



Préfet coordonnateur du
bassin Adour-Garonne



AGENCE DE L'EAU
ADOUR-GARONNE

ÉTABLISSEMENT PUBLIC DU MINISTÈRE
DE L'ÉCOLOGIE ET DU DÉVELOPPEMENT DURABLE

Etude portant sur une analyse post-crise des cours d'eau de la Garonne amont, de la Pique, des Nestes et de l'amont du gave de Pau (31, 64, 65)



Rapport d'étude

Septembre 2014



Diagnostics environnement et territoires

47, place de la mairie
64290 Gan

tél. 05.59.05.38.29

email : c.beaufriere@geodiag.fr

SARL au capital de 7500 euros- RCS Pau
SIRET : 454 035 510 00048 - APE : 7112 B

Etude portant sur une analyse post-crue des cours d'eau de la Garonne amont, de la Pique, des Nestes et de l'amont du gave de Pau (31, 64, 65)

Sommaire

| | |
|---|-----------|
| 1 – CADRE GENERAL DE L'ETUDE | 4 |
| 1.1 – LE PERIMETRE DE L'ETUDE..... | 4 |
| 1.2 – LES PROBLEMATIQUES TRAITÉES ET LES OBJECTIFS VISES..... | 4 |
| 1.3 – CONTENU ET ORGANISATION DU RAPPORT..... | 5 |
| 2 – DONNEES ET METHODES UTILISEES POUR L'ANALYSE | 6 |
| 2.1 – LES DONNEES DISPONIBLES..... | 6 |
| 2.1.1 – Les images satellitaires..... | 6 |
| 2.1.2 – Les images aériennes ortho-rectifiées et géoréférencées..... | 7 |
| 2.1.3 – Les autres images aériennes..... | 10 |
| 2.1.4 – Les photos de terrain..... | 10 |
| 2.1.5 – Les vidéos..... | 10 |
| 2.1.6 – Les cartes et données SIG..... | 10 |
| 2.1.7 – Les études relatives à la crue..... | 10 |
| 2.1.8 – Les données altimétriques et topographiques..... | 11 |
| 2.1.9 – Les investigations de terrain..... | 11 |
| 2.2 – DIFFICULTES RENCONTREES DANS LA COLLECTE DES DONNEES..... | 11 |
| 2.3 – L'EXPLOITATION DES DONNEES DISPONIBLES..... | 11 |
| 2.3.1 – La post-traitement des images satellitaires..... | 11 |
| 2.3.2 – La photo-interprétation..... | 12 |
| 2.3.3 – L'analyse diachronique..... | 14 |
| 2.3.4 – La cartographie de terrain..... | 15 |
| 2.4 – DIFFICULTES RENCONTREES DANS L'ANALYSE DES DONNEES..... | 15 |
| 3 – L'EVENEMENT DU POINT DE VUE HYDRO-CLIMATIQUE | 17 |
| 3.1 – LA CHRONOLOGIE DES EVENEMENTS..... | 17 |
| 3.2 – L'ORIGINE DES DEBITS LIQUIDES..... | 18 |
| 3.2.1 - Les pluies génératrices des crues de 2012 et 2013..... | 18 |
| 3.2.2 - Contribution de la fonte nivale dans les débits..... | 19 |
| 3.3 – L'ORIGINE DES DEBITS SOLIDES..... | 21 |
| 3.4 – LES AUTRES CONTRIBUTIONS A LA CRUE..... | 23 |
| 3.5 – ORIGINE ET PREVISIBILITE DE LA CRUE ET DE SES CONSEQUENCES..... | 24 |
| 3.5.1 – Une origine multifactorielle pour un évènement complexe..... | 24 |
| 3.5.2 – Une prise en compte insuffisante de l'aléa mobilité..... | 24 |
| 3.5.3 – Nécessité et précocité du retour d'expérience..... | 26 |
| 3.5.4 – Un évènement exceptionnel ?..... | 26 |
| 4 – L'EVENEMENT DU POINT DE VUE DE LA DYNAMIQUE FLUVIALE ET TORRENTIELLE | 28 |
| 4.1 – BANDE ACTIVE ET ESPACES DE MOBILITE FONCTIONNEL..... | 28 |
| 4.1.1 – La notion de bande active..... | 28 |
| 4.1.2 – La notion d'espace de mobilité..... | 28 |
| 4.1.3 – Délimitation de l'espace de mobilité fonctionnel de la crue de juin 2013..... | 29 |

| | |
|--|------------|
| 4.2 - LOCALISATION ET EXTENSION DES ZONES DE MOBILITE..... | 30 |
| 4.2.1 – Bassin versant de la Garonne..... | 30 |
| 4.2.2 – Bassin versant de la Neste..... | 38 |
| 4.2.3 – Bassin versant du gave de Pau..... | 42 |
| 4.3 – OCCUPATION DES SOLS DES ZONES DE PLUS FORTE MOBILITE | 53 |
| 4.3.1 – Bassins intramontagnards d'altitude | 53 |
| 4.3.2 – Fonds des vallées torrentielles..... | 53 |
| 4.3.3 – Cônes de déjection torrentiels..... | 55 |
| 4.3.4 – Plaines divagantes de vallées alluviales | 59 |
| 4.3.5 – Zones à méandres mobiles du piémont..... | 62 |
| 4.4 – TRANSPORT SOLIDE ET CONTINUITÉ DU CHARRIAGE..... | 62 |
| 4.4.1 – Origine des matériaux mobilisés..... | 64 |
| 4.4.2 – Principales zones de dépôts des alluvions charriées..... | 77 |
| 4.4.3 – Principaux obstacles anthropiques à la continuité du charriage..... | 81 |
| 4.5 – TYPOLOGIE MORPHO-FONCTIONNELLE DES COURS D'EAU | 87 |
| 5 – PROCESSUS MORPHODYNAMIQUES ET FACTEURS AGGRAVANTS | 92 |
| 5.1 – LES VERROUS HYDRAULIQUES..... | 92 |
| 5.1.1 – Définition du verrou hydraulique..... | 92 |
| 5.1.2 – Mise en charge et perte de charge des écoulements | 96 |
| 5.2 – LES PRINCIPAUX EFFETS HYDRAULIQUES ET MORPHODYNAMIQUES LIES AUX POINTS DURS .. | 100 |
| 5.2.1 - L'effet tremplin..... | 100 |
| 5.2.2 - L'effet glissière..... | 103 |
| 5.2.3 - L'effet toboggan | 106 |
| 5.2.4 - L'effet défecteur ou ping-pong..... | 107 |
| 5.3 – LES BOISEMENTS ET LES EMBACLES | 110 |
| 5.3.1 – Rôles et comportement des boisements rivulaires et alluviaux | 110 |
| 5.3.2 – Les embâcles..... | 112 |
| 5.4 – LES FACTEURS AGGRAVANTS D'ORIGINE NATURELLE | 114 |
| 5.4.1 – La nature des roches ou terrain constitutifs des berges..... | 114 |
| 5.4.2 - Les instabilités de versants | 117 |
| 5.4.3 - L'activité des couloirs d'avalanche | 118 |
| 5.4.4 - La ripisylve..... | 119 |
| 5.4.5 – Les boisements alluviaux..... | 119 |
| 5.5 – LES FACTEURS AGGRAVANTS D'ORIGINE ANTHROPIQUE | 123 |
| 5.5.1 - Les défauts d'entretien et de gestion..... | 123 |
| 5.5.2 – L'exploitation des cours d'eau et de leurs ressources | 125 |
| 5.5.3 - Les aménagements visant à contraindre le cours d'eau | 129 |
| 5.5.4 - Les aménagements liés à l'urbanisation et aux infrastructures..... | 131 |
| 5.5.5 – Combinaisons des facteurs et des processus..... | 135 |
| 6 – BILAN ET PERSPECTIVES..... | 137 |
| 6.1 – ACQUISITION DES DONNEES POUR LE RETOUR D'EXPERIENCE | 137 |
| 6.1.1 – Les photographies satellitaires..... | 137 |
| 6.1.2 - Les prises de vue aériennes..... | 139 |
| 6.1.3 – Les prises de vue terrestres | 143 |
| 6.1.4 – Recommandations concernant les données images..... | 143 |
| 6.2 – POUR LE PARTAGE ET LA GESTION INTEGREE DE L'ESPACE RIVIERE | 148 |
| 6.2.1 – La crue est aussi un outil de connaissance | 148 |
| 6.2.2 – Les réflexes post-crise..... | 148 |
| 6.2.3 – Des « réponses réflexes » qui amènent de nouvelles questions..... | 152 |
| 6.3 – LES MESSAGES CLES A RETENIR..... | 154 |

Remarque

Le présent rapport est accompagné d'un **atlas cartographique** qui présente :

- La pente longitudinale des cours d'eau étudiés ;
- Les élargissements de la bande active consécutifs à la crue de juin 2013 ;
- Les recoupements de méandre associés à la crue de juin 2013 ;
- Les principaux obstacles au transit sédimentaire par charriage, mis en évidence par cette crue.

Cet atlas au **1/40000** est organisé selon 3 **cahiers géographiques** :

- La Garonne amont et la Pique ;
- Les Nestes ;
- Le Gave de Pau.



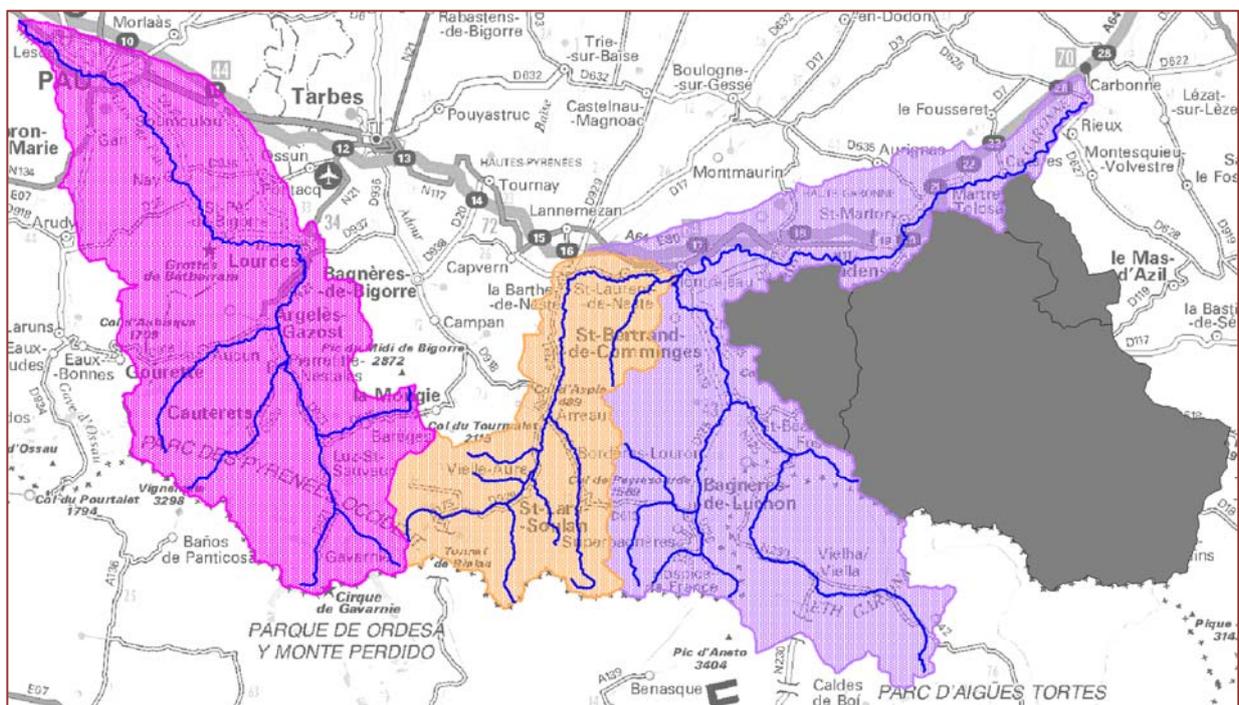
1 – Cadre général de l'étude

1.1 – Le périmètre de l'étude

Le périmètre de l'étude comprend l'ensemble des bassins versants pyrénéens les plus touchés par la crue des 18 et 19 juin 2013. Il s'agit du gave de Pau amont (64, 65), des Nestes (65), de la Pique et de la Garonne amont (31,65, Espagne).

Au total, cela représente environ 620 km de cours d'eau à étudier, dont 200 km sur le bassin versant du gave de Pau (1975 km²), 170 km, sur celui des Nestes (865 km²) et 250 km sur le bassin amont de la Garonne (1850 km²), Pique comprise.

Périmètre de l'étude



1.2 – Les problématiques traitées et les objectifs visés

Cette étude est principalement centrée sur la **dynamique fluviale** et l'hydromorphologie. Elle vise à décrire et expliquer les phénomènes ayant été à l'origine de ces crues ou les ayant accompagnées et ceux étant à l'origine des nombreux dégâts. Elle doit aider à partager des éléments de diagnostic et doit tirer des enseignements pour la future gestion des cours d'eau et l'aménagement des territoires concernés.

A ce titre, il convient de considérer la crue comme une crise climato-hydrologique génératrice de divers risques naturels, associés mais de nature distincte :

- L'**inondation** proprement dite qui correspond à la submersion des terrains riverains des cours d'eau ;
- La **mobilité**, qui fait référence aux processus menant aux érosions pouvant affecter les berges, le fond du lit mais également les terrains riverains, et ses répercussions sur le tracé et l'emprise (ou bande active) des cours d'eau ;

- Les **mouvements de terrain** (superficiels), qui peuvent affecter les versants adjacents aux cours d'eau ;
- Les **processus torrentiels** tels que les coulées de débris, qui accompagnent souvent la divagation de certains cours d'eau sur leur cône de déjection.

Ainsi, les problématiques abordées sont les suivantes :

- Les phénomènes et les **risques fluviaux ou torrentiels**, leur origine, leur déroulement/dynamique, leurs conséquences et le rôle des facteurs aggravants d'origine naturel (géologie, avalanche, ripisylve, etc.) ;
- Les **enjeux humains** et leur exposition aux aléas fluviaux/torrentiels (notion de vulnérabilité), leurs rôles en tant que facteurs aggravants anthropiques ;
- Les **travaux et l'aménagement du territoire**, en considérant, à la fois les aménagements antérieurs aux crues, les travaux d'urgence réalisés entre la crue d'octobre 2012 et celle de juin 2003, les travaux d'urgence réalisés suite à la crue de juin 2013 et les travaux prévus ou à définir qui n'ont pas encore été mis en œuvre.

1.3 – Contenu et organisation du rapport

Le présent rapport comprend 4 parties principales, à savoir :

- Le rappel et l'analyse des données disponibles et des méthodes mises en œuvre ;
- Une analyse de l'évènement du point de vue hydro-climatique ;
- Une analyse de l'évènement du point de vue de la dynamique fluviale et torrentielle ;
- Une synthèse/conclusion concernant, d'une part, l'approche méthodologique de ce type d'évènement et, d'autre part, le partage et la gestion de l'espace rivière.

Ce document est accompagné d'études de cas, présentées sous la forme de 3 cahiers géographiques distincts, à raison d'un cahier par bassin versant objet de la présente analyse.

2 – Données et méthodes utilisées pour l'analyse

2.1 – Les données disponibles

2.1.1 – Les images satellitaires

☞ La mise en orbite du système Pléiades-HR, composé de deux satellites d'observation de la terre à très haute résolution spatiale, permet de disposer d'un système civil dual capable d'acquisitions submétriques avec une répétitivité quotidienne en tout point du globe.

La combinaison, au sein d'un système d'information géographique, des éléments géoréférencés observés sur les images Pleiades-HR, délivre une vision fine des conséquences morphologiques des phénomènes.

La base de données produite constitue un ensemble de données géoréférencées en "pile" de couches, où la donnée de référence pour le calage géométrique est le Référentiel à Grande Echelle (RGE) de l'IGN, notamment la composante image (BD-ORTHO) et la composante altimétrique (BD ALTI).

☞ La procédure d'intégration des données disponibles est décrite ci-après.

Pour les images Pleiades-HR :

- L'intégration du format DIMAP V2, natif des données livrées par le canal Astrium ;
- Le contrôle qualité image ;
- L'affinage de la géométrie par rapport à la BD ORTHO de l'IGN ;
- Le contrôle qualité géométrie ;
- La création d'une fiche de métadonnées ISO 19115/19139 compatible INSPIRE.

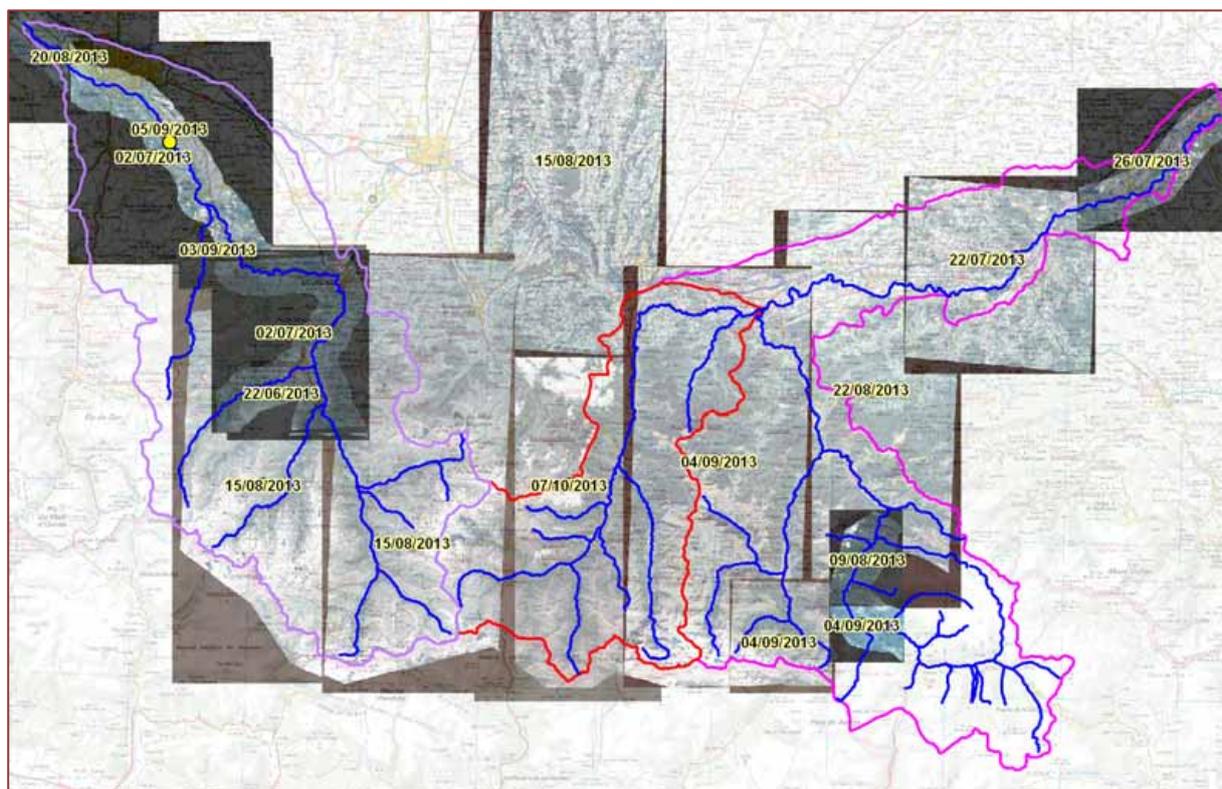
Pour les données exogènes :

- L'import des données pertinentes parmi les jeux de données existants ;
- Le contrôle qualité ;
- Si nécessaire, une reprise où une mise en géométrie des éléments géographiques ;
- La création d'une fiche de métadonnées ISO 19115/19139 compatible INSPIRE.

☞ Les images de l'année 2013 utilisées sont indiquées sur la carte ci-après. Selon les zones couvertes, elles s'échelonnent entre le 22 juin et le 7 octobre 2013.

Par conséquent, elles représentent des états très différents des cours d'eau et de leur lit majeur, en fonction de l'importance et de l'avancement des travaux post-crise réalisés en urgence, entre quelques jours et plus de 3 mois après l'évènement.

Localisation et dates des images Pleiades-HR utilisées



2.1.2 – Les images aériennes ortho-rectifiées et géoréférencées

☞ Le premier groupe d'images aériennes utilisées sont celles qui servent de référentiels pour l'analyse diachronique.

Pour la France, il s'agit de la BD-Ortho de l'IGN, livrées à l'échelle départementale :

- Version 2012, pour les Pyrénées-Atlantiques ;
- Version 2010, pour les Hautes-Pyrénées et la Haute-Garonne.

Pour l'Espagne (Vall d'Aran), il s'agit des ortho-photographies de l'ICGC (Institut Cartogràfic i Geologic de catalunya) de 2012, disponibles à partir d'un serveur WMS du géoportail de l'Institut (<http://www.icc.cat/>)

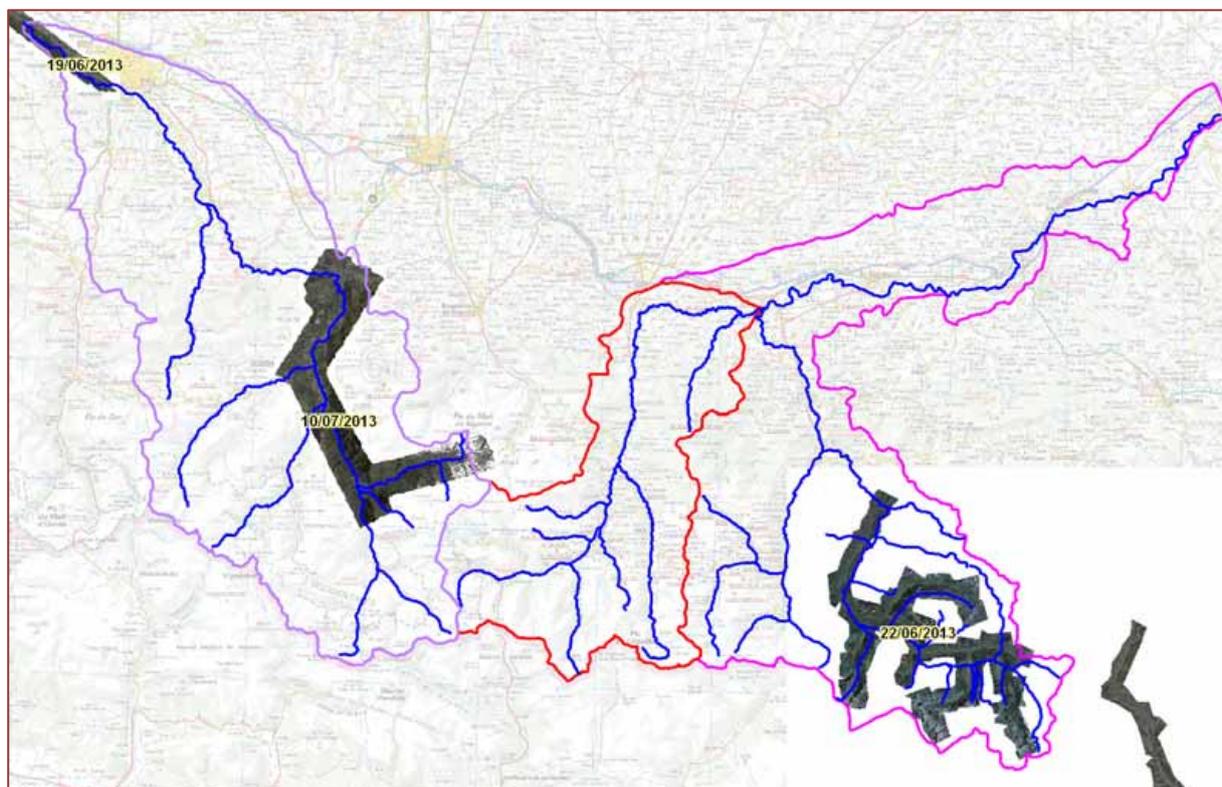
☞ Le second groupe d'images aériennes utilisées sont celles relatives à la crue de juin 2013 (voir carte ci-après).

Pour la France, il s'agit de missions de l'IGN, commandées par les services de l'Etat :

- DDT65_ORTHO_COUL_TOURMALET_LOURDES_062013, du 20 juin 2013, sur le Bastan et le gave de Pau, entre Sassis et Lourdes (65) ;
- DDT65_ORTHO_IRC_TOURMALET_LOURDES_062013, du 20 juin 2013, sur le Bastan et le gave de Pau, entre Sassis et Lourdes (65), en proche infra-rouge ;
- Mission DREAL-Aquitaine, du 19 juin 2013, sur le gave de Pau, entre Pau et Orthez (64).

Pour l'Espagne (Vall d'Aran), il s'agit des ortho-photographies de l'ICGC (Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya) du 22 juin 2013, au pixel de 25 cm, disponibles en flux WMS à partir du géoportail de l'Institut (<http://www.icc.cat/>)

Localisation et dates des images aériennes utilisées (source IGN, ICGC)



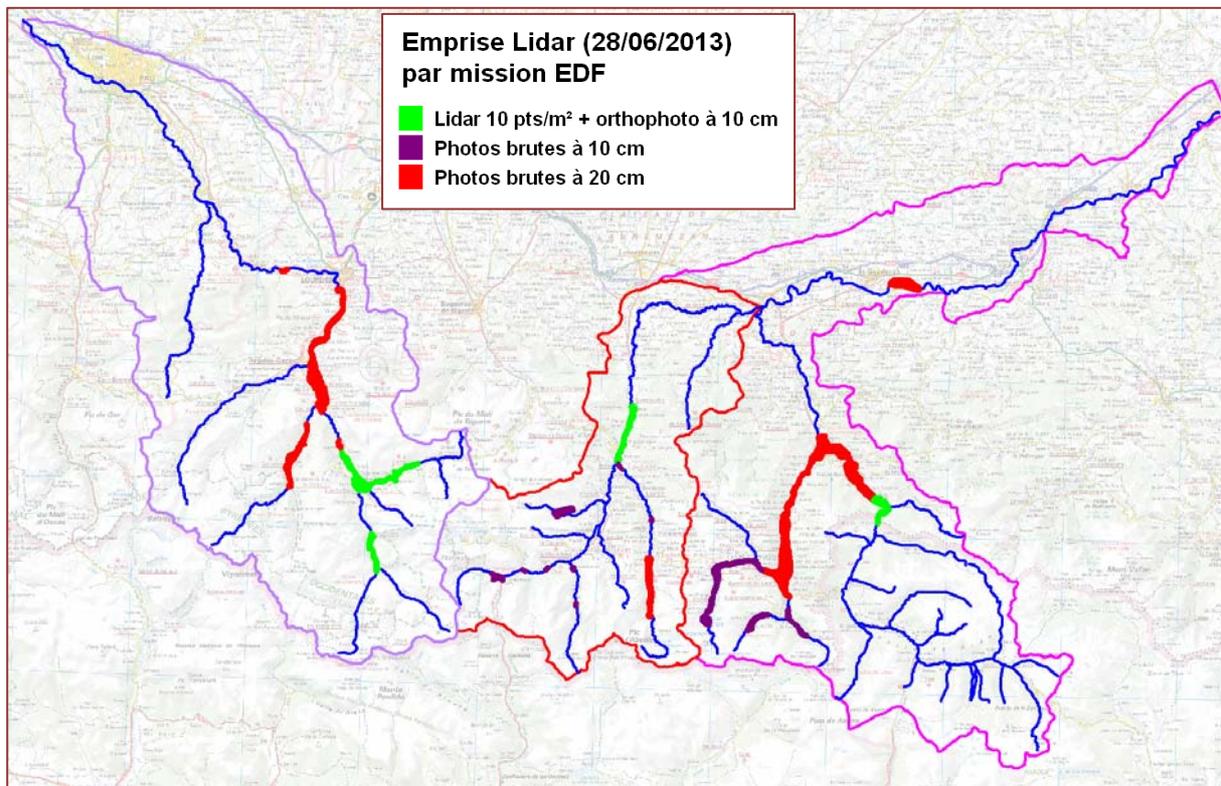
Pour la France, d'autres missions ont été mises à disposition (voir carte ci-après). Elles proviennent de levés Lidar réalisés par EDF (EDF – CICH, le Bourget du lac) les 4 et 5 juillet 2013, sur la Garonne amont (secteur de Fos - 31), sur le Bastan (aval de Barèges – 65) et le gave de Pau amont (entre Sassis et Chèze – 65).

☞ Le troisième groupe d'images aériennes utilisées sont celles acquises dans le cadre de cette étude, sur des secteurs ciblés pour faire l'objet d'une analyse affinée.

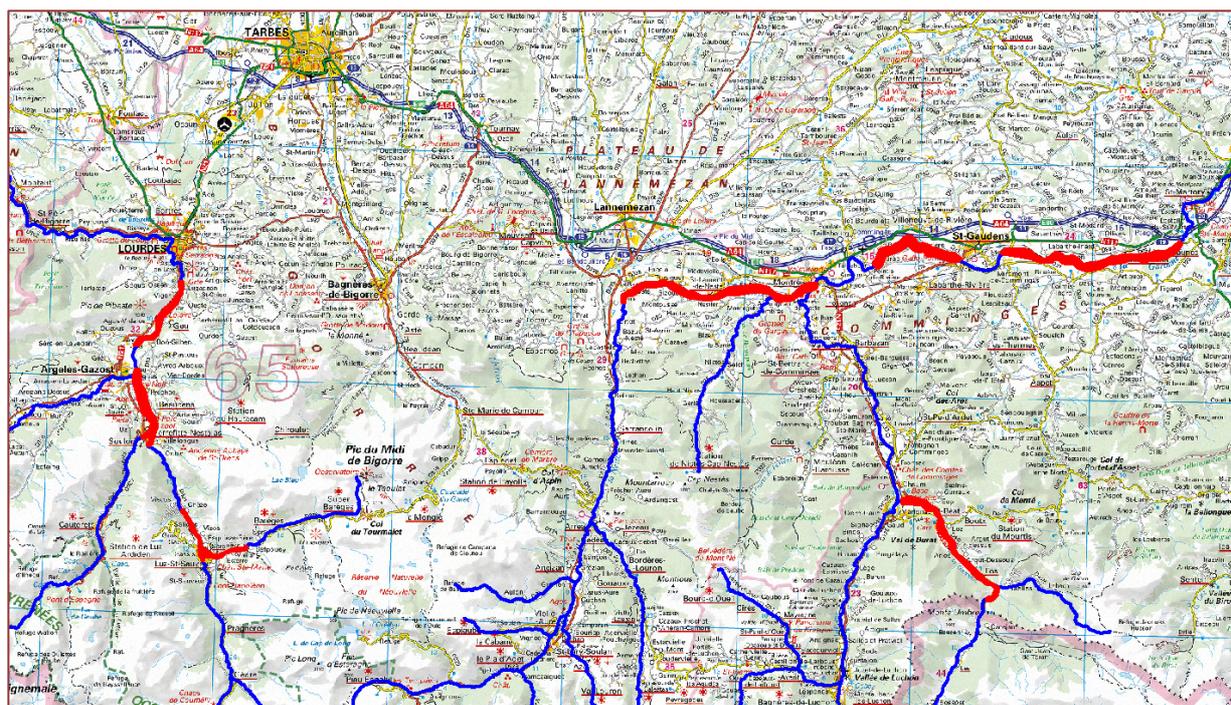
Les missions ont été réalisées en février 2014, par la société l'Avion Jaune, sur les 8 zones indiquées en rouge sur la carte ci-après.

Il s'agit d'images à la résolution de 10 cm obtenues en une seule fauchée, avec une emprise moyenne de l'ordre de 600 m de largeur.

Localisation des images aériennes EDF utilisées (source EDF)



Zones d'acquisition d'images aériennes à haute résolution – mars 2014 - GéoDiag



2.1.3 – Les autres images aériennes

Les autres images aériennes disponibles proviennent principalement de vols réalisés en hélicoptère pendant ou après la crue.

Il s'agit de vols réalisés par :

- La DDT65 et le PLVG (ex SMDRA), sur le Bastan et l'Yse, les 19 et 25 juin 2013 ;
- La DDT65 et le PLVG (ex SMDRA), sur le gave de Cauterets, le 19 juin 2013 ;
- La DDT65 et le PLVG (ex SMDRA), sur le gave de Gavarnie, le 19 juin 2013 ;
- La DDT65 et le PLVG (ex SMDRA), sur le gave de Pau, les 19 et 25 juin 2013 ;
- La DDT65, sur les Nestes, le 25 juin 2013 ;
- La DREAL Midi-Pyrénées, sur les Nestes, le Bastan et le gave de Pau amont (65), le 25 juin 2013 ;
- La DDT31 et l'Onema, sur la Garonne, le 7 juillet 2013 ;
- Le service RTM 31, sur la Pique amont, le 18 juin 2013 ;
- L'Onema 65, sur les Nestes et le gave de Pau (65), le 15 août 2013.

Les clichés commandés par EDF, sur la Garonne amont, la Pique, les Nestes d'Aure et du Louron, les gaves de Gavarnie et de Pau, et pris les 4 et 5 juillet 2013, complètent ces missions.

2.1.4 – Les photos de terrain

De nombreuses photographies ont été prises sur le terrain. Elles proviennent des membres du comité de pilotage, des prestataires missionnés par eux ou des investigations réalisées par GéoDiag, dans le cadre de la présente étude.

Elles sont complétées par les images disponibles sur l'internet et provenant de sites traitant de l'évènement.

A noter, à ce propos, le travail de collecte réalisé par le laboratoire CNRS Géode de l'université de Toulouse 2, qui a rassemblé une grande quantité de témoignages images relatifs à la crue ou aux travaux post-crise.

2.1.5 – Les vidéos

Les vidéos utilisées proviennent pour l'essentiel de l'internet et notamment des reportages télévisuels relatifs à l'évènement.

Ils sont complétés par des vidéos amateurs filmées par des membres du COPIL ou lors des investigations de terrain réalisées par GéoDiag.

2.1.6 – Les cartes et données SIG

Certaines cartographies ou données SIG ont été transmises par des membres du COPIL. Elles proviennent principalement des inventaires de laisses de crue et de zones inondées, réalisés à la suite de l'évènement.

2.1.7 – Les études relatives à la crue

Quelques données ou documents ont également été fournies par des membres du COPIL. La plupart sont relatifs soit à l'analyse hydro-climatique de l'évènement, soit aux projets de travaux prévus dans la première phase de l'urgence post-crise.

2.1.8 – Les données altimétriques et topographiques

Les principales données altimétriques relatives à la crue proviennent des campagnes d'acquisition Lidar réalisées soit par les services de l'Etat (DDT65 sur le Bastan), soit par EDF (Bastan aval, gave de Pau amont, Garonne amont).

L'utilisation des images Pléiades en tri-stéréoscopie, à des fins d'analyse altimétrique a été abandonnée. Leur acquisition paraissait trop tardive vis-à-vis de l'avancement des travaux d'urgence et leur précision altimétrique insuffisante pour les analyses souhaitées.

2.1.9 – Les investigations de terrain

Entre le 22 juin 2013 et avril 2014, plusieurs visites effectuées sur le terrain par GéoDiag, afin de compléter les analyses par l'observation directe et le recueil de témoignages. Certaines de ces investigations ont été réalisées avec des membres du COPIL, notamment sur la Garonne amont, la Pique ou les Nestes.

2.2 – Difficultés rencontrées dans la collecte des données

Malgré la multitude des données relatives à la crue, leur collecte s'est avérée difficile et longue. En effet, il ressort de cette phase que l'information sur la nature des données collectées pendant et juste après la crue, sur leur acquisition ou leur détenteur, était peu ou pas partagée entre les membres du COPIL, parfois même entre services d'une même structure.

Leur mise à disposition a pu également être différée faute d'un service ou d'un interlocuteur bien identifié pour faire le lien avec GéoDiag sur ce point. Ainsi, à de nombreuses reprises, un interlocuteur n'a pas jugé utile de fournir certaines données ou de faire part de leur existence croyant qu'un collègue ou un autre service s'en chargerait.

Enfin, une difficulté plus spécifique à échanger des informations et des données est apparue avec le service RTM, en particulier dans les Hautes-Pyrénées. Les raisons avancées sont relatives à la propriété ou à la confidentialité des données en question.

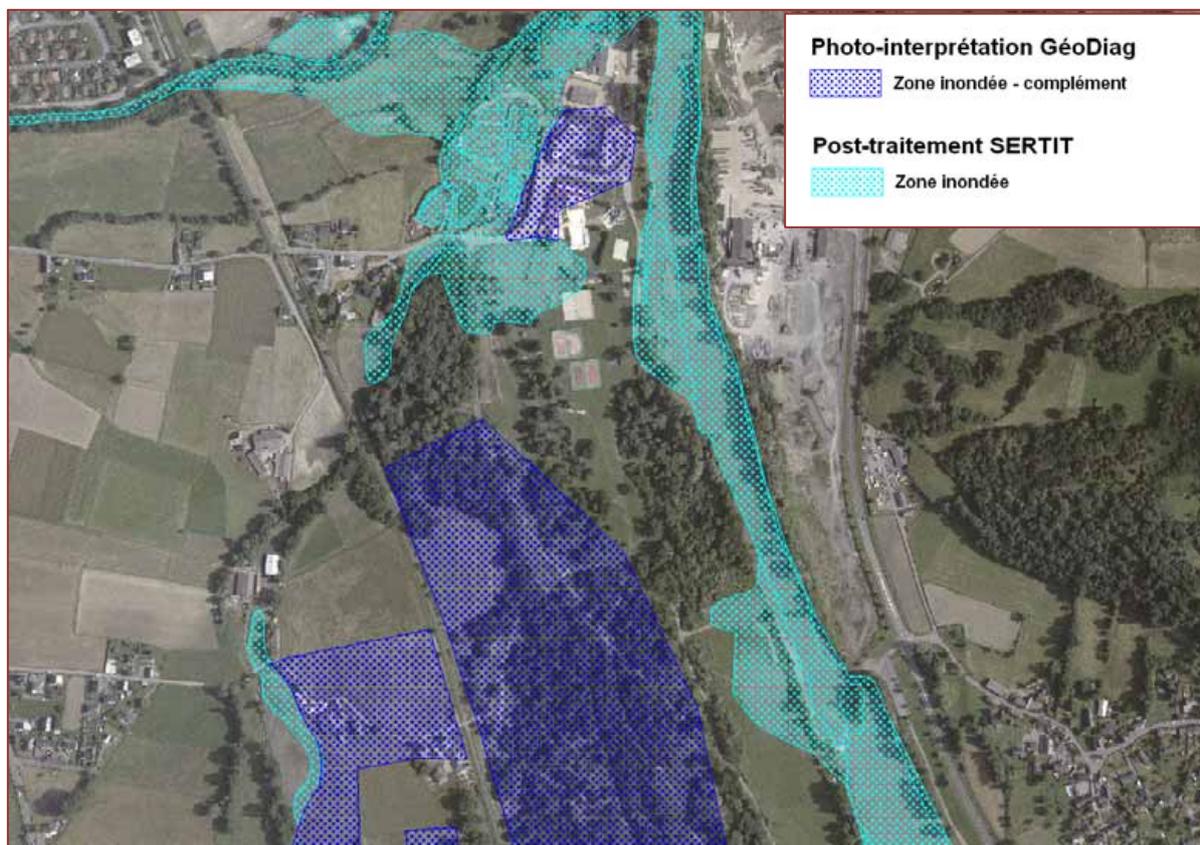
2.3 – L'exploitation des données disponibles

2.3.1 – La post-traitement des images satellitaires

Le post-traitement des images satellitaires avait été mis en œuvre sur une partie du gave de Pau, afin de produire une carte des zones inondées, avant le lancement de la présente étude.

Comparé à la photo-interprétation ou aux observations de terrain, le résultat obtenu est apparu peu probant car fortement dépendant de l'occupation du sol, au moment des prises de vue. En effet, les zones couvertes par une végétation dense et haute (boisement, culture, etc.) ont souvent été exclues de la cartographie bien que faisant manifestement partie des espaces soumis à submersion, en juin 2013.

Cartographie comparative des zones inondées



Cette exploitation n'a donc pas fait l'objet d'une analyse plus poussée.

2.3.2 – La photo-interprétation

La photo-interprétation des documents visuels (ortho-photos, photographies, vidéos) est la principale méthode d'exploitation des données collectées qui a été mise en œuvre.

Réalisée à l'aide d'un SIG, elle a notamment permis de tracer les limites de la bande active ou du lit mineur héritées de la crue, d'identifier les points durs (ouvrages transversaux, bâtiments, etc.) en liens directs avec les principales zones d'érosion latérale ou encore les principales zones de dépôts de nappes de charriage.

Compte tenu de l'étalement des prises de vue exploitées, entre juin et octobre 2013, l'avancement des travaux post-crise est variable d'une vue et d'une zone à l'autre. Pour limiter le risque d'erreur, l'information relative aux différentes délimitations a été vérifiée à l'aide des images (photos et vidéos) prises pendant ou immédiatement après la crue.

Evolution d'une portion du gave de Pau, en fonction des travaux (Beaucens, 65)



Evolution d'une portion du gave de Pau, en fonction des travaux (Beaucens, 65)



2.3.3 – L'analyse diachronique

L'analyse diachronique repose sur la comparaison de vues prises à des dates différentes sur un même site.

Dans le cas présent, elle s'appuie principalement sur la BD-Ortho (IGN), prise comme référentiel et sur les images post-cruée, acquises après le 19 juin 2013.

Cette méthode vise en premier lieu à identifier, voire à quantifier, certaines évolutions morphologiques dues à la crue de juin 2013. La principale difficulté rencontrée tient au fait que les missions RGE/IGN disponibles sont antérieures à la crue d'octobre 2012, qui a également été morphogène, notamment sur l'amont des Nestes et du gave de Pau (la Pique ou la Garonne n'ayant pas été touchées de manière significative).

Sur certaines parties du gave de Pau, cette difficulté a été atténuée par l'existence d'une analyse intermédiaire, effectuée par GéoDiag entre la crue d'octobre 2012 et celle de juin 2013. Mais elle n'a pas d'équivalent sur le bassin des Nestes.

Concernant la crue de juin 2013, les images disponibles avant, pendant et après la crue sont quantitativement et qualitativement très inégales, selon le bassin versant et la zone considérés.

Du fait de l'état des lieux réalisé en 2011 par **GéoDiag** sur le bassin du gave de Pau 65 et des compléments apportés suite à la crue d'octobre 2012 (hors Bastan, non touché); du fait aussi de l'importance des dégâts et des transformations géomorphologiques relatifs à la crue

de juin 2013 et des très nombreuses images acquises sur ces cours d'eau, les analyses comparatives sur le gave de Pau, et plus particulièrement le Bastan, sont à la fois plus complètes et plus fines que sur les autres bassins versants étudiés.

2.3.4 – La cartographie de terrain

Lors des visites de terrain, certaines observations complémentaires ont été cartographiées soit directement sur place soit à l'aide d'une trace GPS, afin de compléter ou affiner les résultats de la photo-interprétation.

2.4 – Difficultés rencontrées dans l'analyse des données

Les principales difficultés rencontrées dans l'exploitation des données relèvent :

- De la précocité et de l'ampleur des travaux de curage et de terrassement post-crise, engagés souvent dès le 19 juin ;
- De la disparité des images et informations disponibles, toutes les zones n'ayant pas bénéficié des mêmes couvertures (IGN, hélicoptère, médias, etc.).

Lorsque les seules images disponibles sont postérieures à la mi-juillet 2013, il peut être difficile de reconstituer précisément les limites de la bande active, la répartition des alluvions charriées, etc. hors l'influence des premiers travaux d'urgence.

Si les témoignages photographiques de terrain font également défaut sur les mêmes secteurs, l'analyse reste alors incomplète et imprécise. Sur certains sites, seule une recherche poussée recoupant des sources variées a permis de limiter les incertitudes initiales.

Dans certains cas, la mise à disposition des témoignages et données préalablement collectés par le service RTM auraient pu faire gagner du temps et de la précision pour cette phase d'analyse.

Sur l'exemple ci-après, pris sur le gave de Cauterets, l'interprétation de l'image Pléiade (août 2013) indique un tracé quasi inchangé par rapport à 2010. En réalité, la vue d'hélicoptère prise le 19 juin, montre une divagation importante du torrent, qui passe à l'Est des maisons et a provoqué la destruction de plusieurs bâtiments. Dans ce cas de figure, les travaux post-crise « cachent » la majeure partie des modifications morphologiques subies par cette portion du gave et son espace de mobilité fonctionnel.

Ce type de situation montre tout l'intérêt de pouvoir disposer de vues prises pendant ou immédiatement après la crue, avant que les travaux engagés pour faire face aux urgences ne modifient trop radicalement la morphologie fluviale ou torrentielle héritée de l'évènement.

Gave de Cauterets – Quartier Concé – Image Pléiade du 15 août 2013



Gave de Cauterets – Quartier Concé – Image DDT65 du 19 juin 2013 – Source DDT65



3 - L'évènement du point de vue hydro-climatique

Cette partie repose essentiellement sur la synthèse des données et des analyses disponibles. Aucune analyse spécifique n'a été conduite dans le cadre de la présente étude.

3.1 – La chronologie des évènements

Du point de vue de la dynamique fluviale et torrentielle mais également de la réponse des diverses portions de cours d'eau aux flux liquides et solides impliqués, la crue n'est pas un évènement ponctuel concentré uniquement sur la durée de la pluie génératrice.

