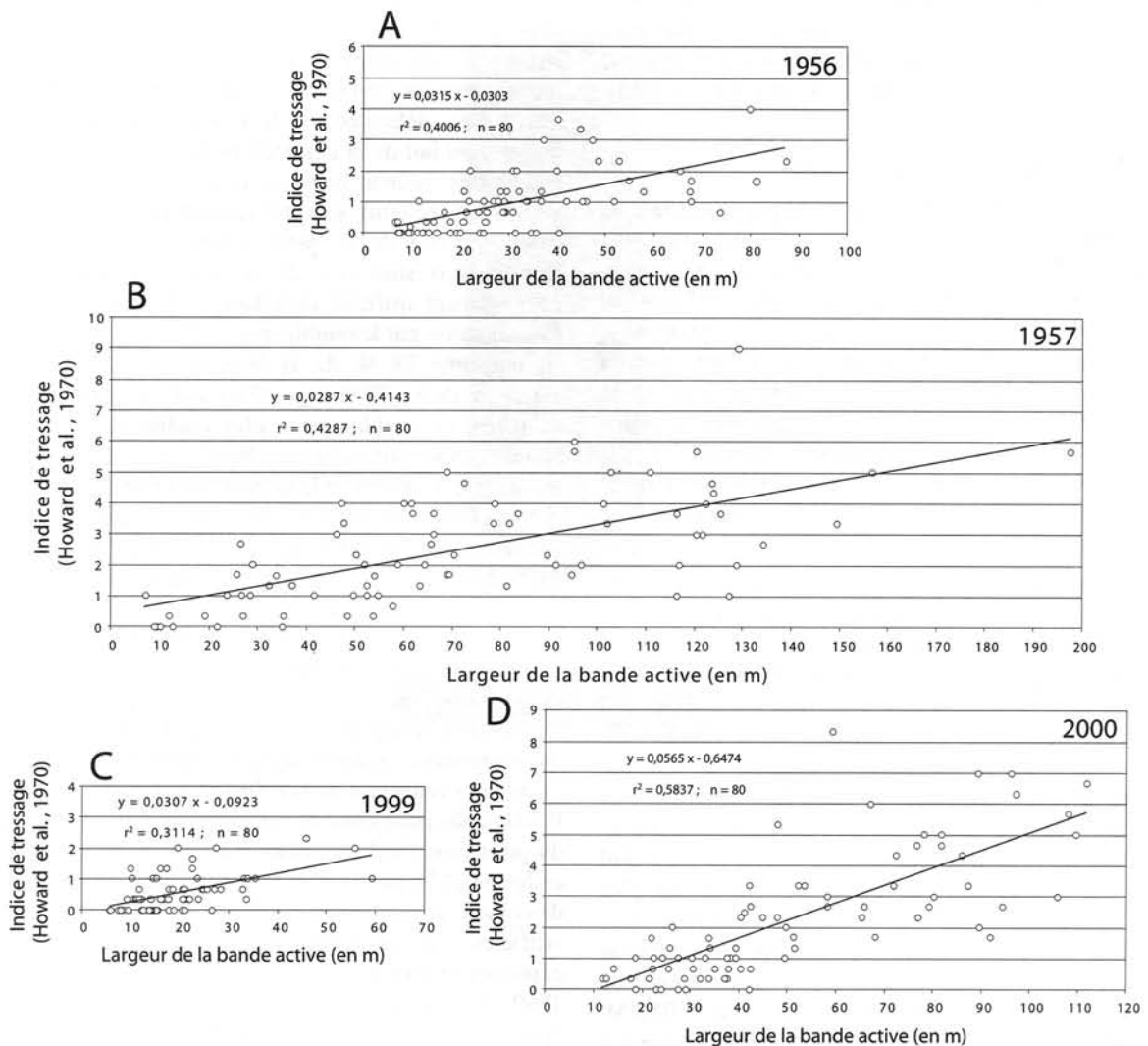


FIG. 8 – CORRÉLATIONS ENTRE LA LARGEUR DE LA BANDE ACTIVE ET L'INDICE DE TRESSAGE DU HAUT GUIL ENTRE 1956 ET 2000
On note une assez bonne corrélation entre les deux variables, tous les coefficients de détermination (r^2) étant significatifs avec un risque d'erreur (α) égal à 0,02. La corrélation est cependant meilleure en période de crue, comme le montrent les situations en 1957 et 2000.

largeur de la bande active, généralement positives et de plus forte amplitude dans la partie amont du bassin. Plusieurs facteurs contribuent à expliquer cette situation :

- 1- la présence en 2000 de cellules pluviométriques centrées sur la partie amont du bassin,
- 2- le caractère réduit, en 2000, du couvert neigeux, y compris sur les versants amont, alors qu'en 1957, l'enneigement était encore très abondant (TRICART, 1958),
- 3- une contrainte latérale moins forte en 2000, due à des cônes torrentiels moins développés qu'ils ne le furent en 1957 (ARNAUD-FASSETTA *et al.*, 2003).