Sans chercher à remonter trop loin dans le temps, les caractéristiques hydrologiques et les transformations morphologiques induites peuvent être rapprochées de la chronologie suivante :

Octobre 2012

- Pluies intenses sur la crête frontalière (64 et 65), en provenance d'Espagne
- Crue morphogène sur le gave de Cauterets, le gave de Gavarnie et les Nestes (pas sur le Bastan !) mobilisant des stocks volumineux d'alluvions grossières et activant des surfaces importantes des bandes actives ou de certains cônes torrentiels

Hiver 2012/2013

- Très abondantes chutes de neige sur l'Ouest et le centre du massif pyrénéen, y compris à des altitudes modérées
- Nombreuses avalanches

Printemps 2013

- Températures basses limitant la fonte nivale
- Pluviométrie importante aux moyennes et basses altitudes
- Niveaux de base des cours d'eau élevés pouvant correspondre à des débits morphogènes, sur des périodes relativement longues

Semaines précédant la crue des 18/19 juin

- 31 mai / 1^{er} juin - Pluies intenses sur le piémont et abondantes chutes de neige sur les reliefs, notamment proches de la zone frontalière
- Avalanches tardives sur certains secteurs
- Dans les jours suivants – températures élevées, même en altitude (isotherme 0°C > 3500 m), favorisant une fonte nivale rapide et abondante
- Niveau de base élevé dans les cours d'eau soumis à la fonte nivale

Episode du 17 au 19 juin

- Précipitations intenses sur l'Ouest et le centre du massif pyrénéen
- Crue des cours d'eau, touchant les bassins versants amont de la Garonne, de la Pique, de la Neste et du gave de Pau
- Débits restant élevés dans les jours qui suivent l'évènement, du fait de la fonte nivale

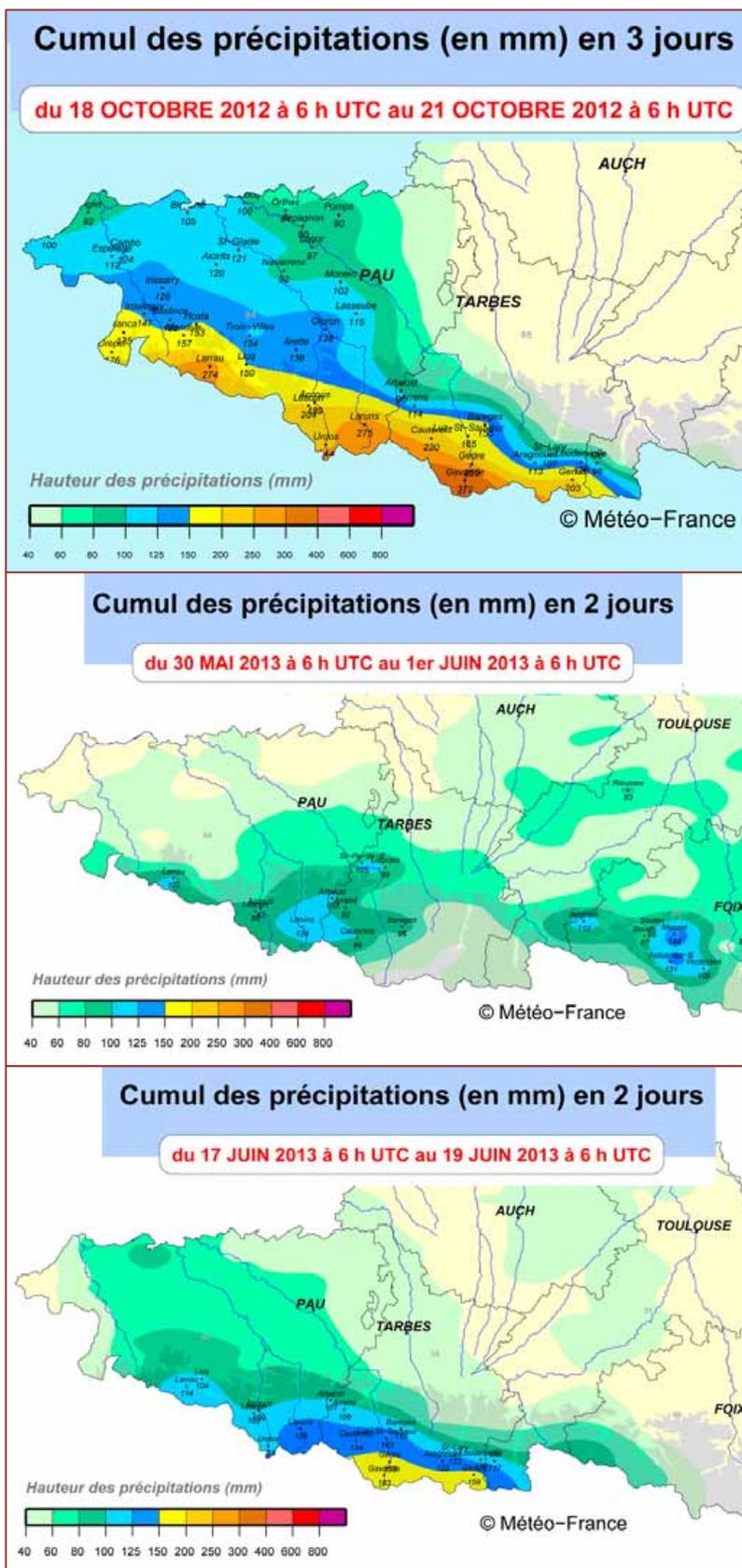
3.2 – L'origine des débits liquides

3.2.1 - Les pluies génératrices des crues de 2012 et 2013

Les pluies génératrices des crues du 21 octobre 2012 et du 19 juin 2013 présentent des similitudes quant au contexte climatique associé :

- ☞ Flux de sud amenant de l'air chaud ;
- ☞ Pluies remontant d'Espagne, débordant des crêtes frontalières sur le versant français ;
- ☞ Fortes intensités des pluies en haute montagne, conduisant à une rapide augmentation des débits et renforçant le caractère torrentiel de la crue.

Cartes de répartition des précipitations relatives aux crues d'octobre 2012 et de juin 2013 (source Météo-France)



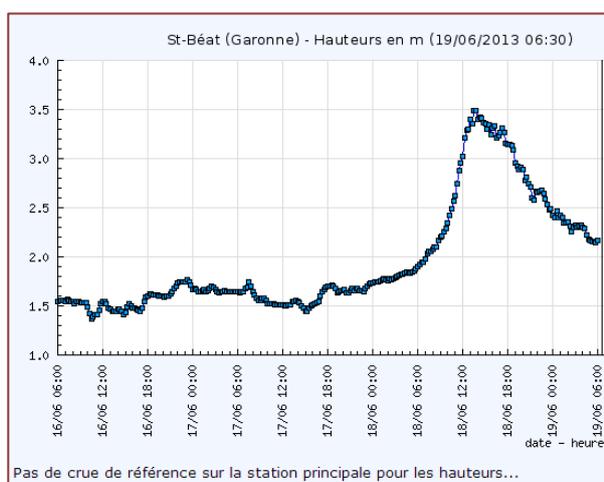
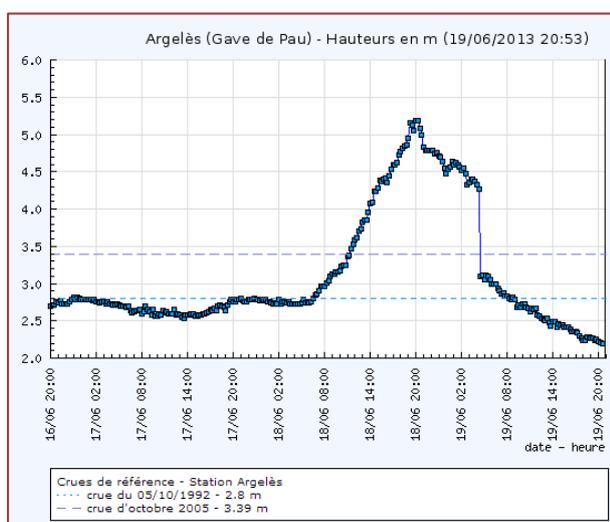
En octobre 2012, les cumuls de pluie associés à la crue ont été nettement plus élevés, en particulier sur les gaves de Cauterets (193 mm # 134 mm, soit x1,44) et de Gavarnie (335 mm # 183 mm, soit x1,83).

En juin 2013, les principales différences se rapportent à la lame d'eau ruisselée du fait de la présence d'un épais manteau neigeux et de la contribution de la fonte nivale.

Les hydrogrammes enregistrés aux stations limnigraphiques indiquent une montée rapide des débits.

| Cumul des précipitations (en mm) | | | |
|----------------------------------|-------------------|--------------|-----------|
| Bassin versant | station | octobre 2012 | juin 2013 |
| Gave de Pau amont | Cauterets | 193 | 134 |
| | Gavarnie | 335 | 183 |
| | Gèdre | 209 | 122 |
| | Barèges | 140 | 103 |
| | Luz-st-Sauveur | 145 | 131 |
| Nestes | St-Lary | 91 | 92 |
| | Loudenvielle | 102 | 98 |
| | Genos | 173 | 165 |
| | Aragnoet | 169 | 127 |
| Garonne amont | Luchon | | 88 |
| | Hospice de France | | 133 |
| | St-Paul d'Oueil | | 118 |
| Val d'Aran | Vielha | | 112 |
| | Bonaigua | | 100 |

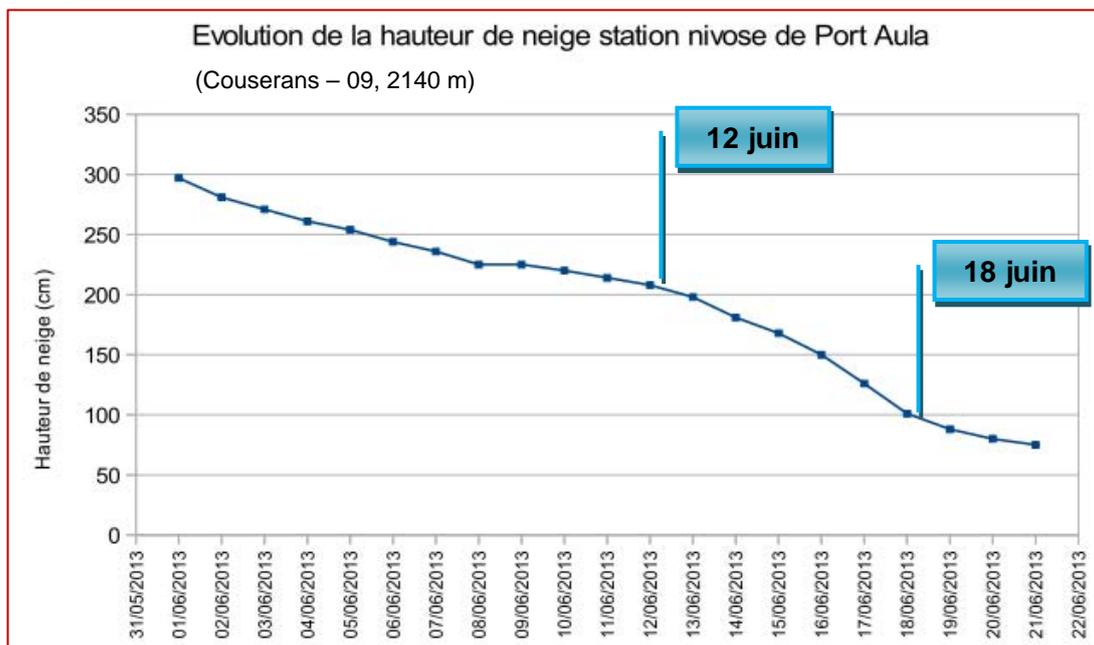
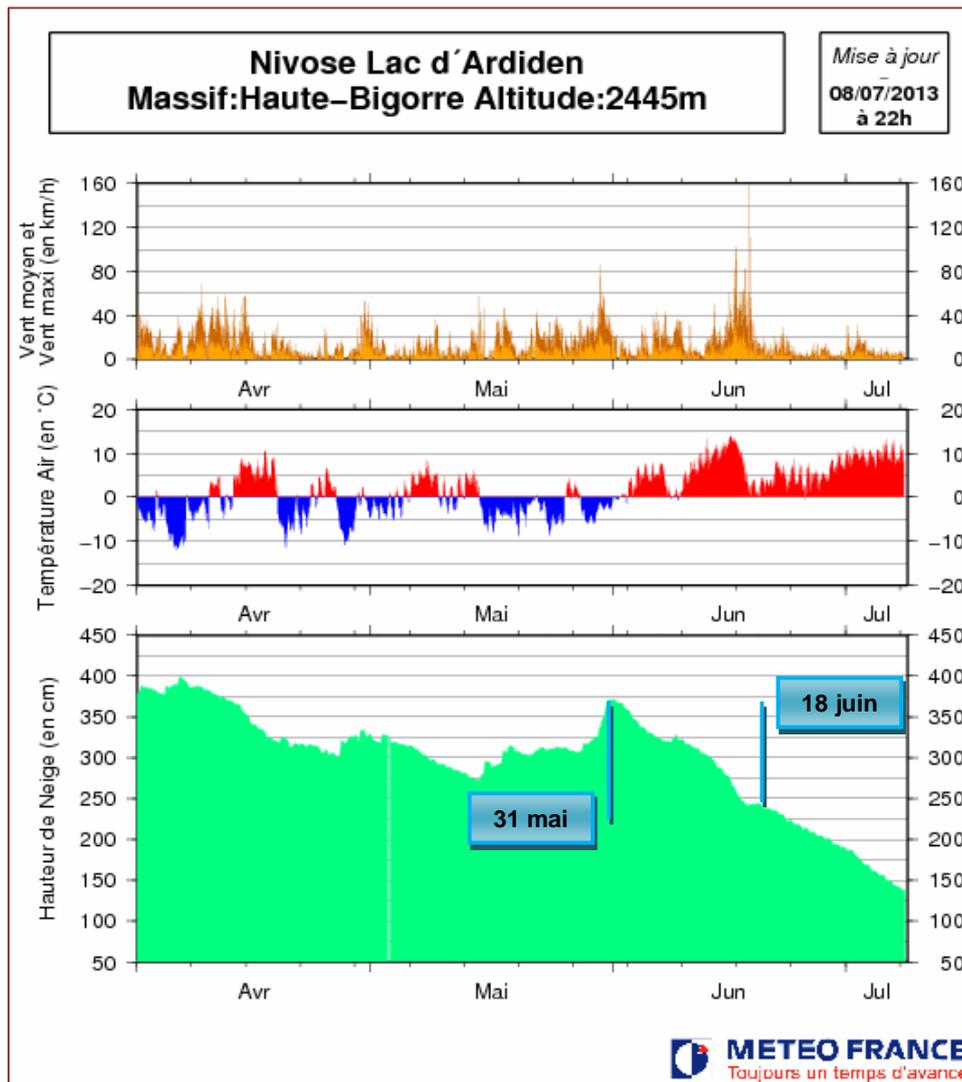
Exemples d'enregistrement des niveaux d'eau (source « Vigicrues »)



3.2.2 - Contribution de la fonte nivale dans les débits

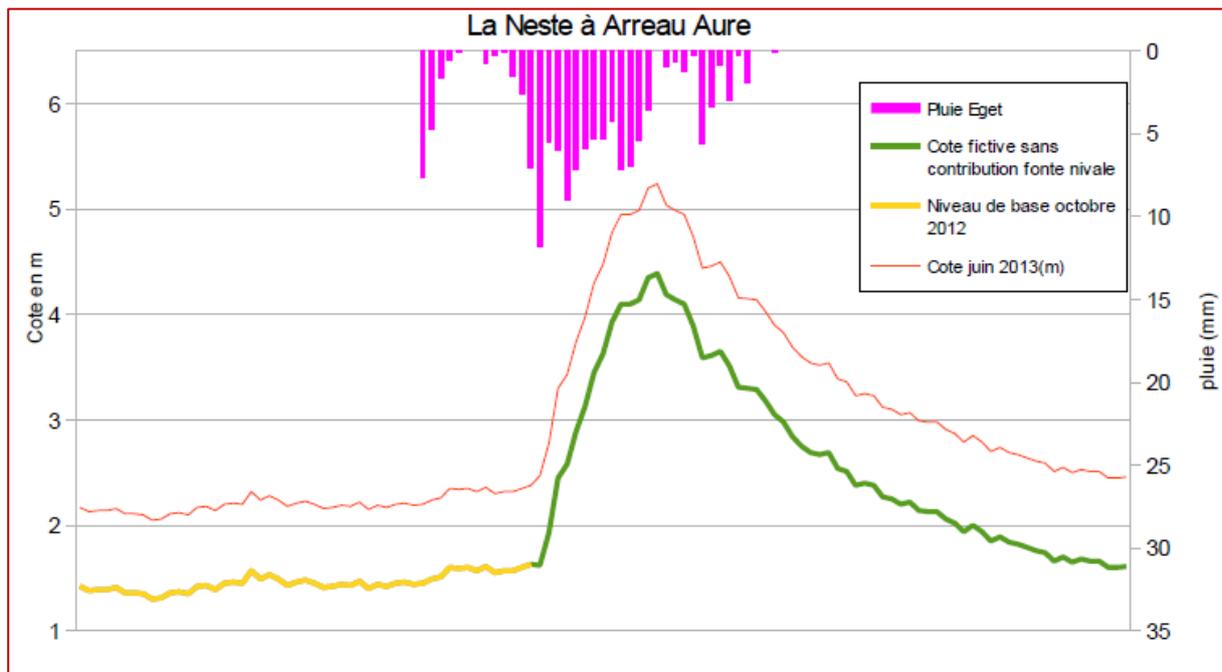
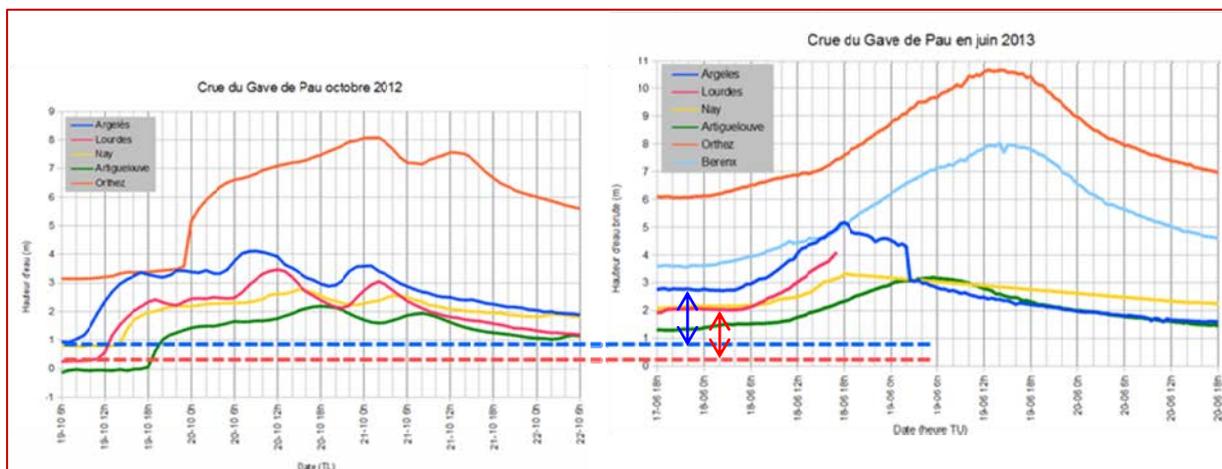
Si en octobre 2012, la neige était absente, en juin 2013, la fonte nivale est estimée forte dans la semaine précédent la crue et plus modeste pendant l'épisode.

D'après les analyses conduites pour la DREAL, la contribution totale de la fonte nivale (avant et pendant l'événement) a pu générer une majoration de 80 à 90 cm sur les maxima relevés aux stations hydrographiques de Chaum (Garonne - 31) et Arreau (Neste - 65).



La fonte nivale a donc principalement conduit à des débits de base déjà élevés, avant la pluie génératrice. A Argelès et à Lourdes, la différence est nettement supérieure à 1 m.

Comparaison des niveaux de base des crues d'octobre 2012 et juin 2013



3.3 – L'origine des débits solides

Les crues morphogènes d'octobre 2012, de l'hiver et du printemps 2013 ont « préparé » le terrain en fragilisant les berges, en mobilisant certaines fractions granulométriques des alluvions grossières présentes dans le lit mineur ou la bande active des cours d'eau concernés.

Ainsi, la crue d'octobre 2012 a mobilisé des volumes conséquents de matériaux sur les gaves de Cauterets, Gavarnie et Pau amont, secondairement sur la Neste mais pas sur le Bastan. Elle a également activé l'espace de mobilité du gave de Pau sur les plaines de Saligos et de Beaucens.

Bande active du gave de Pau, après la crue du 21 octobre 2012, à Saligos (à droite) et à Beaucens (65) – Source GéoDiag



Les crues morphogènes ont également « ouverts » des espaces jusque là « fermés », entraînant le recalibrage naturel de la bande active en même temps que la fragilisation des berges, de la ripisylve ou des boisements alluviaux.

Gave de Pau – passerelle de Saligos (65), avant (à droite) et après la crue de 2012



Sur la même période, les travaux post-crue 10/2012 ont déplacé des volumes importants d'alluvions (curage, remblais, glacis, etc.), rendant ces éléments tantôt plus mobilisables tantôt hors d'atteinte pour les crues ultérieures.

Travaux au sein la bande active du gave de Pau, Saligos (65), mai 2013 – Source CG65



3.4 – Les autres contributions à la crue

L'important manteau neigeux a confiné les versants (déstabilisés par les abondantes pluies d'octobre !) mais les a également fortement chargés. Au moment de la fonte nivale, des instabilités de versants ont été activées ou révélées, notamment du fait de la relaxation des contraintes statiques.

Manteaux neigeux et fonte nivale 2013, sur les pentes du Tourmalet (65)



La fonte nivale prolongée et les fortes précipitations ont provoqué la saturation des terrains et des versants. L'instabilité des formations superficielles a été accrue, ainsi que leur contribution potentielle au transport solide (fourniture primaire).

L'importance du manteau neigeux est aussi à l'origine de nombreuses avalanches, dont certaines tardives (fin mai ...), entraînant notamment :

- Le décapage des couloirs ;
- La mobilisation des débris rocheux ;
- La destruction de boisements rivulaires ou de versant ;
- La formation de culots dans les talwegs récepteurs.

Couloir et culot d'avalanche dans la vallée du Bastan (65) – Source Géode



3.5 – Origine et prévisibilité de la crue et de ses conséquences

3.5.1 – Une origine multifactorielle pour un événement complexe

Avalanches, instabilités des versants ou des berges, crues morphogènes antérieures, etc. ont contribué à la dynamique de la crue de juin 2013. Cet événement présente donc une origine multifactorielle tant pour les débits liquides que solides.

L'occurrence d'une crue significative était attendue, compte tenu de l'importance de la fonte nivale déjà observée et des bulletins météorologiques émis à partir du 17 juin, relatifs à des phénomènes orageux pouvant durer jusqu'à la nuit du 18 au 19 juin.

« Episode pluvio-orageux actif nécessitant un suivi particulier compte tenu de sa persistance et des cumuls associés. » (Source Météo-France)

Cependant, la prévision concernant les débits, donc l'alerte hydrologique, s'est avérée insuffisamment précise.

« Cet événement pluvieux, particulièrement intense et centré sur les crêtes, a donc rendu très compliquée l'élaboration de prévisions et, en particulier, l'estimation du maximum, que ce soit dans le temps ou en hauteur d'eau. Or il s'avère que c'est une information essentielle pour les gestionnaires de crise. » (Source DREAL Midi-Pyrénées)

Dans ce cas, les améliorations attendues concernent principalement l'acquisition de données en temps réel et l'accès à l'information concernant **l'intensité de pluie**, en particulier sur les **bassins versants de haute montagne**. En effet, il ressort qu'ils sont moins bien couverts que les fonds de vallée et le piémont, en termes de stations de mesure, alors qu'ils sont les principaux contributeurs en termes de débits liquides, pour ce type de crue.

D'autres caractéristiques de la crue n'avaient pas été prévues, comme en témoignent les dégâts, parfois même les destructions, ayant affecté de nombreux bâtiments ou des infrastructures. Il s'agit en premier lieu de son **emprise spatiale**, en particulier du point de vue de la **mobilité latérale** et des **processus morpho-dynamiques** associés, qui sont à l'origine de la plupart des dommages observés.

3.5.2 – Une prise en compte insuffisante de l'aléa mobilité

En domaine torrentiel, plus que sur le piémont (domaine fluvial), certaines cartographies de PPRI (ou PERI) se révèlent imprécises. Plusieurs facteurs explicatifs peuvent être avancés :

- La différence d'intensité avec la crue de référence du PPRI ;
- L'absence d'une prise en compte spécifique de l'aléa mobilité (latérale et verticale) en plus de l'aléa submersion ;
- La forte influence du charriage sur les lignes d'eau et les conditions de débordement ;
- L'apparition « récente » de nouveaux aménagements ou points de contrôle hydrauliques, dont les capacités n'avaient jamais été sollicitées ni le comportement observé pour un tel niveau de crue ;
- L'absence ou le manque de données de calage pour les modèles hydrauliques utilisés.

Plusieurs exemples montrent que la seule prise en compte de l'aléa submersion ne suffit pas à rendre compte de l'exposition aux risques fluvio-torrentiels. En effet, certaines parcelles ont été emportées, du fait de l'érosion/mobilité latérale, sans avoir été préalablement inondées.

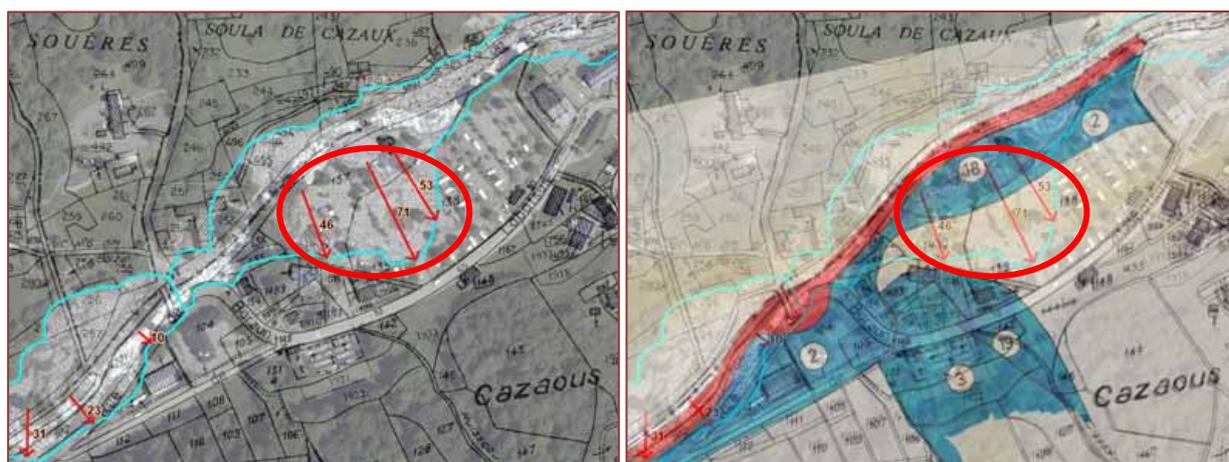
Dans le cas du camping « La Ribère », en aval de Barèges, la destruction partielle du terrain a été accompagnée d'une submersion par débordement du Bastan et par des écoulements

provenant de la route d'accès. Dans ce cas, l'impact hydraulique du pont menant aux thermes de Barzun constitue probablement un des facteurs explicatifs.

Barèges – une partie du camping « la Ribère » a été emportée par la crue du Bastan



Pourtant, elle est partiellement « non inondable », selon la cartographie réglementaire



Beaucens – une partie du camping du lac des gaves a été emportée sans être inondée



Dans le cas du parking du lac des gaves (Beaucens, 65), une vidéo amateur prise pendant la crue (« inondations gave de Pau 18 juin 2013 », F. Lamouroux) montre le recul progressif de la berge par sapement, sans que le terrain qui sera finalement érodé ne soit déjà submergé.

Ces exemples confirment que pour ce type d'évènement, notamment dans le domaine torrentiel, toute modélisation hydraulique risque d'être imprécise (débits liquides et zones inondées), au point de rendre certaines quantifications (débits solides, mobilité latérale) peu exploitables en termes de prévention ou de protection face aux risques encourus.

3.5.3 – Nécessité et précocité du retour d'expérience

Ils illustrent également l'importance à donner aux analyses qui peuvent être faites d'un tel évènement (cartographies, topographie, etc.), afin de disposer de données locales capables de décrire aussi précisément que possible ce type de crue et ses multiples conséquences, notamment sur le plan géomorphologique.

La précision et la fiabilité des informations collectées dépendent de la rapidité de leur acquisition, au regard de l'exécution des premiers travaux d'urgence (curage, terrassement, etc.). Le retour d'expérience devrait donc être mené au plus vite, s'il doit notamment servir à améliorer le calage des modèles et la prévision des modifications que peut engendrer un tel évènement.

« Il n'existe pas d'outil « presse bouton » ...
[Les outils existants permettent] de conforter des hypothèses sur le fonctionnement du cours d'eau, que seule l'**observation** préalable et une bonne connaissance du **terrain** permettent d'établir.

L'application de formules [modélisation] ne doit intervenir qu'après une interprétation **géomorphologique** du problème étudié »

(Torrents et rivières de montagne – Editions Quæ – 2013)



3.5.4 – Un évènement exceptionnel ?

Historiquement, la crue de juin 2013 est à rapprocher d'évènements similaires, dont certains ont été aussi voire plus importants.

Sur la Garonne amont, notamment à St-Béat, les crues de juillet 1897, juin 1875, octobre 1937, mai 1835 ou novembre 1982 sont comparables.

Sur le gave de Pau, les évènements de niveau comparable sont différents selon la zone du bassin versant considérée. Ainsi, la crue de juillet 1897 fait référence sur le Bastan, alors que c'est celles de juin 1875, octobre 1937 ou février 1952 concernent plus spécifiquement le gave de Pau, en particulier en aval de Soulom.

L'extension et la localisation de la zone contributive aux débits apparaît à nouveau comme un facteur déterminant.

Ainsi, sur la Bastan (65), la crue de juillet 1897 présente de nombreuses similitudes avec celle de juin 2013, tant par ses origines hydro-climatiques, avec notamment un manteau neigeux abondant et une pluie génératrice intense, que pour ses conséquences géomorphologiques.

La plupart des photographies prises à l'époque montrent que les mêmes zones de respiration ont été utilisées par la rivière pour dissiper son énergie. Cette analyse confirme que la **bande active** est globalement la même et peut donc être connue (cartographiée). Elle indique aussi que, au fil des années, celle-ci s'était refermée (alluvionnement, boisement, aménagement, etc.), faisant oublier son appartenance à l'espace rivière et sa fonction d'**espace tampon** pour de tels niveaux de crue.



Bande active du Bastan, en aval de Barèges, après la crue de juillet 1897 – source Internet



4 – L'évènement du point de vue de la dynamique fluviale et torrentielle

Du point de vue de la dynamique fluviale et torrentielle, cette crue permet de mettre en évidence des aspects importants concernant notamment :

- Les espaces touchés par la mobilité latérale des cours d'eau ;
- Les processus morphodynamiques impliqués ;
- Le transport solide par charriage et les principales discontinuités.

Certaines de ces thématiques sont plus largement illustrées dans les cahiers géographiques qui accompagnent ce rapport. Cependant, les principaux enseignements issus de cette analyse sont présentés ci-après.

4.1 – Bande active et espaces de mobilité fonctionnel

4.1.1 – La notion de bande active

Dans le fond des **vallées alluviales** mais en-dehors du **lit majeur**, principalement concerné par les débordements et la submersion des terrains riverains, les débits de la crue de juin 2013 ont occupé des espaces étendus, généralement plus larges que le lit mineur connu antérieurement.

Cet espace, où se sont produit la plupart des phénomènes d'érosion latérale, de divagation des chenaux d'écoulement et de charriage de fond, constitue la **bande active** ou l'**espace de mobilité fonctionnel** relatif à cet évènement.

D'une manière générale, notamment pour les cours d'eau à chenaux multiples, la bande active désigne l'emprise comprenant l'ensemble des chenaux en eau et des bancs de galets non végétalisés ou régulièrement remaniés. Cette notion peut alors être substituée à celle de **lit mineur**.

Le Bastan en aval du pont d'Esterre (65), avant (à gauche) et après la crue – Source GéoDiag



4.1.2 – La notion d'espace de mobilité

La mobilité latérale des cours d'eau s'exprime essentiellement selon 2 processus :

- La **migration progressive** des méandres, au fil des crues morphogènes successives ;
- La **divagation** subite du chenal d'écoulement principal, lors d'une seule crue.

L'enveloppe cartographique qui contient tous les tracés en plan du lit mineur ou de la bande active, sur un pas de temps donné, délimite l'espace de mobilité d'une portion du cours d'eau. Délimitée à partir des données cartographiques ou photographiques depuis le XIX^{ème} siècle à nos jours, cette emprise correspond à **l'espace de mobilité historique**.

Délimitée à partir des données photographiques et satellitaires récentes (1948 à nos jours), ou des observations de terrain relatives à une crue morphogène comme celle de juin 2013, elle désigne **l'espace de mobilité fonctionnel** (ou contemporain).

Le Bastan à Betpouey (65), avant (à gauche) et après la crue – Source GéoDiag



4.1.3 – Délimitation de l'espace de mobilité fonctionnel de la crue de juin 2013

Sur les portions de cours d'eau jugées les plus pertinentes, du fait de leur forte mobilité latérale et des enjeux riverains touchés, mais aussi les mieux documentées pour effectuer ce type d'analyse, l'espace de mobilité fonctionnel relatif à la crue de juin 2013 a été cartographié, principalement par photo-interprétation.

Cette délimitation permet de réaliser une comparaison avec l'emprise du lit mineur antérieure à la crue (BD-Ortho – 2010 ou 2012).

Les résultats de cette analyse permettent plusieurs « lectures » ou exploitations :

- Localisation et extension des **zones de respiration** où le cours d'eau dissipe son énergie par érosion latérale des terrains riverains ;
- Définition des zones soumises à **l'aléa mobilité** (destruction des terrains) et estimation de leur **niveau de vulnérabilité**, en fonction des enjeux anthropiques implantés dessus ;
- Localisation, voire quantification, des **stocks alluviaux mobilisés** par la crue (reprise de charge), en provenance du fond de vallée ;
- Localisation et extension des **zones préférentielles de sédimentation** des nappes de charriage transportées par la crue ;
- Evaluation du **degré de fermeture de la bande active**, avant la crue, du fait des boisements et de l'alluvionnement ;
- Localisation, voire quantification, des **surfaces boisées détruites** par la crue et ayant contribué à la fourniture de bois flottés et à la formation d'embâcles ;
- Retour d'expérience sur le comportement hydraulique et les impacts morphologiques **des points de contrôle et des points durs**, nouveaux ou anciens, présents au sein de la bande active.

Toutes ces informations sont utiles pour améliorer la prévention vis-à-vis des prochaines crues et affiner les capacités de prévision de leurs impacts géomorphologiques. Certains de

ces points sont illustrés à la suite ou abordés dans les cahiers géographiques associés à ce rapport.

4.2 - Localisation et extension des zones de mobilité

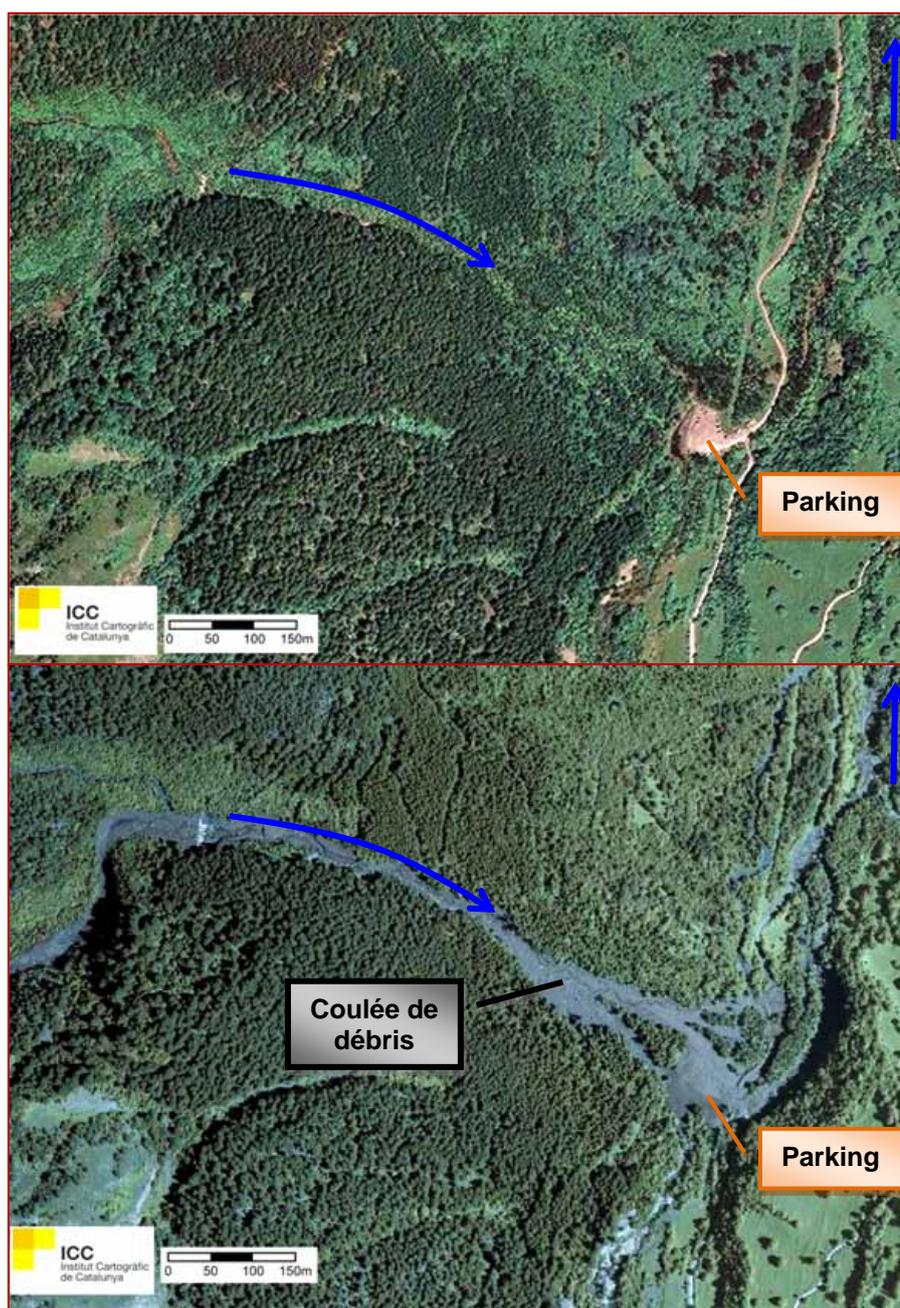
4.2.1 – Bassin versant de la Garonne

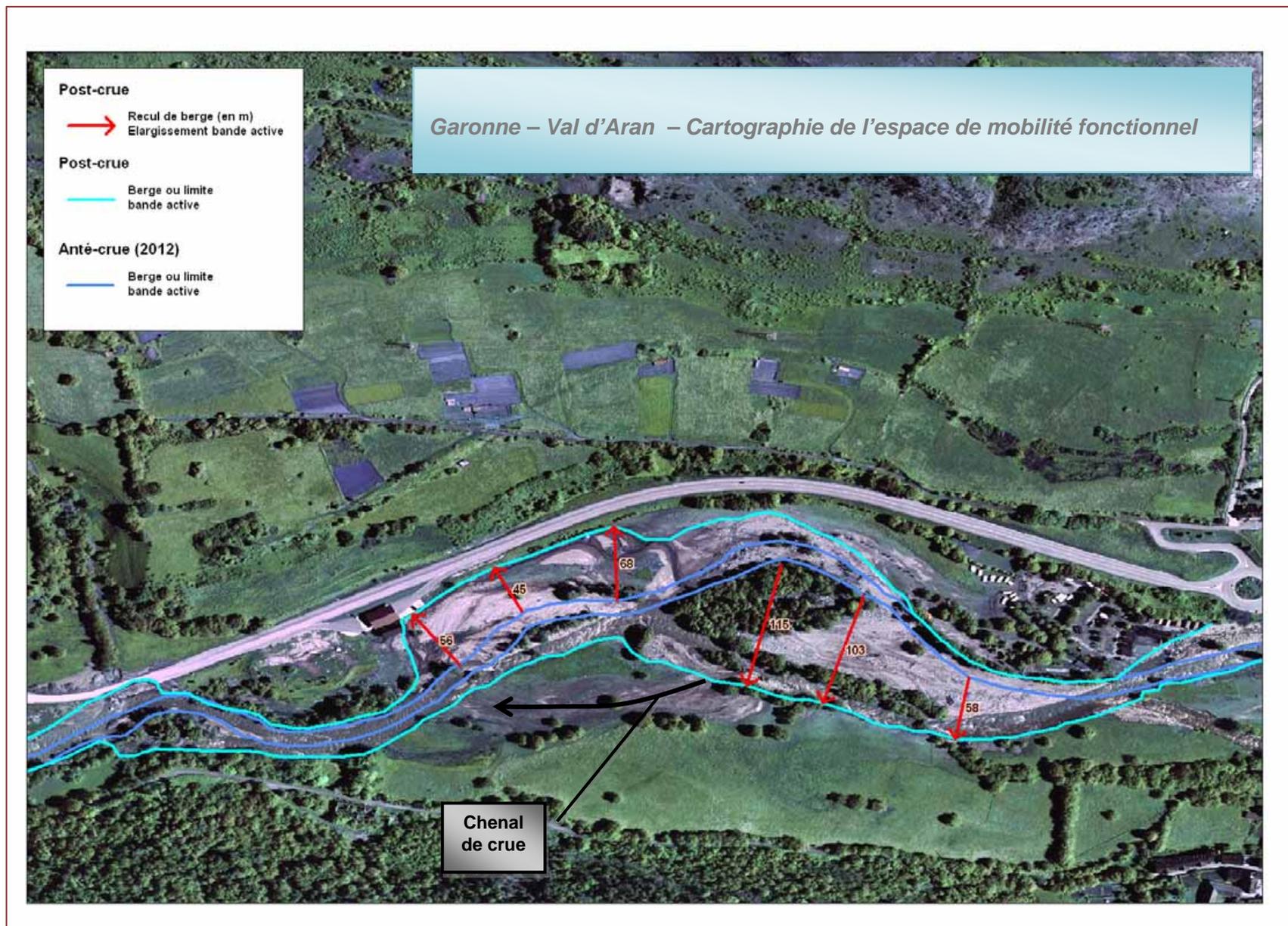
Concernant la **Garonne amont** (voir cahiers géographiques), les principales zones soumises à une forte mobilité latérale, parfois à la divagation du lit mineur, se situent en val d'Aran (Espagne).

Compte tenu des contextes géologique et orographique, le caractère torrentiel y a été plus marqué qu'en aval de la frontière franco-espagnole. Cela se manifeste notamment par :

- Des coulées de débris ou des cônes de déjection très actifs, sur certains affluents ;
- L'élargissement de la bande active de la Garonne, sur certaines portions.

Coulée de débris du torrent de Valarties. Situation en 2012 (en haut) et après la crue de juin 2013 (source ICC)





La cartographie de la bande active de la Garonne montre que les principales zones d'élargissement se concentrent entre Salardu et Vielha, plus particulièrement en aval d'Artiès. Sur cette portion, l'évolution dépasse régulièrement 50 m, plus ponctuellement 100 m.

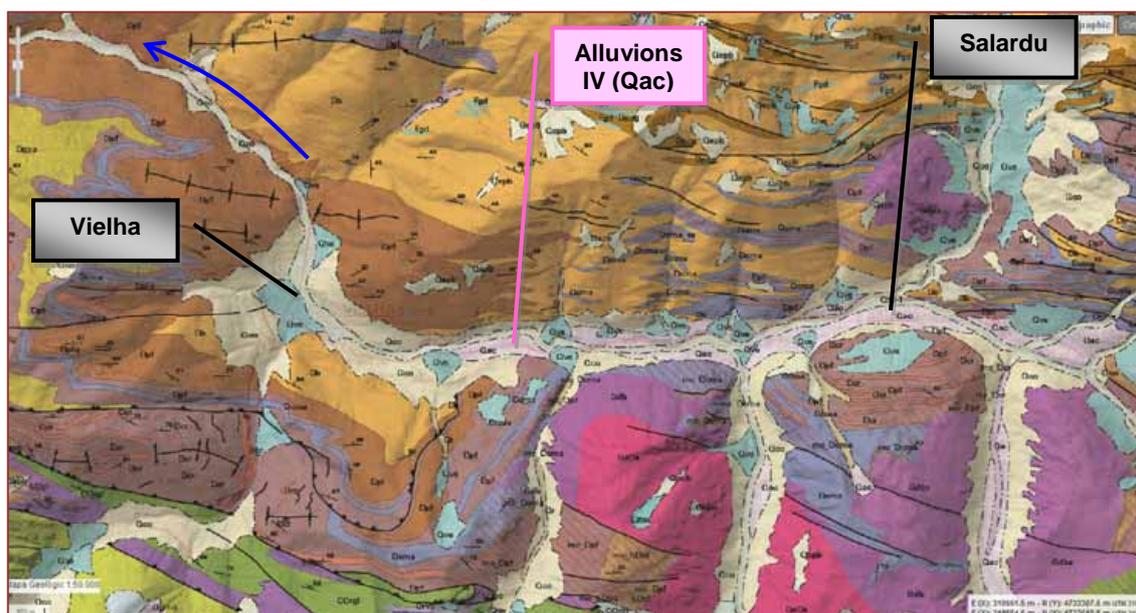
En aval de Vielha, l'élargissement significatif (> 20 m) de la bande active est moins fréquent ou étendu en linéaire. Sa valeur maximale demeure généralement inférieure à 50 m.