En aval de l'Echalp, certains secteurs ont été élargis en 2000, de sorte que la limite de la bande active a pu parfois légèrement dépasser celle de 1957. Il en a été ainsi dans la plaine des Praynas puis entre la plaine des Ribes et la plaine d'Aiguilles (ARNAUD-FASSETTA *et al.*, 2003). Ces élargissements localisés expriment le besoin qu'a le Haut Guil de dissiper son énergie et sa puissance dans les secteurs de moindre pente (*i.e.* essentiellement dans les plaines). On attribue ainsi le dépassement des limites de la crue de 1957 sur les sites 22, 52, 59–61 et 63 non pas à une hydrologie plus abondante mais aux effets de la réduction (sur place et/ou en amont) de la surface des zones de dissipation naturelles suite à la mise en place du remblai de la D947. La morphogenèse du fond de vallée est donc liée avant tout à la magnitude de l'aléa, mais le facteur humain peut en atténuer ou en renforcer les effets.

4.2. Le poids du facteur humain

Le rôle des équipements est négligeable dans la partie amont du bassin, très peu aménagée (la D947 s'arrête à La Roche Ecroulée). En revanche, ils tiennent une place plus importante en aval de La Roche Ecroulée, notamment du fait de la présence du remblai supportant la D947. Omniprésente, cette structure a été construite en rive droite du Haut Guil, dans les gorges, au niveau de la concavité basale des versants, voire même dans la plaine alluviale. Elle constitue assurément la structure la plus contraignante dans le fond de vallée et sa présence a eu des implications tant du point de vue de l'élargissement que de la contraction de la bande active du Haut Guil.

Nous nous sommes d'abord penchés sur son implication dans le phénomène d'élargissement de la bande active, produit essentiellement lors des crues BFHM. Lorsque son talus n'avait pas été bétonné ou en cas d'affouillement important, le remblai n'a pas résisté à la puissance des flux et il a alors été facilement détruit. Le relevé systématique des dégâts causés à la structure pendant les crues montre que sa dégradation peut être très importante (fig. 9). Sa destruction a été quasi générale en 1957 mais plus spécifique de la partie amont du Haut Guil en 2000, conformément à la vigueur de l'événement, plus élevée en amont (fig. 3D). Ce type de remblai (*i.e.* constitué de matériaux meubles) se comporte comme un «fusible» permettant à la bande active du Haut Guil de gagner rapidement en largeur lors des crues BFHM. Lorsque le remblai a résisté –cas très fréquent lorsque son talus avait été bétonné et/ou maçonné–, il a agi localement comme facteur atténuateur de l'élargissement, tel que cela

a été observé lors de la crue de 2000 (fig. 9D). Cependant, il peut repousser l'élargissement sur la rive opposée, voire même renforcer le phénomène en cas de réflexion de l'onde de crue sur la structure. Dans tous les cas, il provoque un effet rétroactif en renforçant la puissance des crues vers l'aval. Enfin, le remblai intervient aussi en rompant le contact entre les versants et la plaine alluviale. L'alimentation latérale ne se fait plus qu'en des secteurs précis (*i.e.* cônes, sections sans remblai), ce qui diminue d'autant les possibilités de recharge (donc d'élargissement) de la bande active, qui dépendent pour beaucoup des apports latéraux.

Nous avons ensuite cherché à définir le rôle joué par les aménagements dans le phénomène de contraction entre les deux crues BFHM (1957–1999). En 1956, 51 % des sites pris en compte montrent une bande active délimitée par le remblai de la D947 (fig. 9A). On soulignera le nombre important de sites qui enregistrent un élargissement de la bande active au delà de la route D947 suite à une crue, très certainement celle de 1953. En 1957, l'élargissement considérable de la bande active par la crue de juin explique que 65 % du linéaire soit en contact avec la route D947. La crue entraîne la destruction massive de l'ouvrage, à hauteur de 87 % (fig. 9B). Le remblai a été reconstruit dans les mois/années qui ont suivi la crue et son tracé a été rectifié, de façon à le rendre plus direct (notamment au niveau des cônes). En 1999, la bande active n'est délimitée par le remblai que sur 33 % du linéaire, du fait de la contraction de la bande active dont les limites restent bien en deçà de celles de 1957. Cependant, le remblai a été reconstruit le plus souvent dans l'emprise de la bande active de 1957 (fig. 9C). Hormis trois sites (17, 22 et 40), qui enregistrent un élargissement artificiel, la portion de la bande active qui a été contractée par le remblai entre 1957 et 1999 représente en moyenne 28 % de la largeur en 1957, avec des variations de 8 à 77 % (fig. 9E). Il est évident que la mise en place du remblai a été plus contraignante dans les secteurs où la plaine alluviale était la plus étroite (*i.e.* dans les gorges). Concernant la largeur de la bande active 1999, elle représente en moyenne 35 % de la largeur de celle de 1957, avec des variations de 9 à 116 % (fig. 9F). Le cumul des largeurs qu'occupent la portion contractée entre 1957 et 1999 et la bande active 1999 atteint la valeur moyenne de 49 % (fig. 9G), ce qui, au total, nous permet de conclure que la part des aménagements dans la contraction de la bande active entre 1957 et 1999, certes non négligeable, ne permet pas, à elle seule, d'expliquer 100 % du phénomène. L'autre facteur important reste le fait qu'aucun événement hydroclimatique BFHM n'a affecté la vallée du Haut Guil durant cette période, hormis celui du printemps 1973, de magnitude largement inférieure à celles de 1957 ou 2000. Il faut donc tenir compte de ces deux facteurs (*i.e.* absence de grosses crues, déconnexion artificielle d'une partie de la plaine alluviale) pour expliquer la contraction de la bande active entre 1957 et 1999. Une recolonisation du fond de vallée par la végétation peut alors s'opérer et jouer comme facteur aggravant de la contraction (fig. 10 A et B).