*Val d'Aran –
élargissement de la
bande active par
érosion latérale d'une
route – Source SMEAG*



Cette évolution spatiale est conforme à la géologie du fond de vallée, les formations alluviales quaternaires (Qac) étant plus étendues dans les secteurs de plus grande mobilité latérale. Elle peut également être mise en relation avec l'organisation du réseau hydrographique, notamment l'éloignement croissant avec la confluence entre l'Arriu d'Aiguamog et l'Arriu de Ruda, située en amont de Salardu.

Extrait de la carte géologique de Catalogne (source ICC)

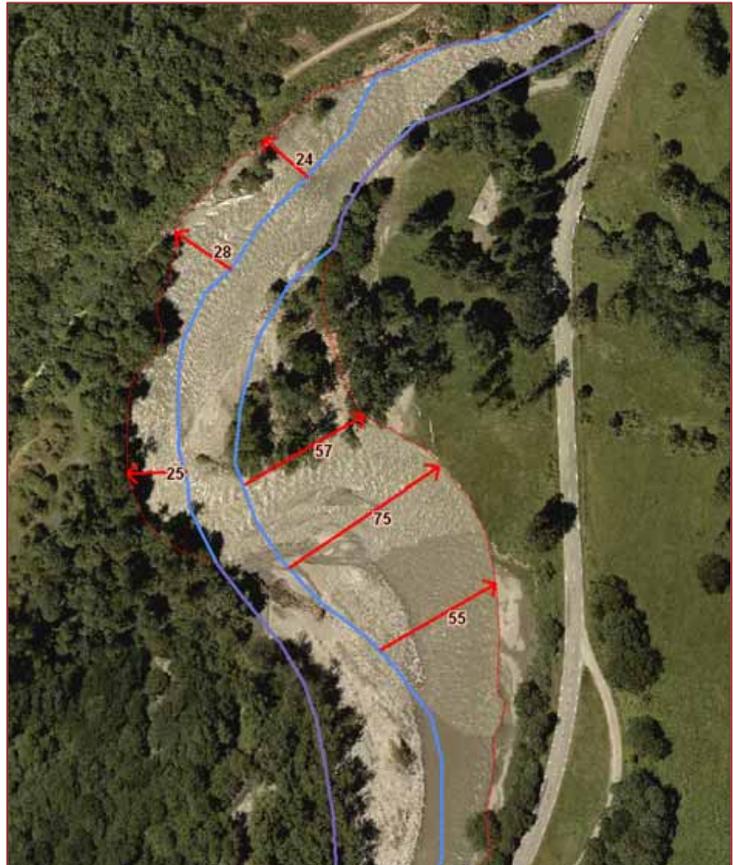


Cet exemple confirme l'influence du contexte géologique et du relief sur la localisation et l'extension des espaces tampons, en dehors des aménagements anthropiques mis en place pour contraindre et « chenaliser » le cours d'eau.

En aval du plan d'Arem, les élargissements de la bande active sont peu fréquents et généralement inférieurs à 50 m. Ils se concentrent notamment en amont et en aval de Fos, ainsi qu'au droit d'Arlos, où certains méandres sont plus marqués.

Sur cette portion, lorsque les berges sont basses, les débordements ont pu être importants et étendus, jouant un rôle significatif d'écrêtement de la crue. A contrario, certains méandres plus accentués ou des points durs rocheux ont pu localement favoriser l'érosion latérale.

Recul (en m) des berges en amont de Fos (source EDF)



Les berges basses ont favorisé les débordements et limité l'érosion latérale (secteur d'Arlos) – Source GéoDiag



☞ Pour la **Garonne médiane** (entre confluence avec la Pique puis avec la Neste), les zones soumises à une mobilité latérale active sont peu fréquentes et étendues. Les reculs de berge y sont généralement inférieurs à 20 m.

Les configurations les plus fréquentes sont soit en extrados de méandre, soit en aval d'un ouvrage transversal, comme au pont de Fronsac.

Erosion latérale en aval du pont de Fronsac (recul ~20 m) – Source GéoDiag



☞ Sur la **Garonne aval** (après confluence Neste), les zones à mobilité latérale active sont plus fréquentes entre Pointis-de-Rivière et Lestelle-de-St-Martory. L'élargissement de la bande active y est généralement compris entre 30 et 50 m, sauf en amont de la gravière de Beauchalot, où il atteint 80 m.

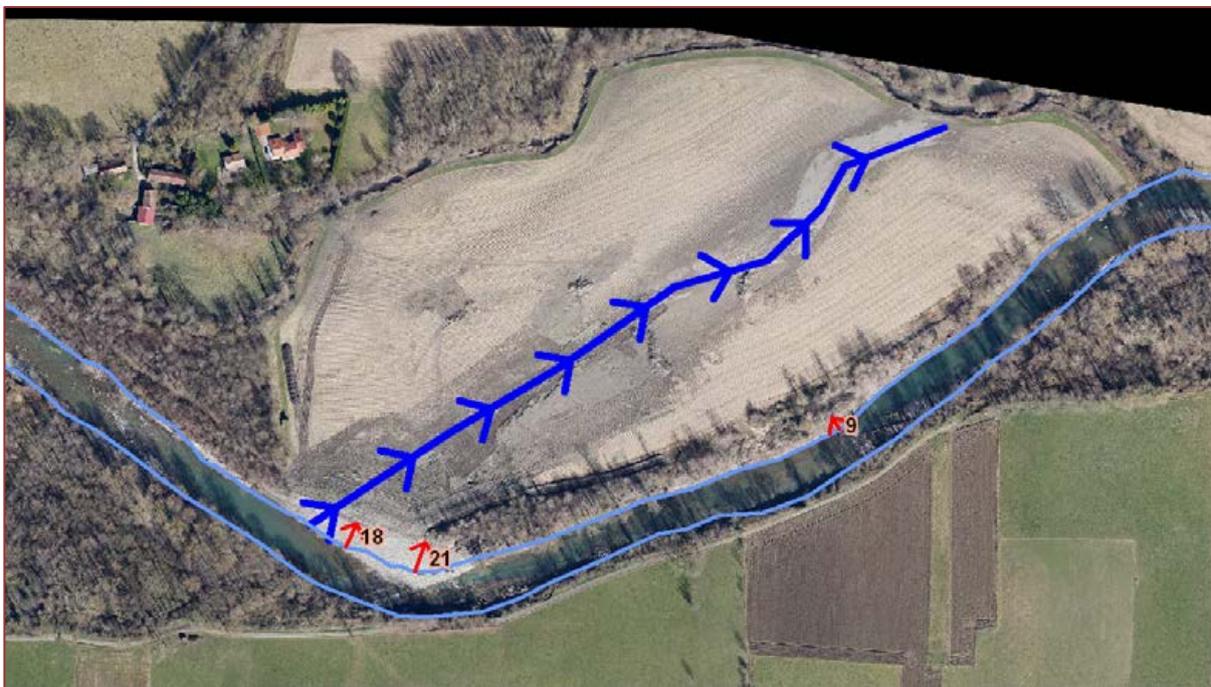
La plupart du temps, il s'agit de trains de méandres dont la sinuosité montre une tendance nette à l'accroissement. Cependant, le recul de berge s'effectue fréquemment en intrados de méandre, parfois avec une amorce franche de rescindement.

Ce type d'évolution morphologie est typique des portions de cours d'eau en cours de réajustement après une période de fortes modifications, ici consécutives aux extractions de granulats en lit mineur.

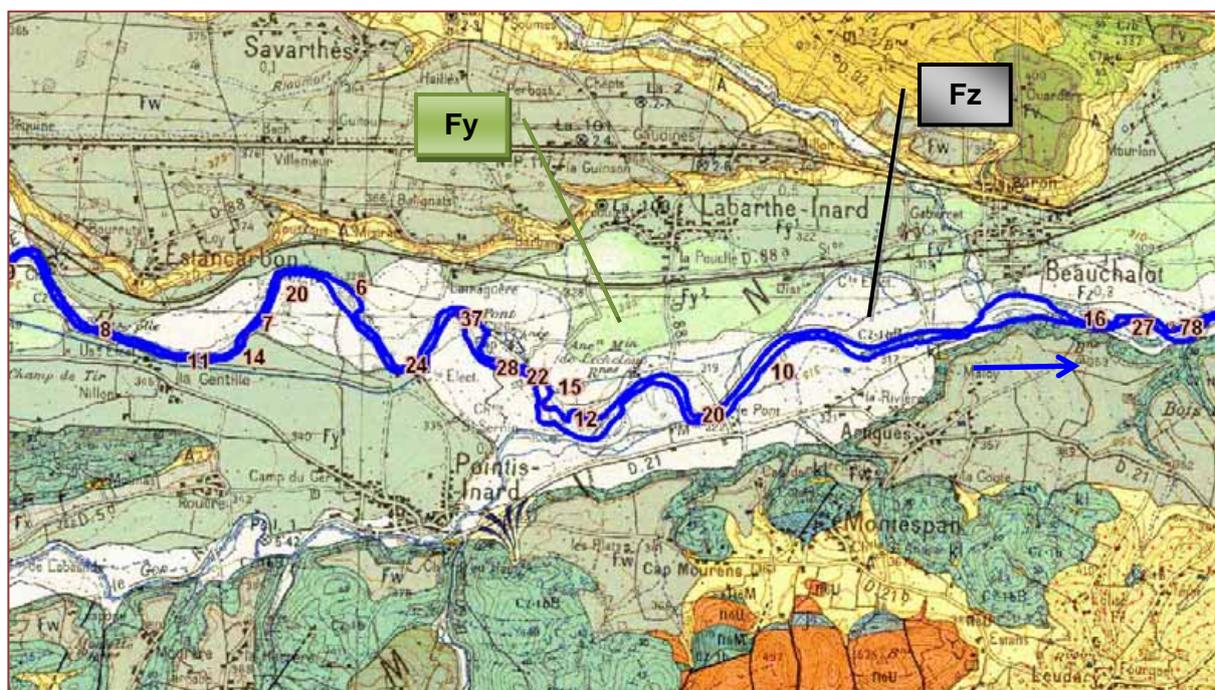
Deux familles de facteurs exercent un contrôle sur l'évolution de la forme des méandres : la géologie et les contraintes anthropiques.

La géologie détermine la présence de **verrous**, comme celui du pont de Valentine, ou l'existence de **terrasses alluviales** plus ou moins anciennes (Fy et Fx), insubmersibles et indurées. C'est ainsi que les évolutions latérales les plus prononcées se situent bien sur des portions où les alluvions récentes (Fz) sont les plus étendues.

La Garonne à Estancarbon - Amorce d'un rescindement de méandre, en intrados – Source GéoDiag / Avion jaune



Principaux reculs de berge (en m) et géologie de la plaine alluviale (source BRGM)



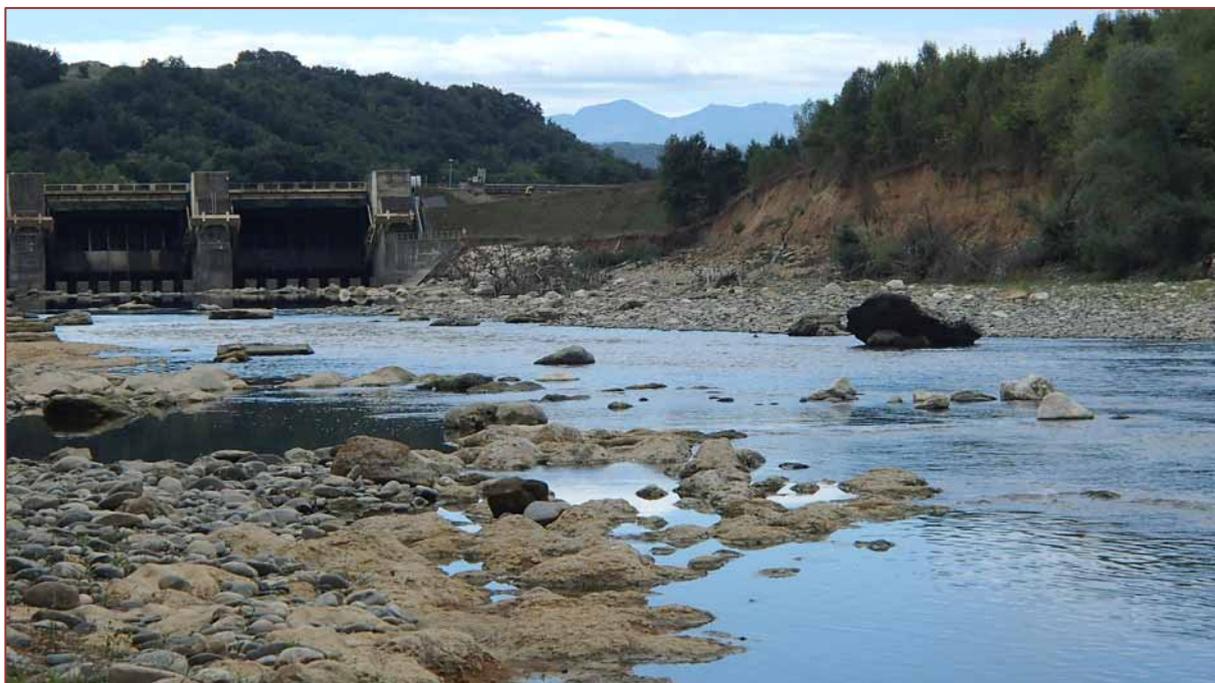
Les **ouvrages transversaux** contrôlent la ligne d'eau. En amont, ils en atténuent la pente mais peuvent ainsi favoriser les débordements, donc des recoupements de méandre. Vers l'aval, ils accélèrent les écoulements et accroissent leurs capacités érosives.

*Seuil de Pointis-Inard –
amorce de
rescindement du
méandre et érosion
latérale (en m) –
Source Pléiades, 2013*



C'est notamment le cas sur la Garonne dite hydroélectrique, où les principales zones d'érosion latérale se situent en aval des barrages de Boussens et de la Brioulette. Elles y sont associées à un décapage marqué du substratum molassique et de l'ancien plancher alluvial, lorsqu'il était encore présent latéralement, sous la forme de terrasses.

*Barrage de la Brioulette – Erosion latérale (à droite) et décapage (premier plan) –
Source GéoDiag*



Au contraire, les **protections de berges**, selon leur résistance à l'érosion, limitent l'évolution morphologique de certains méandres, ce qui peut conduire à des reports de contraintes hydrodynamiques vers d'autres portions de berge.

☞ Concernant la **Pique**, les portions où la mobilité latérale a été la plus active sont principalement circonscrites à quelques bassins intramontagnards situés en altitude :

- La Pique, sur la route de l'Hospice de France et sur le pla de Ravi ;
- Le Lis, entre les cascades d'enfer et l'Ourson ;
- La Neste d'Oô, entre la Cascade de la Madelaine et le village d'Oô.

La plupart du temps, l'élargissement maximal de la bande active est inférieur à 50 m, sauf ponctuellement où il peut dépasser 60 m, comme au niveau de l'auberge du Lis (60 m) ou en amont des granges d'Astau (75 m).

A nouveau la géologie (ombilic alluvial en amont d'un verrou rocheux) et l'organisation du réseau hydrographique (confluence entre torrents à très fortes pentes) semblent être des facteurs déterminants pour expliquer la localisation et l'extension de ces zones où la mobilité latérale s'avère plus active.

En aval de Bagnères-de-Luchon, les érosions de berge sont moins fréquentes et marquées, bien que le fond de vallée soit alluvial. Le caractère montagnard de la crue et l'effet tampon joué par les différentes zones de débordement ou de respiration situées en amont peuvent expliquer que la mobilité latérale soit moins active vers l'aval.

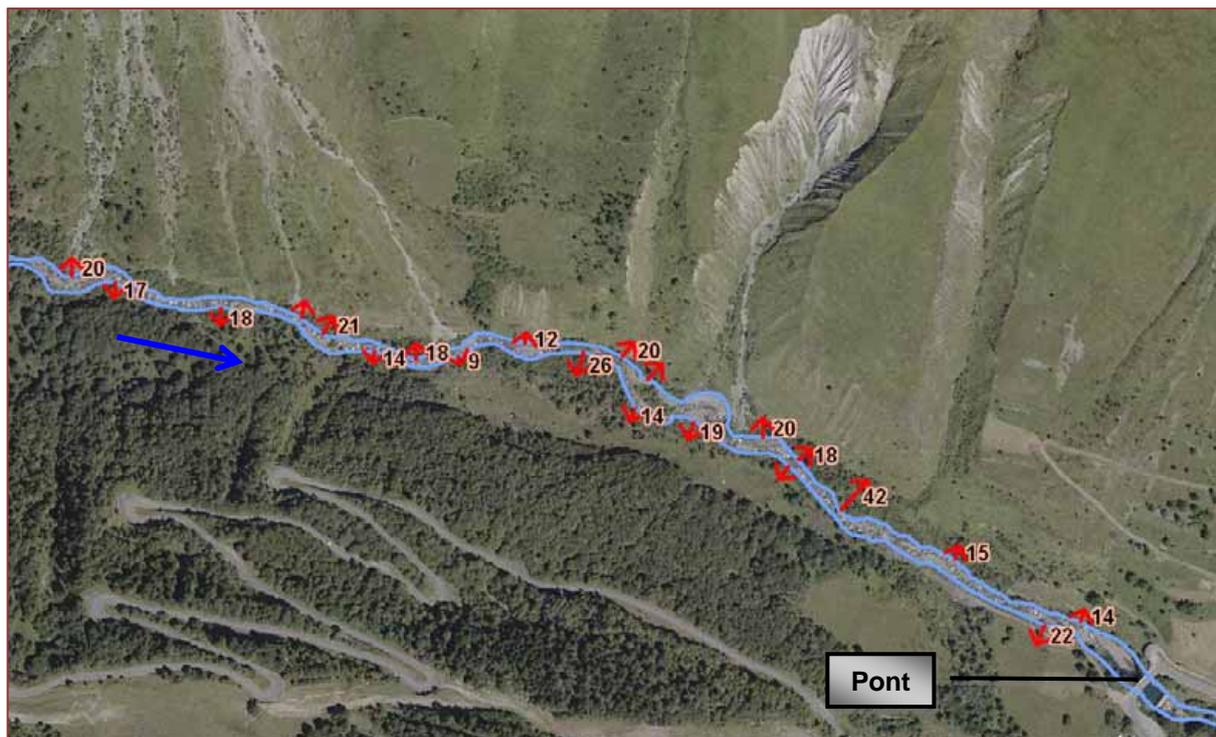
La Neste d'Oô aux granges d'Astau, en 2010 (à gauche, source IGN) et en 2013 (source EDF)



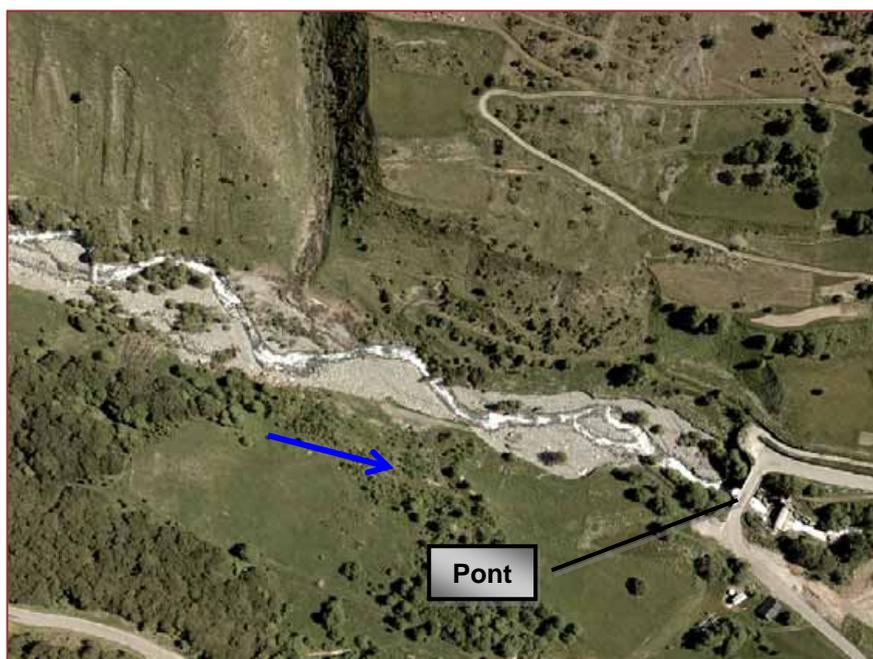
4.2.2 – Bassin versant de la Neste

☞ Sur la **Neste d'Aure amont**, la principale zone de mobilité active concerne la **Neste du Badet**, en amont du pont du Plan (voir cahiers géographiques). Cette portion, située à plus de 1400 m d'altitude, en amont d'un verrou rocheux, réceptionne les débits liquides et solides de nombreux torrents et ravines, dont l'activité a été variable, lors de la crue de juin 2013, comme en témoigne l'état post-crise des divers cônes de déjection.

Reculs de berge (en m), en amont du pont du Plan (source BD-Ortho 2010, IGN)

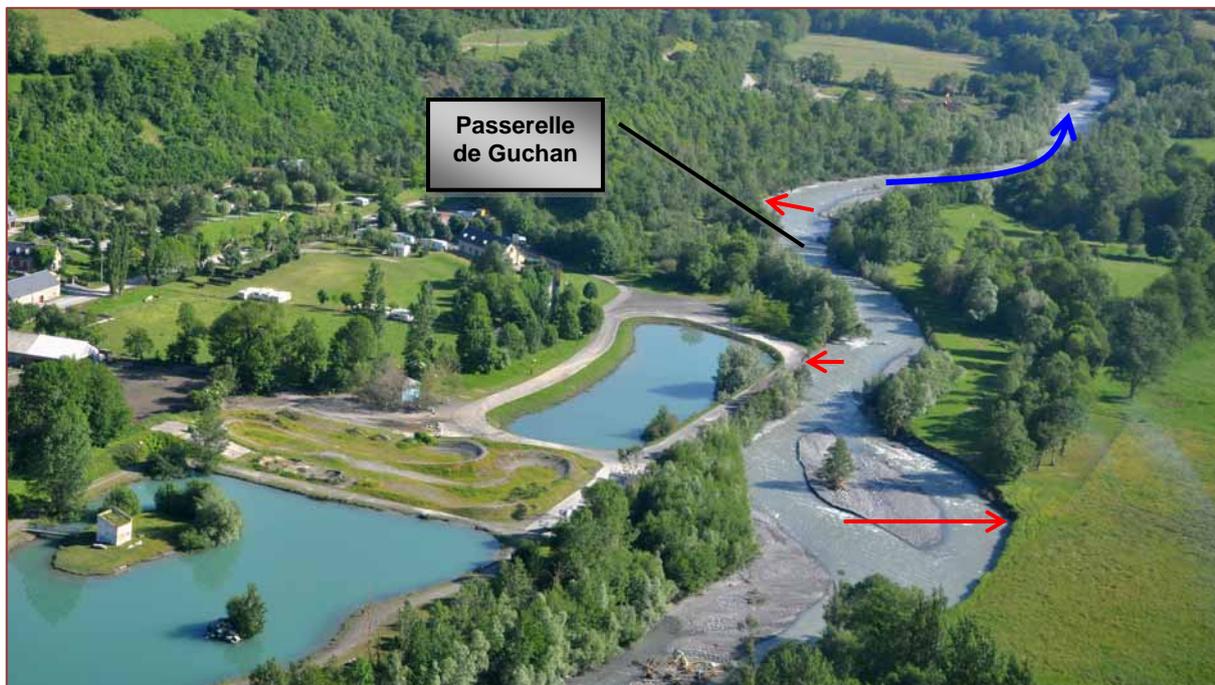


Bande active de la Neste du Badet, en amont du pont du Plan (source EDF, 2013)



En aval de St-Lary, la principale zone de mobilité active se concentre au niveau de la base de loisirs d'Agos, de part et d'autre de la passerelle de Guchan. La sinuosité s'est nettement accentuée sur deux méandres successifs, emportant une portion du sentier de randonnée, et le plan d'eau aval a failli être capturé.

Evolution de la sinuosité au niveau de la base de loisirs d'Agos – source DREAL M-P



Une autre zone a combiné mobilité latérale active et débordements étendus : il s'agit du secteur du Bouala, à Ancizan. Elle correspond à l'entrée dans le verrou géologique de Cadéac, sur une portion où la Neste vient buter sur le versant rocheux, en rive droite.

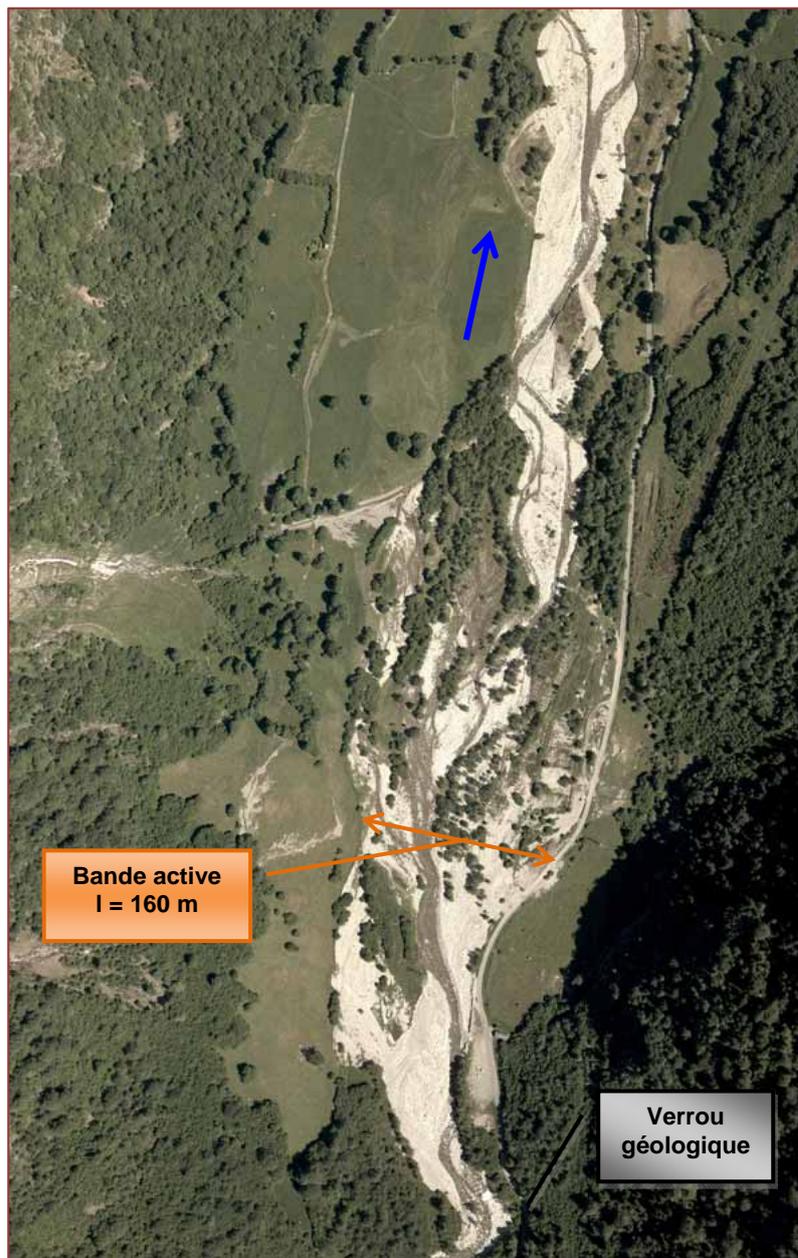
Ancizan - Mobilité latérale, débordement et charriage en rive gauche de la Neste – source DREAL M-P



☞ Sur la **Neste du Louron**, la seule portion où la mobilité latérale est importante est située en aval du pont de Prat, entre le lieu-dit « Escale du Pio » et la Fontaine Bourbon. Sur environ 2 km linéaire, la Neste a divagué sur environ 60 m à 80 m de largeur, localement plus.

Le pla d'Artiguelongue constitue un plateau intramontagnard de moyenne altitude (1100 à 1150 m), entre la zone montagnarde délimitée par la confluence entre les Nestes de la Pez et de Clabaride, en amont, et le verrou géologique des granges d'Ourcibats, à l'aval. Récepteur de nombreux petits torrents et ravines, il constitue un vaste ombilic d'alluvions fluviales récentes, où la Neste peut divaguer lors des crues morphogènes.

Bande active de la Neste du Louron sur le pla d'Artiguelongue – source EDF



En aval du lac et du verrou géologique de Genos, se développe une portion où la mobilité latérale est plus modérée, avec des reculs de berge généralement compris entre 5 et 20 m, qui indiquent cependant une tendance à l'accroissement de la sinuosité. Cette portion de fond

de vallée, tapissée de moraines et d'alluvions fluviales s'achève au verrou géologique d'Avajan.

☞ Sur la **Neste d'Aure médiane**, entre Arreau et Izaux, les zones de mobilité active sont ponctuelles et correspondent à des reculs de berge généralement inférieurs à 20 m.

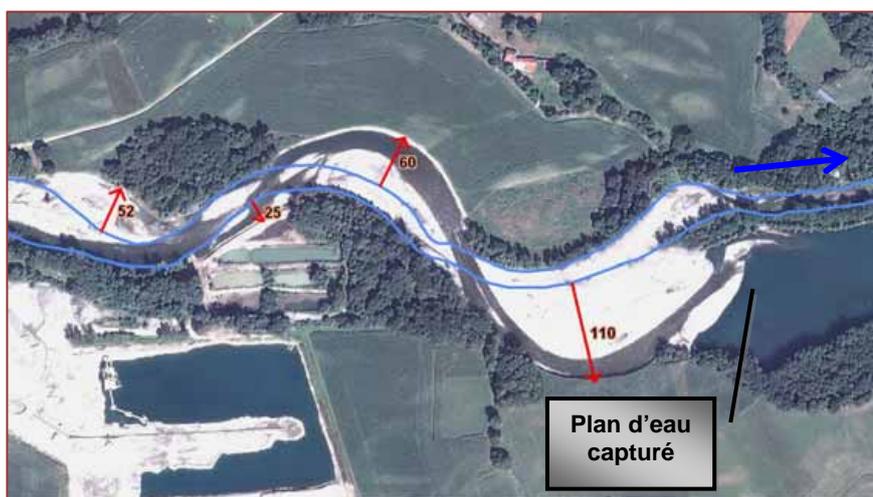
☞ Sur la **Neste d'Aure aval**, plusieurs portions de mobilité active se succèdent. Elles correspondent, pour la plupart, à des trains de méandres dont la sinuosité tend à s'accroître. Les reculs de berge sont fréquemment compris entre 15 m et 40 m et dépassent localement 60 m voire 100 m.

Comme pour la Garonne aval, les évolutions constatées ne concernent pas uniquement l'extrados des méandres. Elles ont pu conduire à une inversion de la sinuosité, à l'amorce du rescindement de certaines courbes ou à la capture de plans d'eau de gravière, comme à Aventignan.

*Neste aval – Escala –
reculs de berge (en m)
et inversion de
sinuosité (en bleu, lit
mineur 2010) -
(GéoDiag/AvionJaune)*



*Neste aval –
Aventignan – reculs de
berge (en m) et capture
de plan d'eau de
gravière – source
Pleiades, 2013*



4.2.3 – Bassin versant du gave de Pau

☞ Sur le bassin du **Bastan** (voir cahiers géographiques)

Les zones de mobilité active sont très présentes sur le Bastan, en aval du parking de Tourneboup et de la confluence avec le ruisseau Dets Coubous (voir carte ci-après).

En amont de Barèges, les reculs de berge sont généralement inférieurs à 50 m.

Entre Barèges et le pont de Viey, leur extension est plus importante mais les reculs de berge restent inférieurs à 50 m, sauf en amont des thermes de Barzun et en amont du siphon de Justé et Tuco où ils atteignent respectivement 75 m et 65 m.

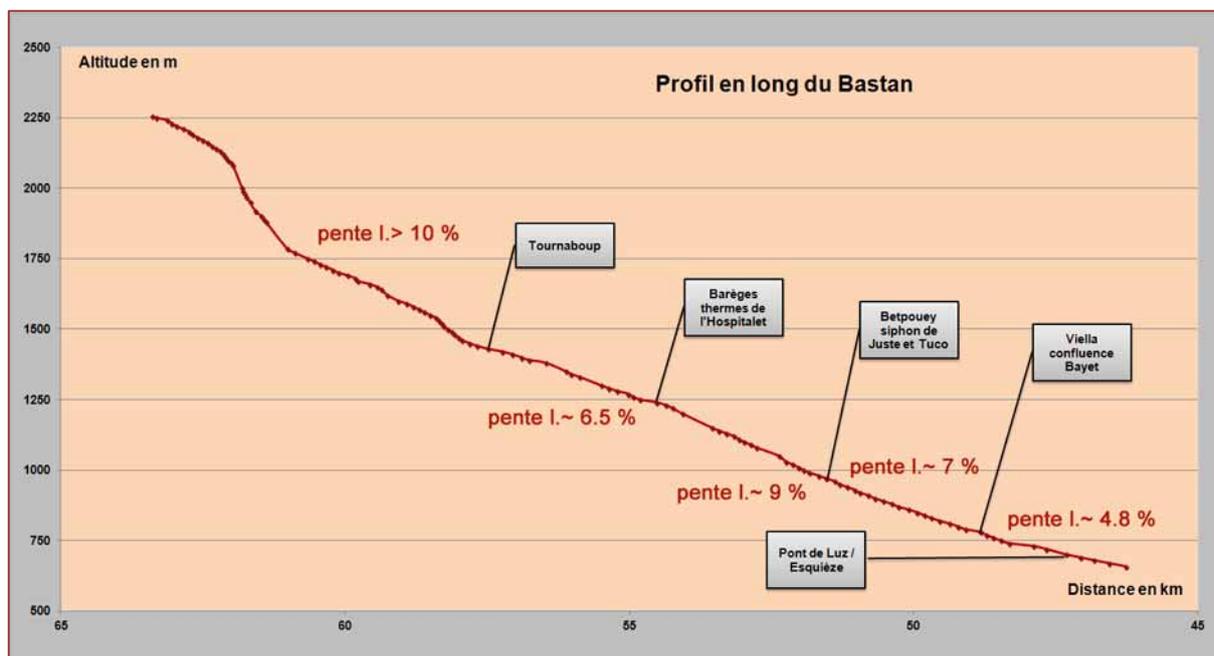
En aval du pont de Viey, les zones de mobilité latérale sont plus développées, notamment à Viella au niveau des abattoirs (jusqu'à 130 m d'élargissement), à Esterre, en aval du pont (jusqu'à 140 m d'élargissement) puis sur le cône de déjection, avec plus de 200 m d'élargissement sur la plaine de Barès.

Seul fait exception, l'entonnement du Bastan, dans la traversée urbaine de Luz / Esquièze, sur environ 200 m linéaire.

Cette évolution longitudinale est en relation avec l'évolution de la géologie, qui détermine la présence d'affleurements et de verrous rocheux, d'une part, et celle d'un fond de vallée alluvial, d'autre part, ainsi qu'avec celle de la pente longitudinale.

Celle-ci s'atténue progressivement, avec des ruptures de pente plus marquées au niveau de la plaine d'Esterre puis de la plaine de Barès, de part et d'autre du verrou de Luz.

Evolution de la pente longitudinale du Bastan (source IGN)



Evolution de la bande active du Bastan, en aval du pont d'Esterre

Le trait bleu foncé = bande active/lit mineur, en 2010 (source BD-Ortho – IGN)

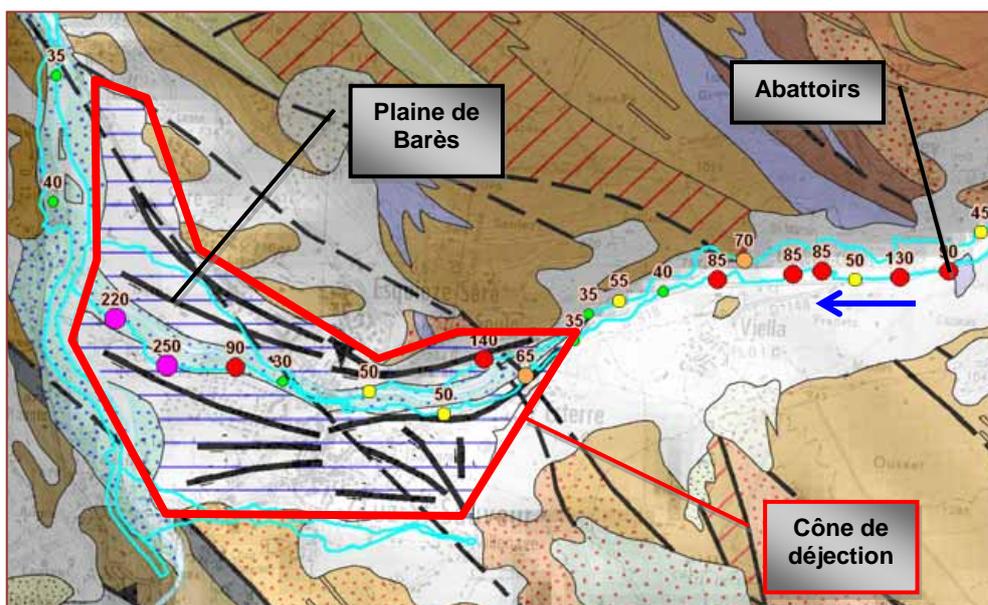
Le trait bleu clair = bande active/lit mineur, en juillet 2013 (source DDT65 – IGN)

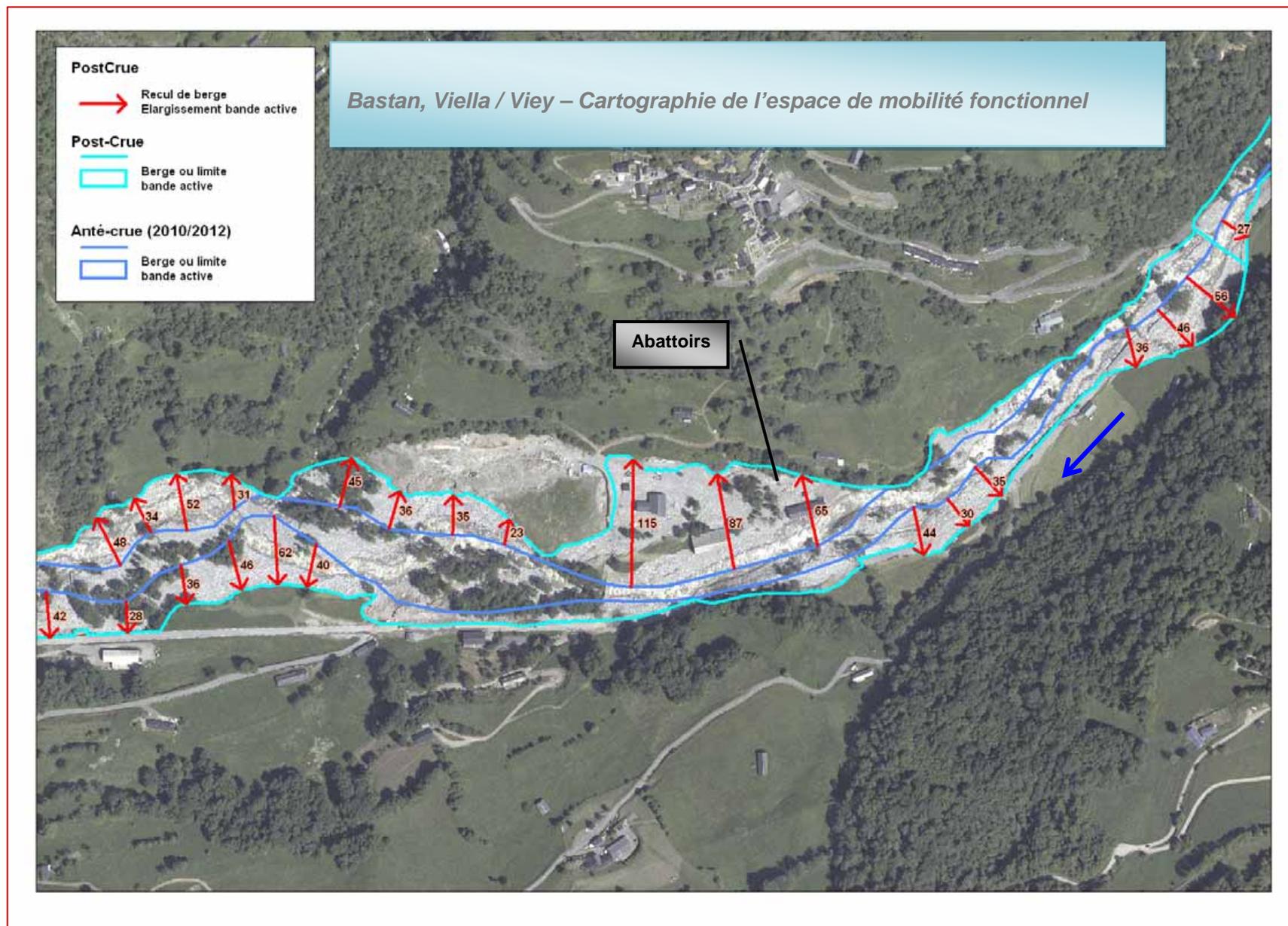
Les **flèches rouges** indiquent les reculs de berge et l'espace de mobilité fonctionnel utilisé pendant la crue (en m)

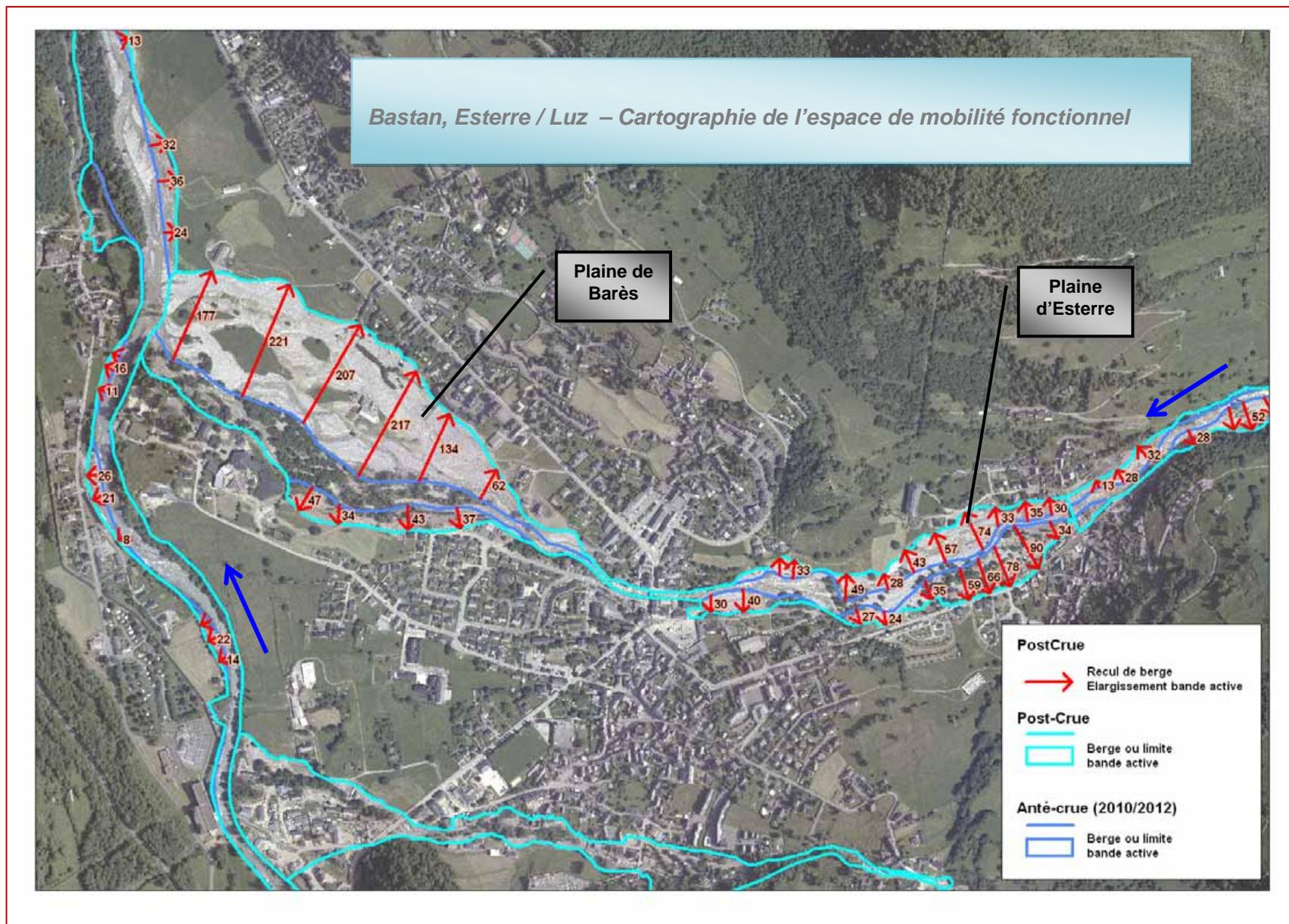
Globalement, les évolutions constatées sont conformes à la géologie et à la connaissance de la bande active de la crue de 1897. Seule la divagation du Bastan sur la plaine de Barès est « nouvelle », même si elle concerne une partie du cône de déjection.



Géologie et élargissement de la bande active (source BRGM)







☞ Sur l'**Yse**, la forte urbanisation du cône de déjection rend imprécise la délimitation de la bande active relative à la crue. Cependant, il apparaît que le cône de déjection a largement été sollicité, selon une extension voisine de la cartographie du PPR inondation de Luz-St-Sauveur.

Les zones de plus forte mobilité latérale apparaissent en amont des gorges, à environ 1200 m d'altitude, ainsi qu'en aval de la prise d'eau EDF, à moins de 700 m d'altitude.

En amont des gorges, elles sont associées à des instabilités des pieds de versants.

Yse – Secteur en amont du cône de déjection (1300 m) – érosions de berge et instabilités de versant – source ETRM



Sur le cône de déjection, elles sont liées au comportement hydraulique des ouvrages transversaux (pont, seuil), qui ont favorisé le dépôt des nappes de charriage et les divagations, accentuant les effets dus aux changements de pente longitudinale.

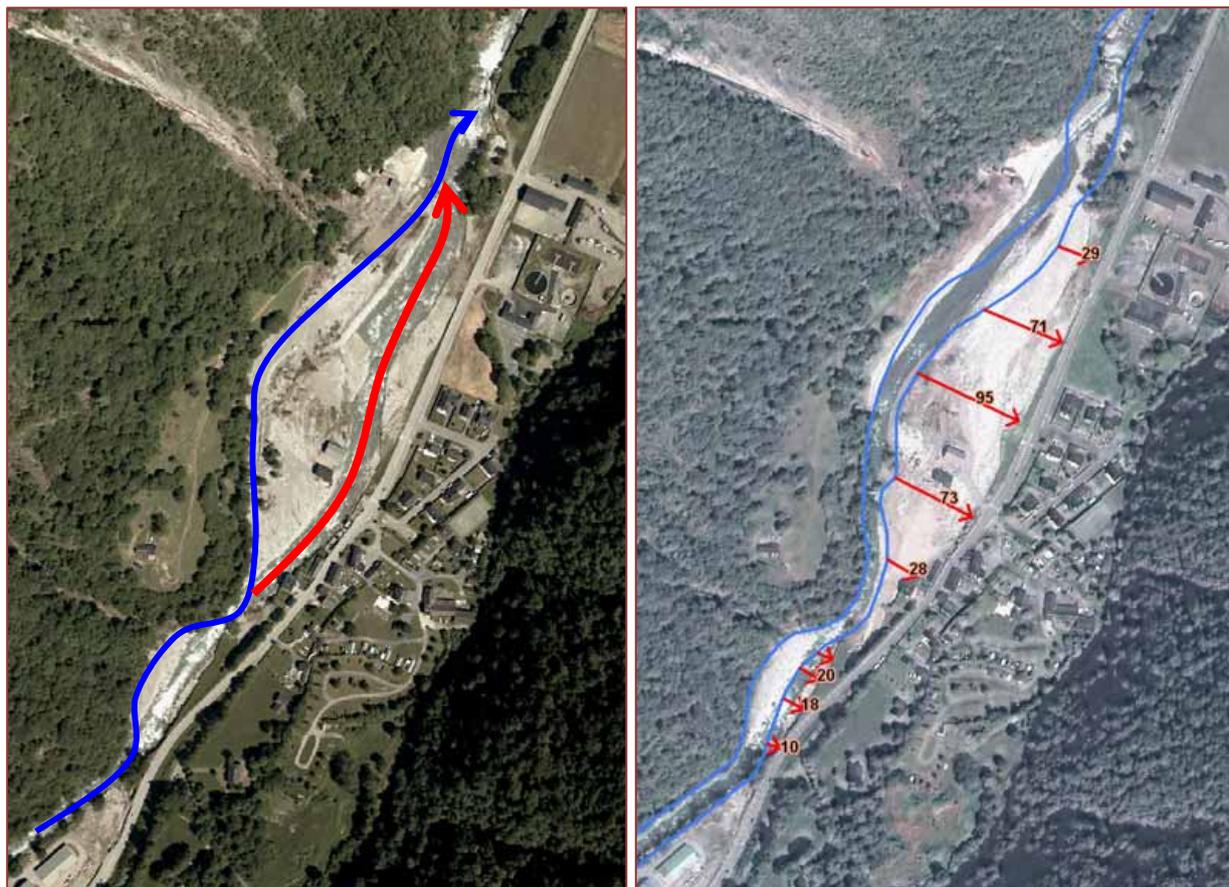
Yse – Secteur en médian du cône de déjection (700 m) – érosions de berge, sédimentation et divagations, en amont du pont de la RD 921 – source ETRM



☞ Sur le bassin du **gave de Cauterets**, 2 zones présentent une mobilité latérale plus marquée.

La première est située en aval de l'agglomération de Cauterets, au niveau du quartier Concé. L'élargissement de la bande active est proche d'une centaine de mètres. Le gave a divagué, ouvrant un nouveau chenal et abandonnant une partie de son tracé d'avant la crue.

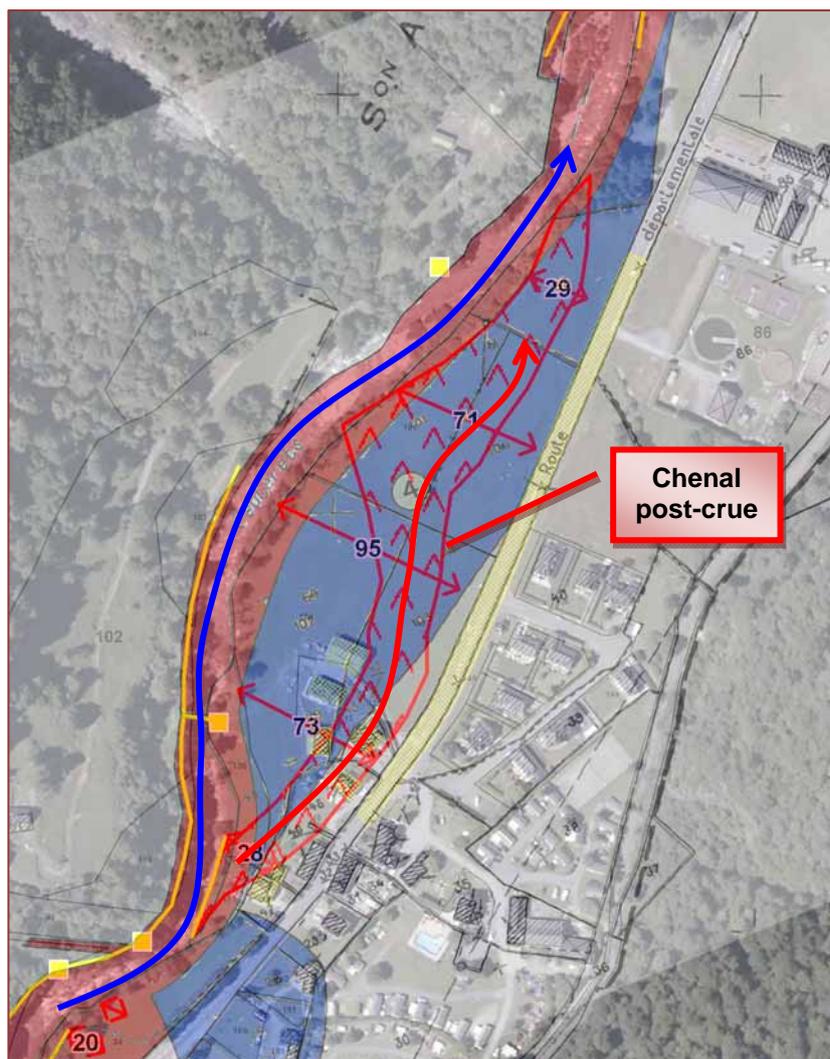
Cauterets – quartier Concé – tracé du gave avant (en bleu) et après (en rouge) la crue – photo de droite après travaux d'urgence (source Pleïades)



Dans ce cas de figure, cette évolution morphologique est majoritairement inscrite dans la zone d'aléa inondation du PPRi. Cependant, la divagation, avec création d'un nouveau lit apparaît en zone bleue (aléa modéré à faible), alors qu'elle a provoqué la destruction de plusieurs bâtiments, du fait de l'aléa mobilité.

Par ailleurs, la route départementale apparaît comme n'étant pas exposée au risque d'inondation (zone blanche de la carte du risque), alors qu'elle a servi de chenal de crue très actif (fortes vitesses d'écoulement), en juin 2013.

Cauterets – Concé - Carte du risque du PPRi et évolution morphologique du lit du gave



La seconde zone correspond au cône de déjection du gave, au niveau de Soulom, avant sa confluence avec le gave de Pau.

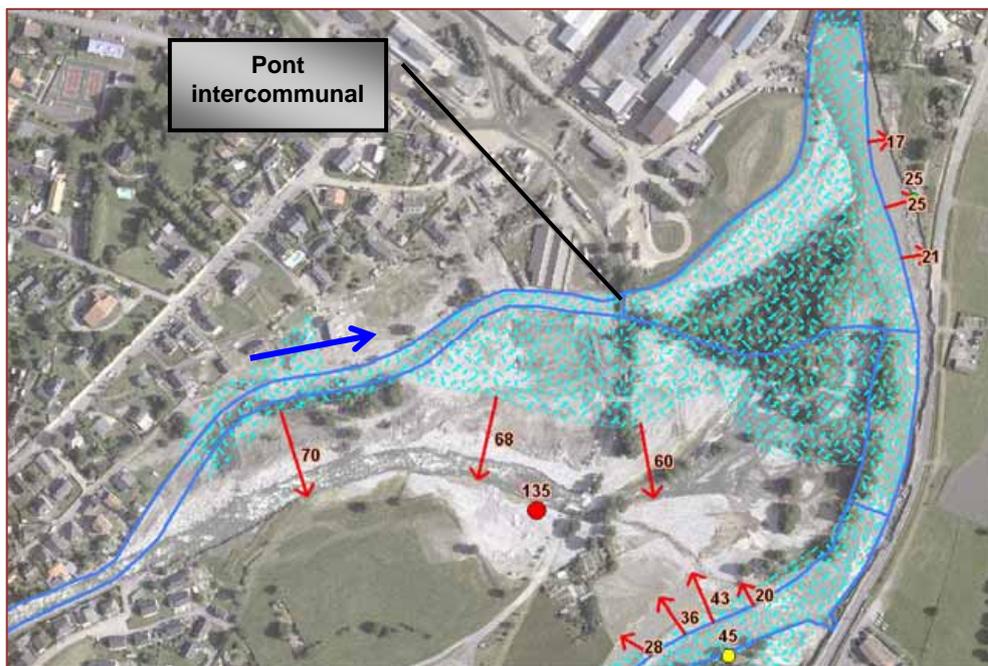
Sur cette portion, la partie Sud du cône a été activée. Cela correspond à un déplacement de plus de 130 m de la bande active, qui s'ajoute au déplacement d'environ 100 m, déjà consécutif à la crue d'octobre 2012, sur la partie aval du cône.

Le chenal d'écoulement principal s'est ainsi déplacé de 160 m vers le Sud, au niveau du pont intercommunal.

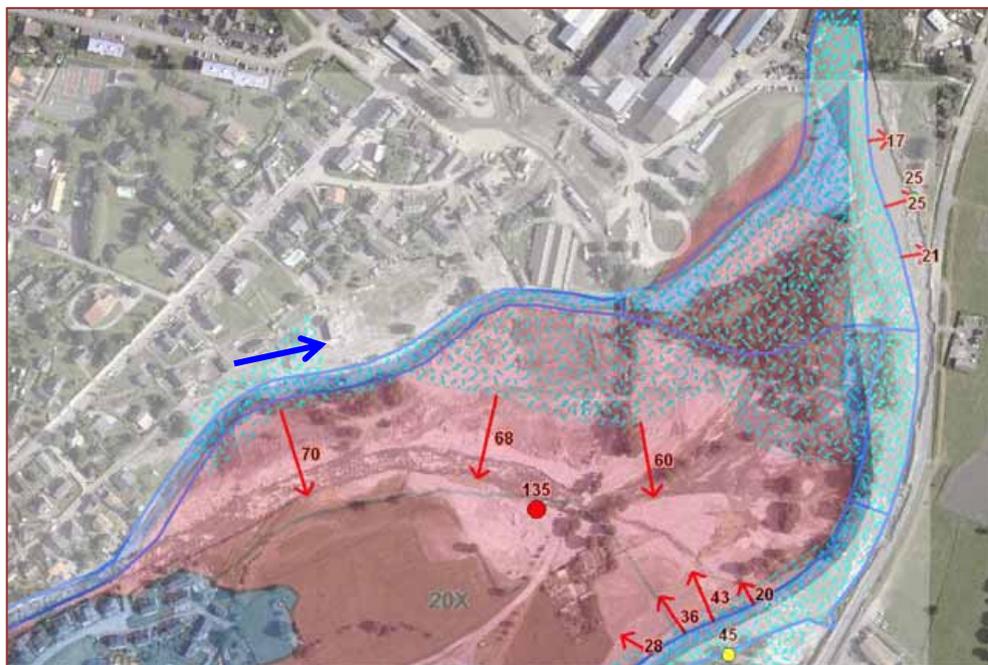
Toute la zone de divagation active est comprise dans la zone rouge du PPRi, correspondant à un aléa inondation fort. Dans ce cas de figure, la cartographie du PPRN paraît conforme aux zones touchées lors de l'évènement de juin 2013.

D'après la carte géologique, la partie du cône située en aval de la route de liaison et du pont intercommunal appartient préférentiellement à la bande active du gave de Pau (alluvions récentes), alors qu'en juin 2013, elle a été sollicitée par les divagations du gave de Cauterets, comme en octobre 2012.

Soulom - Evolution de la bande active du gage de Cauterets en octobre 2012 (paillettes bleues) et juin 2013 (flèches rouges) – source IGN, 2013



Comparaison de la bande active avec la carte du risque du PPRi – source préfecture 65



☞ Sur les **gaves de Gavarnie et de Pau** (voir cahiers géographiques), à l'exception de quelques bassins intramontagnards d'altitude, comme le pla de la Prade, au pied du cirque de Gavarnie, les zones à forte mobilité latérales se situent, l'une dans la plaine de Saligos, en aval de la confluence avec le Bastan, l'autre sur la plaine de Beaucens, en aval de la confluence avec le gavage de Cauterets.

Secteur en tresses du pla de la Prade, à Gavarnie, après la crue de juin 2013 – Source DDT65

Ces deux zones ont déjà été activées par la crue d'octobre 2012, conduisant notamment le gavage à rogner la base de plusieurs cônes de déjection, entre le pont de Pescadère (Esquièze-Sère) et le pont de la Reine (Saligos).

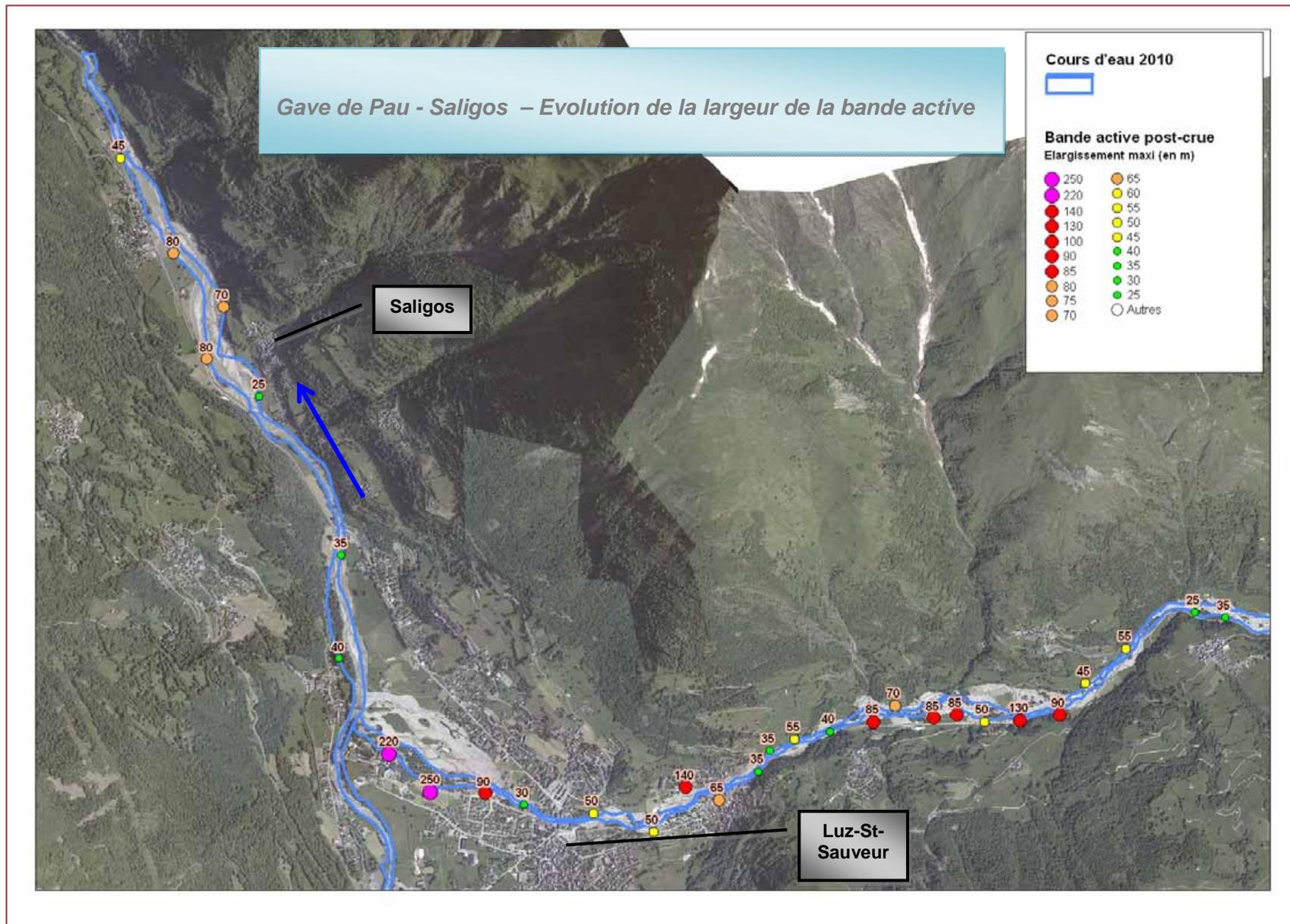
Sur la plaine de Saligos, le cumul des reculs de berge liés aux deux crues conduit à un élargissement de la bande active compris entre 45 m et 80 m. L'essentiel de la morphogénèse est associée à la crue de 2012.



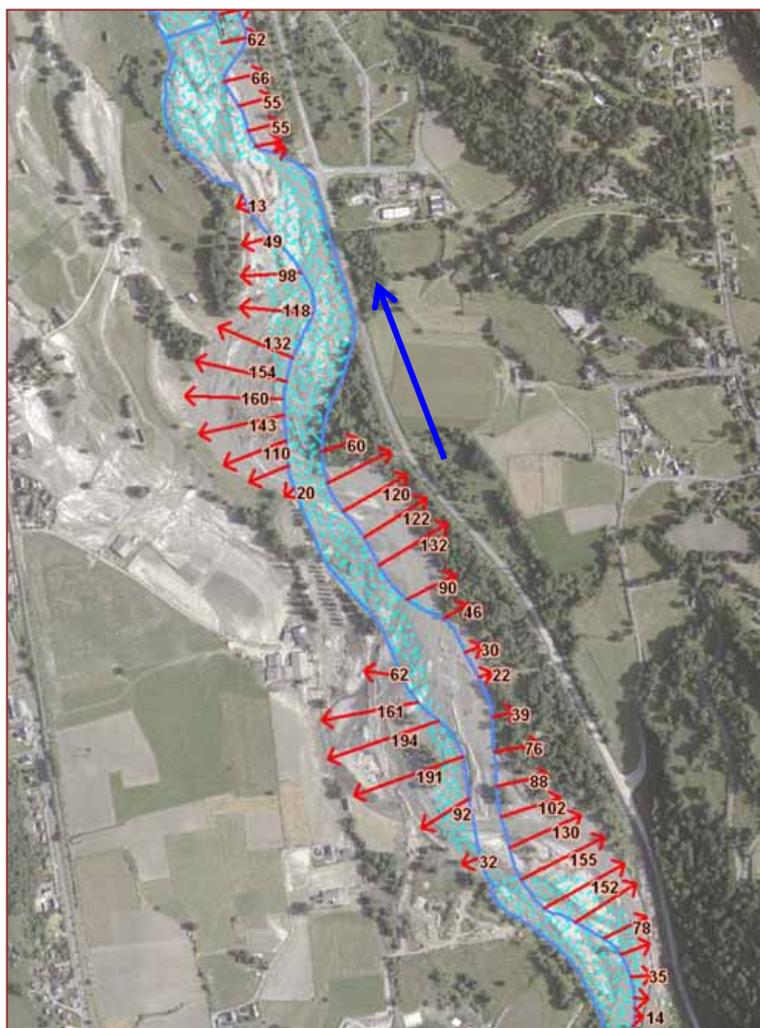
Sur la plaine de Beaucens, la mobilité a été très active en amont du lac des gaves. Le cumul des reculs de berge des deux crues dépasse 150 m en plusieurs endroits. L'essentiel de la morphogénèse est associée à la crue de juin 2013. Il en résulte l'apparition d'une sinuosité marquée de l'enveloppe de la bande active, avant travaux post-cruée, entre la zone industrielle de Pierrefitte, en amont, et le seuil de Beaucens, en aval.

En aval du pont de Tilhos, les zones de mobilité latérale importante sont moins fréquentes et étendues. Les reculs associés à la crue de juin 2013 sont généralement inférieurs à 50 m, sauf sur quelques portions, comme en aval du pont de Rieulhès (150 m) ou en vis-à-vis de la confluence avec l'Ouzom (140 m).

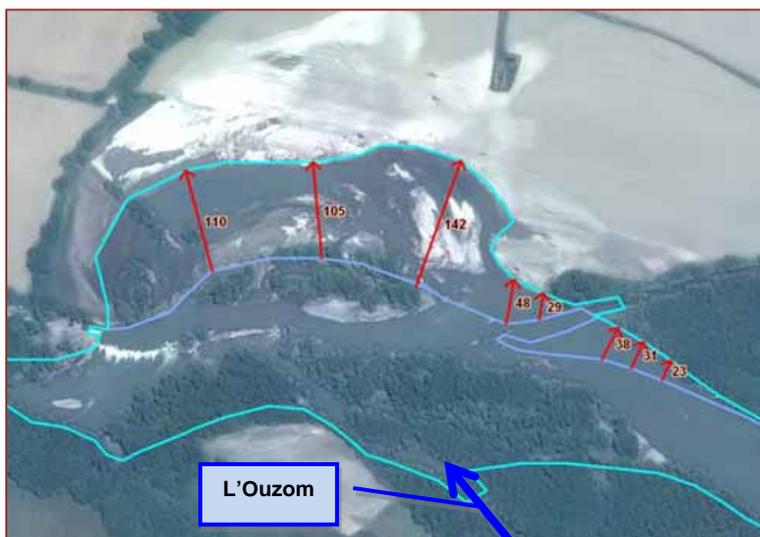
Historiquement, antérieurement à l'industrie d'extraction de granulats au sein de la bande active du gavage de Pau, les zones soumises à une forte mobilité latérale étaient plus étendues, d'une part, en amont de Lourdes, pour les Hautes-Pyrénées, entre Nay et Bizanos, ainsi qu'entre Lescar et Denguin, dans la traversée des Pyrénées-Atlantiques. Des photos anciennes en attestent, notamment celles relatives à la crue de 1937.



Plaine de Beaucens (65) - Reculs de berge cumulés des crues de 2012 et 2013 – lit mineur post-crise d'octobre 2012 = paillettes bleues – Source DDT 65 / IGN, 2013



Reculs de berge face à la confluence gage de Pau – Ouzom (64) – Source Pléiades, 2013



4.3 – Occupation des sols des zones de plus forte mobilité

4.3.1 – Bassins intramontagnards d'altitude

A l'exemple du pla de la Prade sur le gave de Gavarnie, de la Neste du Badet, du pla d'Artiguelongue, sur la Neste du Louron ou du pla des granges d'Astau, sur la Neste d'Oô, ou du Lis, au niveau de l'auberge, les zones à mobilité active des bassins intramontagnards étaient généralement occupées par des pelouses d'estive, en zone agro-pastorale, ou par des boisements, de densité variée.

A l'exception d'ouvrages de franchissement, généralement implantés à la faveur d'un verrou géologique, de pistes ou de routes bordières, elles étaient dépourvues d'enjeu anthropique important.

Les photos anciennes indiquent une activité torrentielle morphogène régulière qui, couplée aux risques d'avalanche, explique le faible niveau de vulnérabilité de ces zones.

Bande active de la Neste du Badet, en zone de pelouse et de bois (source EDF, 2013)



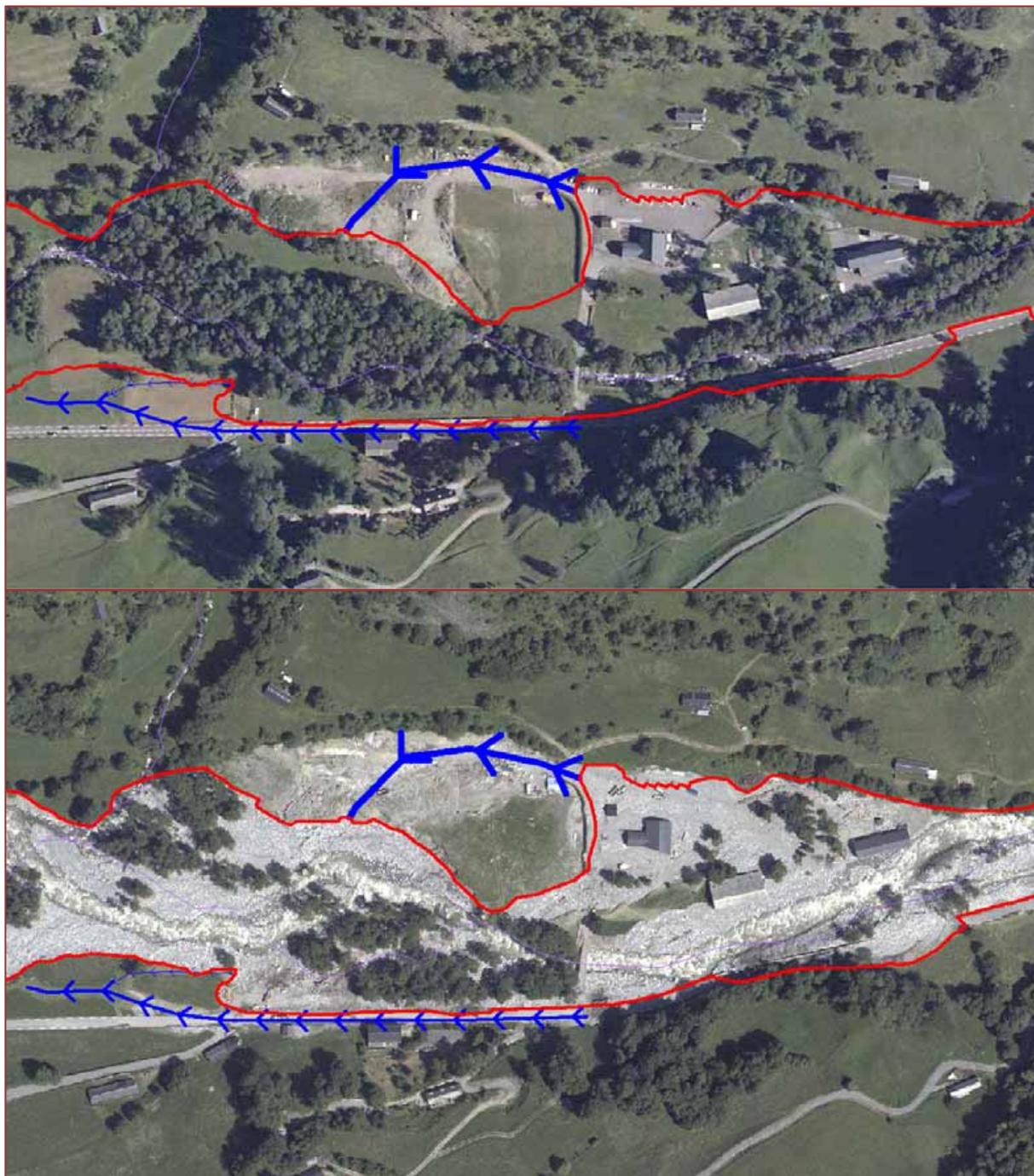
4.3.2 – Fonds des vallées torrentielles

Avant la crue, les fonds de vallées torrentielles les plus sollicités, comme le pla de Ravi sur la Pique, le quartier Concé sur le gave de Cauterets ou, plus encore, la vallée du Bastan, présentaient une occupation du sol variée.

Les prairies de fauche et les boisements rivulaires ou alluviaux prédominent mais les infrastructures routières, les ouvrages transversaux et les zones bâties sont présents et localement étendus ou nombreux.

La topographie est un facteur déterminant, les portions les plus évasées et plates étant plus particulièrement utilisées pour y implanter des bâtiments et les activités associées : habitation, local technique, camping, etc.

Le Bastan à Viella (65) – diversité de l'occupation du sol au sein de la bande active (en rouge) et des chenaux de crue (en bleu) – source BD-Ortho 2010 et vol juillet 2013 (IGN) – ancienne décharge et bâtiments implantés à partir des années 1990



En termes d'érosion, les destructions de terrain touchent tous les types d'occupation du sol, des bâtiments, des ouvrages transversaux comme des portions de route au même titre que les prairies ou les boisements, même si des îlots de ces derniers ont pu mieux résister.

4.3.3 – Cônes de déjection torrentiels

Par leur extension, les principaux cônes de déjection torrentiels activés par la crue sont ceux du Bastan, de l'Yse, du gave de Cauterets et de la Mousquère (voir carte p.73).

☞ Sur le cône de l'Yse, l'occupation du sol est dominée par l'urbanisation et les infrastructures routières associées. Un cordon de boisement rivulaire, d'épaisseur variable, marque le thalweg du cours d'eau.

Les destructions de terrain se sont concentrées au sein du boisement ou en bordure immédiate. Cependant, toutes les zones ont été touchées par le dépôt des alluvions grossières charriées par la crue et par les divagations associées.

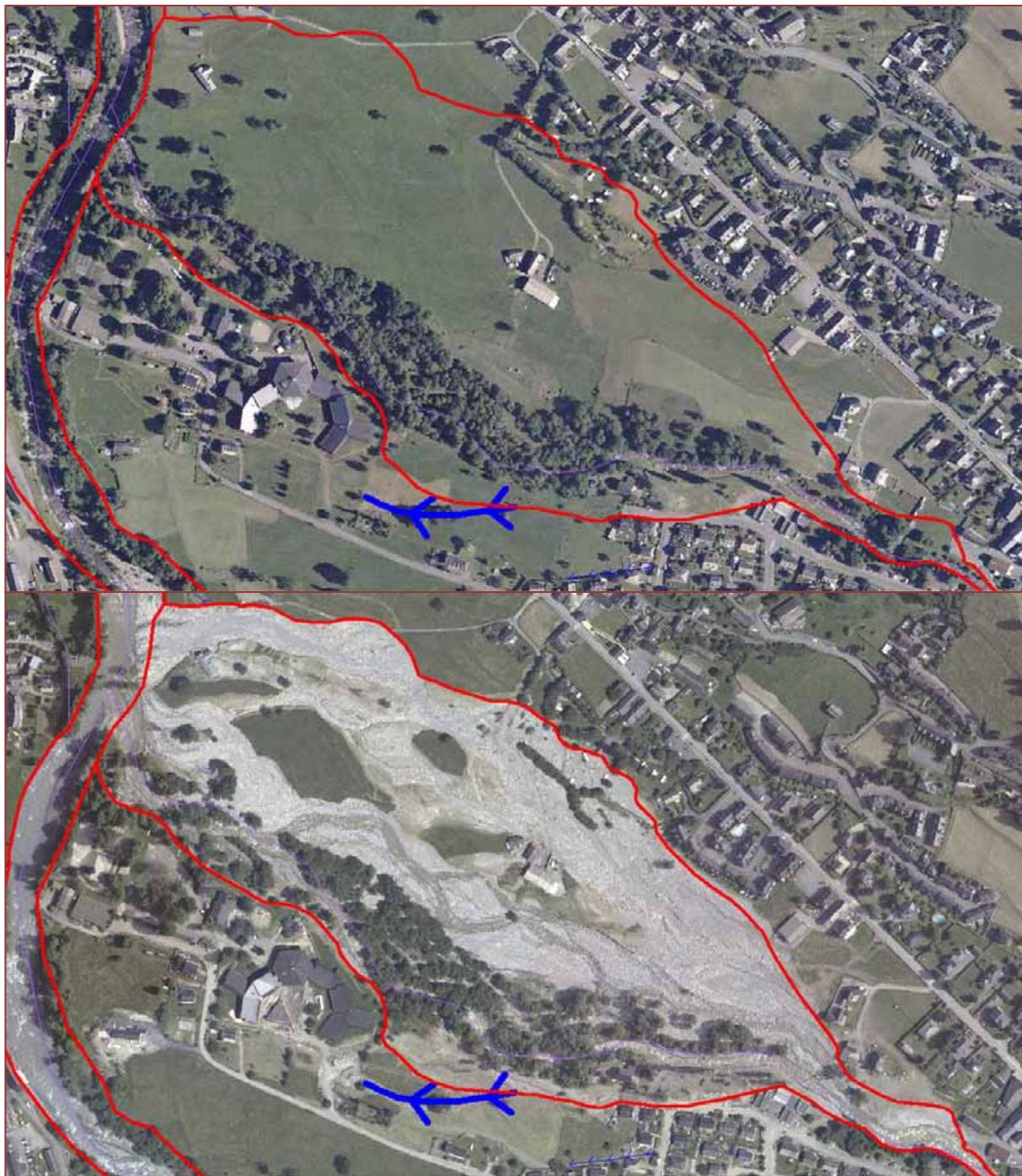
Le cône de l'Yse à Luz-St-Sauveur (65) – Occupation du sol au sein de la bande active (en rouge) – source BD-Ortho 2010 et vol juillet 2013 (IGN)



☞ Sur le cône du **Bastan**, les zones où la mobilité a pu s'exprimer correspondent essentiellement aux boisements alluviaux et à des prairies de fauche.

Les prairies ont, pour la plupart, étaient détruites, alors que les boisements alluviaux ont été préservés. Certains bâtiments agricoles ont subi des dommages du fait de l'érosion.

Cône du Bastan à Luz et Esquièze (65) – Occupation du sol au sein de la bande active (en rouge, chenaux de crue en bleu) – source BD-Ortho 2010 et vol juillet 2013 (IGN)

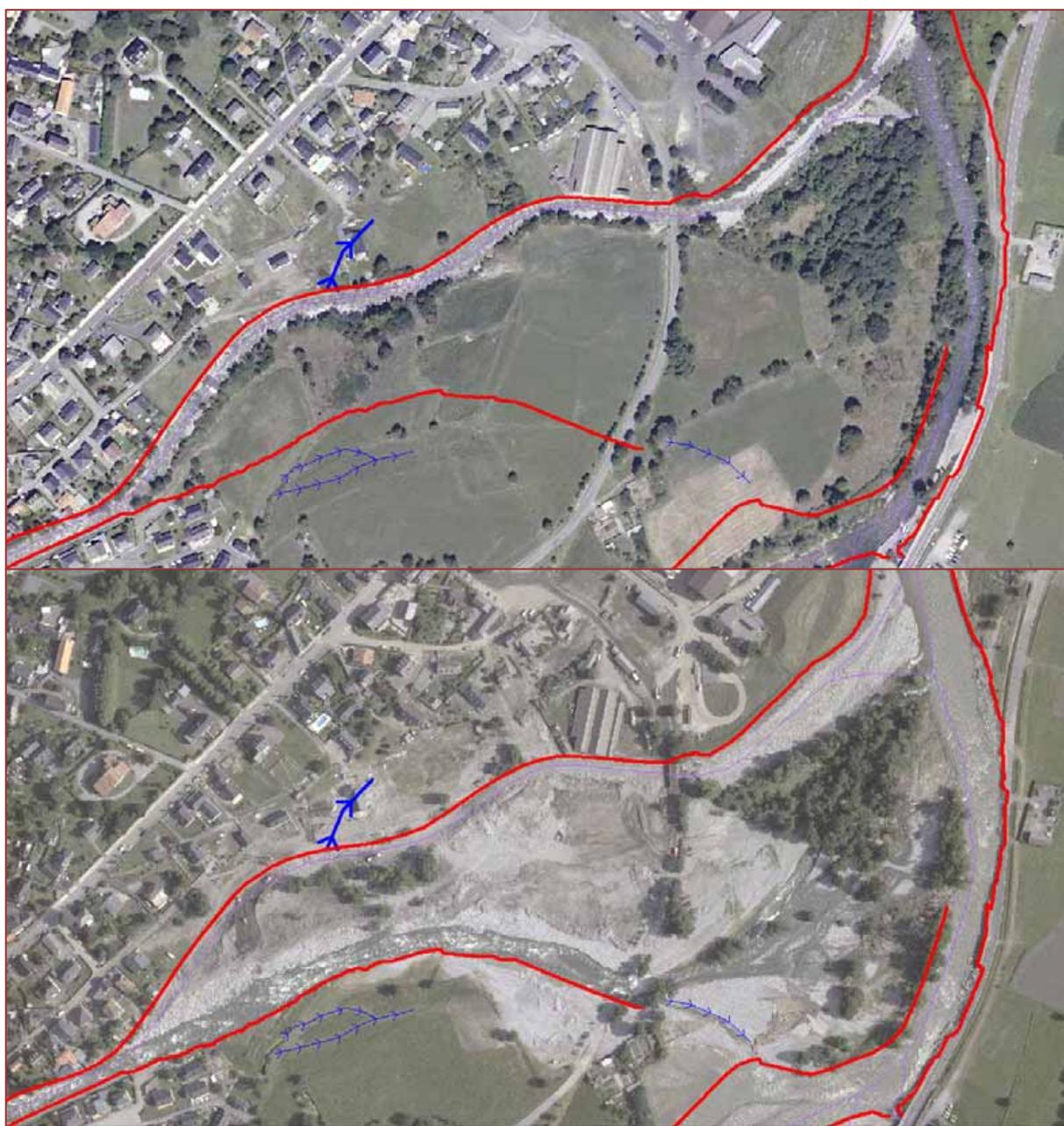


Mieux protégées (digue, enrochement), les zones bâties situées en bordure de la bande active ont également subi des dégâts, principalement du fait de l'activité de chenaux de crue, à l'origine d'inondation et d'apport de matériaux.

☞ Sur le cône du **gave de Cauterets**, les zones où la mobilité a pu s'exprimer correspondent essentiellement à des prairies, parcelles cultivées et aux boisements alluviaux, proches de la confluence avec le gave de Pau.

Les prairies et les cultures ont, pour la plupart, étaient détruites, alors que les boisements alluviaux ont bien résisté. Un vaste remblai, prévu pour recevoir le futur stade de Soulom, a totalement été emporté.

Cône du gave de Cauterets à Soulom (65) – Occupation du sol au sein de la bande active (en rouge, chenaux de crue en bleu) – BD-Ortho 2010 et vol juillet 2013 (IGN)



Mieux protégées (mur-digue, enrochement), les zones bâties et industrielles situées au Nord de la bande active ont également subi des dégâts, principalement du fait de surverses et de l'activité de chenaux de crue, à l'origine d'inondation et d'apport de matériaux.

☞ Sur le cône de la **Mousquère**, à Bourisp (65), la partie amont est urbanisée et aménagée. Les débordements ont touché la moitié occidentale du cône. Les dépôts de sédiments grossiers ont largement engravé les prairies et les cultures situées au centre du cône mais également la rive gauche, en aval de la RD 929 et du cône géologique.

Cône de la Mousquère à Bourisp (65 – en violet – source BRGM) – Occupation du sol au sein de la bande active – source Pleïade 2013



Dépôt d'alluvions grossières sur le cône de la Mousquère, à Bourisp (65) – sources GéoDiag et EDF (à droite)



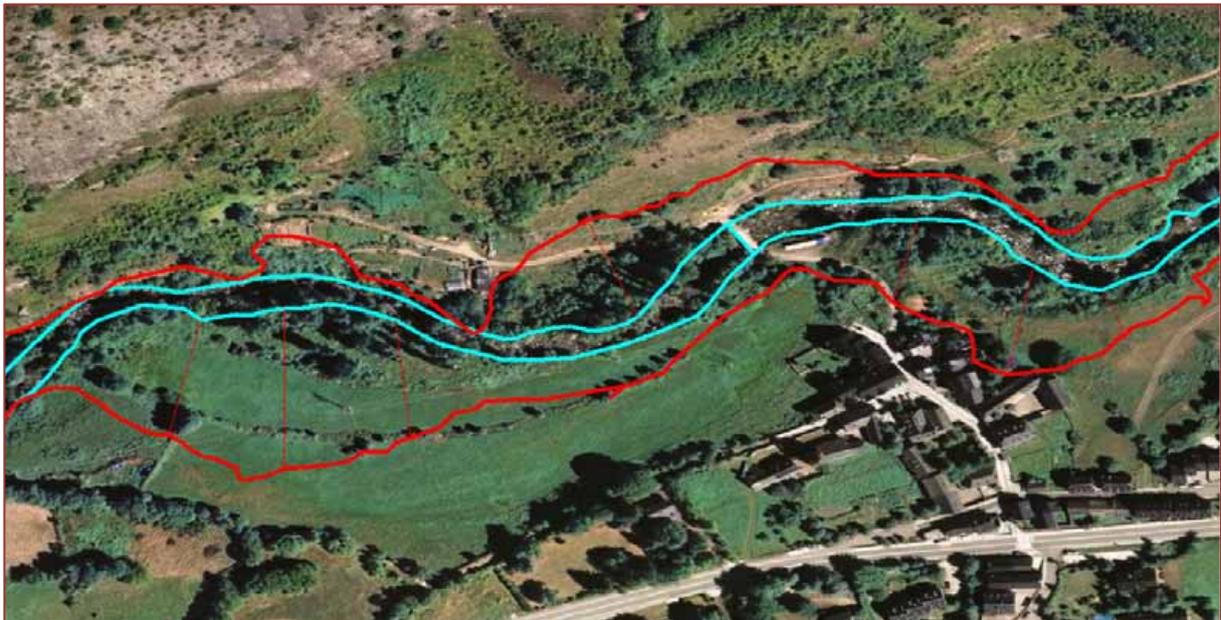
D'autres cônes, comme celui du gave d'Azun, à Argelès-Gazost, ou de l'One, à Bagnères-de-Luchon, n'ont pas subi une mobilité ou des divagations significatives.

En revanche, en haute montagne, de nombreux torrents primaires ont activé leur cône, comme la Glère, affluent de la Pique, en amont de Bagnères-de-Luchon, ou le Baricave, affluent de la Neste du Rioumajou, en amont de St-Lary.

4.3.4 – Plaines divagantes de vallées alluviales

☞ Sur la **Garonne**, en val d'Aran, les zones à forte mobilité latérale voire à divagation concernent des prairies, des cultures et des boisements alluviaux, principalement.

Garonne, val d'Aran – Occupation du sol au sein de la bande active (trait rouge épais) – source ICC, 2012

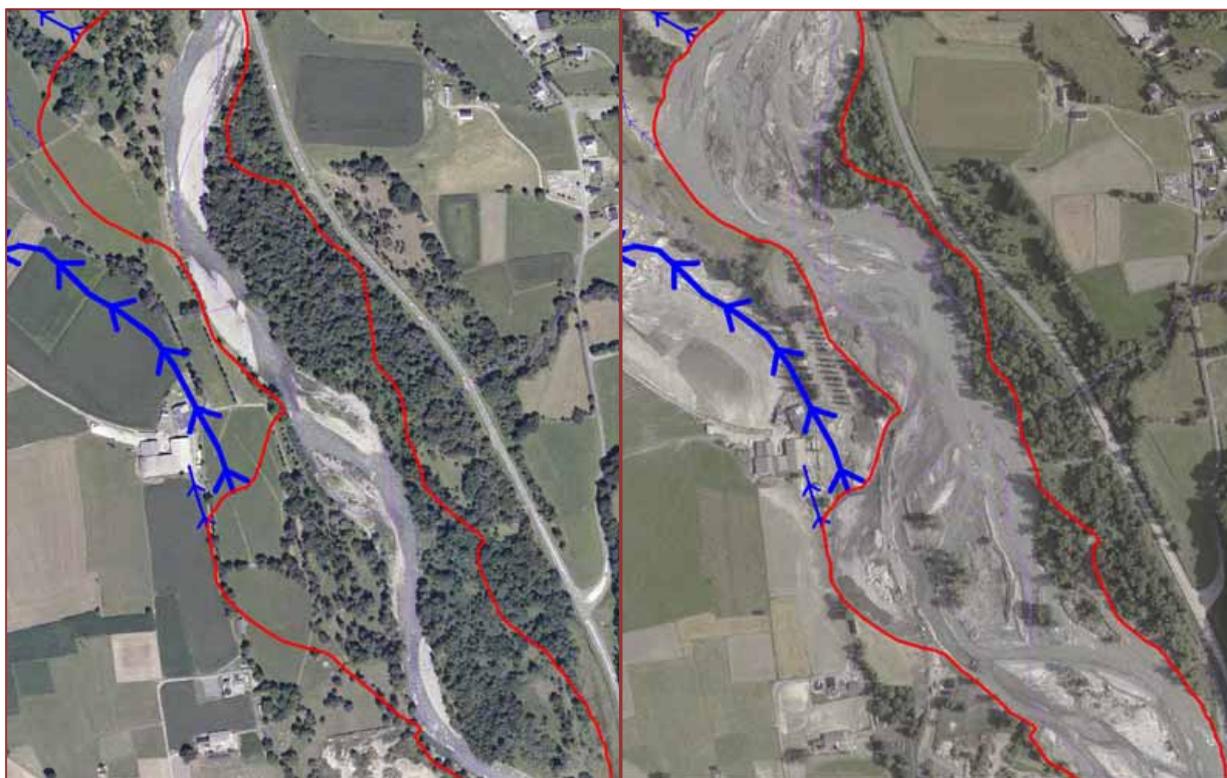


☞ Sur le **Gave de Pau**, au niveau de Saligos, la bande active utilisée en juin 2013 était majoritairement nue, avant l'évènement, du fait de la crue de 2012 et des travaux réalisés à la suite.