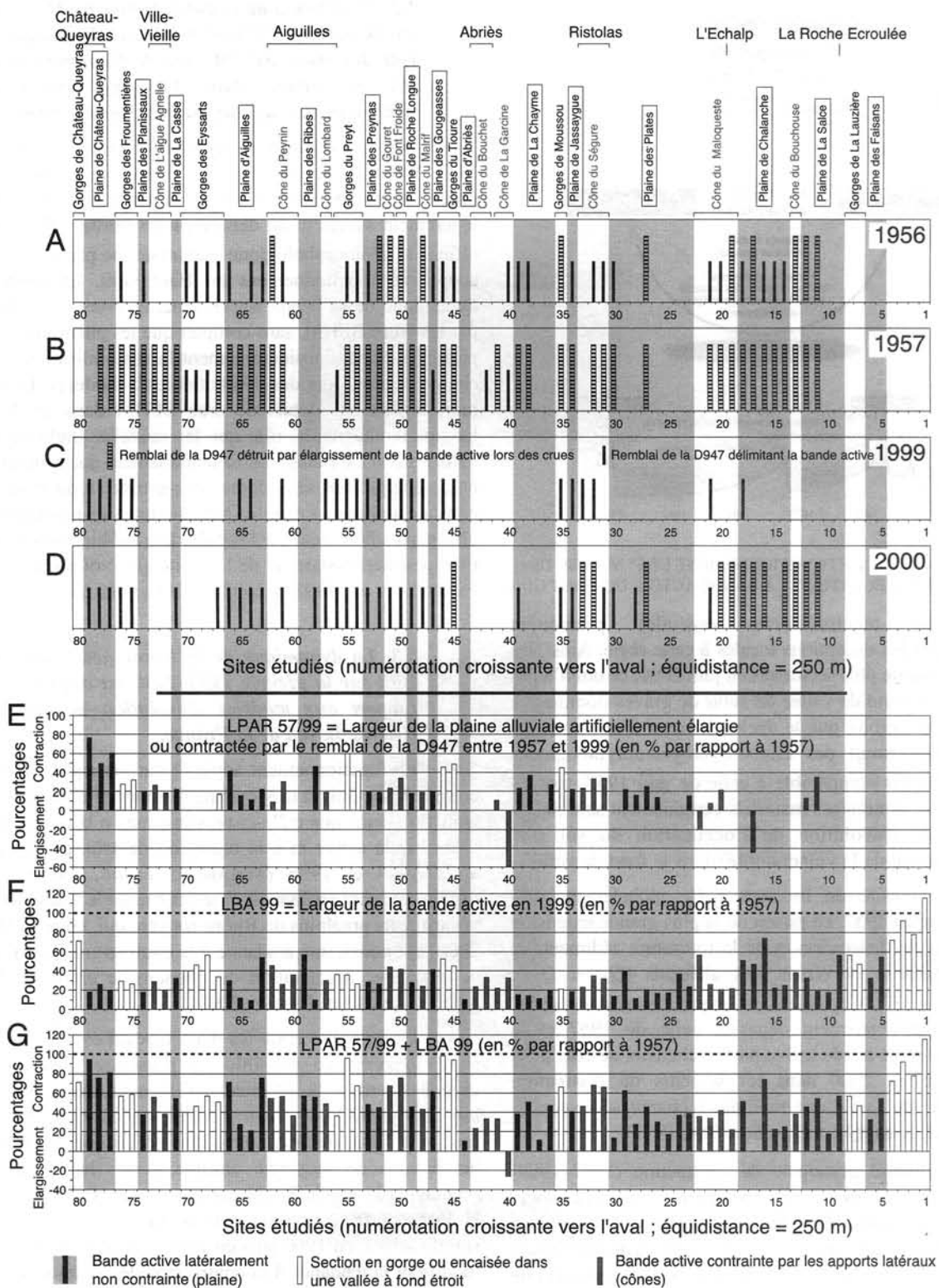


FIG. 9 - LA PART DES AMÉNAGEMENTS DANS L'ÉVOLUTION DE LA LARGEUR DE LA BANDE ACTIVE DU HAUT GUIL ENTRE 1956 ET 2000

5. Discussion

5.1. La bande active du Haut Guil est soumise à une forte variabilité spatiale entre 1956 et 2000

Les crues BFHM, comme celles de juin 1957 ($>Q_{100}$) et de juin 2000 (Q_{30}), jouent un rôle prépondérant

dans le renforcement du taux de tressage et dans l'accroissement de la surface et la largeur de la bande active (fig. 10 A et B). Cependant, les impacts hydrogéomorphologiques restent proportionnels à la magnitude des aléas hydroclimatiques. Des facteurs aggravants (différence de couvert neigeux, embâcle de bois morts, aménagements) ou limitants (lit rocheux, contraction

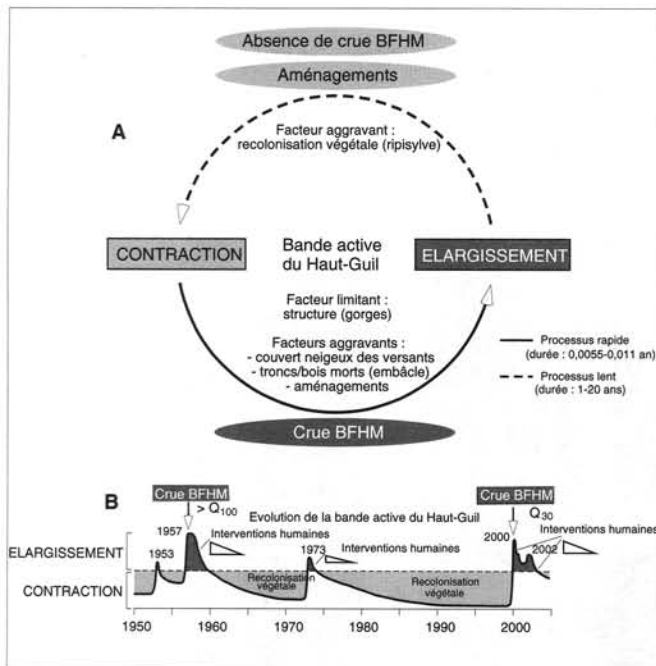


FIG. 10 – MODE DE FONCTIONNEMENT ET SYNTHÈSE DE L'ÉVOLUTION RÉCENTE DE LA BANDE ACTIVE DU HAUT GUIL

artificielle, recolonisation végétale) permettent d'expliquer les exceptions locales à cette règle. Ainsi, les impacts ont été plus sectorisés en juin 2000, ce qui n'a pas empêché le fond de vallée de subir de graves dommages. Tout porte à croire que le déclenchement d'une nouvelle crue $>Q_{100}$ aurait des effets hydrogéomorphologiques d'une ampleur comparable à celle de juin 1957, tout en causant des dommages matériels certainement supérieurs, du fait de l'évolution de l'occupation du sol (*i.e.* accroissement de la vulnérabilité) dans le fond de vallée.