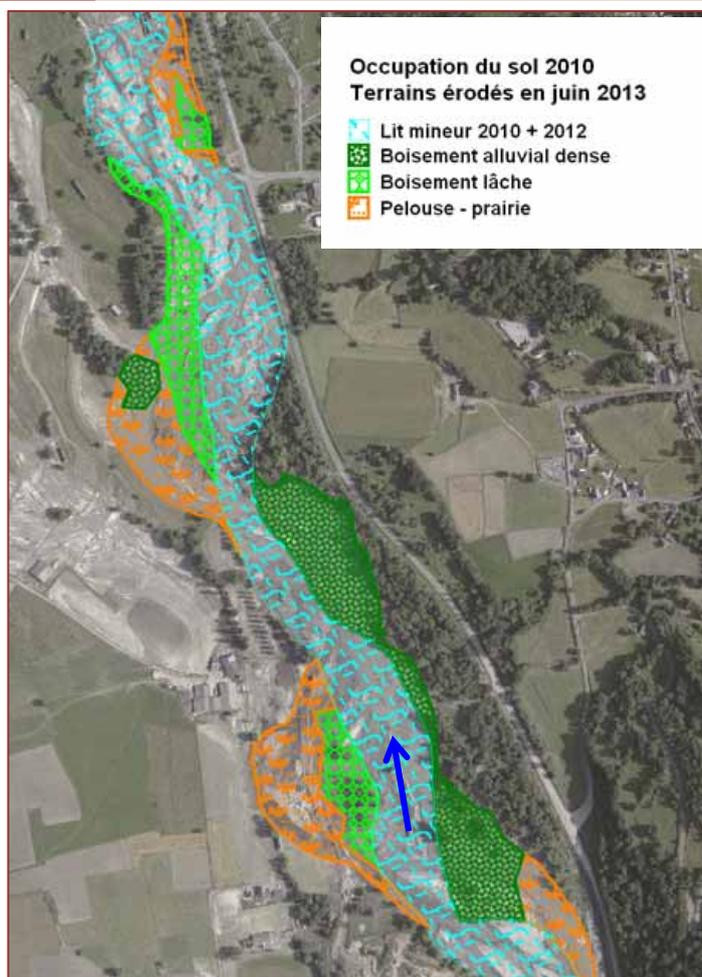
Au niveau de Beaucens, la bande active utilisée en juin 2013 était occupée pour partie par un boisement alluvial dense, en rive droite et par des prairies ou des boisements lâches, en rive gauche.

Entre la prise d'eau du Gabarret et le seuil de Beaucens, les terrains érodés par la crue de juin 2013 représentent une superficie de l'ordre de 16 ha, dont 42 % de prairies/pelouses, 34 % de boisements alluviaux denses et 24% de boisements lâches avec pelouse en sous-bois.

Les reculs de berge sont plus marqués en rive gauche, avec près de 54 % des surfaces érodées. La différence entre les deux rives est très marquée, puisque plus de 70 % des prairies érodées étaient situées en rive gauche, alors que 93 % des boisements denses érodés étaient en rive droite.



*Gave de Pau, Beaucens / Adast (65)
– Occupation du sol au sein de la
bande active (trait rouge épais), en
2010 (à gauche, source BD-Ortho –
IGN) et en juillet 2013 (à droite,
source IGN-DDT65)*



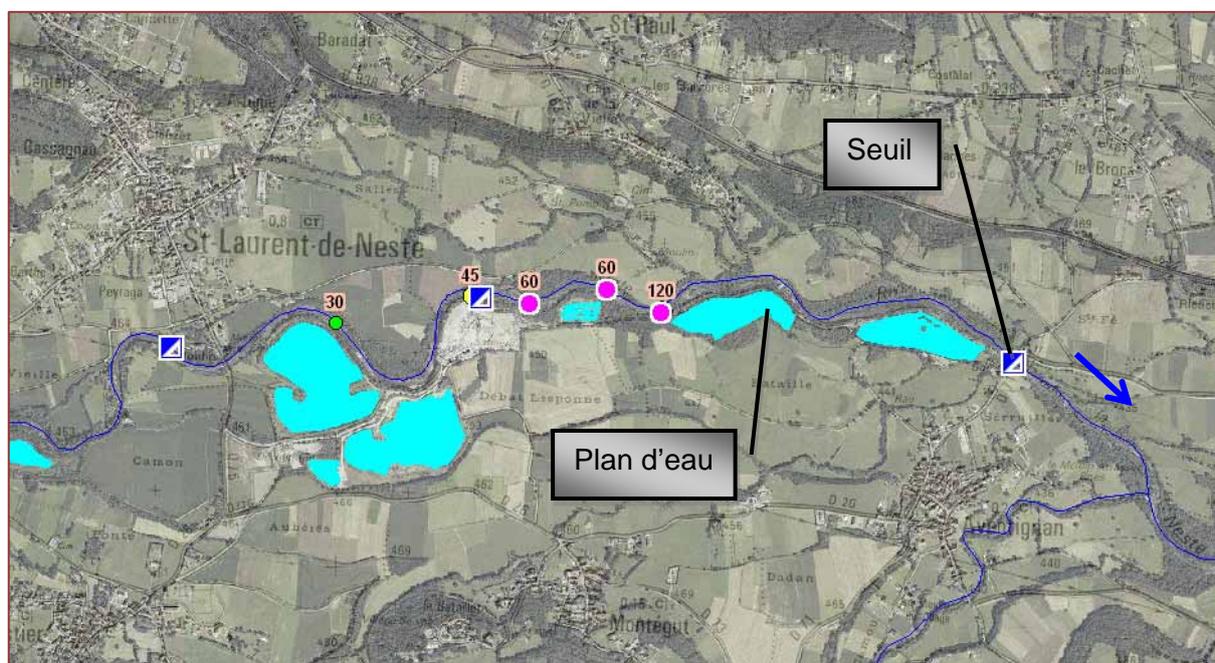
4.3.5 – Zones à méandres mobiles du piémont

☞ Sur la **Garonne** comme sur la **Neste aval**, les portions les plus mobiles correspondent majoritairement à des zones de boisements alluviaux, à des peupleraies ou à des grandes cultures.

Cependant, les plans d'eau de gravière sont fréquents, ainsi que les seuils qui contrôlent des prises d'eau et, par conséquent, des tronçons court-circuités. La plupart de ces ouvrages ont également une fonction de stabilisation du profil en long

Ainsi, les recoupements de méandre (voir cahiers géographiques), les contournements de seuil ou les captures de plan d'eau consécutifs à la mobilité fluviale peuvent être à l'origine de modifications morphologiques en chaîne qui concerneraient des linéaires ou des surfaces riveraines importantes.

Neste aval - Occupation du sol sur les portions à forte mobilité – Source BD-Ortho-IGN



☞ Sur le **Gave de Pau**, la situation est assez similaire mais les boisements alluviaux sont plus étendus. Ceci est à rapprocher du fait que, entre Nay et Pau (64) notamment, l'activité morphogène du gave est plus marquée que sur le piémont du saint-gaudinois, par exemple.

4.4 – Transport solide et continuité du charriage

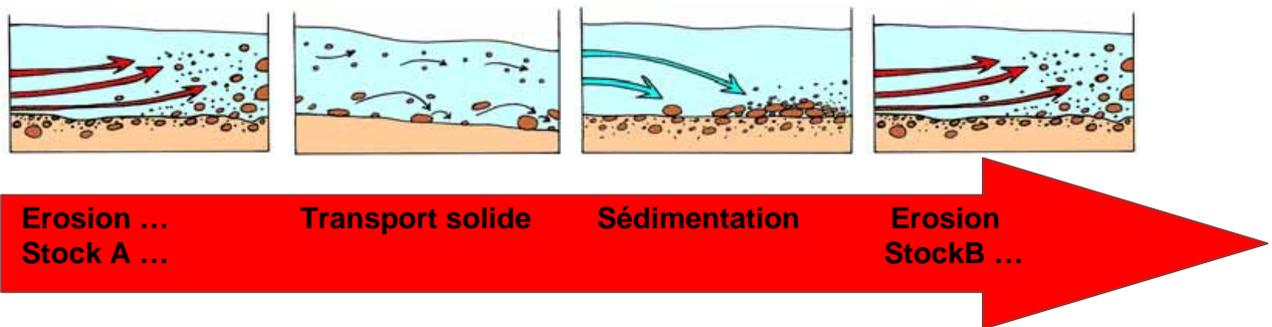
La **mobilité** fluviale ou torrentielle et le transport solide par **charriage** sont étroitement liés. Le transport solide dépend principalement de la **pente longitudinale** (hydraulique) et du **débit liquide**, qui déterminent la capacité de transport de l'écoulement. Le relief, la topographie et l'hydrologie sont donc les principaux facteurs de contrôle.

La granulométrie et la cohésion des matériaux sur/contre lesquels s'écoule l'eau conditionnent quels sont les **stocks disponibles**. Ils dépendent eux-mêmes de la géologie et des aménagements anthropiques (protections de berge, occupation du sol, etc.).

En fonction de ces multiples paramètres, la mobilité verticale et latérale du cours d'eau est l'expression de la capacité effective de transport propre à chaque crue et à chaque portion homogène de cours d'eau. La **bande active** ou l'espace de mobilité fonctionnel correspondant à la crue indique quels sont les stocks de matériaux effectivement utilisés ainsi que la manière dont les **processus morphodynamiques** érosion + transport + sédimentation + érosion + ..., se succèdent dans l'espace.

En effet, s'agissant du charriage, il s'agit d'un processus discontinu d'amont en aval, dont l'une des principales caractéristiques est d'aboutir à des distances de transport généralement limitées à quelques centaines de mètres (pour des galets), qui nécessite donc une recharge sédimentaire régulière « **de proche en proche** », à partir de **stocks mobilisables** régulièrement répartis tout au long du cours d'eau.

Relation fonctionnelle et spatiale entre mobilité et charriage (la flèche représente une distance amont – aval < 500 m)



En zone de montagne, la production primaire, directement issue des versants, ou la contribution des couloirs torrentiels ou avalancheux participent au charriage en injectant de nouveaux volumes mobilisables dans le réseau hydrographique.

Dans les grandes vallées intramontagnardes et sur le piémont, les alluvions récentes (plancher et bancs alluviaux) ou plus anciennes (lit majeur) sont les principaux stocks disponibles. Leur renouvellement dépend donc des arrivées de matériaux en provenance de l'amont du cours d'eau ou de ses affluents.

Sur une portion de cours d'eau, si les volumes entrants sont inférieurs à la capacité de transport relative à la crue, le bilan sédimentaire sera négatif et les dépôts ne compenseront pas intégralement les érosions. Cela se marquera par une incision du lit ou/et par des reculs de berges marqués.

4.4.1 – Origine des matériaux mobilisés

La crue de juin 2013 a mobilisé des quantités très importantes de matériaux alluvionnaires d'origine diverses, issus notamment :

- Du ravinement des versants ;
- D'instabilités de versants (mouvements de terrains superficiels) ;
- De la reprise des matériaux préalablement mobilisés par les avalanches ;
- De la reprise des matériaux présents dans le lit mineur des cours d'eau (bancs et plancher alluviaux) ;
- De la reprise des matériaux présents sur le lit majeur des cours d'eau.

☞ Le **ravinement des versants** n'a pas été analysé en détail. Cependant, quelques zones plus particulièrement actives ont été repérées sur les documents photographiques disponibles.

C'est notamment le cas de ravines inscrites dans des éboulis ou des colluvions morainiques et qui alimentent la Neste de Badet à partir des versants des crêtes des Cintes blanches ou de Traouès.

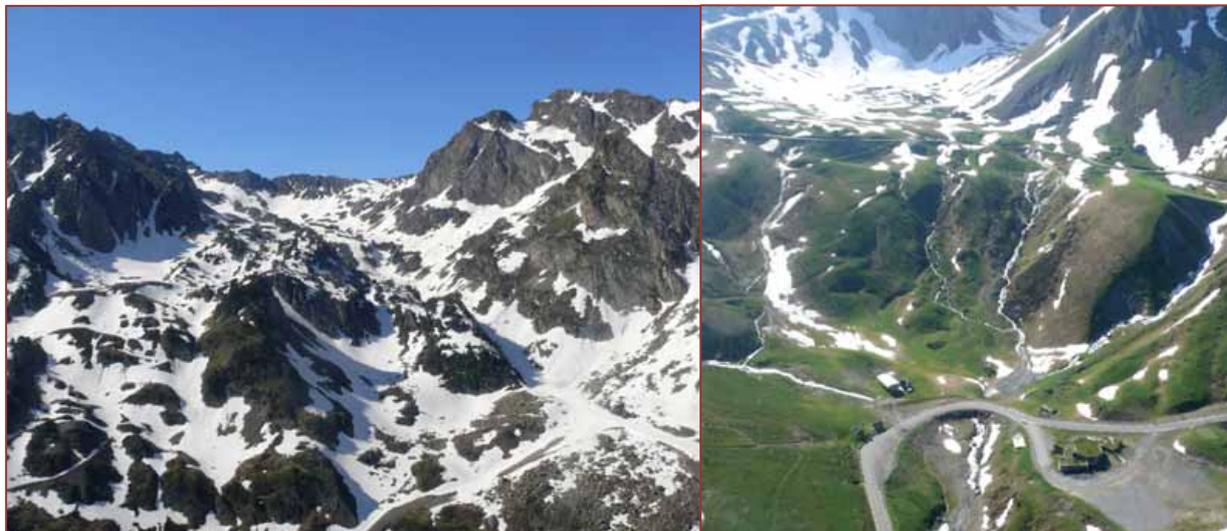
Neste de Badet – ravines actives sur le versant Nord (source EDF)



Prises à partir de juillet, les images Pleïades ne rendent pas compte du manteau neigeux encore présent au moment de la crue, en altitude. Il est probable que son extension a limité les ravinements sur les versants encore recouverts.

D'une manière générale, cette contribution au transport solide grossier apparaît modeste. Cependant, l'épisode d'octobre 2012 a pu rendre disponibles des stocks importants, bien que peu visibles en-dehors des talwegs, notamment sur les bassins du gave de Pau et des Nestes.

Bastan – Secteur du Tourmalet – enneigement le 25 juin 2013 (source DREAL Midi-Pyrénées)



☞ Les **instabilités de versants** peuvent être indépendantes du fonctionnement du cours d'eau récepteur ou directement associées à l'érosion du pied de versant par le cours d'eau.

Les mouvements superficiels indépendants du cours d'eau récepteurs semblent rares, pour ceux que la photo-interprétation permet de répertorier.

Les ajustements de pied de versants associés à la mobilité latérale du cours d'eau récepteur sont nombreux sur certains axes, notamment l'Yse (65), le Bastan (65) ou la Neste de Badet (65). Certains représentent un recul du « haut de berge » supérieur à 20 m ou une surface glissée de plus de 0.2 ha, qui s'ajoutent à la bande active du cours d'eau.

La plupart de ces glissements, inscrits dans des formations morainiques ou de pente ont continué d'évoluer au cours des mois postérieurs à la crue, fournissant principalement des matériaux fins.

Glissement de pied de versant sur le Bastan, en amont de Barèges (65) - (GéoDiag)



Glissements de pied de versant sur le Bastan, en amont de Barèges (65) – source DDT65 / IGN, 2013



☞ La **reprise de matériaux dans le lit mineur** présente plusieurs aspects.

En haute montagne, on constate souvent un « recalibrage » naturel du lit mineur des torrents sans que leur tracé en plan n'ait subi de modifications significatives. Le lit est plus large (photo-interprétation), voire plus profond (hypothèse) et les matériaux érodés ont été charriés vers l'aval.

La plupart du temps, ces portions concernent des zones où le plancher alluvial est peu épais, du fait des affleurements rocheux, et/ou des zones fréquemment mobilisées, la reprise de charge ayant pu s'y produire en octobre 2012 comme en juin 2013.

Neste de la Pez - Zone de « recalibrage » et reprise de charge (Environ 500 ml) – source BD-Ortho 2010 (IGN) et Pleiades 2013



Dans les vallées de moyennes et basses montagnes, le recalibrage des cours d'eau par la crue s'est accompagné d'une divagation des chenaux ou d'une migration de méandres. La mobilité latérale est importante et s'est exprimée aux dépens de la bande active, qui se trouvait souvent être « fermée » par le développement de la végétation arborée.

*Bande active de l'Arriu Joeu, en amont d'Es Bordès – Val d'Aran
(Source ICC, 2013)*



*Bastan - Faciès en marches d'escalier, antérieur à la crue
(GéoDiag)*



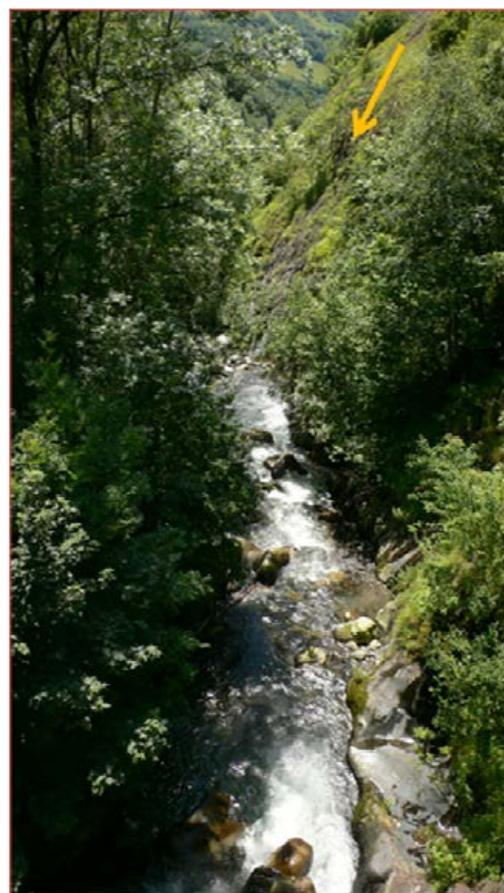
Dans quelques cas, comme pour certaines portions du Bastan, la destruction du **pavage** a permis à la crue de mobiliser une partie du plancher alluvial, en place depuis plusieurs décennies. Localement, l'**incision** du lit a ainsi pu dépasser 2 m, comme dans la traversée de Barèges. Les nombreux **affouillements** qui ont affecté des ouvrages, des bâtiments ou des infrastructures en sont une des conséquences les plus visibles et représentent généralement les principales causes de destruction d'ouvrages ou de protections de berge.

Le Bastan en aval du pont de Barzun – situation en 2011, à gauche, et en 2013, à droite.



Avant la crue, le lit mineur du Bastan présentait souvent un faciès en marches d'escalier (Step-Pools). Cet agencement résulte du travail des crues peu à modérément morphogènes, qui a permis aux blocs les moins mobiles de constituer progressivement des « seuils » capables de stabiliser le profil en long du cours d'eau et de protéger une partie du plancher alluvial contre l'érosion verticale.

Le Bastan à Betpouey – Destruction du pavage et incision du lit mineur (crue + travaux d'urgence) – situation en 2011, à droite, et en 2013, à gauche (GéoDiag).



Incision et décapage du plancher alluvial sont également constatés sur certaines portions de cours d'eau, notamment sur le gave de Pau, en aval du pont de Tilhos, dans la traversée de Lourdes (~80 cm) et en aval de la STEP de Lourdes (témoignage CG65).

En aval du pont de Tilhos, cette érosion verticale a conduit à l'accentuation d'un front d'érosion, environ 120 m en aval du franchissement de la départementale, et a contribué à la formation d'un banc alluvial, 800 m en aval, au niveau du rond-point de la pénétrante vers Argelès-Gazost.

En aval du pont de Tilhos, un front d'érosion régressive s'est accentué (en haut, GéoDiag 2014 – en bas, CG65, 2011)



En aval du rond-point de la pénétrante vers Argelès-Gazost, un banc s'est formé (source CG65, 2013)



☞ La **reprise de matériaux sur le lit majeur** présente plusieurs aspects.

Elle s'est produite soit par érosion latérale, du fait de l'élargissement de la bande active ou de la migration de méandres, soit par érosion verticale, notamment lors de divagation du lit ou de rescindements de méandres (amorçés ou effectifs).

*Le Bastan à Betpouey –
Reprise de charge aux
dépens de la bande active
(boisée) et du lit majeur
(prairie) – source BD-Ortho
2010 (IGN) et Pleïades 2013*



*La Garonne à Fos – reprise
de charge par migration de
méandre (source ONEMA 31)*



Ces derniers indiquent clairement que les distances de charriage sont limitées à quelques centaines de mètres, les zones de sédimentation succédant directement aux zones d'érosion verticale.

La Garonne à Pointis-Inard – Erosion verticale avec amorce d'un rescindement de méandre (source ONEMA 31, 2013)



Sur les portions de cours d'eau concernées, l'importance des migrations et des recouplements de méandres indiquent une capacité de transport par charriage très significative.

Sur les zones de piémont du gave de Pau, de la Neste ou de la Garonne, des trains de méandres montrent ainsi une évolution rapide ou importante, alors que la pente du cours d'eau est, en moyenne, inférieure à 1 %.

Cela montre que l'amortissement des vitesses, du fait de l'éloignement des montagnes et de l'écrêtement de la crue par débordement, n'est que partiel. Par ailleurs, cela indique que les stocks d'alluvions facilement mobilisables, sous la forme de bancs ou directement en provenance de l'amont, ne sont pas suffisants pour satisfaire les capacités du cours d'eau en crue. Le lit majeur et les alluvions plus anciennes sont donc largement mis à contribution.

Sur ces portions, deux types d'évolutions morphologiques se côtoient :

- Les **migrations de méandres** correspondent à une augmentation progressive de la sinuosité, donc à une diminution de la pente longitudinale, qui tend à atténuer les capacités de transport du cours d'eau ;
- Les **recouplements de méandre** correspondent à une diminution de la sinuosité, donc à une augmentation de la pente longitudinale, qui tend à accroître les capacités morphogènes du cours d'eau.

Sur ce point, une nette différence apparaît à propos des zones les plus touchées par les recouplements de méandres (chenaux de crue marqués en intrados, avec ou sans griffe d'érosion verticale).

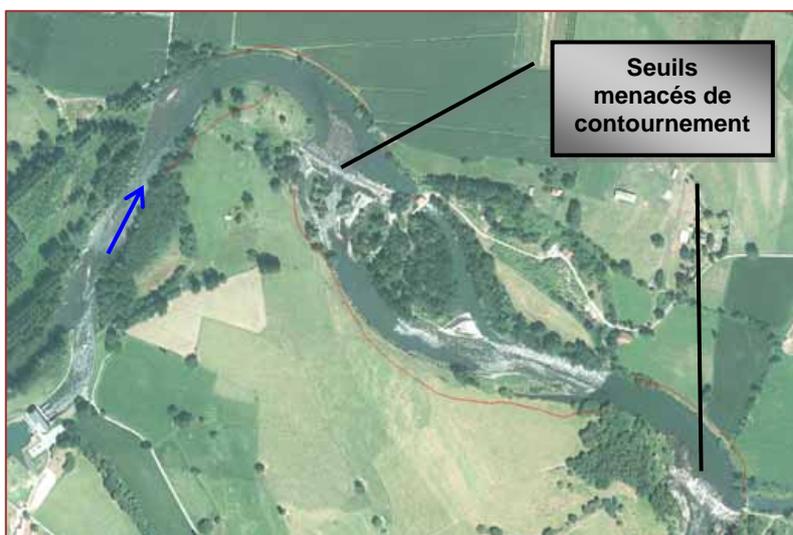
En effet, sur la Garonne amont, notamment dans le val d'Aran, les méandres sont généralement peu marqués. Les recouplements ne modifieraient que peu la pente et la sinuosité. En revanche, sur le piémont, les méandres peuvent être plus amples et leur recouplement conduirait à des modifications importantes de la sinuosité et de la pente longitudinale.

Ainsi, sur la Garonne, à Pointis-Inard, entre la Coume de Luent et la confluence avec le Ger, 3 méandres successifs sont concernés par l'amorce d'un recouplement de méandre, avec

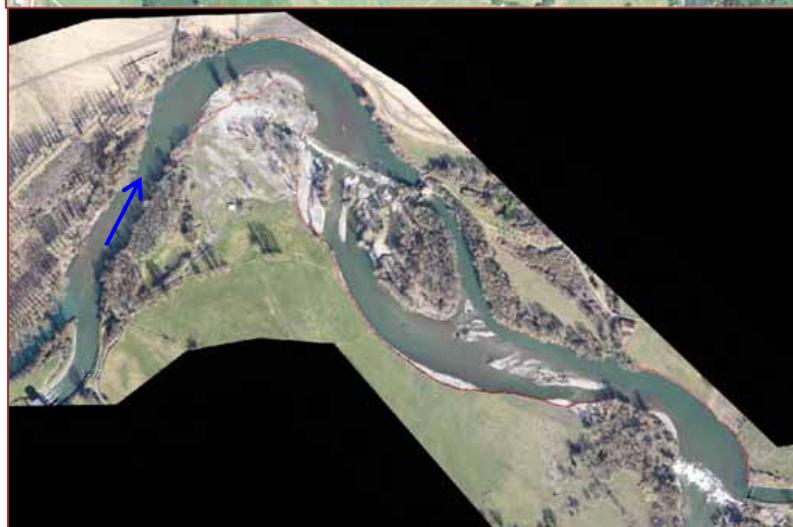
respectivement une diminution potentielle de la sinuosité de l'ordre de 25 %, 35% et 15 %, en cas de changement de lit.

De plus, le recoupement des deux méandres les plus aval entraînerait le contournement de seuils, qui stabilisent le profil en long, entre autres fonctions. Une situation similaire se retrouve sur d'autres sites : à Rebouc (Neste, 65), à Bizanos (gave de Pau, 64), etc.

La Garonne à Pointis-Inard (31) – Migrations de méandres entre 2010 (en haut - source IGN) et 2014 (en bas – source GéoDiag/Avion jaune)



Dans d'autres configurations, cette tendance a conduit à la capture de plans d'eau (ancienne gravière) implanté en intrados de méandre. En cas de brèche plus importante ou de crue plus longue, cette capture aurait pu amplifier les ajustements morphologiques des portions de cours d'eau concernées.

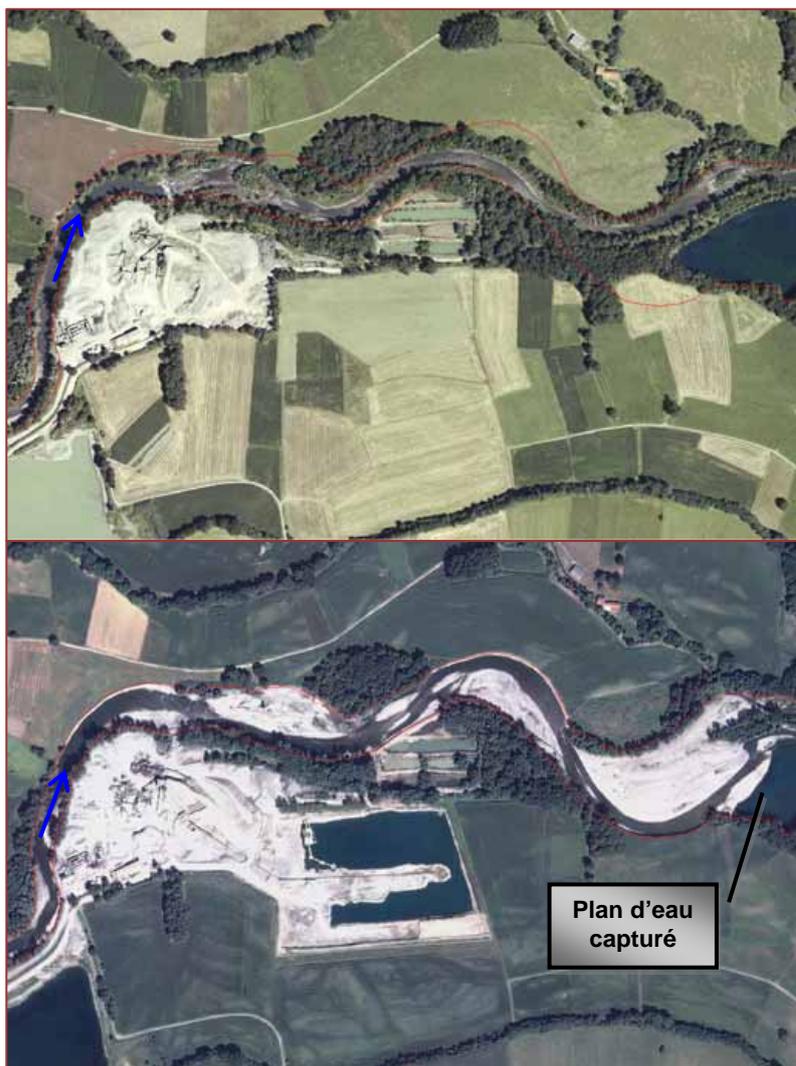


C'est notamment le cas sur le gave de Pau, à Baudreix (64) ou sur la Neste, à Aventignan (65).

Le gave de Pau à Baudreix (64) – Réparation d'une brèche, après la capture du plan d'eau – source SIGAP

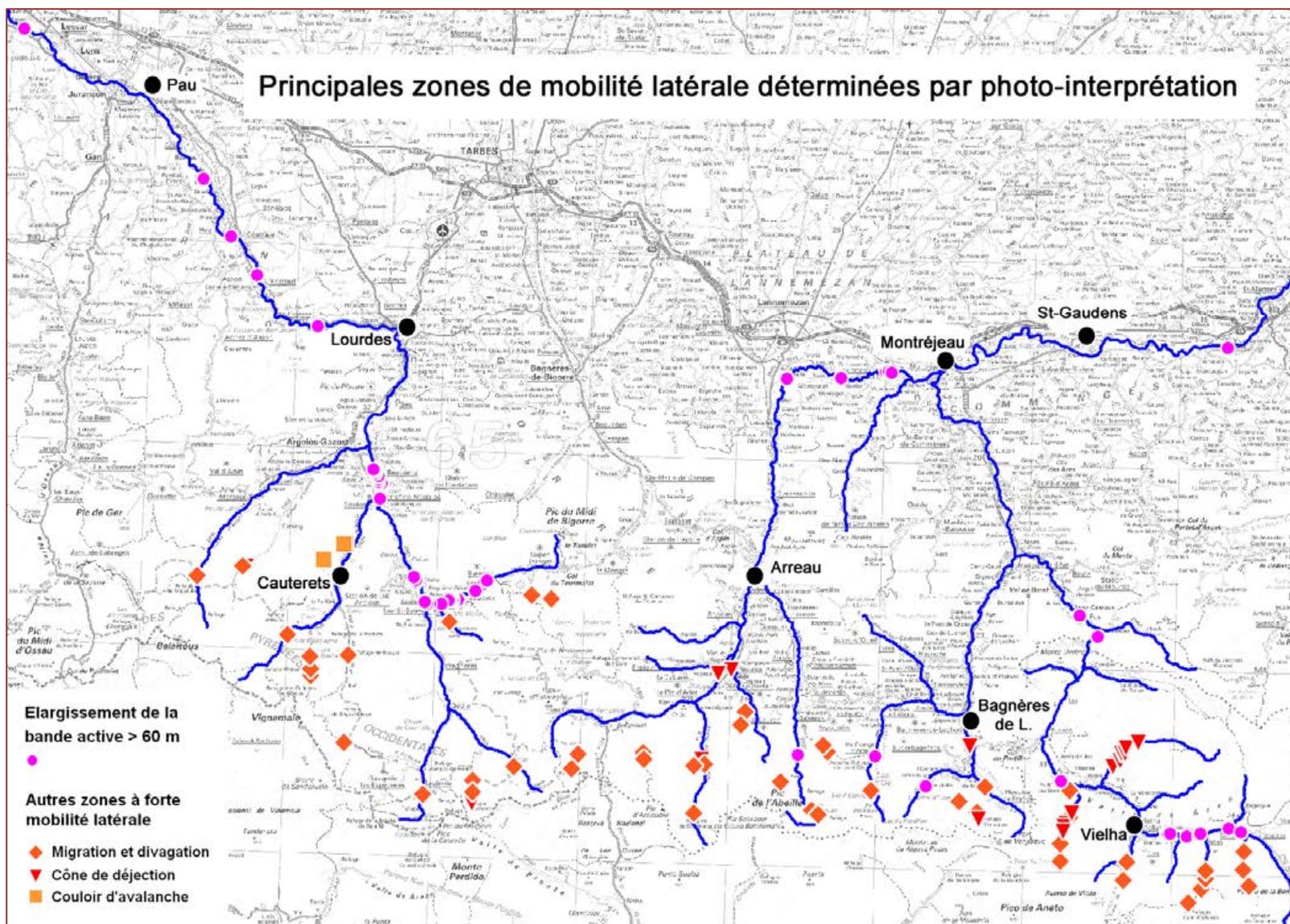


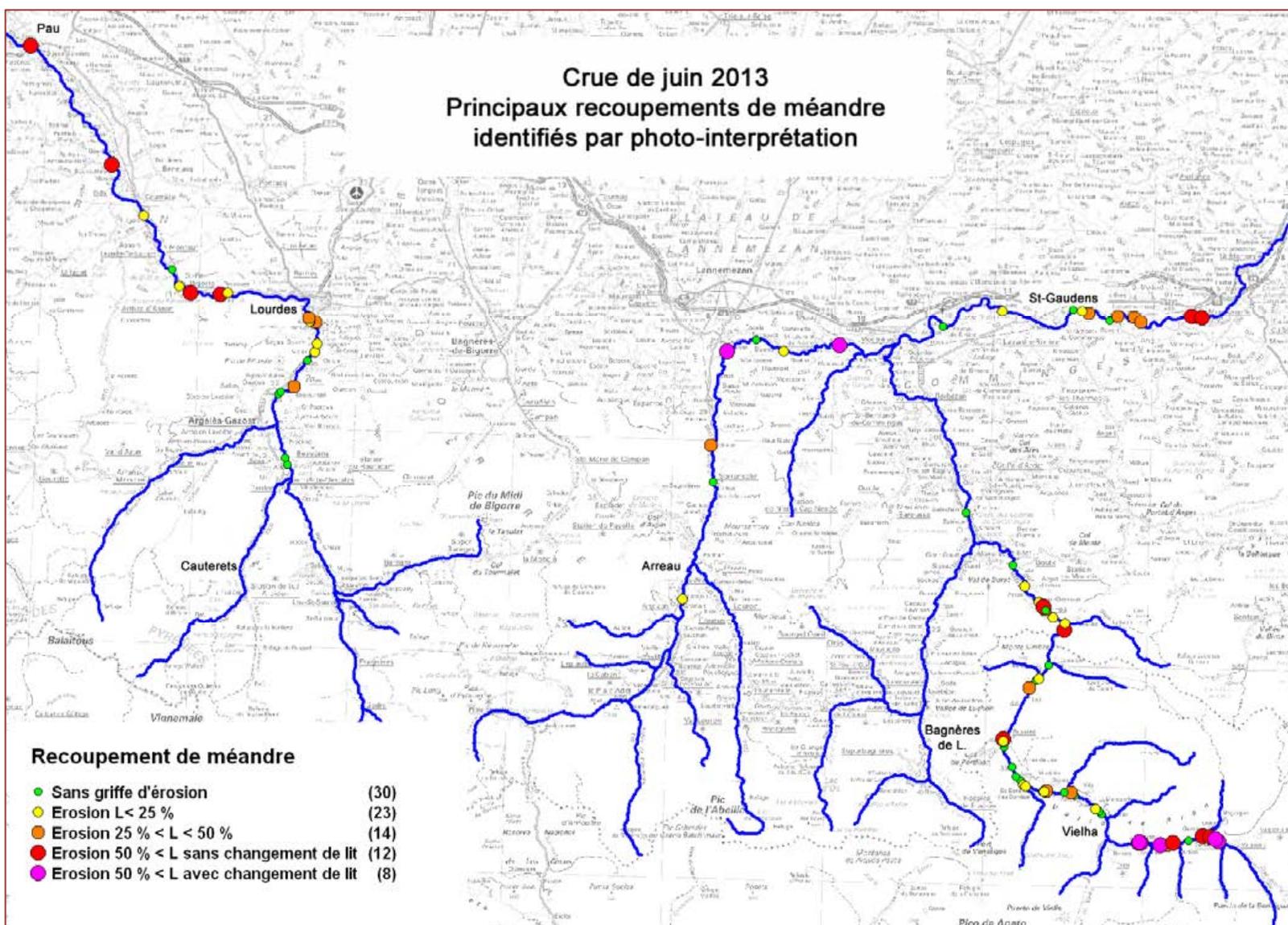
La Neste à Aventignan (65) – Migrations de méandres entre 2010 (en haut - source IGN) et 2014 (en bas – source GéoDiag/Avion jaune)



Le gave de Pau à Siros (64) - Migrations de méandres entre 2010 (à gauche - source IGN) et 2013 (à droite – source Pléiades)







☞ La reprise de matériaux sur les cônes de déjection présente plusieurs configurations.

La crue d'octobre 2012 avait déjà montré la possibilité de rognage de la base de cône pourtant « stabilisés » depuis des siècles. Cette configuration apparaît notamment sur le gave de Pau, dans la plaine de Saligos (65). La plupart du temps, la crue de juin 2013 n'a fait qu'accentuer le phénomène, faisant encore reculer le cône de l'affluent torrentiel.

*Gave de Pau à Saligos –
Base du cône torrentiel
érodé par la crue
d'octobre 2012 (GéoDiag)*



La crue de juin 2013 montre aussi que le volume de matériaux visible sur certains cônes de déjection après l'évènement se compose de 2 stocks distincts. Le premier correspond à des alluvions charriées depuis l'amont, où des érosions se sont produites.

Le second correspond à la mise au jour de matériaux déjà en place mais jusque là recouverts par une fine couche de terre (< 20 cm) et de la végétation (pelouse, etc.). C'est notamment le cas sur les cônes du Bastan, à Esquièze-Sère (65), et du gave de Cauterets, à Soulom (65).

Sur ces zones, l'appréciation des volumes d'alluvions grossières déposées par la crue est délicate et imprécise, les matériaux seulement mis à nu par l'érosion des couches superficielles n'étant pas aisément distingués de ceux effectivement charriés en juin 2013.

*Le Bastan à Esquièze –
Alluvions sur (apportées
par la crue) et sous
(anciennes) la couche de
terre couverte de pelouse
(trait vert) - (GéoDiag)*



4.4.2 – Principales zones de dépôts des alluvions charriées

Les principales zones de sédimentation sont liées à :

- Une atténuation de la pente longitudinale ;
- Une augmentation de la largeur de la bande active ;
- Une zone de confluence avec un autre cours d'eau ou le débouché dans un plan d'eau ;
- Un obstacle transversal d'origine naturelle (verrou rocheux, embâcle, boisement, etc.) ou anthropique (ouvrage, etc.) ;
- A la répartition des vitesses d'écoulement, plus faibles dans l'intrados des méandres.

Dans de nombreux cas de figure, plusieurs de ces facteurs peuvent combiner leurs impacts pour aboutir à l'arrêt du charriage des alluvions.

☞ La **diminution de la pente longitudinale** peut être liée à la présence d'un verrou rocheux, à une zone de confluence avec une vallée plus large, comme dans le cas des cônes de déjection.

☞ **L'augmentation de la largeur** de la bande active ou du fond de vallée est généralement contrôlée par la géologie. En permettant l'étalement des flux liquides, elle abaisse la compétence du cours d'eau et favorise la sédimentation des éléments les plus grossiers.

Une brusque **difffluence** ou un **débordement** significatif peuvent produire les mêmes effets, par abaissement du débit liquide transitant dans le lit mineur du cours d'eau.

☞ Une **confluence ou le passage dans un plan d'eau** peut favoriser le dépôt des éléments charriés par abaissement de la pente hydraulique, augmentation de la profondeur ou de la largeur ou encore par effet d'obstacle, si la crue du collecteur rehausse le niveau de base local.

☞ Les **obstacles transversaux** modifient la pente hydraulique ou génèrent des effets de contre-pente en fond du lit, qui favorisent le dépôt des nappes de charriage.

A l'exception des coulées de débris, les distances de charriage sont limitées à quelques dizaines ou centaines de mètres, en fonction des conditions hydrauliques et géomorphologiques. De ce fait, les zones de dépôts sont généralement proches des zones d'érosion où les alluvions sédimentées ont préalablement été prélevées.

Au bilan, les principales zones de mobilité latérale correspondent ou sont voisines des zones de sédimentation les plus étendues. Pour l'essentiel, elles se localisent en haute montagne, à proximité des crêtes frontalières, qui ont été les bassins torrentiels les plus arrosés.

Font exception, la vallée du Bastan, dont le contexte géologique (placages morainiques) et géomorphologique est singulier, le bassin du gave de Pau à Beaucens (zone historique de tressage), ainsi que quelques portions de la Garonne, en aval de Montréjeau, de la Neste, en aval de la Barthe/Neste ou du gave de Pau, en aval de Lourdes, où l'évolution de certains trains de méandres a permis de mobiliser des volumes significatifs d'alluvions.

La Glère – Pique amont (31) – Zones de sédimentation associées à des changements de la pente longitudinale – source Pleïades, 2013



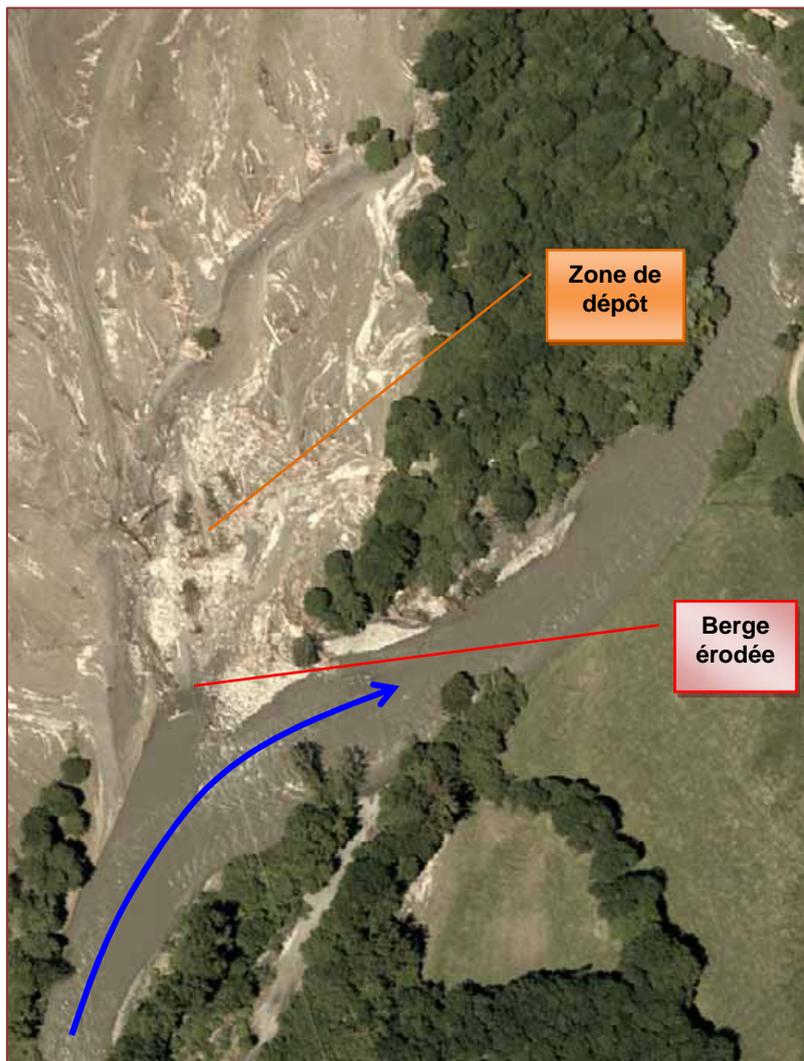
Cône du Baricave dans la Neste de Rioumajou (65) – Retenue du barrage de l'Escalette – source EDF



Sortie des « gorges de Luz » à Soulom (65) – Changement de pente et élargissement du lit du gage de Pau – source EDF

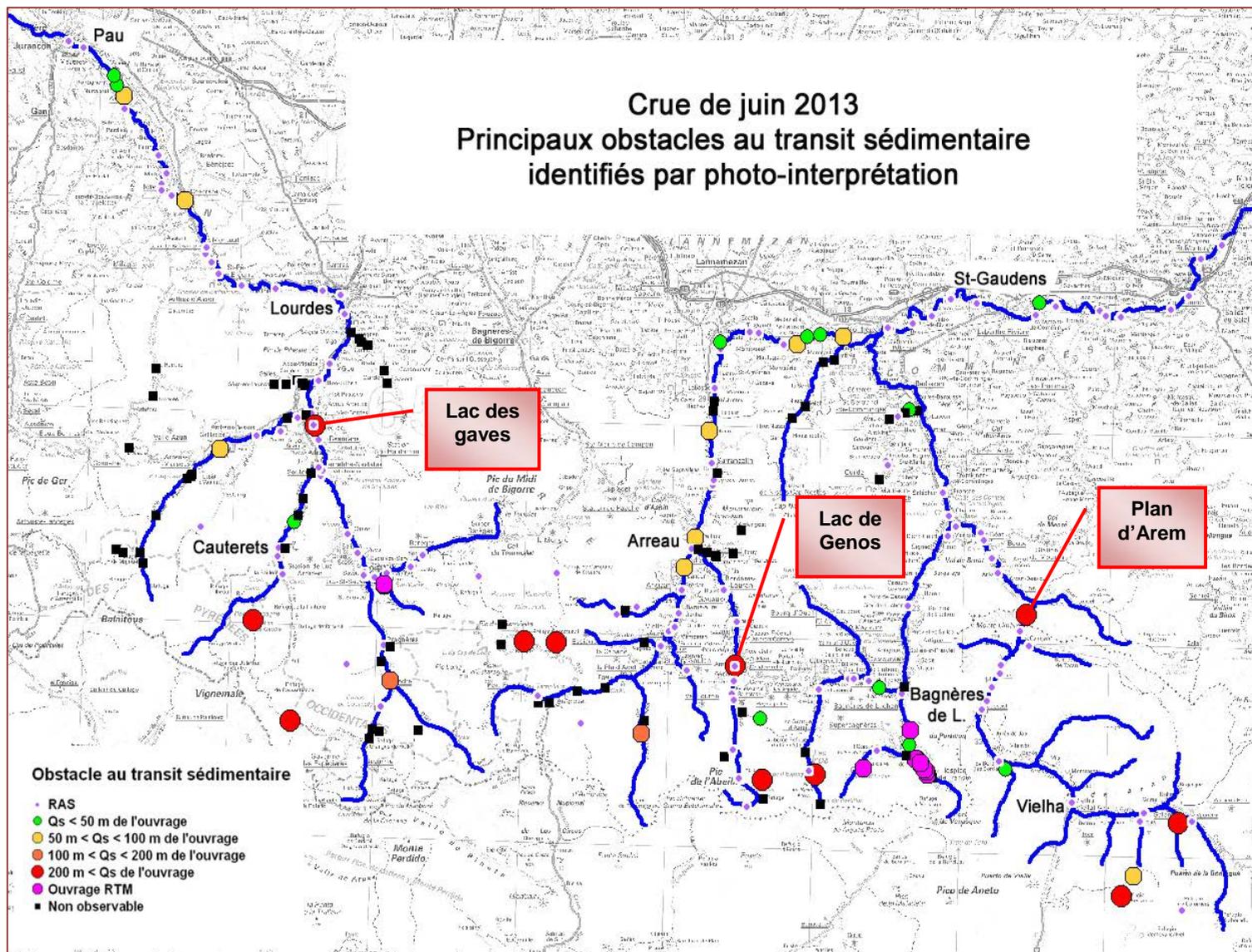


La Garonne à Arlos (31) – Succession d'une berge érodée et d'une zone de sédimentation de galets à moins de 100 m – source EDF



D'une manière générale, la production primaire, issue directement des versants et des torrents semblent avoir moins contribué au charriage que les lits mineurs et majeurs des portions où la bande active a été fortement voire totalement sollicitée. Ce sont ainsi des stocks d'alluvions plus anciennes, correspondant probablement à la dernière crue morphogène de même emprise, qui ont été mobilisés.