L'intensité du tressage a été globalement plus importante en 1957, en raison de la plus grande extension des zones de dissipation et de la fourniture sédimentaire plus abondante provenant des affluents ($Q_I^* < Q_S^*$; SCHUMM, 1977). Cependant, la largeur de la bande active 2000 a pu localement dépasser celle de 1957 et la dissection de la bande active par les chenaux de crue a été plus forte en 2000 dans les secteurs de dissipation maximale, du fait d'une moindre recharge sédimentaire par les affluents ($Q_I^* > Q_S^*$; SCHUMM, 1977).

La phase principale de contraction (1957–1999) s'explique par l'absence de crue BFHM durant la période, par la reconstitution de la ripisylve, et par la mise en place du remblai supportant la route D947 dans la plaine alluviale. À ce stade, il serait pernicieux de considérer que cette phase de relaxation de la rivière, du fait de sa plus longue durée, puisse être représentative de la tendance générale. Ce serait négliger l'importance des crues BFHM dans le calibrage de la bande active et, au delà, dans le fonctionnement de l'hydrosystème. Il n'y a donc aucun intérêt à minimiser cet aspect, d'autant que la prise en compte de la limite de la crue centennale (ou supérieure), dans les opérations d'aménagement des milieux riverains du cours d'eau, reste encore aujourd'hui le meilleur moyen d'éviter des inondations catastrophiques ou d'en atténuer les impacts.

5.2. L'évolution de la bande active du Haut Guil sur la période 1956–2000 permet de discuter du rôle des crues BFHM dans le façonnement des lits de rivière dans la zone amont des hydrosystèmes montagnards subméditerranéens.

Ainsi, le concept de «débit dominant» proposé par M.G. WOLMAN et J.P. MILLER (1960), qui accorde aux crues haute fréquence–basse magnitude (*i.e.* débit légèrement supérieur au débit à pleins bords $\sim Q_{1-2}$) une efficacité géomorphologique maximale, ne paraît pas être adapté au fonctionnement du Haut Guil. En effet, la dynamique de sa bande active apparaît avant tout guidée par les crues BFHM, sans compter que les phénomènes de pavage limitent considérablement la remobilisation de la charge de fond lors des débits faibles à modérés. Le rôle morphogène des débits de crue BFHM dans les hauts bassins montagnards, rôle que les modèles anglo-saxons bâtis à partir de l'étude du fonctionnement des rivières de basse énergie ont sans doute sous-estimé, a du reste été constaté à plusieurs reprises hors du domaine montagnard, plus particulièrement sur les piémonts méditerranéens des Préalpes méridionales et de la Montagne Noire (ARNAUD-FASSETTA *et al.*, 1993 et 2002 ; FORT *et al.*, 2001).

5.3. La dynamique de la bande active du Haut Guil sur la période 1956–2000 est originale par rapport aux modèles d'évolution de certaines rivières du sud de la France.

Le fonctionnement apparaît par exemple différent entre le Haut Guil et la Moyenne Durance, qui montre une tendance –sans que celle-ci ne s'inverse– à la contraction de la bande active et à la réduction du taux de tressage entre 1944 et 1986 (MIRAMONT *et al.*, 1998). Des différences sont également observées entre le Haut Guil et les affluents préalpins du Rhône moyen, qui, entre 1950 et 2000, ont connu une tendance à la contraction des bandes actives, avec accélération du phénomène entre 1950 et 1970 (LIÉBAULT et PIÉGAY, 2002).

L'originalité entre les deux types d'évolution tient à la convergence possible de plusieurs facteurs et, premièrement, à la différence d'intensité des processus morphodynamiques (*e.g.*, compétence, capacité de transport, force tractrice, puissance spécifique, etc.) entre les bassins de moyenne altitude et les hauts bassins montagnards. Sur le Roubion par exemple, F. LIÉBAULT et H. PIÉGAY (2001) mentionnent l'occurrence de deux crues significatives, en 1960 puis en 1993, sans que celles-ci ne modifient la tendance à la contraction de la bande active, entamée depuis les années 1950. Deuxièmement, on constate le moindre impact des changements climato-anthropiques post-PAG dans le Haut Guil. Ceci s'explique par le fait que dans le Haut Guil, malgré le changement climatique post-PAG, les processus morphodynamiques sont restés toujours très actifs, en raison de la connexion directe de la bande active avec les zones «génétiquement» productrices en débris ; les effets du reboisement des massifs montagneux et des vallées n'ont pas empêché le Haut Guil de réoccuper par deux fois en quarante-cinq ans une grande partie du fond de vallée ; il n'y a pas eu dans

le Haut Guil d'interventions humaines fortement préjudiciables à la recharge sédimentaire de la bande active, comme l'ont pu être ailleurs les extractions, les barrages (Moyenne Durance), etc. Sur la Drôme en revanche, les effets cumulés du changement climatique post-PAG, des extractions, du reboisement du bassin et de la diminution des pics de crue ont provoqué une réduction régulière du taux de tressage et de la largeur de la bande active entre 1947 et 1991 (KONDOLF *et al.*, 2002). Troisièmement, l'absence de crue BFHM durant la période d'étude est considéré comme un facteur explicatif de la contraction des bandes actives dans certains bassins. Par exemple, F. LIÉBAULT *et al.* (2002) expliquent la contraction de l'Eygues entre 1964 et 1993 par l'absence de crues BFHM durant ces trente années.