Les contributions respectives des crues de 2012 et 2013 n'ont pu être différenciées. Cependant, plusieurs observations postérieures à la crue de 2012 mais antérieures à celle de 2013, indiquaient la présence d'abondantes quantités de matériaux sur certaines portions de cours d'eau, parmi les plus touchées par la première de ces deux crues.



4.4.3 – Principaux obstacles anthropiques à la continuité du charriage

La photo-interprétation des images satellitaires ou aériennes constitue un support limité pour ce type d'analyse. En fonction des ombres portées (versants, forêts), du couvert végétal, de l'étranglement des cours d'eau ou encore du niveau d'eau dans les plans d'eau ou les retenues d'ouvrages, les observations concernant les zones de sédimentation des alluvions charriées ne sont pas toujours possibles.

Cependant, trois types d'ouvrages anthropiques ont pu constituer des obstacles significatifs vis-à-vis de la continuité du charriage de fond, lors de la crue de juin 2013 (voir cahiers géographiques) :

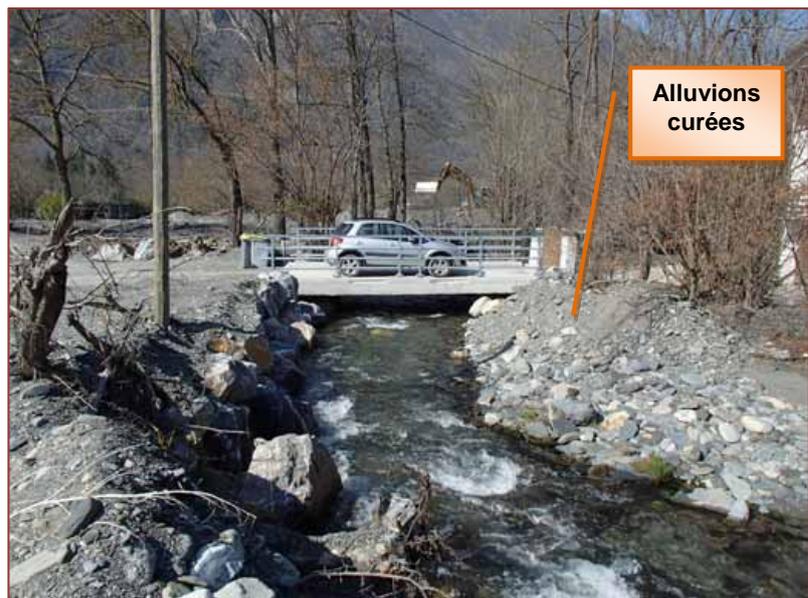
- Les ponts sous-capacitaires ;
- Les retenues amont d'ouvrages transversaux (barrage, seuil) ;
- Les ouvrages de sédimentation (plage de dépôt RTM).

☞ Les ouvrages de **franchissement sous-capacitaires** se sont mis en charge ou ont permis la formation d'embâcle. Le relèvement de la ligne d'eau et l'atténuation de la pente hydraulique en amont ont favorisé la sédimentation des nappes de charriage.

Bastan - Dépôt d'une nappe de charriage consécutif à la mise en charge du pont d'Esterre (65) – source DDT65

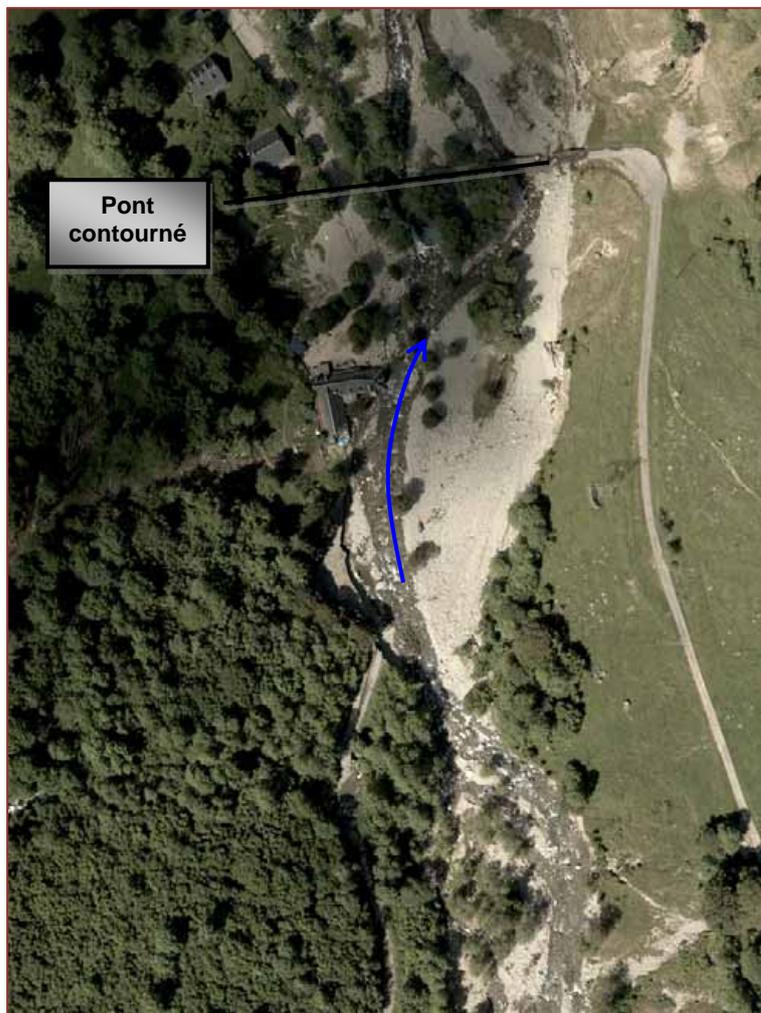


Cône de la Mousquère à Bourisp (65) – Dépôt d'alluvions curées, en amont d'un franchissement sous-capacitaire (GéoDiag)



A leur tour, ces dépôts ont pu accentuer les débordements ou la mobilité latérale, en provoquant un brusque encombrement du chenal d'écoulement et, parfois, favoriser ou provoquer le contournement de l'ouvrage.

Neste d'Oô – Obstruction et contournement du pont – dépôt d'une nappe de charriage en amont – source EDF



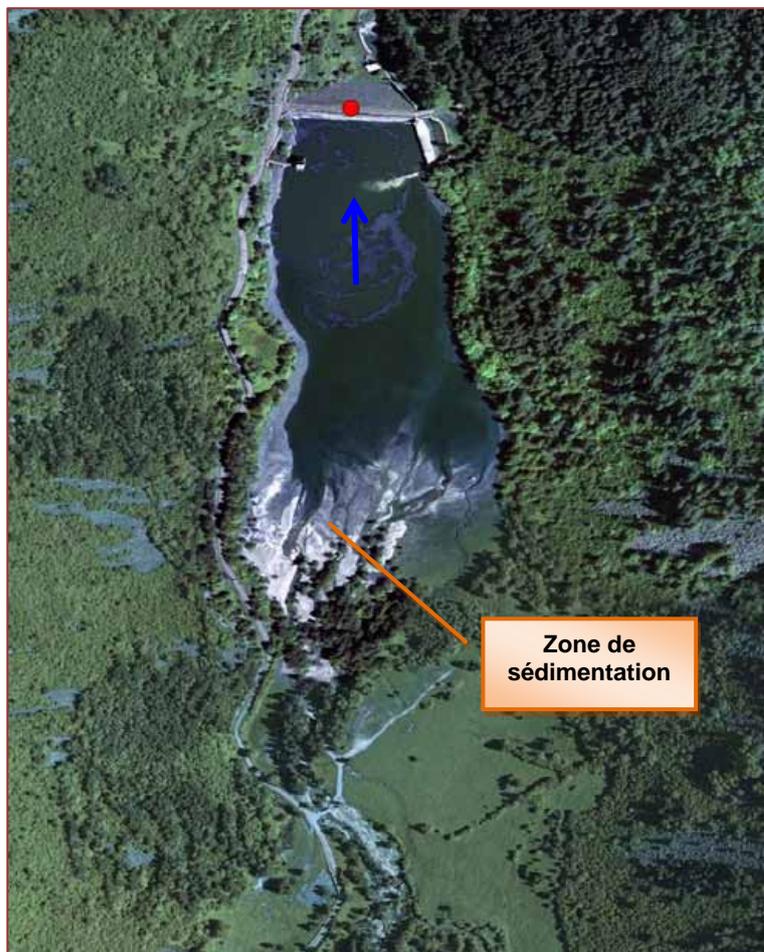
Dans certains cas, des seuils transversaux ont joué le même rôle, notamment lorsqu'ils ont permis la formation d'un embâcle. Le seuil de Calypso sur le gave de Cauterets (65) ou celui de la prise d'eau de Ravi (31), sur la Pique, illustrent ce cas de figure.

Prises d'eau de Calypso (à droite) et de Ravi (à gauche – source RTM)



☞ Les **retenues amont d'ouvrages** hydrauliques modifient la pente hydraulique et constituent des plans d'eau propices à la sédimentation. Plus elles sont longues, plus leurs impacts sur l'interruption du charriage de fond sont sensibles et marqués.

Sédimentation dans une retenue de barrage sur un affluent de la Garonne, val d'Aran – source ICC, 2013



Sur l'ensemble des ouvrages ayant pu être analysés par photo-interprétation (192), ressortent 13 ouvrages RTM associés à des plages de sédimentation mises en place sur la Pique ou ses affluents et autant d'autres ouvrages dont les impacts semblent importants.

Concernant ces derniers, ils sont principalement implantés en montagne et contrôlent donc des bassins versants de haute altitude et de superficie faible à modeste.

Les trois ouvrages qui apparaissent comme les plus impactants, du fait de leur rôle d'obstacle, d'une part, et de la taille du bassin versant amont qu'ils contrôlent sont :

- Le **plan d'Arem** (31), sur la Garonne, qui contrôle tout le bassin de la Garonne espagnole ;
- Le **lac de Genos** (65), sur la Neste du Louron ;
- Le **lac des gaves**, sur le gave de Pau (65), qui contrôle les apports en alluvions issus du Bastan, du gave de Gavarnie et du gave de Cauterets.

Sur la Garonne hydroélectrique, en aval de la confluence avec le Salat, cette crue confirme le blocage des apports grossiers par la retenue du barrage de BousSENS (St-Vidian) et le décapage des alluvions encore présentes en aval immédiat des ouvrages.

Garonne – plan d'Arem – zone de sédimentation grossière en amont de la retenue – source Pléiades, 2013

La retenue du plan d'Arem accentue le blocage des nappes de charriage en provenance de la Garonne espagnole. Lors de la crue, sa vidange a également libéré un volume important d'alluvions fines qui se sont déposées sous forme de **boue** sur les zones inondées.

Au sein des tronçons court-circuités, ces dépôts de matières en suspension favorisent la **cimentation des bancs** de galets, d'une part, et le développement de la végétation ligneuse, d'autre part.

Ces impacts accélèrent et renforcent la fixation des bancs, ce qui accroît encore les perturbations sur la continuité du transport solide par charriage.



Boue déposée par la crue de la Garonne dans le bourg de St-Béat (31)



Travaux de curage du lac de Genos, en avril 2014 (GéoDiag)



**Le gage de Pau à Beaucens –
Comblement du lac des gaves
par piégeage des alluvions –
source DDT65**

Déjà amorcé par la crue d'octobre 2012, le comblement du lac des gaves est estimé à environ 80 %, suite à celle de juin 2013.

Les matériaux charriés le plus en aval de la retenue proviennent de ceux déjà présents et de l'érosion de la berge rive droite, par contournement du seuil de Beaucens et destruction du parking (volume total estimé entre 60 et 80 000 m³).

Les autres matériaux proviennent des érosions de berge de la rive gauche, en amont du seuil de Beaucens, qui ont pu fournir entre 120 et 140 000 m³ d'alluvions.

Ces dépôts ont conduit à une forte réduction de la hauteur de chute, en aval du seuil.



Seuil (flèche rouge) de Beaucens (65), en amont du lac des gaves – Contournement de l'ouvrage et érosion du parking (double flèche rouge) – source GéoDiag



Seuil (flèche rouge) de Beaucens (65), en amont du lac des gaves – hauteur de chute résiduelle après comblement partiel du lac – source GéoDiag



☞ Les **plages de dépôts** (RTM) ont pour vocation de stocker les matériaux charriés par les crues morphogènes.

Sur les affluents de la Pique (31), les ouvrages ont pleinement fonctionné. Certains sont cependant comblés et n'ont plus de capacité de stockage leur permettant d'atténuer les effets d'une nouvelle crue morphogène.

En aval de ces ouvrages, des zones d'érosion importantes sont constatées, notamment sur des zones de confluence à moindre pente, comme sur le pla de Ravi ou au niveau de l'auberge du Lys.

Sur l'Yse, en amont de Luz-St-Sauveur (65), les ouvrages constituant la plage de dépôts ont été détruits par la crue, libérant le charriage vers l'aval. Dans ce cas, ce sont les franchissements sous-capacitaires qui ont largement contrôlé les conditions de sédimentation des alluvions charriées, dont le volume serait de l'ordre de 50 à 60 000 m³.

4.5 – Typologie morpho-fonctionnelle des cours d'eau

Comme le montre les analyses décrites précédemment, pour une même crue, les réponses morphologiques diffèrent d'une portion à l'autre d'un même cours d'eau ou selon le (sous-) bassin versant considéré.

Dans le cas de la crue de juin 2013, l'éloignement par rapport aux zones les plus touchées par la pluie génératrice et/ou par la fonte nivale, d'une part, et la pente longitudinale du cours d'eau (voir cahiers géographiques) et du fond de vallée, d'autre part, constituent des paramètres de contrôle prépondérant.

L'encaissement du fond de vallée ainsi que l'épaisseur et l'extension du plancher alluvial sont également des paramètres importants pour expliquer les réponses morphologiques observées.

L'ensemble de ces facteurs, essentiellement géologiques et topographiques, permettent d'établir une **typologie morpho-fonctionnelle** sommaire des cours d'eau étudiés. A son tour, celle-ci permet de prédéfinir les processus les plus attendus et les principaux facteurs de contrôle à prendre en compte (voir carte et tableau ci-après).

Elle aide également à déterminer l'importance fonctionnelle ou spatiale des espaces exposés lors des crues majeures et pouvant jouer le rôle de zones tampons pour :

- L'expansion des crues en lit majeur ;
- le stockage sédimentaire ;
- La mobilité latérale.

Torrents primaire (à droite) et secondaire



Rivière en tresses de vallée intramontagnarde

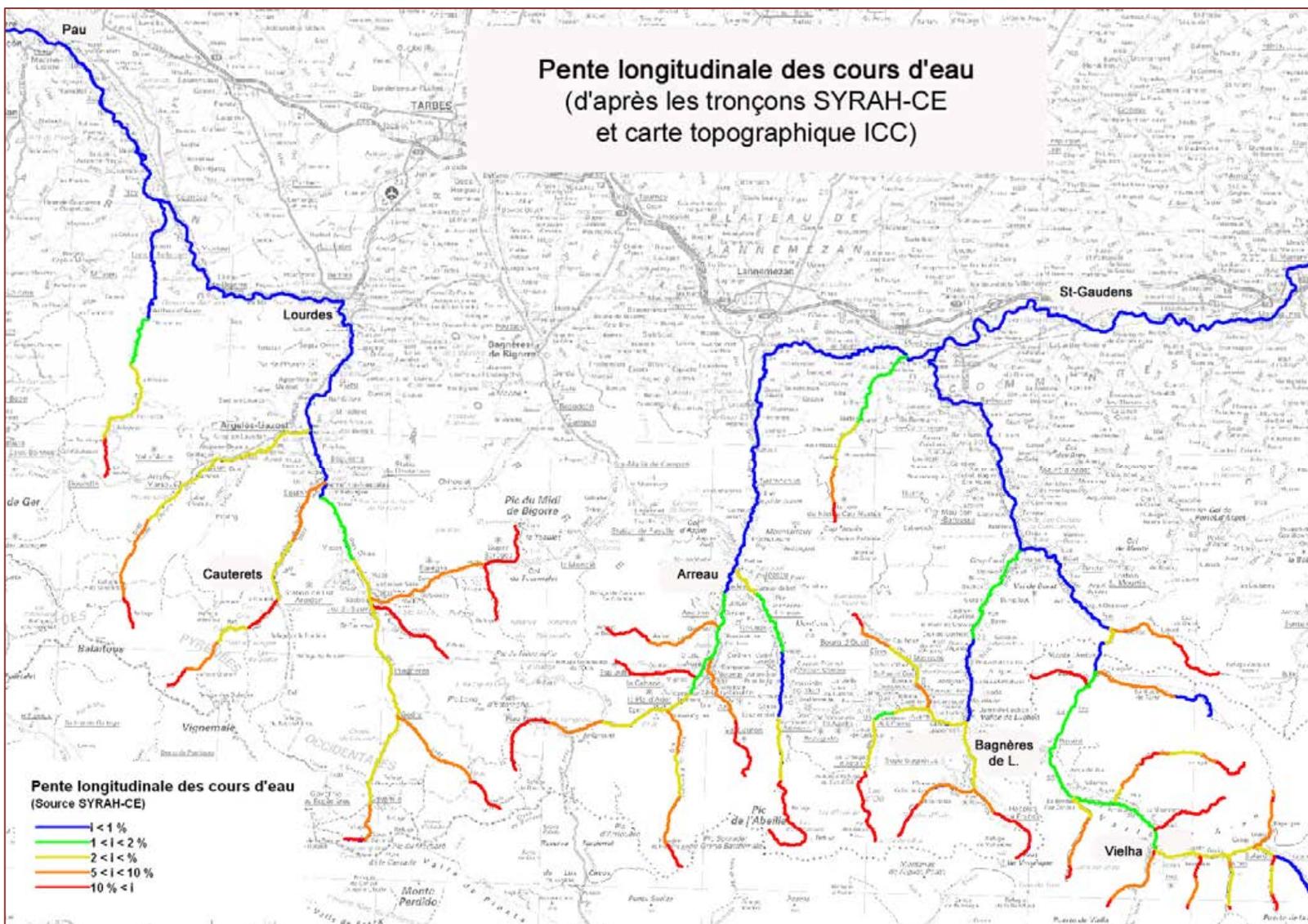


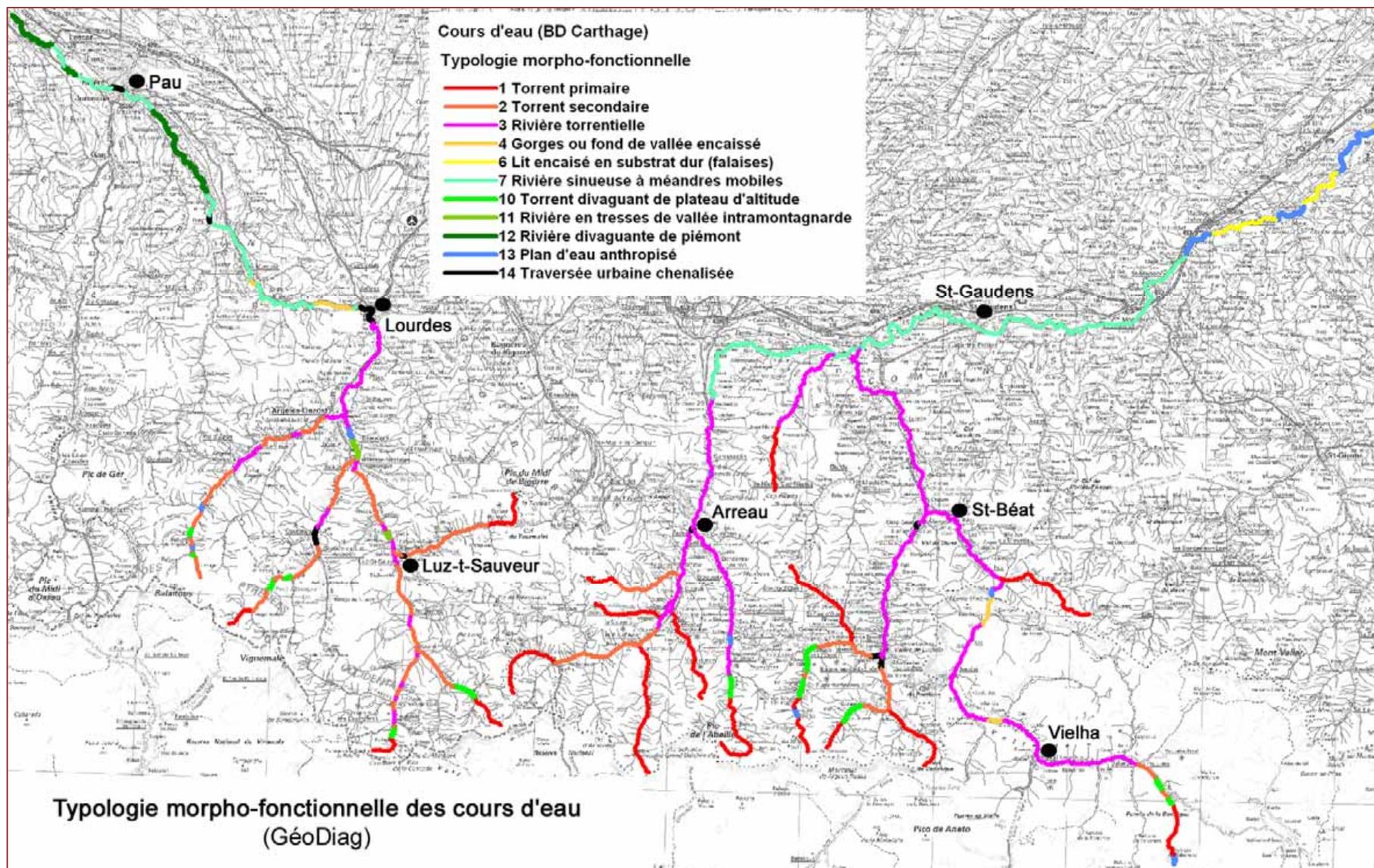
Rivière sinueuse à méandres mobiles



A noter que, du point de vue des écoulements et des processus dynamiques associés, le caractère torrentiel des cours d'eau des vallées intramontagnardes se prolonge au-delà des principales ruptures de pentes, du fait d'une inertie mais également des confluences avec des cours d'eau à forte pente.

Cette typologie sert de cadre pour présenter les principaux processus morphodynamiques et les évolutions observés sur les bassins versants étudiés, qui sont décrits au chapitre suivant.





Description simplifiée des cours d'eau selon la typologie morpho-fonctionnelle

| Typologie morpho-fonctionnelle des cours d'eau | | sig | Débordement | | | Mobilité latérale | | | Apports sédimentaires | | | | Affleurements rocheux | | | |
|--|---|-----|-------------|------------|---------|-------------------|-------------|----------|-----------------------|-----------------------|------------------|----------|-----------------------|-------------|-----------|------|
| | | | nul | discontinu | continu | nulle | discontinue | continue | versants | affluents torrentiels | autres affluents | Falaises | continus | discontinus | ponctuels | nuls |
| Torrents | primaire | 1 | 1 | | | 1 | | | 1 | 1 | | | 1 | | | |
| | secondaire | 2 | | 1 | | | 1 | | 1 | 1 | | | | 1 | | |
| | secondaire (cône de déjection) | 2c | | | 1 | | | 1 | | 1 | | | | | 1 | |
| | rivière torrentielle | 3 | | 1 | | | 1 | | 1 | 1 | | | | 1 | | |
| Gorges non torrentielles ou cours d'eau encaissé | fond de vallée en V | 4 | 1 | | | 1 | | | 1 | 1 | 1 | | 1 | | | |
| | encaissé en substrat tendre | 5 | | 1 | | | 1 | | | | 1 | | | 1 | | |
| | encaissé en substrat dur | 6 | 1 | | | 1 | | | 1 | | 1 | | 1 | | | |
| Rivière à méandres | rivière sinueuse mobile | 7 | | | 1 | | | 1 | | | 1 | | | | | 1 |
| | rivière sinueuse stable | 8 | | | 1 | 1 | | | | | 1 | | | | | 1 |
| | rivière très sinueuse / tortueuse | 9 | | | 1 | 1 | | | | | 1 | | | | | 1 |
| Rivière divagantes | rivière en tresses de plateau d'altitude | 10 | | | 1 | | | 1 | | | 1 | | | | 1 | |
| | rivière en tresses de vallée intramontagnarde | 11 | | | 1 | | | 1 | | | 1 | | | | 1 | |
| | rivière divagante de piémont | 12 | | | 1 | | | 1 | | | 1 | | | | | 1 |
| Autres | plan d'eau artificiel | 13 | | | | | | | | | | | | | | |
| | traversée urbaine chenalisée | 14 | | | | | | | | | | | | | | |

5 – Processus morphodynamiques et facteurs aggravants

En plus des écoulements liquides et du transport solide, ce type de crue met en lumière certains processus de la dynamique fluviale ou torrentielle et permet de caractériser le rôle aggravant de certains facteurs ou configurations.

Cette analyse s'appuie sur des études de cas mais ne prétend pas être exhaustive.

5.1 – Les verrous hydrauliques

5.1.1 – Définition du verrou hydraulique

☞ Verrou géologique

En zone de montagne, les différences de résistance à l'érosion des formations rocheuses dégagent des zones plus étroites, au long des fonds de vallée torrentielle ou glaciaire.

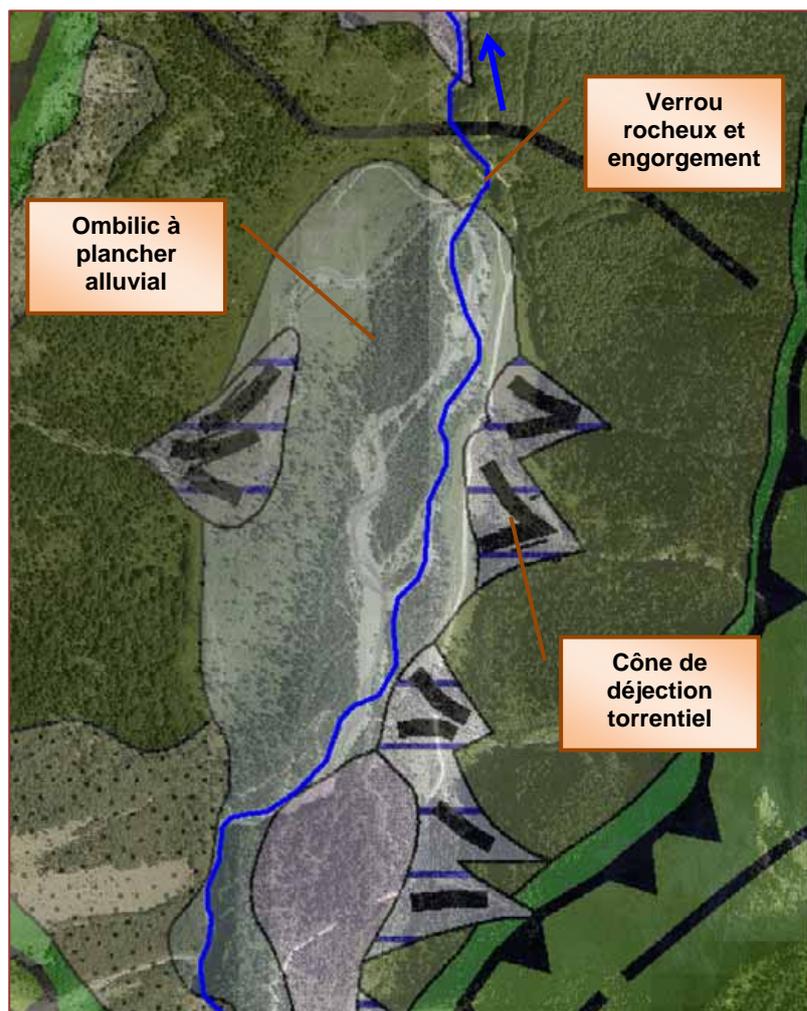
Ces resserrements constituent des **verrous géomorphologiques** dont les impacts hydrauliques sont particulièrement sensibles lors des crues importantes. Ils correspondent à une diminution marquée de la largeur de l'espace disponible pour les écoulements (champ d'inondation, lit majeur) et à une rupture de pente dans le profil en long.

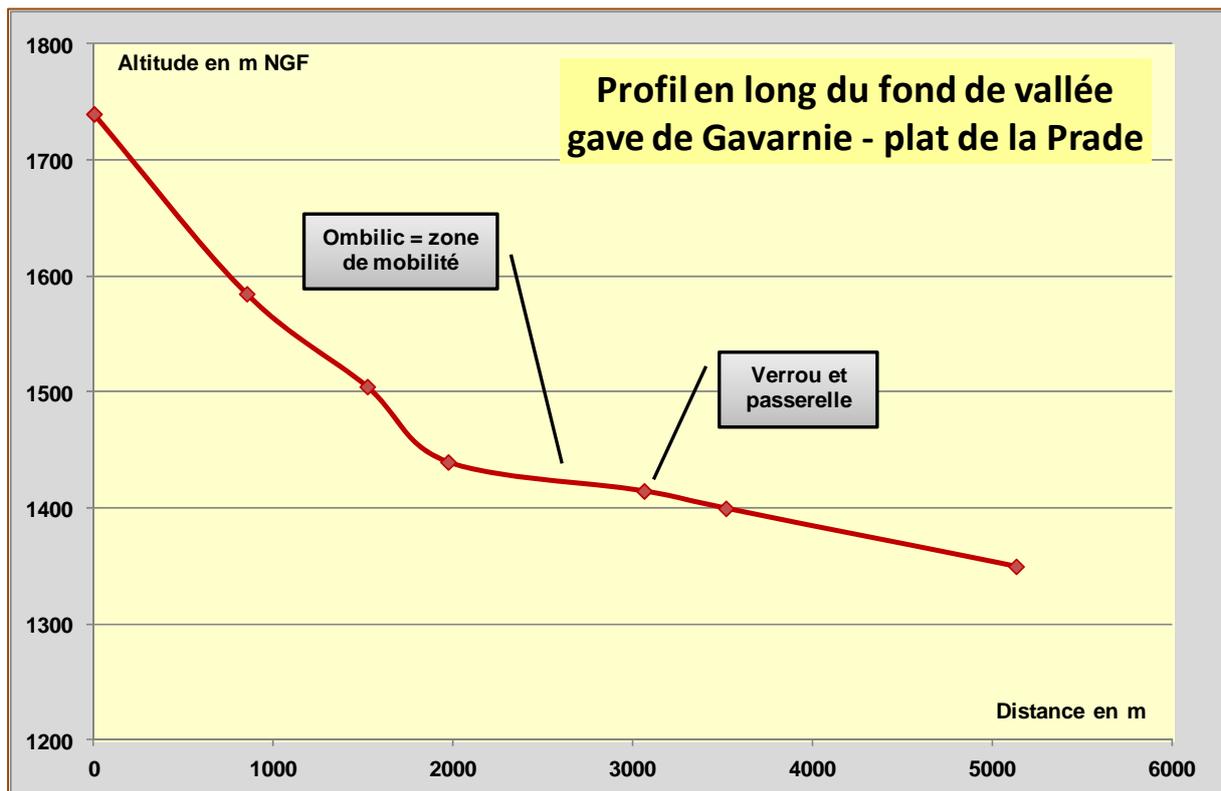
En amont, ils sont généralement précédés par un **ombilic**, cuvette topographique large, tapissée d'alluvions glaciaires ou fluviales, au sein duquel le cours d'eau en crue peut déborder ou être mobile latéralement.

Ainsi, l'ombilic situé en amont d'un verrou constitue une **zone tampon** propice à l'expansion, voire à l'écrêtement naturel, des inondations, au ralentissement des écoulements et au dépôt des sédiments charriés et des bois flottés (chablis, embâcle).

Vers l'aval, ils peuvent déboucher sur une zone de gorges, plus ou moins étroites et encaissées, ou sur un nouvel ombilic.

Verrou du plat de La Prade à Gavarnie (65) – sources BD-Ortho IGN et SCAN-Géol BRGM





Plat de la Prade, Gavarnie (65) - Verrou et passerelle vus depuis l'aval



☞ Verrou anthropique

Tout aménagement (remblai, etc.), bâtiment ou ouvrage transversal au fond de vallée conduisant à un resserrement de la largeur disponible pour les écoulements et/ou à une mise en charge constitue un verrou sur le plan hydraulique.

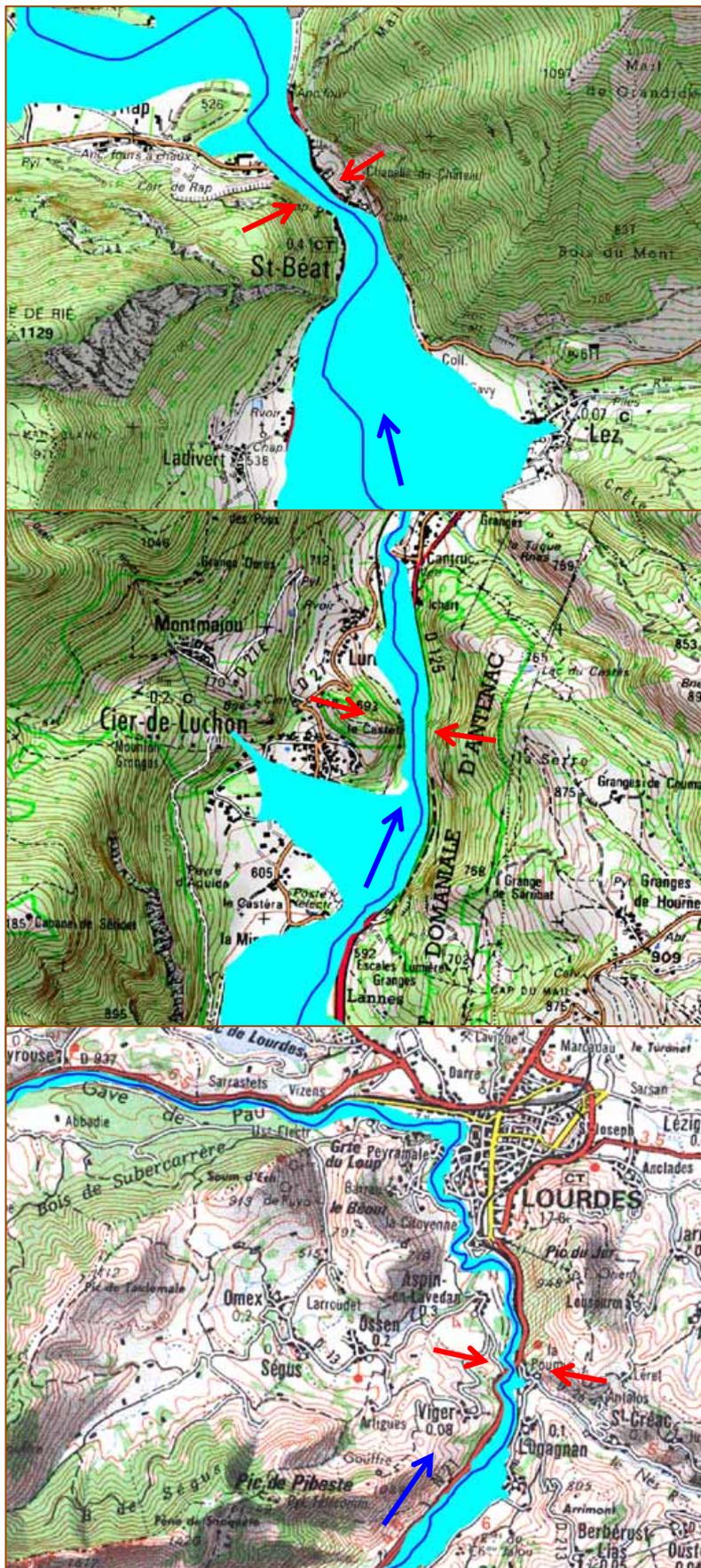
Comme un verrou géomorphologique, pour un niveau de crue donné, il peut provoquer un effet retenue en amont, équivalent à une sur-inondation par rapport à la configuration naturelle, et à une accélération vers l'aval, liée à l'existence d'une perte de charge.

Verrous géologiques et resserrement du lit majeur (trame bleue) de la Garonne à St-Béat (31), de la Pique à Cier-de-Luchon (31) et du gave de Pau à Lourdes (35) – source Scan 25, IGN et CIZI, DREAL Midi-Pyrénées

En domaine torrentiel, la plupart des verrous sont mixtes, un aménagement anthropique venant renforcer la restriction de la section d'écoulement déjà imposée par la géologie.

En effet, de nombreux ouvrages de franchissement (passerelle, pont, etc.) ont été implantés sur ces singularités géomorphologiques, afin de réduire la portée de l'ouvrage.

Des ouvrages hydrauliques, seuils ou barrages, privilégient également ce type d'implantation, notamment pour profiter de la capacité de la retenue, en amont, et de la perte de charge, en aval.



Exemples de verrous hydrauliques mixtes :

*Le Bastan à Barèges (65) –
Versant et bâtiment*



*Le Bastan à Viey (65) –
Affleurement rocheux et
route départementale
protégée*



*Le Bastan à Luz-St-Sauveur
– Cônes de déjection bâtis et
pont – (source DDT65)*



5.1.2 – Mise en charge et perte de charge des écoulements

Du fait de la restriction de la section d'écoulement, lors des crues débordantes, les verrous peuvent se mettre en charge.

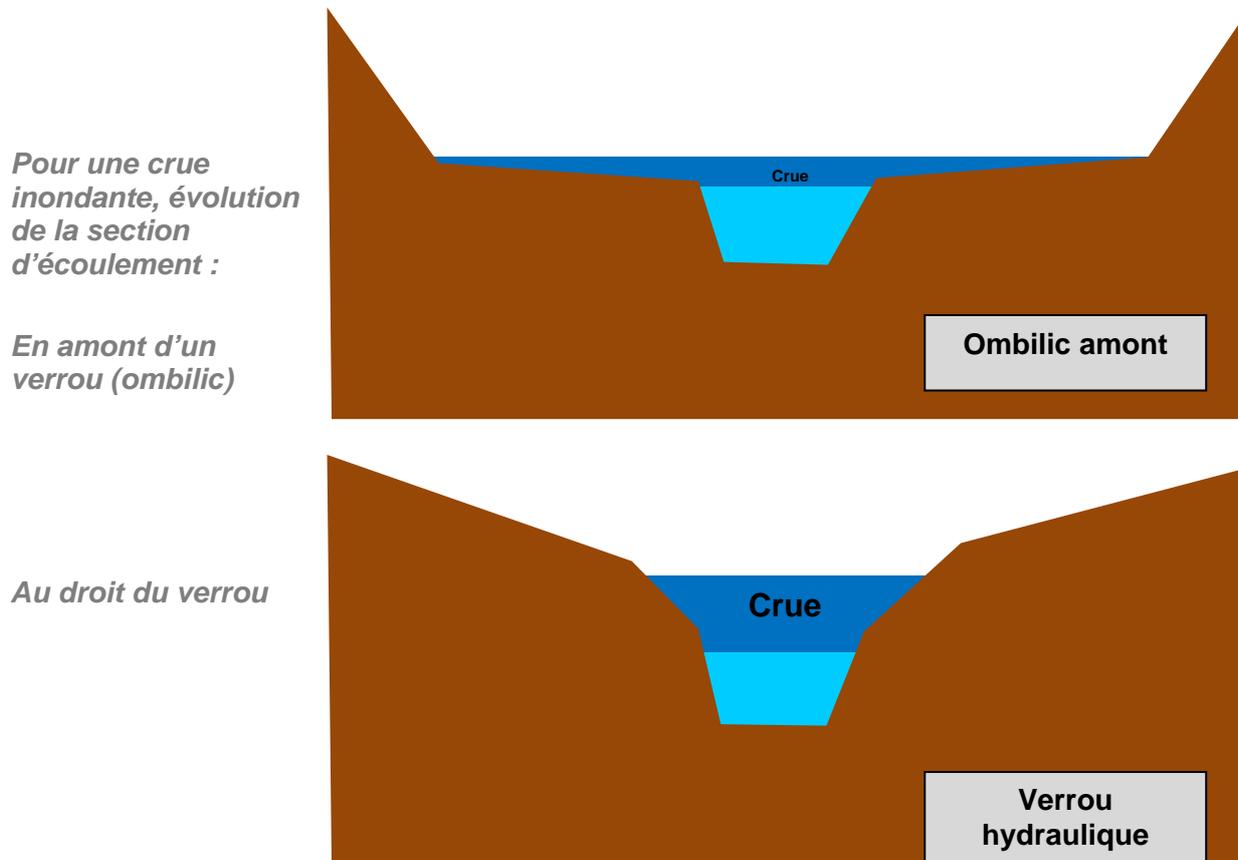
☞ En amont, la pente hydraulique est alors réduite, la ligne d'eau rehaussée et les débordements facilités. Cet **effet retenue** peut également s'accompagner d'une forte diminution de la capacité de charriage des alluvions grossières.

Les nappes de charriage sédimentent, conduisant ainsi à un encombrement du lit, voire à une rehausse supplémentaire de la ligne d'eau. L'étalement de l'inondation s'en trouve accentué ainsi que la mobilité latérale du cours d'eau, qui peut aboutir à des changements brutaux de lit (divagation).

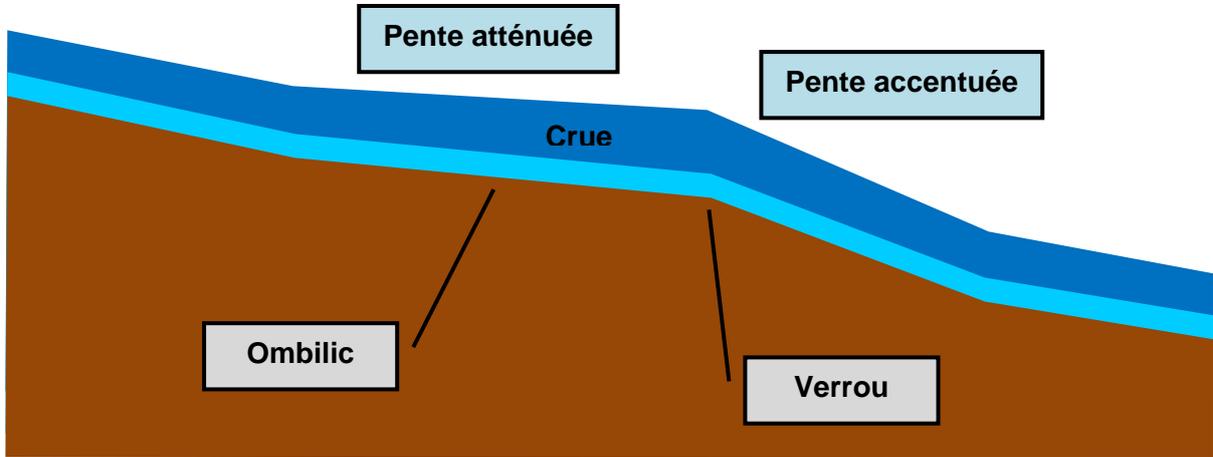
☞ Au droit du verrou, la **perte de charge** conduit à un accroissement local de la pente hydraulique et à une accélération des écoulements vers l'aval. Généralement plus concentrés, ces derniers acquièrent donc une capacité d'érosion et de transport plus élevée.

Renforcé par le fait que les alluvions charriées se sont déposées en amont, ce processus provoque une aggravation des phénomènes érosifs, au droit et en aval immédiat du verrou. L'érosion latérale étant limitée du fait de la résistance des berges, rocheuses ou confortées, l'érosion verticale est favorisée pouvant conduire à l'**incision** du lit.

La profondeur de celle-ci dépend directement de l'épaisseur du plancher alluvial présent en fond de lit, de la résistance du substratum rocheux et/ou de celle d'aménagements mis en place pour stabiliser le profil en long (seuil de fond, radier bétonné, etc.).



Pour une crue inondante, évolution de la ligne d'eau et de la pente hydraulique au droit d'un verrou



La Garonne au pont de Fronsac (31)



Dans le cas d'un plancher alluvial recouvrant une roche mère résistante, l'incision peut détruire le pavage, décaper toute l'épaisseur d'alluvions et mettre le substratum à nu.

A son tour, cette incision peut être à l'origine d'une érosion verticale régressive qui peut remonter en amont du verrou. Ce processus peut conduire à l'affouillement des ouvrages et des aménagements présents en travers du lit ou sur les berges.

La Neste d'Aure à Grézian (65) – Sur la zone tampon située en amont du verrou géologique, la Neste s'est étalée et a déposé les alluvions charriées et des chablis – (sources DREAL M-P, en haut et DDT65, en bas)



☞ Sur la **zone tampon située en amont du verrou**, la crue peut s'étaler, les débordements, la sédimentation des alluvions charriées et le dépôt des chablis sont favorisés. Cela réduit d'autant le volume (liquide + solide) à faire transiter au niveau du verrou ainsi que le risque de formation d'embâcle au droit de celui-ci ou des ouvrages transversaux qui y sont implantés.

En revanche, le risque de contournement du verrou, par inondation et/ou mobilité latérale, est accru, surtout si la morphologie de celui-ci est dissymétrique et la résistance des rives contrastée. Le contournement de nombreux ouvrages est souvent lié à ces processus.

Ces **zones tampons**, sujettes aux inondations, sont propices à la divagation du cours d'eau et à l'accumulation de dépôts sédimentaires en grands volumes. Etant utilisées seulement lors des crues importantes, leur occupation du sol et les aménagements pour les protéger contre les risques fluvio-torrentiels y sont en constante évolution. Celle-ci peut altérer leur rôle **d'espace de respiration** et renforcer la dynamique des crues vers l'aval.

Bastan au pont de Sers (65) – le verrou a été contourné par la gauche et a favorisé la sédimentation des alluvions charriées, en amont - (source DDT65)



Le Bastan au pont de Luz-Esquièze (65) – le verrou a favorisé l'inondation en rive gauche, la mobilité et la sédimentation des alluvions charriées, en amont - (source DDT65)



5.2 – Les principaux effets hydrauliques et morphodynamiques liés aux points durs

Dès lors que les écoulements des cours d'eau en crue ne sont pas totalement libres, en lit mineur comme en lit majeur, de multiples configurations naturelles ou anthropiques peuvent constituer autant de **points durs ou saillants**.

Ces derniers provoquent des effets hydrauliques et morphodynamiques particuliers qui peuvent expliquer le fait que certaines zones aient été touchées ainsi que la nature et l'ampleur de nombreux dégâts.

Cette crue permet d'illustrer notamment :

- L'effet tremplin ;
- L'effet glissière ;
- L'effet toboggan ;
- L'effet défecteur ou ping-pong.

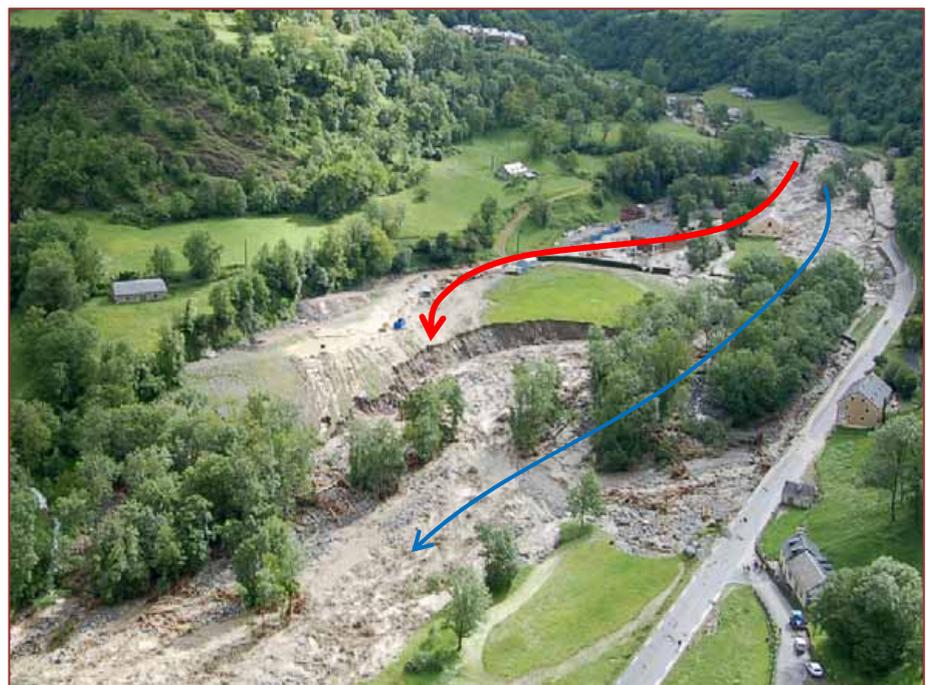
5.2.1 - L'effet tremplin

Certains verrous ou points durs peuvent favoriser le débordement en amont. La partie du lit majeur ainsi emprunté peut présenter une pente longitudinale plus faible que la portion de cours d'eau contigüe.

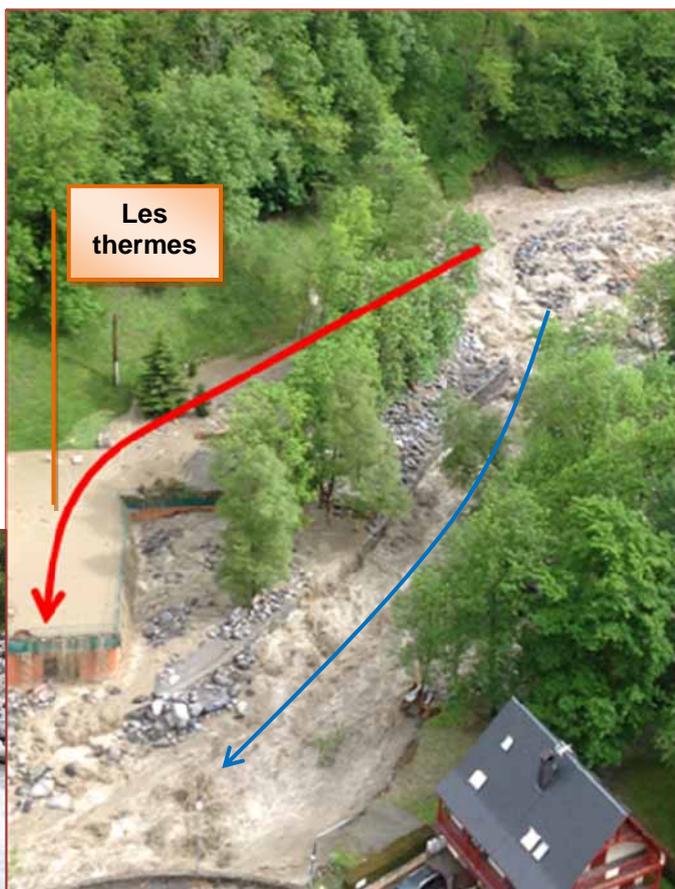
Ainsi, à leur restitution au cours d'eau, les eaux débordées se déversent avec une hauteur de chute. Au droit de celle-ci, les vitesses sont élevées et, si le talus concerné n'est pas suffisamment résistant, une érosion verticale régressive peut s'enclencher.

Si celle-ci se propage jusqu'au point de débordement amont, la section d'écoulement du chenal de crue peut devenir suffisante pour conduire à la divagation du cours d'eau.

Le Bastan à Vieux (65) – le débordement en amont a inondé une terrasse en partie remblayée (décharge). A la restitution le talus a subi une érosion verticale régressive, en plus de la mobilité latérale



Le Bastan à Barèges (65) – le débordement dans le méandre amont a conduit à la submersion et à l'engravement des thermes de Barzun, malgré l'endiguement conçu pour les protéger (sources DDT65, en haut et CNRS-Géode, en bas)



La Neste d'Aure à Arreau (65) - Effet tremplin conduisant à la submersion d'un parc urbain (source R. Alberny)



Le Bastan à Esterre (65) – zone de rupture de pente propice à l'érosion verticale régressive en lit majeur



Le Bastan à Esquièze (65) – divagation sur le cône torrentiel, fronts d'érosion verticale régressive (flèches roses) amorçant la formation de nouveaux chenaux (source DDT65)



5.2.2 - L'effet glissière

Certaines portions de berge artificielles ou rocheuses, résistent mieux à l'érosion qu'une berge naturelle constituée d'alluvions. Elles peuvent également être moins rugueuses qu'une berge naturelle boisée.

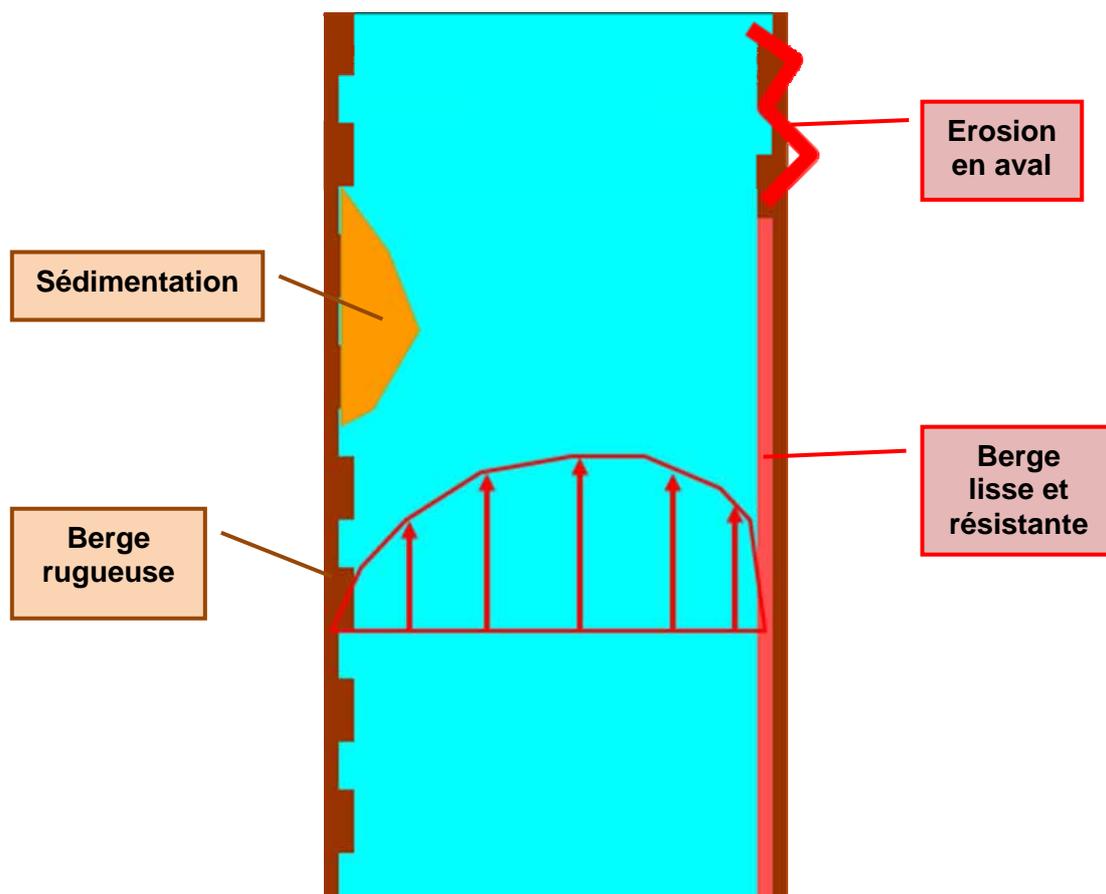
Plus le **contraste de résistance ou de rugosité** est important entre deux berges en vis-à-vis, plus le gradient de vitesse sera accentué au profit de la berge la plus lisse ou résistante.

De ce fait, pour un même débit liquide, une configuration contrastée conduit à une plus grande concentration des écoulements le long de la berge la moins rugueuse. Celle-ci subit une accélération localisée des écoulements, renforçant ainsi leurs capacités érosives.

Le long de la berge opposée, les conditions sont alors plus propices à la sédimentation, ce qui, à terme, peut encore accentuer le contraste morphologique entre les deux berges.

Il en résulte fréquemment que, en aval d'une portion de berge protégée, l'érosion et la mobilité latérale sont plus actives. Cette dynamique est d'autant plus intense que le contraste de résistance est marqué et que la berge non protégée est naturellement sensible (alluvions, absence de systèmes racinaires denses, etc.).

Gradient de vitesse d'écoulement en fonction de la rugosité des berges



Ces processus mettent en évidence l'efficacité limitée de certaines protections de berge, notamment si elles sont ponctuelles. Elles ont également pu conduire à l'endommagement

(affouillement, etc.) voire au contournement des protections elles-mêmes ou d'ouvrages transversaux, comme le seuil de Beaucens (gave de Pau, 65).

La Garonne en val d'Aran (Espagne) – démantèlement et contournement d'un enrochement (source SMEAG)



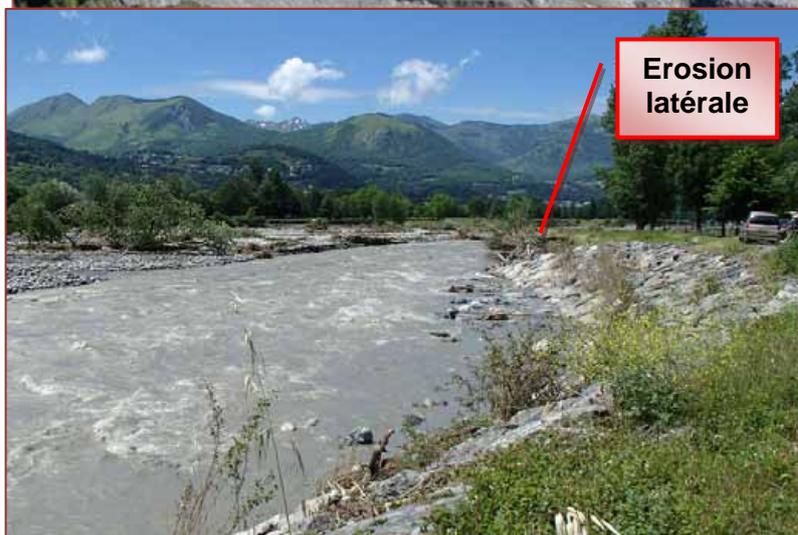
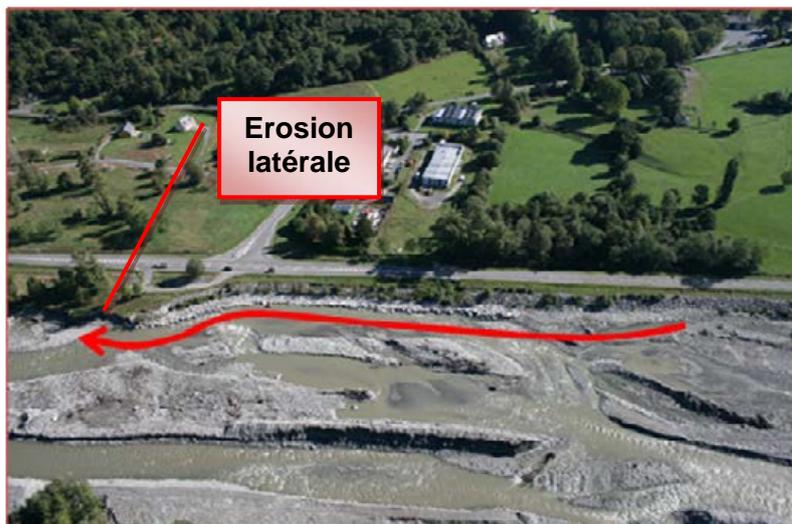
La Garonne à Fos (31) – démantèlement et début de contournement d'un enrochement (source SMEAG)



Le gave de Gavarnie à Saligos (65) – Erosion latérale, à l'aval immédiat d'une protection de berge en enrochement



Le gave de Pau à Beaucens (65) – Erosion latérale, à l'aval immédiat d'une protection de berge en enrochement (source DDT65, en haut)



Le gave de Pau à Nay (64) – Erosion latérale, à l'aval immédiat d'une protection de berge en enrochement (source SIGAP)



5.2.3 - L'effet toboggan

Comme les verrous hydrauliques certains ouvrages transversaux peuvent créer une perte de charge favorisant des accélérations des écoulements et des érosions en aval.

Au niveau de la zone de dissipation, cela peut conduire au décapage des bancs alluviaux ou du plancher alluvial, à l'affouillement ou à l'érosion latérale des berges.

Ces processus sont particulièrement visibles en aval d'ouvrages hydroélectriques.

La Garonne au Plan d'Arem (Fos, 31) – décapage en aval du barrage (source ONEMA)



La Garonne à Pontis-Rivière (31) – décapage en aval du barrage (source ONEMA)



Ils sont à l'origine d'instabilités de berge ou de falaise et de dégâts qui peuvent être importants, notamment au niveau des infrastructures riveraines.

*La Garonne à Gensac (31) –
décapage en aval du
barrage (source GéoDiag)*



*Le gave de Pau à Bétharam
(64) – décapage en aval du
barrage (source SIGAP)*

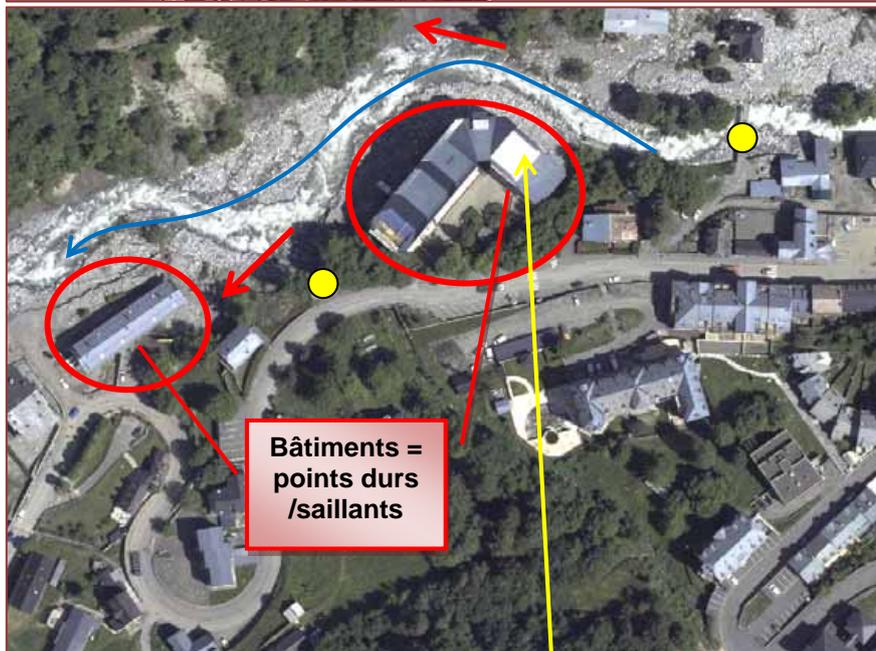


5.2.4 - L'effet déflecteur ou ping-pong

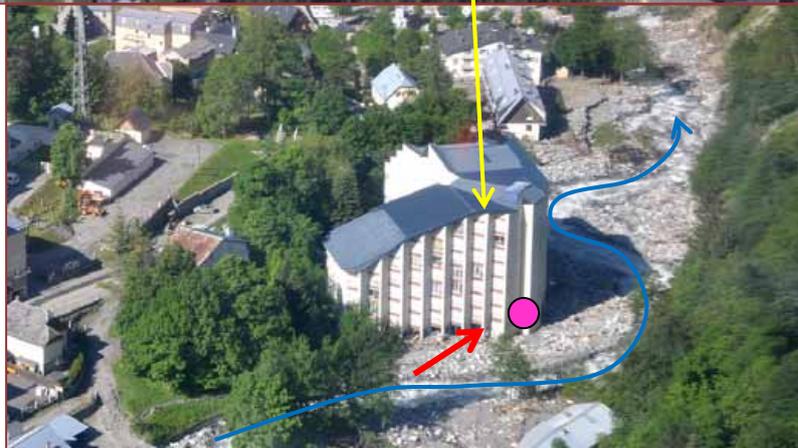
Certains points durs peuvent dévier les écoulements en crue, surtout s'ils sont en saillie par rapport au trait de berge. Ils renvoient ainsi les courants et la force érosive en aval ou sur la rive opposée, à la manière de déflecteurs.

Dans certaines configurations, cela conduit à un véritable jeu de ping-pong (ou de flipper), comme ce fut le cas sur le Bastan, dans la traversée de Barèges (65). En rive droite, le versant rocheux, parfois doublé d'un confortement de pied, a renvoyé les flux vers la rive gauche, la plus urbanisée. Sur celle-ci, les bâtiments construits au sein de la bande active, souvent contrainte par des protections de berge, ont pu renvoyer les flux vers la rive droite et y accroître les instabilités de pied de versant.

Le Bastan à Barèges (65) – Evolution de l'occupation du sol au sein de la bande active – en haut, situation en 1945 (source IGN) – en bas, situation en juillet 2013 (source DDT65/IGN)



Le Bastan à Barèges (65) – le torrent en crue a contourné le bâtiment saillant qui a joué un rôle de déflecteur (source DDT65) – voir photo ci-après



Le Bastan à Barèges (65) – le torrent en crue a contourné le bâtiment saillant, a détruit la protection de berge et érodé le versant en rive opposée



Le Bastan à Barèges (65) – le torrent en crue a contourné les bâtiments saillants et érodé le versant en rive opposée (source DDT65)



Le Bastan à Barèges (65) – le torrent en crue a contourné et engravé ce bâtiment saillant (source Lourdes-Actu)



5.3 – Les boisements et les embâcles

5.3.1 – Rôles et comportement des boisements rivulaires et alluviaux

La ripisylve, implantée sur la berge des cours d'eau, et les boisements alluviaux, implantés sur les bancs de galets ou sur le lit majeur, constituent des facteurs de contrôle du comportement hydrodynamique local du cours d'eau et des berges.

☞ En **strates arbustives souples**, ces boisements peuvent « s'effacer » face aux flux d'eau. En se couchant, ils protègent le terrain sur lequel ils sont implantés et augmentent la **rugosité** de la surface sur laquelle se produit l'écoulement.

Cela contribue à ralentir les écoulements et à filtrer le flux liquide. La sédimentation est favorisée et l'énergie dissipée.

☞ En **strates arborées « rigides »**, ces boisements peuvent constituer de véritables points durs. Tant qu'ils résistent (ou le terrain qui les supporte !) à la force d'arrachement de l'eau, ils contraignent le flux liquide à les contourner et peuvent constituer de véritables **peignes** qui bloquent les bois flottés provenant de l'amont.

En piégeant de nombreux chablis, les boisements alluviaux limitent le risque de formation d'embâcle en aval. Cependant, ils contribuent ainsi à la formation **d'écrans végétaux** ou **d'embâcles** qui deviennent de véritables déflecteurs au fur et à mesure de l'accumulation des bois flottés.

Selon leur localisation par rapport aux enjeux riverains, ces « déflecteurs naturels » peuvent jouer un rôle protecteur ou aggravant vis-à-vis de l'érosion.

*La Garonne à Fos (31) –
Le boisement alluvial
(banc) entraîne la
formation d'un embâcle
qui joue le rôle de
déflecteur (source
ONEMA)*



S'ils sont instables ou que le terrain qui les supportent est érodé, ces boisements fournissent de nombreux **chablis** qui peuvent former des **embâcles**, après avoir été transportés en aval.

Selon la résistance procurée par les systèmes racinaires, d'une part, et la puissance ou la durée de la crue, d'autre part, ces boisements peuvent donc passer d'un rôle d'aide au maintien des berges à celui de facteur aggravant de leur instabilité puis de la formation d'embâcles.

La Garonne à Miramont-de-Comminges (31) – La portion de berge dépourvue de ripisylve a subi une érosion latérale plus marquée (source ONEMA)



La Neste d'Aure à Vielle-Aure (31) – Antérieurement réduite en épaisseur/densité, la ripisylve n'a pas empêché l'érosion de la berge, en rive droite (source DDT65)



Le gave de Pau à Villelongue (65) - Le boisement alluvial a joué le rôle de peigne avant de constituer un véritable déflecteur



Le gavage de Cauterets à Soulom (65) – En peignant les écoulements, le boisement alluvial piège de nombreux chablis, limitant le risque de formation d'embâcles en aval



5.3.2 – Les embâcles

Dans ce contexte torrentiel, la formation d'un embâcle (barrage naturel temporaire) peut avoir deux origines principales :

- Les **culots d'avalanche** qui obstruent le lit du cours d'eau ;
- L'**accumulation de bois flottés** nourrie par les nombreux chablis arrachés aux versants, aux berges ou aux boisements alluviaux.

Dans un premier temps, l'embâcle constitue un nouveau **verrou**, plus ou moins opaque, pouvant retenir les écoulements (effet retenue) ou les contraindre à le contourner (mobilité latérale, divagation).

En amont, l'effet retenue favorise le relèvement de la ligne d'eau et la sédimentation des alluvions charriées, donc les débordements et l'inondation, si le lit mineur n'est pas contraint par des versants pentus.

En cas de rupture ou de contournement, la dynamique de la crue est brusquement accélérée, s'accompagnant d'une **vague de rupture** (avec surcote) et de réajustements morphologiques brutaux (érosion latérale ou incision). A la rupture de l'embâcle, la purge sédimentaire de la retenue temporaire peut brusquement libérer un volume important d'alluvions.

En domaine torrentiel cela contribue à la dissipation de l'énergie du cours d'eau mais également à un **fonctionnement par « bouffées »** et à la destruction du pavage du lit.

La formation des embâcles de bois (ou autres corps flottés) est également favorisée par l'existence de verrous hydrauliques et la présence d'ouvrages transversaux sous-capacitaires pour ce niveau de crue. Elle dépend directement, d'une part, de la taille des arbres flottés (longueur, diamètre, volume du houppier, etc.) et, d'autre part, de la dimension des ouvertures et du tirant d'air résiduel de l'ouvrage pendant la crue.

Le Bastan en amont de Barèges (65) – Un culot d'avalanche a temporairement obstrué le lit pendant la crue (source DDT65)



La Garonne à Fos (31) – L'atterrissement des chablis en lit majeur favorise la formation d'embâcles et contrôle le fonctionnement des chenaux de crue (source ONEMA)



La Garonne à St-Béat (31 – à gauche, source DREAL M-P) et le Bastan à Barèges (65 – à droite) – Formation d'embâcle associée à un pont



Par le jeu des « bouffées », des surverses, des déviations ou de la rupture du pavage, ... les écoulements acquièrent des capacités érosives importantes, en particulier en aval des verrous et au droit des points durs ou des embâcles.

Ces facteurs aggravants, naturels ou anthropiques, sont donc à prendre en compte pour comprendre la dynamique locale des écoulements en crue et ainsi expliquer ou prévoir la nature et l'ampleur des dégâts associés.

Tous ces processus interviennent généralement de manière combinée. Les effets des points durs (de toute nature) sont accentués si les pentes sont fortes et les fonds de vallées contraints latéralement.

Les écoulements en crue utilisent des trajectoires plus tendues (moins sinueuses), abandonnant souvent la sinuosité préalable du lit mineur. Ces trajectoires favorisent une mobilité latérale forte, aux dépens des zones où les berges sont les plus fragiles.

5.4 – Les facteurs aggravants d'origine naturelle

En plus des facteurs de contrôle comme la pente ou du contexte géologique, les facteurs aggravants d'origine naturelle les plus impliqués dans la dynamique de la crue sont :

- La nature des roches ou terrain constitutifs des berges ;
- Les instabilités de versants ;
- L'activité des couloirs d'avalanche ;
- La ripisylve ;
- Les boisements alluviaux.

5.4.1 – La nature des roches ou terrain constitutifs des berges

Pour une même contrainte hydrodynamique la nature des roches conditionne la réponse du terrain soumis aux écoulements.

Une roche dure (calcaire, granite, etc.) résiste, ne se déforme pas et n'absorbe donc pas l'énergie du cours d'eau. Des terrains alluvionnaires (limons, sables, galets, etc.) subissent une érosion qui favorise la dissipation d'énergie ainsi que l'adaptation morphologique du lit (pente, largeur, sinuosité, etc.) du cours d'eau à la gamme de débit correspond à la crue.

En zone de montagne, où les changements géologiques sont nombreux et fréquents, les contrastes de résistance sont multiples, d'une berge à l'autre, ainsi que longitudinalement sur de courtes distances.

Ainsi, des saillies rocheuses ou des blocs morainiques, qui n'interfèrent pas ou peu avec les écoulements courants, peuvent jouer localement un rôle déterminant pour ce niveau de crue.

Le cas du **gave de Cauterets au quartier Concé**, en aval du bourg de Cauterets (65), en fournit une illustration.

Avant la crue, le gave s'écoulait le long du versant, en limite occidentale du fond de vallée, libérant ainsi tout l'espace alluvial. Pendant la crue, il a changé de lit, menaçant directement la route et détruisant plusieurs bâtiments.

Cette **divagation** est directement imputable au rôle de déflecteur joué par une **saillie rocheuse** présente au niveau de la « prise d'eau » du nouveau chenal d'écoulement, d'une part, et à la moindre résistance offerte par les terrains alluvionnaires, d'autre part, malgré la présence d'une protection de berge, en rive droite.

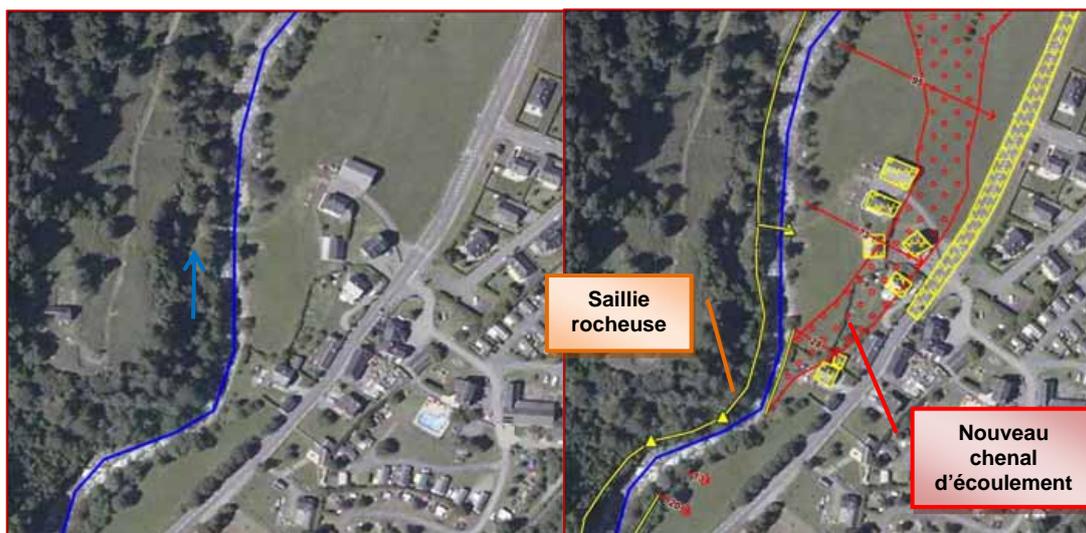
Dans le même temps, la morphologie du lit (forte sinuosité) a favorisé la sédimentation d'une nappe de charriage dans l'ancien chenal d'écoulement, qui, ainsi encombré, ne pouvait plus

faire transiter les débits de la crue. La présence d'un ouvrage transversal (passerelle) a probablement accentué ce phénomène.

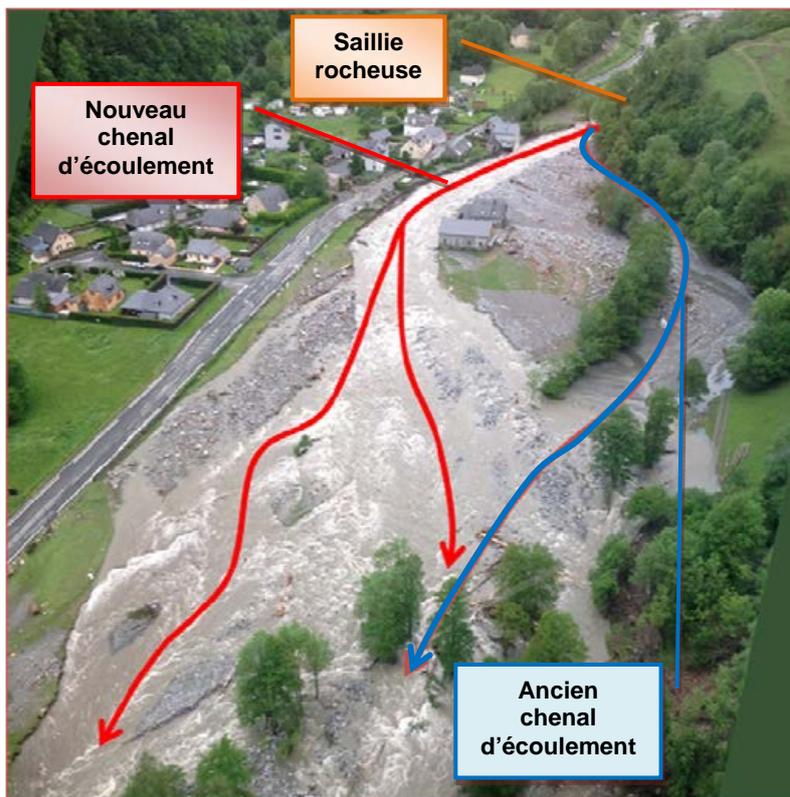
Le gave de Cauterets, quartier Concé, après la crue (source EDF)



Le gave de Cauterets, quartier Concé, avant (à gauche) et après la crue (source BD-Ortho 2010, IGN et analyse GéoDiag)



Le gave de Cauterets, quartier Concé, après la crue (source DDT65)



Le gave de Cauterets, quartier Concé, après la crue (source DDT65, en haut)



Compte tenu du caractère naturel de ce facteur aggravant, son comportement en crue, actuelle et future, est donc prévisible, à la lueur de ce retour d'expérience.



Le réaménagement « à l'identique » ne modifie pas cette configuration contrôlée par la géologie. Les mêmes causes devraient produire les mêmes effets

Le gave de Cauterets, quartier Concé, après les travaux post-crue



5.4.2 - Les instabilités de versants

Les instabilités de versants ont leur dynamique propre, notamment liée à la saturation en eau des terrains superficielles et à la présence / fonte du manteau neigeux.

Fortement dépendante des conditions climatiques, l'instabilité des formations superficielles a pu être activée par la même pluie génératrice que la crue.

Par ailleurs, la mobilité latérale des berges, l'incision du lit, l'affouillement du pied de versant sont autant de processus hydrodynamiques qui peuvent avoir accentué ou provoqué des instabilités de versants au niveau des talwegs torrentiels.

Aucun phénomène de grande ampleur n'a été constaté. En revanche, tout au long du Bastan, de la Neste de Badet et sur certaines portions de l'Yse, les phénomènes d'ampleur modeste à minime sont multiples. Leurs effets cumulés peuvent donc avoir été significatifs, dans le déroulement de la crue.

Les principales conséquences sur la dynamique de la crue sont :

- Un possible encombrement temporaire du lit, équivalent à celui provoqué par un embâcle ou un culot d'avalanche, avec ou sans déviation du cours d'eau ;
- Une fourniture accrue en matériaux solides ;
- La possible fourniture de nombreux chablis ;
- Des phénomènes de réajustements morphologiques encore actifs plusieurs mois après la crue.

Le Gave de Cauterets à Calypso (65) – Glissement de terrain dans le talweg



Le Bastan à Barèges (65) - Glissement de terrain lié à l'érosion du pied de versant



5.4.3 - L'activité des couloirs d'avalanche

Au cours de l'hiver et du printemps précédents la crue, les avalanches ont été nombreuses sur les massifs touchés par la pluie génératrice. De ce fait, l'encombrement des talwegs par la neige durcie ou les arbres arrachés a pu jouer sur la dynamique de la crue, notamment pour les torrents primaires ou secondaires.

Pendant la crue, la persistance de culots d'avalanche a multiplié le nombre de configurations où les écoulements ont pu être ralentis voire momentanément bloqués. Les impacts ont alors été équivalents à ceux d'un embâcle de bois, jusqu'à rupture ou contournement total ou partiel du culot par le cours d'eau en crue.

Le Bastan, en amont de Barèges (65) – Etat de couloirs torrentiels et avalancheux, début juillet 2013 – source DDT65/IGN



5.4.4 - La ripisylve

Comme la plupart des autres facteurs naturels, les rôles de la ripisylve vis-à-vis du déroulement de la crue peuvent être variés (cf. § 5.3) et, de ce fait, jugés positifs ou négatifs.

La ripisylve intervient en tant que facteur aggravant à plusieurs titres :

- Son **absence** correspond fréquemment à une accentuation de l'érosion latérale, notamment sur le piémont de la Garonne ou de la Neste ;
- Sa **discontinuité** fait apparaître contrastes de résistance ainsi que des points durs (début ou fin du boisement) sur lesquels les écoulements se sont « appuyés » pour éroder la berge voisine ;
- En cas de bonne résistance aux contraintes hydrodynamiques, certaines portions de ripisylve ont bloqué les bois flottés, constituant ainsi des **défecteurs** de plus en plus « efficaces », y compris à proximité de zones à enjeux anthropiques ;
- Sous l'effet du sapement prolongé des berges, la plupart des sujets arborés ont fini par être emportés, alimentant ainsi de nombreux **embâcles** ;
- Tractés puis déposés sur le lit majeur, de nombreux **chablis** ont favorisé l'apparition de **griffes d'érosion** verticales, pouvant contribuer au recouplement de méandres ;
- Etc.

5.4.5 – Les boisements alluviaux

Comme pour la ripisylve, les impacts des boisements alluviaux sur la dynamique de la crue sont variés et peuvent être appréciés de diverses manières.

En tant que facteur aggravant, ils sont principalement intervenus en :

- Bloquant les bois flottés, constituant ainsi des **points durs** ou des **défecteurs** de plus en plus « efficaces », y compris à proximité de zones à enjeux anthropiques ;
- Fournissant de nombreux chablis et en alimentant de nombreux embâcles ;
- Etc.

D'une manière générale, cet évènement indique une **fermeture importante de la bande active** de nombreux cours d'eau torrentiels (Pique, Neste d'Oô, Bastan, etc.) au cours des dernières décennies. Le développement des boisements alluviaux y remonte parfois à la dernière crue de même intensité, soit plus de 50 années. Les sujets étant massifs et les boisements denses, ils ont accentués les effets points durs, sur des zones soumises à débordement.

La Garonne à Miramont-de-Comminges (31) - Chablis et embâcles – (source ONEMA)



La Neste du Louron à Vielle-Louron (65) – Boisements alluviaux « stables », ayant limité les érosions de berge – source DREAL M-P

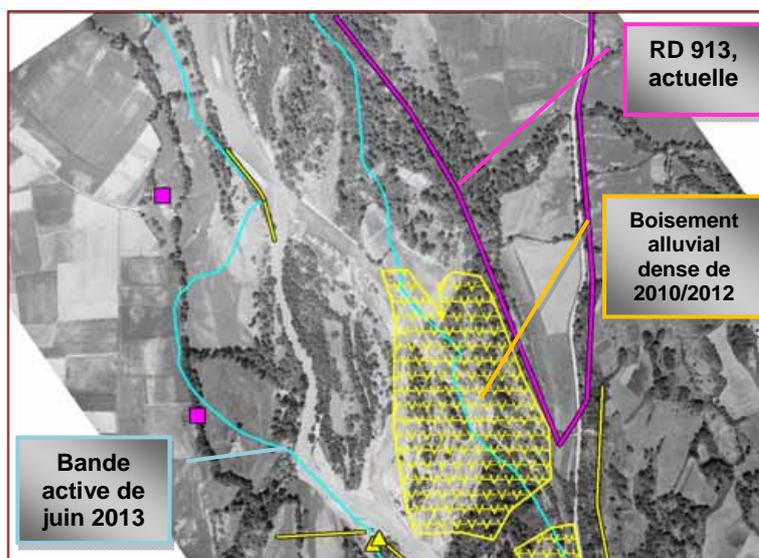


La Neste à Arreau (65) - Chablis faisant déflecteur



Dans la plaine de Beaucens – Adast (65), sur le gave de Pau, le rôle de point dur joué par le boisement alluvial présent en rive droite, le long de la RD 913, est l'un des facteurs qui expliquent la translation de la bande active vers l'Ouest, comparée à sa position historique connue.

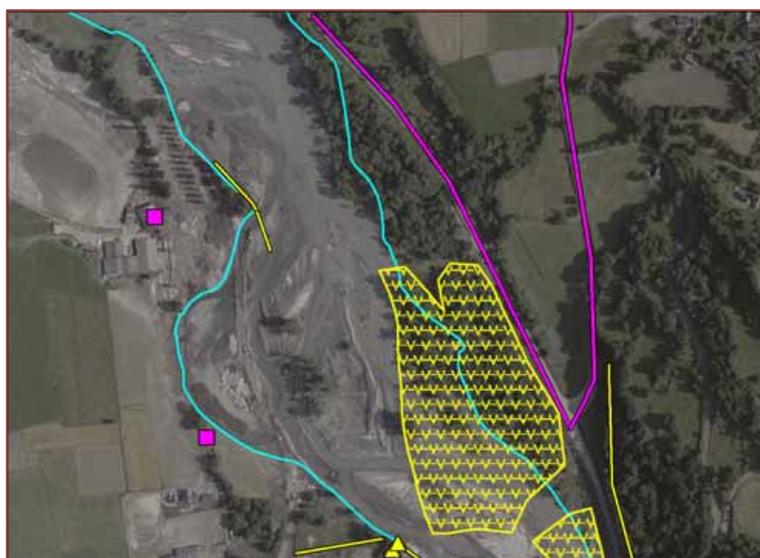
Le gave de Pau à Beaucens (65) – en 1947, les traces de la crue de 1937 indiquent que la bande active est bien développée le long du tracé actuel de la RD 913, le débordant légèrement vers l'Est – Source IGN



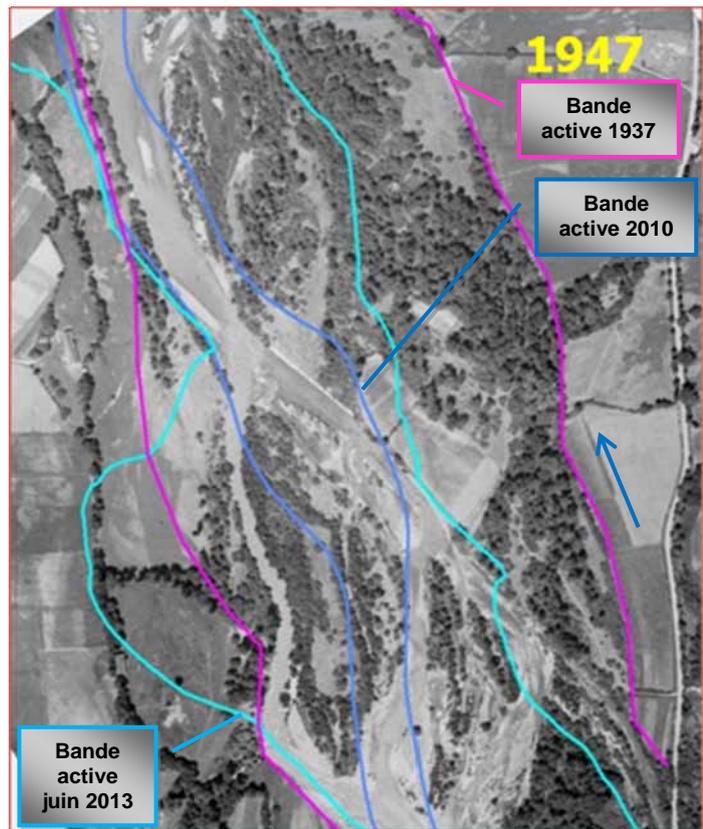
Le gave de Pau à Beaucens (65) – en 2010, la bande active de 1937/1947 est fortement boisée le long de la RD 913 et présente une largeur plus réduite – Source BD-Ortho IGN



Le gave de Pau à Beaucens (65) – en 2013, une partie du boisement alluvial a résisté le long de la RD 913 mais la bande active s'est élargie aux dépens des terrains non boisés de la rive gauche, au-delà de la limite de 1937/1947 – Source BD-Ortho IGN



Le gage de Pau à Beaucens (65) – entre 1937/1947, la bande active s'est rétractée. En juin 2013, elle a retrouvée une largeur plus importante mais inférieure à celle de 1947, tout en se translatant vers la plaine d'Adast – Source IGN



Dans ce cas de figure, le rôle du boisement alluvial s'ajoute à celui d'autres évolutions de l'occupation du sol, notamment au niveau de la zone industrielle de Pierrefitte-Nestalas (sarcophages protégés, épis déflecteurs) et de la prise d'eau du Gabaret, en rive gauche.