Ainsi, le modèle d'évolution du bassin supérieur du Guil (fig. 10) se détache de celui des bassins de moyenne altitude. Mais d'autres hauts bassins montagnards s'en détachent aussi, tels ceux de l'Ubaye (PIÉGAY *et al.*, 2000) ou du Giffre (PEIRY, 1986), preuve que le fonctionnement des hauts bassins est assez différent de celui des bassins inférieurs.

Conclusion

Les résultats de cette étude montrent que la variabilité spatiale 2D de la bande active du Haut Guil est très forte depuis la deuxième partie du XX^e siècle. La bande active s'élargit et le tressage se renforce après le passage des crues BFHM de juin 1957 ($> Q_{100}$) et juin 2000 (Q_{30}). La bande active se contracte et le tressage diminue entre 1957 et 1999 en raison de l'absence de crue BFHM et de la mise en place, dans la plaine alluviale, des remblais supportant la route principale Château-Queyras/La Roche Ecroulée. Cette évolution confirme le rôle important joué par les aléas hydroclimatiques dans le façonnement des lits de rivière situés dans les zones lithologiquement fragiles des hydrosystèmes montagnards supérieurs.

La dynamique de la bande active du Haut Guil sur la période 1956–2000 est originale par rapport au modèle d'évolution de certaines rivières alpines et préalpines du sud-est de la France. L'originalité tient à la conjonction possible de plusieurs facteurs et en premier lieu à la

différence d'intensité des aléas hydroclimatiques et des processus morphodynamiques entre les bassins de moyenne altitude et les hauts bassins montagnards. Malgré le changement climatique post-PAG, les processus morphodynamiques sont restés toujours très actifs dans le Haut Guil, du fait :

- 1- d'un contexte lithostructural (*i.e.* schistes lustrés très tectonisés) prédisposant à une fourniture abondante et chronique en débris ;
- 2- de l'importance, dans l'étage supra-forestier, des processus cryo-niveaux dans la fragmentation et la constitution des stocks de débris ;
- 3- des avalanches, qui participent activement à la remobilisation et au transfert des débris, des versants jusqu'aux fonds de vallée ;
- 4- des pentes très fortes qui favorisent l'instabilité des formations superficielles sur les versants et accroissent l'efficacité du ruissellement.

Les effets du reboisement des massifs montagneux et des vallées n'ont pas empêché le Haut Guil de réoccuper par deux fois en quarante-cinq ans une grande partie du fond de vallée. Par ailleurs, l'absence de crue BFHM durant la période considérée peut être un facteur permettant d'expliquer la contraction (ou le non-élargissement) de la bande active de certaines rivières. Enfin, il n'y a pas eu dans le Haut Guil des actions humaines fortement préjudiciables à la recharge sédimentaire de la bande active, comme l'ont pu être, ailleurs, les extractions, dragages, barrages, etc.

Au total, le modèle d'évolution (*i.e.* contraction des bandes actives depuis 1950 ; phénomène plus marqué entre 1950 et 1970) des bassins de moyenne altitude ne paraît donc pas être directement transposable à celui des hauts bassins montagnards, tout au moins à celui du Haut Guil.

Remerciements – Nous tenons à remercier S. PLAGNOL (Parc naturel régional du Queyras) et P. VAUTERIN (Service de la restauration des terrains en montagne, Gap) pour les données et les moyens matériels qu'ils ont bien voulu mettre à notre disposition ; C. BOURBON, B. DEBAIL et B. EINHORN, étudiants en DEA à l'Université Paris VII Denis-Diderot, pour leur assistance sur le terrain et au laboratoire et enfin à C. MIRAMONT (Université de Provence), pour nous avoir proposé de participer à ce numéro «très» spécial de la revue *Méditerranée* puisque dédié à M. JORDA, universitaire aixois qui aura marqué durablement l'esprit de la communauté scientifique et des générations d'étudiants, tant par ses qualités de chercheur que de pédagogue.

BIBLIOGRAPHIE

ARNAUD-FASSETTA G., BALLAIS J.-L., BEGUIN E., JORDA M., MEFFRE J.-C., PROVANSAL M., RODITIS J.-C. et SUANEZ S., (1993), La crue de l'Ouvèze à Vaison-la-Romaine (22 septembre 1992). Ses effets morphodynamiques, sa place dans le fonctionnement d'un géosystème anthropisé, *Revue de Géomorphologie dynamique*, n° 62–2, p.33–48.

ARNAUD-FASSETTA G., BELTRANDO G., FORT M., PLET A., ANDRÉ G., CLÉMENT D., DAGAN M., MÉRING C., QUISSERNE D. et 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*, n° 1, p.17–34.

ARNAUD-FASSETTA G., COSSART E. & FORT M., (sous presse), Hydrogeomorphic hazards and impact of man-made structures during the catastrophic flood of June 2000 in the Upper Guil catchment (Queyras, Southern French Alps). *Geomorphology*.

BALLANDRAS S., (2002), L'évolution des formes de relief et des formations torrentielles alpines depuis 4700 BP, *Quaternaire*, n° 13, 3–4, p. 267–277.

BOURBON C., (2002), *Dynamique torrentielle et aménagement en région de montagne. Le Queyras schisteux : étude géomorphologique de la crue de juin 2000 sur la partie amont du Guil*, Mémoire de Maîtrise, Université Paris VII Denis-Diderot, 145 p.

- BRAVARD J.-P. et PEIRY J.-L., (1993), La disparition du tressage fluvial dans les Alpes françaises sous l'effet de l'aménagement des cours d'eau (XIX-XX^e siècles), *Z. f. Geomorph. N. F.*, Suppl. Bd. n° 88, p. 67-79.
- DEBAIL B., (2003), *Dynamique de versant et ajustements torrentiels dans la vallée du Guil (Hautes-Alpes, Parc naturel régional du Queyras). Impacts géomorphologiques et perspectives de gestion sur les départementales D902, D947, D441 et D60*, Mémoire du DEA, Université Paris VII Denis-Diderot, 109 p.
- FORT M., ARNAUD-FASSETTA G., BELTRANDO G., PLET A., ANDRÉ G. et 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 (éd.) *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, p. 41-52.
- FORT M., ARNAUD-FASSETTA G., COSSART E., BEAUDOUIN B., BOURBON C., DEBAIL B. et EINHORN B., (2002), Impacts et signification hydromorphologique de la crue du Guil de juin 2000 (Haut Queyras), in DELAHAYE D., LEVOY F. et MAQUAIRE O. (éd.), *Geomorphology : from Expert Opinion to Modelling. A tribute to Professor Jean-Claude FLAGEOLLET. Proceedings of the Symposium held in Strasbourg, France, on April 26-27 2002*, CERG Ed., p.159-166.
- GAUTIER E., (1994), Les aménagements de la vallée du Buëch (Hautes-Alpes et Alpes-de-Haute-Provence) du XVIII^e siècle à nos jours : un exemple de l'intensification et de l'accélération des bouleversements de la morphogénèse fluviale par l'Homme, *Actes du colloque «Aménagement et gestion des grandes rivières méditerranéennes», 8-10 septembre 1993*, Avignon, France, p.43-47.
- HOWARD A.D., (1967), Drainage analysis in geologic interpretation : a summary, *Am. Assoc. Petrol. Geol.*, n° 51, p. 2246-2259.
- HOWARD A.D., KEETCH M.E. & VINCENT C.L., (1970), Topological and geomorphic properties of braided streams, *Water Resources Research*, n° 6, p. 1647-1688.
- JORDA M., (1985), La torrentialité holocène des Alpes françaises du Sud. Facteurs anthropiques et paramètres naturels de son évolution, *Cahiers ligures de Préhistoire et de Protohistoire*, n° 2, p. 11-28.
- JORDA M. et PROVANSAL M., (1996), Impact de l'anthropisation et du climat sur le détritisme en France du Sud-Est (Alpes du Sud et Provence), *Bulletin de la Société Géologique de France*, n° 167-1, p. 159-168.
- KONDOLF G.M., PIÉGAY H. & LANDON N., (2002), Channel response to increased and decreased bedload supply from land use change: contrasts between two catchments, *Geomorphology*, n° 45, p.35-51.
- LIÉBAULT F. & PIÉGAY H., (2001), Assessment of channel changes due to long-term bedload supply decrease, Roubion River, France, *Geomorphology*, n° 36, p.167-186.
- LIÉBAULT F. & PIÉGAY H., (2002), Causes of 20th century channel narrowing in mountain and piedmont rivers of southeastern France, *Earth Surface Processes and Landforms*, n° 27, p.425-444.
- LIÉBAULT F., CLÉMENT P., PIÉGAY H., ROGERS C.F., KONDOLF G.M. & LANDON N., (2002), Contemporary channel changes in the Eygues basin, southern French Prealps: the relationship of subbasin variability to watershed characteristics, *Geomorphology*, n° 45, p.53-66.
- MACAIRE J.-J., (1990), L'enregistrement du temps dans les dépôts fluviaux superficiels : de la géodynamique à la chronostratigraphie, *Quaternaire*, n° 1-1, p. 41-49.
- MIRAMONT C., JORDA M. et PICHARD G., (1998), Évolution historique de la morphogénèse et de la dynamique fluviale d'une rivière méditerranéenne : l'exemple de la Moyenne Durance (France du Sud-Est), *Géographie Physique et Quaternaire*, n° 52-3, p.381-392.
- NANSON G.C. & CROKE J.C., (1992), A genetic classification of floodplains, *Geomorphology*, n° 4, p. 459-486.
- OSTERKAMP W.R. & HEDMAN E.R., (1982), Perennial-streamflow characteristics related to channel geometry and sediment in Missouri River basin, *United States Geological Survey Professional Paper*, n° 1242.
- PEIRY J.-L., (1986), Dynamique fluviale historique et contemporaine du confluent Giffre-Arve (Haute-Savoie), *Revue de Géographie de Lyon*, n° 61-1, p. 79-96.
- PEIRY J.-L. et NOUGUIER F., (1994), Le Drac dans l'agglomération de Grenoble : première évaluation des changements géomorphologiques contemporains, *Revue de Géographie Alpine*, n° 2, p.77-96.
- PIÉGAY H., SALVADOR P.-G. et ASTRADE L., (2000), Réflexions relatives à la variabilité spatiale de la mosaïque fluviale à l'échelle du tronçon, *Z. f. Geomorph. N. F.*, n° 44-3, p. 317-342.
- RICHARDS K., (1982), *Rivers : form and processes in alluvial rivers*, Methuen, London, 358 p.
- RUNDLE A., (1985), Braid morphology and the formation of multiple channels ; the Rakaia, New Zealand, *Z. f. Geomorph. N. F.*, Suppl.-Bd. n° 55, p. 15-37.
- SALVADOR P.-G., (1993), Aménagement et évolution de deux rivières alpines : les cours moyen de l'Isère et le cours inférieur du Drac (XVII^e-XVIII^e siècle), in *Géomorphologie et Aménagement de la Montagne, Hommage à P. GABERT*, CNRS, Caen, p. 327-333.
- SCHUMM S.A., (1977), *The fluvial system*, John Wiley and Sons, New York, 338 p.
- SMITH D.G., (1973), Aggradation in the Alexandra-North Saskatchewan River, Banff Park, Alberta, in MORISAWA M. (éd.) *Fluvial Geomorphology*, SUNY Binghamton Publ. in Geomorphology, p. 201-219.
- STRAHLER A.N., (1952), Quantitative analysis of watershed geomorphology, *American Geophysical Union Transactions*, n° 38-6, p. 913-920.
- THORNE C.R., (1997), Channel types and morphological classification, in THORNE C.R., HEY R.D. & NEWSON M.D. (ed.), *Applied Fluvial Geomorphology for River Engineering and Management*, John Wiley and Sons, Chichester, p.176-222.
- TRICART J., (1958), Étude de la crue de la mi-Juin 1957 dans la vallée du Guil, de l'Ubaye et de la Cerveyrette, *Revue de Géographie Alpine*, n° 4, p. 565-627.
- TRICART J., (1961a), *Les modalités de la morphogénèse dans le lit du Guil au cours de la crue de la mi-juin 1957*, Publication de l'AIHS, n° 53, p. 65-73.
- TRICART J., (1961b), Mécanismes normaux et phénomènes catastrophiques dans l'évolution des versants du bassin du Guil (Hautes-Alpes, France), *Z. f. Geomorph. N. F.*, n° 5, p. 277-301.
- TRICART J., (1974), Phénomènes démesurés et régime permanent dans les bassins montagnards, *Revue de Géomorphologie Dynamique*, n° XXIII, p. 99-114.
- WOLMAN M.G. & MILLER J.P., (1960), Magnitude and frequency of forces in geomorphic process, *Journal of Geology*, n° 68, p. 54-74.