Il renvoie également à un autre facteur anthropique : le manque d'entretien dont a été l'objet cette zone, notamment depuis l'arrêt de l'exploitation de la décharge de Beaucens.

Le gage de Pau à Beaucens (65), pendant les travaux post-crise – en rive droite, le boisement alluvial a partiellement résisté, alors que les prairies de la rive gauche ont été érodées – source DDT65



5.5 – Les facteurs aggravants d'origine anthropique

Les facteurs aggravants d'origine anthropiques sont également multiples et leurs rôles peuvent être appréciés, tantôt positivement tantôt négativement selon la phase de la crue ou le lieu considérés.

Il est possible de les regrouper en quatre familles principales :

- Les défauts d'entretien et de gestion ;
- L'exploitation des cours d'eau et de leurs ressources
- Les aménagements visant à contraindre le cours d'eau ;
- Les aménagements liés au développement de l'urbanisation et des infrastructures au sein du lit majeur ou de la bande active du cours d'eau.

5.5.1 - Les défauts d'entretien et de gestion

☞ Comme vu précédemment, cette crue a montré combien les bandes actives des dernières crues de cette intensité s'étaient fermées par le développement de la végétation alluviale.

Sur plusieurs décennies, cette tendance a conduit à la constitution de **boisements denses** qui, en résistant aux forces hydrodynamiques, ont formé autant de nouveaux points durs ou, en cédant à la puissance des écoulements, ont fournis de nombreux chablis à l'origine des embâcles.

Dans le même temps, ces zones boisées comprises dans les espaces de mobilité actifs au XIX^{ème} ou au XX^{ème} siècle ont pu faire oublier qu'il s'agissait de parcelles appartenant à la bande active de telles crues. Les transformations morphologiques consécutives à celle-ci en sont devenues d'autant plus inattendues et inacceptables, pour la plupart des riverains.

☞ La question du manque de gestion ou de maintenance a également été mise en lumière pour de nombreux **ouvrages ou aménagements**, notamment des protections de berge.

Certains, en place depuis des décennies avaient été oubliés, notamment du fait de l'évolution de la végétation, ou considérés comme fiables, car durablement efficaces.

Or dans ce contexte montagnard (gel, dégel, etc.) et torrentiel (crues brutales et rapides), tous les aménagements anthropiques vieillissent et se fragilisent, quand ce n'est pas le terrain qui les supportent qui présente des signes de fatigue mécanique. Ainsi, les grillages d'anciens gabions se corrodent, le béton de certaines protections se fissurent, le développement des systèmes racinaires fait travailler les structures ... conduisant progressivement à l'endommagement ou à la ruine de ces constructions.

Suite à des crues morphogènes répétées (2012, 2013) ou longues, la rupture (brèche, basculement, effondrement, etc.) de ces aménagements peut les faire passer du rôle de protections efficaces à celui de facteurs aggravants et ce pendant la crue.

La Neste d'Oô à Oô (31) – La protection de berge a cédé, basculant dans le lit mineur – source ONEMA



La Neste du Louron à Arreau (65) – En basculant dans le lit, la passerelle s'est transformée en épis déflecteur – source DDT65



La Bastan à Barèges (65) – En cédant à l'érosion verticale et latérale, la protection de berge a permis la réactivation d'une partie de la bande active aux dépens d'une rue – source Lourdes Actu



La Garonne à Fos (31) – les anciennes protections de berge (mur en pierres sèches ?) ont cédé



Le gave de Pau à Nay (64), l'enrochement a cédé et été contourné, se transformant en épis déflecteur



5.5.2 – L'exploitation des cours d'eau et de leurs ressources

Sur la zone d'étude, les cours d'eau constituent une ressource dont l'exploitation a nécessité des aménagements ou des travaux lourds qui, en transformant leur morphologie, ont également modifié leur comportement hydrodynamique. Ce sont principalement :

- Les **ouvrages hydrauliques** dédiés à l'hydroélectricité ;
- Les **extractions industrielles** de granulats, en lit mineur ou en lit majeur.

☞ Comme déjà évoqué (§ 4.4.3 et 5.2), les **ouvrages hydroélectriques**, barrages et seuils, constituent des points durs, voire des verrous hydrauliques, et peuvent freiner ou interrompre le transit sédimentaire de la charge grossière.

Leurs impacts en tant que point durs/verrous ont déjà été décrits (effet retenue, effet toboggan, etc.). Ils restent généralement localisés sur quelques dizaines ou centaines de mètres, en amont mais surtout en aval de chaque ouvrage.

Leurs impacts en tant qu'obstacles à la continuité du charriage sont à la fois plus discrets mais plus étendus et durables.

Selon leur localisation, à proximité des zones de production primaire ou beaucoup plus en aval, et leur configuration (hauteur, mobilité, etc.), ils peuvent créer ou accentuer un déficit en matériaux grossiers mobilisables. Si, en aval, ce déficit n'est pas suffisamment compensé, notamment par les apports d'affluents, la morphologie du cours d'eau va tendre à s'adapter en sollicitant d'autres stocks d'alluvions.

Il en résulte généralement une **accentuation des érosions** latérales ou verticales. Ces dernières, en provoquant **l'incision du lit mineur** vont, à leur tour, être à l'origine :

- D'une contraction de la bande active historique, ce qui favorise sa fermeture par boisement ou urbanisation ;
- D'une diminution des débordements, ce qui incite à modifier l'occupation du sol en lit majeur ;
- D'une augmentation de la valeur du débit à pleins bords, donc de la puissance spécifique ;
- Etc.

Pour une même pluie génératrice ou un même débit entrant sur la portion de cours d'eau considérée, ces impacts conduisent tous à une **altération du fonctionnement des espaces tampons** et à une **augmentation des phénomènes érosifs**.

A noter que les impacts des **ouvrages de sédimentation du RTM**, implantés sur des torrents à fort transport sédimentaires, sont de même nature.

Aux **effets d'obstacles** des ouvrages hydroélectriques peuvent s'ajouter les impacts morphologiques des **altérations de l'hydrologie**, en cas de dérivation voire de transfert d'une partie des débits liquides.

Lorsque les débits, donc la fréquence, des petites **crues morphogènes** (Q1 à Q5) sont diminués, les ajustements morphologiques sont amoindris au sein des tronçons court-circuités. Le moindre remaniement des alluvions en lit mineur favorise le développement de la végétation alluviale qui, à son tour, favorise la fixation des atterrissements.

Ces derniers peuvent ensuite constituer de véritables points durs et, en contribuant moins au continuum du charriage, ils favorisent les érosions vers l'aval.

Sans que ce retour d'expérience puisse en constituer une analyse détaillée, des indices de ce type d'impact apparaissent sur certains sites, notamment sur la Garonne, en aval du plan d'Arem, ou sur le piémont commingeois.

La Garonne à Pointis-Rivière (31) – Seuil et dérivation – source ONEMA



☞ Les **extractions de granulats** ont (eu) des impacts directs sur la morphologie des cours d'eau ou de leur espace rivière, d'une part, et des impacts indirects sur la continuité du transit sédimentaire, d'autre part.

Longtemps réalisées directement dans le lit mineur ou la bande active des cours d'eau, notamment en zone de montagne, elles ont principalement conduit à l'**incision du lit** et à la création de **plans d'eau artificiels**.

Comme dans le cas des ouvrages hydroélectriques, les incisions ont modifié le gabarit du lit mineur, donc la valeur du débit à pleins bords et les contraintes hydrodynamiques subies lors des crues morphogènes, pas ou peu débordantes.

La **contraction de la bande active** et l'**altération du fonctionnement des espaces tampons** en sont des conséquences directes.

La présence des plans d'eau artificiels multiplie les points de fragilité vis-à-vis de la mobilité latérale des cours d'eau. Leur exploitation, notamment pour des activités de loisirs ou de tourisme, a également conduit à leur protection, avec des digues contre les inondations et des enrochements contre l'érosion.

Ce sont ainsi de nouveaux **points durs et contraignants** pour le cours d'eau qui sont apparus récemment (< 30 ans). Dans certains cas, la crue de juin 2013 est la première de cette importance ayant permis d'en observer les impacts sur la dynamique des cours d'eau.

Les plus significatifs sont apparus sur le piémont, de la Garonne, de la Neste ou du gave de Pau où, en réponse notamment à des décennies de contraction ou de fermeture du lit mineur et à des débordements « limités », les migrations et les recouvrements de méandres (voir § 4.2 et 4.3.5) ont été marqués et nombreux.

Ainsi un témoin, pêcheur de la Garonne commingeoise, relevait qu'en 1977, le fleuve avait plus débordé mais en faisant nettement moins de dégâts aux berges que cette fois-ci.

La Garonne à Valentine (31) – Plan d'eau et chenalisation du cours d'eau – source ONEMA



Dans le même temps, les seuils mis en place à la suite des extractions industrielles, pour stabiliser le profil en long et éviter la propagation de l'érosion régressive, ont modifié les pentes hydrauliques et multiplié les points durs, avec les impacts déjà évoqués (§ 5.1).

De plus, ils sont nombreux à avoir subi des dommages, du fait de la crue, montrant ainsi leur fragilité et indiquant la vulnérabilité de ces portions de cours d'eau aménagées. Ainsi sur le gave de Pau (64), les 10 seuils publics ont subi des dégâts (Nay- Mirepeix- Baudreix - Assat-Narcastet – Meillon - Artiguelouve – Denguin) et dans une moindre mesure ceux de Lescar (radier et rocade).

On constate des coursiers vidés de leurs blocs (enrochements libres) et trois cas d'échancrures ouvertes au sein de la structure(3). Ces seuils (Nay, Denguin, Baudreix) ont fait l'objet de réparation en urgence l'été 2013, avec leur renforcement par apport de blocs (environ 3000 t /seuil, source CG64).

De nombreux ouvrages privés ont subi le même type de dégâts, avec les mêmes risques d'ajustements morphologiques importants (érosion régressive, purge sédimentaire, etc.), en cas de rupture ou de contournement.

Le Gave de Pau à Lestelle-Bétharram (64) – Brèche dans un seuil en enrochement



Le Gave de Pau à Bizanos (64) – Brèche dans un seuil avec amorce d'une érosion régressive dans le substratum molassique



5.5.3 - Les aménagements visant à contraindre le cours d'eau

☞ Les **digues longitudinales**, visant à limiter les débordements et l'inondation du lit majeur, comme les **protections de berge**, servant à limiter les érosions latérales, contraignent le cours d'eau en crue et atténuent le rôle des espaces tampons ainsi que les possibilités d'ajustements morphologiques du lit, pendant la crue.

En concentrant les écoulements dans un espace restreint et « rigidifié », ces aménagements limitent la dissipation de l'énergie et augmentent la puissance, donc les capacités érosives du cours d'eau en crue sur et en aval de la portion contrainte.

☞ Par ailleurs, ces aménagements possèdent tous un seuil au-delà duquel ils peuvent ne plus être efficaces ou devenir des facteurs aggravants. C'est le cas lorsqu'une digue est submergée ou ébréchée permettant le déversement de la crue vers la zone antérieurement protégée par elle.

Cela correspond aussi à la rupture ou au contournement d'une protection de berge qui, ainsi mise à mal, peut constituer un nouveau point dur autour duquel les forces hydrodynamiques vont « travailler » les berges ou le fond du lit, accentuant l'érosion latérale ou verticale.

Le gave de Cauterets à Pierrefitte-Nestlas (65) – Surverse par-dessus une digue de protection contre les inondations (source SMDRA)



La Garonne dans le val d'Aran – Affaissement d'une protection de berge dans le lit mineur suite à l'érosion derrière le mur et/ou à l'affouillement en pied de berge – source CNRS – Géode



La Pique à Bagnères de Luchon (31) – rupture d'un mur/digue – source CNRS/Géode



Le Bastan à Barèges (65) – rupture d'une protection de berge par affouillement – source D.Platon, CNRS/Géode



L'Yse à Luz-St-Sauveur (65) – Protection de berge détruite – source A. Burens, CNRS/Géode



5.5.4 - Les aménagements liés à l'urbanisation et aux infrastructures

☞ En lit mineur, la multiplication des **ouvrages transversaux** conduit à accroître ou accentuer les configurations de verrou hydraulique, notamment sur les petits cours d'eau torrentiels où les franchissements sont de faible largeur ou section.

De ce fait, ces points durs contraignent les écoulements, favorisent la formation d'embâcles ou le dépôt des nappes de charriage. C'est pourquoi ils sont nombreux à avoir été endommagés, détruits ou contournés par les cours d'eau en crue.

*Le Bastan à Barèges (65) –
Contournement du pont et
affouillement de la STEP
(source DDT65)*



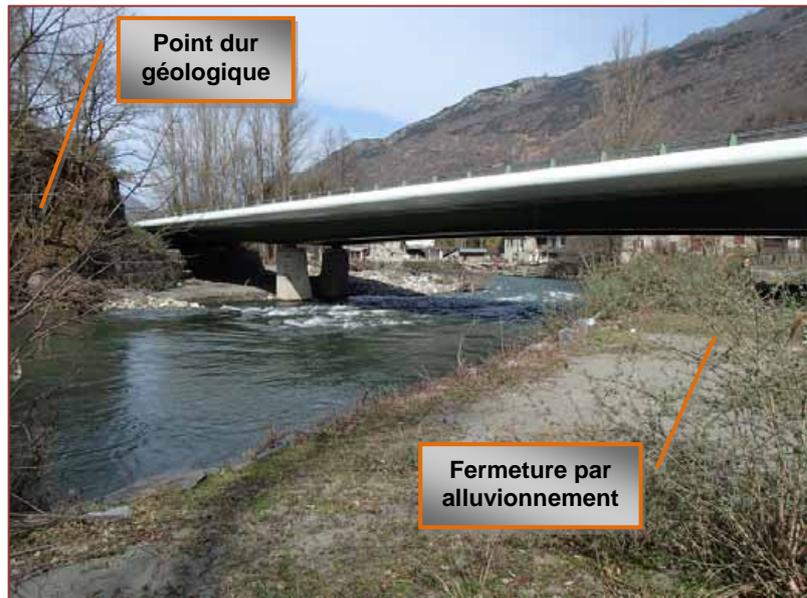
*Le Bastan à Betpouey (65) –
Destruction du franchissement
d'un affluent torrentiel (source
DDT65)*



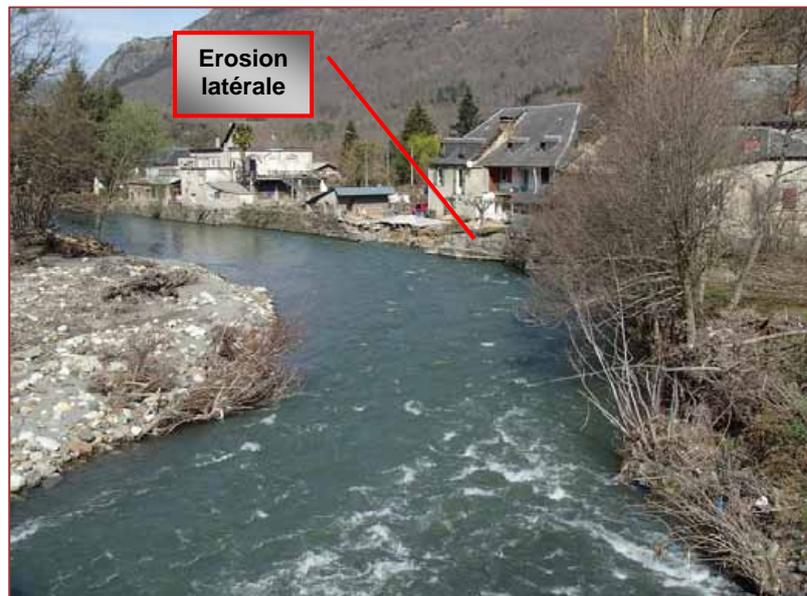
*Le gave de Pau à Beaucens (65)
– Destruction et contournement
du pont sur la rivière de
contournement du lac des
gaves*



La Garonne à Fos (31) – le pont de la 2x2 voies renforce un verrou géologique – son orientation et le fait que son arche rive droite tende à se fermer (alluvionnement progressif) concentrent les écoulements et les dirigent vers la partie basse du bourg de Fos



En aval du pont, l'érosion dont a été l'objet le terrain de l'habitation située directement dans l'axe de l'écoulement, en est l'une des conséquences



☞ En lit majeur, l'implantation de **zones bâties** ou d'**infrastructures** au sein de la bande active historique (dont les cônes de déjection) ou du lit majeur conduit à fermer ces espaces, à réduire les zones d'étalement et de respiration des crues, tout en multipliant les points durs et les obstacles aux écoulements.

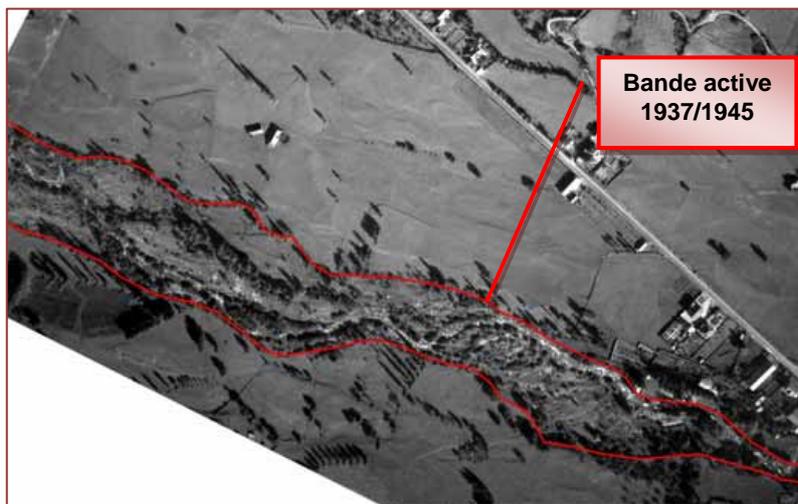
En « compensation » des espaces ainsi perdus pour s'étaler et dissiper son énergie, le cours d'eau en crue en a ouvert ou réactivé de nouveaux, parfois inactifs depuis des siècles.

☞ L'exemple du **cône du Bastan à Esquièze-Sère** illustre ce phénomène.

Depuis le cadastre napoléon (XIXème) jusqu'aux photographies aériennes d'avant la crue, toutes les cartographies et photographies disponibles indiquent la même emprise pour la bande active du cône de déjection du Bastan, en aval du verrou du pont de Luz. Avant la crue, elle occupait une position centrale et un faisceau large de quelques dizaines de mètres, en grande partie couvert par des boisements alluviaux.

Les analyses relatives à la crue de 1897 n'indiquent pas de variation dans cette localisation/extension, qui se retrouve également sur la carte géologique au 1/50000 (BRGM).

Le cône du Bastan à Esquièze (65) – la bande active de 1945 est marquée par des chenaux actifs multiples et un boisement alluvial discontinu – source IGN



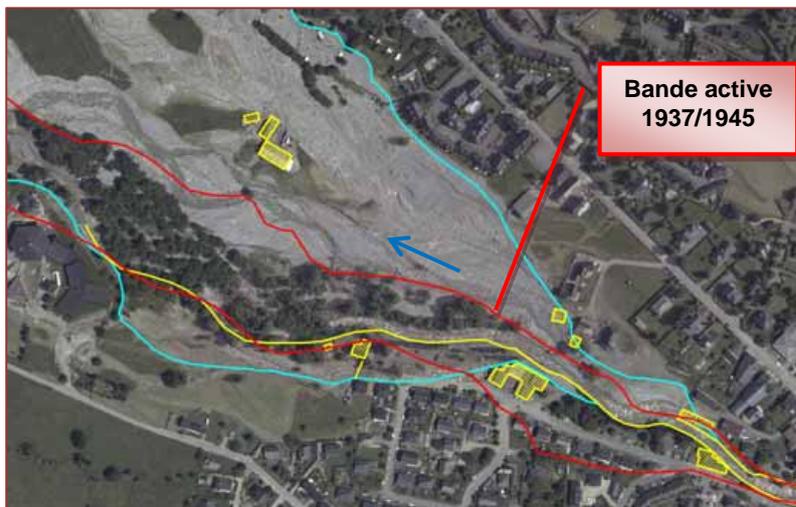
Le cône du Bastan à Esquièze (65) – la bande active de 2001 est marquée par un chenal unique et un boisement alluvial relativement continu – La rive gauche amont du cône a été bâtie (à partir des années 1970), y compris au sein de la bande active de 1945 – source BD-Ortho IGN



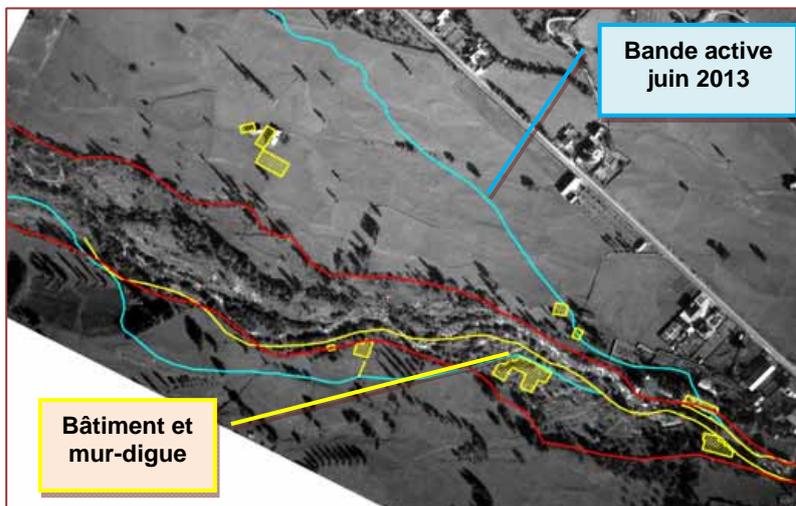
Le cône du Bastan à Esquièze (65) – la bande active de 2010 est similaire à celle de 2001



Le cône du Bastan à Esquièze (65) – En rive droite, la bande active de juin 2013 s'étend très largement au-delà de celle de 1945, à partir du point dur (bâtiment + digue + protection de berge) implanté au sein de la bande active historique – source IGN/DDT65



Le cône du Bastan à Esquièze (65) – l'urbanisation de la rive gauche (2010/2013 – en surimpression) touche une partie de la bande active historique de 1945 – source IGN



L'urbanisation de la rive gauche (bâtiment + mur-digue), au sein de la bande active historique, correspond à l'amorce de la zone de divagation vers la rive droite du cône de déjection. Le boisement alluvial dense a pu également joué le rôle de point dur / déflecteur.

Le cône du Bastan à Esquièze (65) – En rive gauche, les points durs liés à l'urbanisation ont rejeté la bande active de juin 2013 vers la rive gauche, au-delà des limites historiques connues



5.5.5 – Combinaisons des facteurs et des processus

Ces quelques exemples indiquent que les facteurs aggravants naturels et anthropiques interviennent souvent de manière simultanée. Dans le même temps la dynamique locale de la crue combine souvent plusieurs des processus décrits précédemment pour aboutir aux transformations géomorphologiques et aux dégâts constatés.

Le cas de la maison forestière d'Artigalàs à Barèges, en fournit l'illustration.

Situation avant la crue



Pendant la crue, l'eau débordée en amont (effet tremplin + effet défecteur) érode le pied de versant en amont du bâtiment – la passerelle d'accès ne semble pas en charge – source D.Platon, CNRS/Géode



Pendant la crue, le bâtiment constitue un point dur/saillant, qui fait défecteur et accentue l'érosion du pied de versant – la passerelle d'accès ne semble pas en charge – source D.Platon, CNRS/Géode



Le bâtiment (parking) en saillie, situé en amont, a pu jouer le rôle de déflecteur – Déstabilisé, le versant a glissé accentuant la destruction des 2 bâtiments implantés sur cette terrasse



Les dépôts grossiers, en amont du bâtiment, proviennent en partie de l'érosion du versant et indiquent le rôle d'obstacle joué par lui - source D.Platon, CNRS/Géode



Après la crue, la terrasse comprise entre le Bastan et le versant constitue une zone de sédimentation, sur laquelle les 2 bâtiments présents ont été détruits pas la crue – source DDT65



6 – Bilan et perspectives

Ce retour d'expérience de la crue de juin 2013, portant sur la dynamique fluviale et torrentielle, à partir des bassins versants amont de la Garonne, de la Neste et du gave de Pau, ne prétend pas être exhaustif. Il ne remplace pas des études plus locales et plus détaillées, notamment sur le plan topographique ou hydraulique.

Cependant, il apporte des éclairages à la fois sur :

- La manière dont il semble souhaitable d'organiser l'**acquisition de données** et de **connaissances** pour ce type d'évènements majeurs ;
- Le **comportement hydrodynamique** des cours d'eau, au cours d'une telle crise hydrologique ;
- Le rôle des **zones tampons** (de respiration) vis-à-vis de ce type de crue ;
- Les **points faibles de la gestion et de l'aménagement** de ces zones de montagne et de piémont, face à ce type de risques naturels.

En guise de conclusion, le bilan et les perspectives qui découlent de cette étude sont rappelés pour ces divers domaines.

6.1 – Acquisition des données pour le retour d'expérience

Les exemples et les illustrations utilisés dans ce rapport montrent toute l'importance des documents visuels (photographie et vidéo) pour pouvoir décrire et analyser la dynamique de la crue, a posteriori et en dehors de contextes humains émotionnellement très chargés.

6.1.1 – Les photographies satellitaires

☞ Dans le cas présents, l'acquisition de photos satellitaires a été privilégiée. Les prises de vue disponibles couvrent l'ensemble de la zone d'étude mais les **dates d'acquisition** s'échelonnent entre fin juin et octobre 2013.

Il y a donc un décalage important (de quelques semaines à 4 mois !) tant pour visualiser les conséquences morphologiques directes de la crue que pour éviter les modifications en lien avec les premiers travaux post-crue.

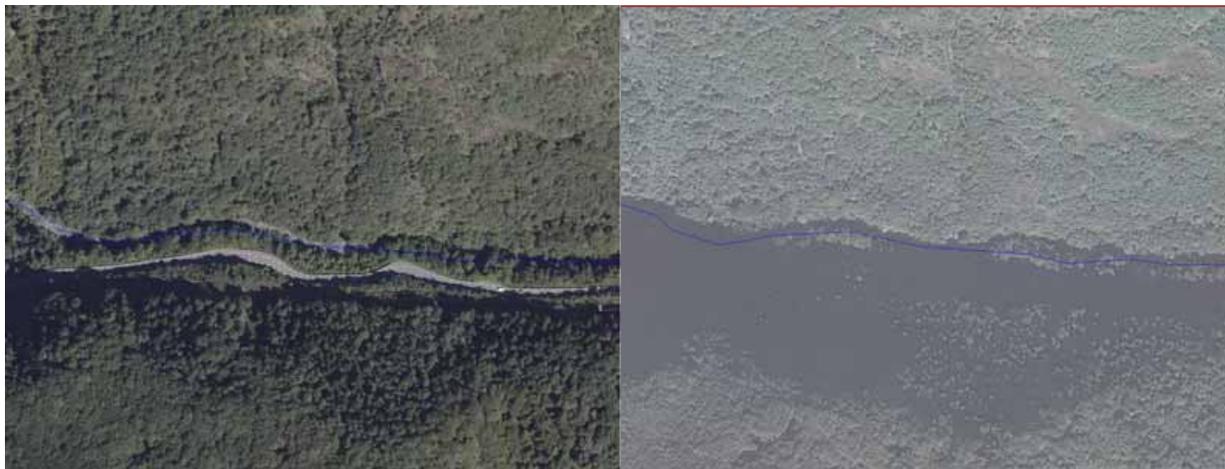
☞ Le traitement de ces images pour la **délimitation des zones inondées** est intéressant mais souffre à la fois du décalage des prises de vue par rapport au pic de la crue et des zones indisponibles à l'analyse du fait de la nébulosité ou du couvert végétal (§ 2.3.1).

Sur ce plan, les prises de vue aériennes offrent de meilleures possibilités, à condition d'en faire une photo-interprétation rigoureuse, recoupée avec des relevés de terrain (laises de crue, etc.).

☞ L'utilisation de ces images pour la photo-interprétation des **faits de la dynamique fluviale** ou torrentielle peut être efficace mais souffre de plusieurs difficultés, dont :

- L'importance des ombres portées ;
- L'importance de la couverture nuageuse ou du voile de nébulosité ;
- Le manque de calage de l'ortho-rectification par rapport au référentiel BD-Ortho (IGN) ;
- D'éventuels problèmes de post-traitement des canaux acquis.

BD-Ortho (IGN) 2010, à gauche, et image Pléïades 2013, à droite, avec ombres portées et voile nuageux



Images Pléïades du 4/09/13, à gauche, et du 7/10/13, à droite – sur cette dernière, les nuages limitent les possibilités de photo-interprétation

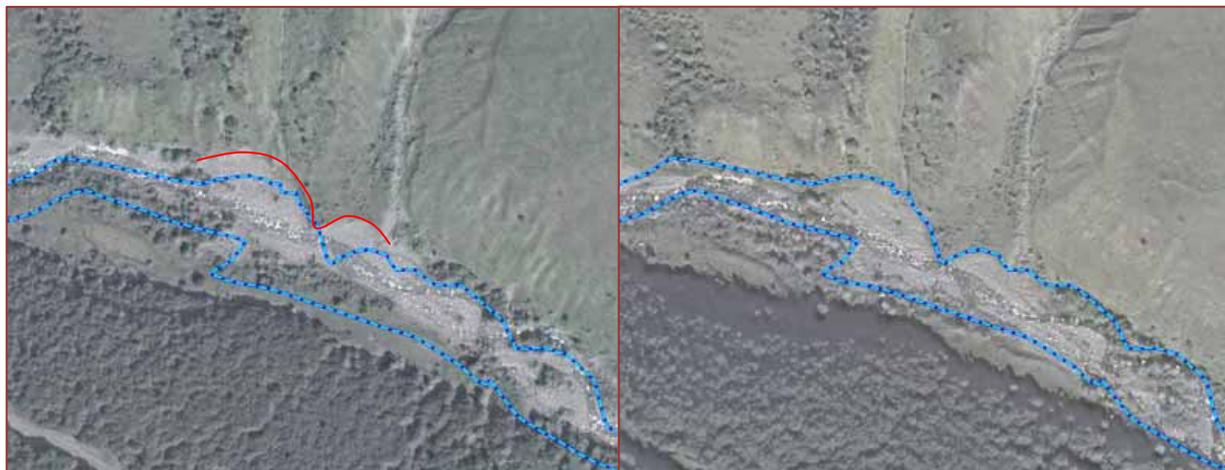


A noter que le calage des images, réalisé par l'IGN ou le SERTIT, fait régulièrement apparaître des défauts, de l'ordre de 5 à 10 m. Comme ces décalages peuvent être de l'ordre des reculs de berges occasionnés par la crue, ils limitent la fiabilité de la photo-interprétation et complique la saisie sous SIG (nouvelle berge, bande active, etc.).

Le décalage n'étant pas homogène sur l'ensemble d'un cliché (qui couvre parfois plus de 500 km² !), le risque de ne pas le mettre en évidence ou de mal le prendre en compte est d'autant plus grand.

Les images ci-après, sur lesquelles ont été reportées les limites de la bande active de la Neste de Badet (65) de juin 2013 (en bleu), montrent un décalage sur le cliché de gauche.

Images Pléiades du 15/08/13, à gauche, et du 7/10/13, à droite – sur la première, apparaît un décalage en X/Y qui limite les possibilités de photo-interprétation



6.1.2 - Les prises de vue aériennes

Les prises de vue aériennes représentent le type de support le plus riche et exploité, dans le cadre de la présente étude.

Il est possible de distinguer 3 ensembles :

- Les photographies aériennes nadirales ortho-rectifiées et géo-référencées ;
- Les photographies aériennes nadirales brutes ;
- Les prises de vue obliques par hélicoptère.

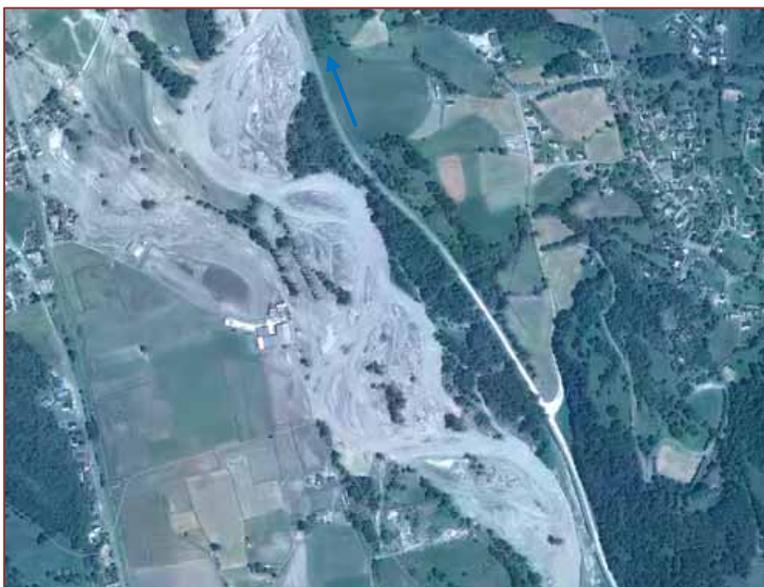
☞ Les **photographies aériennes nadirales ortho-rectifiées** et géo-référencées offrent une définition (10 à 20 cm par pixel) et une qualité qui permettent une photo-interprétation et une saisie sous SIG à la fois complètes et précises.

Dans le cas présent, il ressort que les images prises pendant la crue (16/06/2013, gave de Pau 64) permettent de bien délimiter les zones inondées mais sans analyse des éléments de dynamique fluviale ou torrentielle.

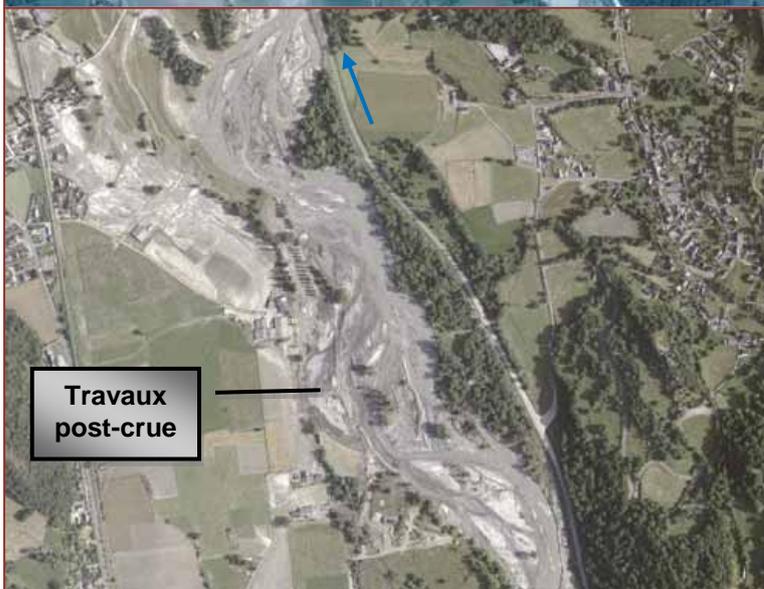
Les images prises peu après la crue (fin juin ou début juillet 2013) permettent les analyses les plus complètes, concernant les zones inondées comme les faits de l'hydrodynamique ou les dégâts.

Plus les images ont été prises tardivement moins elles sont propices à ces analyses, du fait des travaux post-crue et du développement de la végétation. En revanche, elles permettent de faire un point sur certaines transformations géomorphologiques résultants des travaux réalisés en urgence.

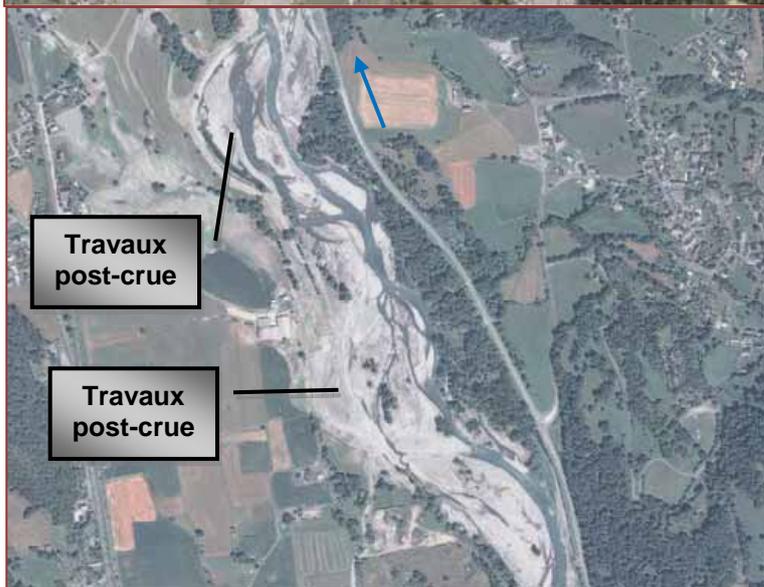
Le gave de Pau à Beaucens (65) – image Pléiades du 22 juin 2013 – état post-crise non modifié



Le gave de Pau à Beaucens (65) – image IGN/DDT65 du 10 juillet 2013 – les travaux de terrassements au sein de la bande active apparaissent, en rive gauche



Le gave de Pau à Beaucens (65) – image Pleiades du 15 août 2013 – les travaux de terrassements au sein de la bande active sont nettement visibles



Le gage de Pau à Beaucens (65) – image GéoDiag/Avion Jaune de 15 février 2014 – les travaux de terrassement ne permettent plus de connaître l'état du cours d'eau hérité de la crue de juin



☞ Les **photographies aériennes nadirales brutes** ne permettent pas une saisie directe sous SIG, lors de la photo-interprétation. Elles nécessitent soit un calage (ortho-rectification + géo-référencement) préalable soit une analyse comparative avec un référentiel géographique (BD-ORTHO ou autre).

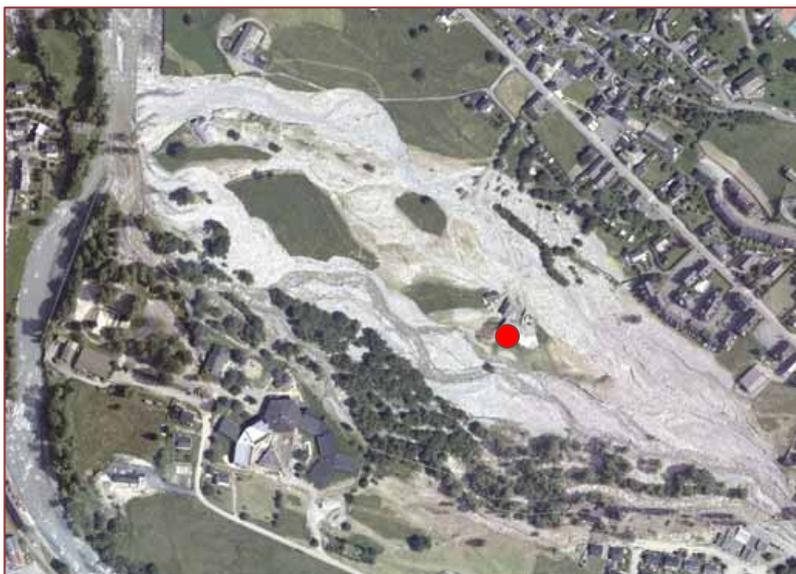
Cependant, elles apportent des informations intéressantes au même titre que les autres images aériennes. Leur exploitation est seulement moins souple ou directe.

☞ Les **prises de vue obliques par hélicoptère**, ainsi que les vidéos aériennes, apportent des informations complémentaires, par rapport aux supports décrits précédemment.

Le fait de disposer d'angles de vue multiples permet de mieux décrire l'état et de comprendre l'évolution de certains sites ainsi que le rôle de certains facteurs, naturels ou anthropiques. Cela permet de se rapprocher d'une vision tridimensionnelle et dynamique des cours d'eau, pendant ou immédiatement après la crue.

De ce point de vue, les **vidéos aériennes** sont extrêmement intéressantes pour l'analyse de la dynamique fluviale ou torrentielle. Pour le spécialiste qui en fait la lecture, elles montrent des états ou des comportements, qui ne seraient pas aussi visibles par une approche terrestre et permettent d'être « partout où il se passe quelque chose » au même moment, si plusieurs vols sont réalisés simultanément.

Le cône du Bastan à Luz-St-Sauveur (65) – vue verticale adaptée à la saisie sous SIG (source IGN/DDT65)



Le cône du Bastan à Luz-St-Sauveur (65) – vue oblique permettant de voir des talus et des chenaux (source DDT65)



Le cône du Bastan à Luz-St-Sauveur (65) – autre vue oblique permettant de voir les mêmes éléments sous un autre angle (source DDT65)



6.1.3 – Les prises de vue terrestres

Grâce aux appareils numériques, les **photographies** et les **vidéos** prises directement sur le terrain sont très nombreuses. Qu'elles aient été acquises pendant ou immédiatement après la crue, elles sont précieuses pour faire l'analyse de la dynamique fluviale et reconstituer certains processus locaux.

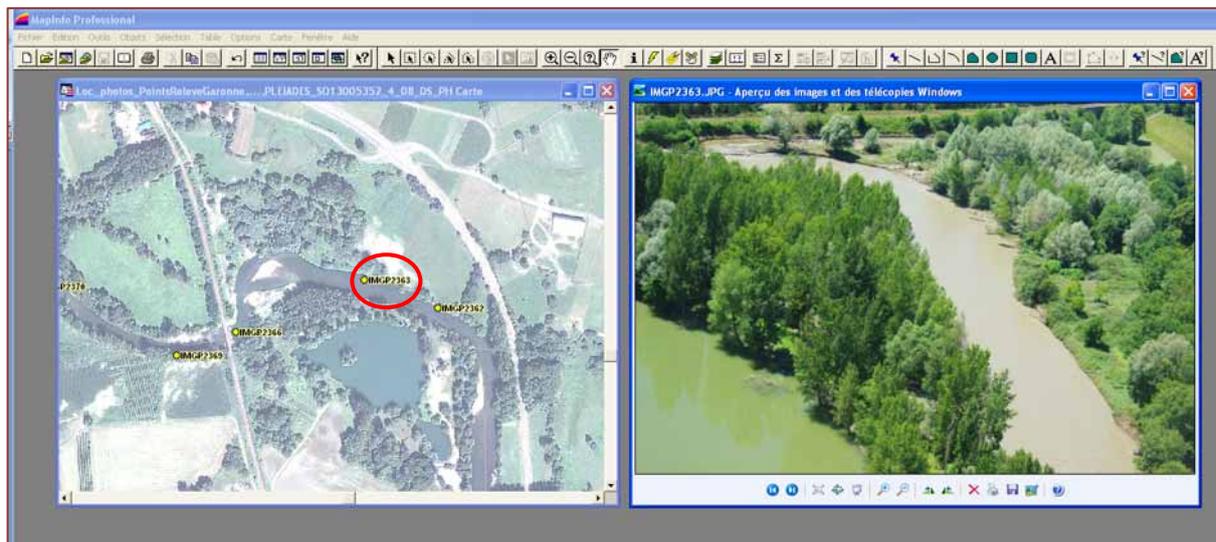
Avec le travail de collecte réalisé par plusieurs structures (C-PRIM, CNRS/Géode, etc.) et l'internet, elles constituent un volume important d'informations aisément disponibles.

Les principaux écueils les concernant sont relatifs :

- A leur très grand nombre, qui nécessiterait un archivage structuré pour en faciliter la recherche et l'exploitation ;
- Au manque de données attributaires les concernant, notamment une géolocalisation précise, la date et l'heure ;
- Etc.

Dans notre pratique, chaque fois que l'information était aisément disponible, les photos ont été répertoriées sous SIG. Cela permet de les ouvrir en même temps que les images aériennes ou satellitaires, complétant ainsi l'analyse relative à un site, la photo-interprétation et, éventuellement, la saisie sous SIG.

Visualisation simultanée d'un site, sous SIG et en photos aériennes verticale et oblique



6.1.4 – Recommandations concernant les données images

Concernant les données images, trois étapes sont à prendre en considération :

- L'acquisition ;
- La collecte et l'archivage ;
- L'exploitation.

Se pose également la question de ce que l'on souhaite analyser : les zones inondées, les dégâts, les processus morphodynamiques, les travaux, etc.

Sans considérer les coûts d'acquisition, qui peuvent constituer un critère de choix déterminant, ni les acquisitions altimétriques, qui constituent un objectif complémentaire, mais en considérant l'objectif principal **d'analyser la dynamique fluviale et torrentielle**, ce retour d'expérience amène les recommandations suivantes.

☞ Pour déterminer et cartographier les **zones inondées**, un **vol à basse altitude pendant** ou peu après le pic de la crue est à prévoir. L'exploitation des **images nadirales** par photo-interprétation nécessite de disposer d'images géo-référencées et ortho-rectifiées.

☞ Pour l'analyse de la dynamique fluviale et torrentielle, un **vol à basse altitude** (hélicoptère, ULM, drone) avec **prises de vue obliques** (photos, vidéos) pendant ou peu après le pic de la crue est souhaitable.

Il va permettre de constituer une mémoire dynamique de l'évènement et de repérer les zones où la morphogénèse est ou a été la plus active.

Cependant, il semble nécessaire de **former les preneurs de vue** pour qu'ils sachent quoi regarder et filmer ou photographier en priorité. En effet, les zones les plus impressionnantes ne sont pas forcément les plus pertinentes du point de vue de l'analyse.

Comme il se dégage de ce retour d'expérience, **cibler prioritairement les espaces tampons et les points durs** permettrait d'en décrire plus finement le comportement et les impacts. Ce repérage peut être réalisé a priori, de manière à constituer rapidement une sorte de plan de vol, une fois la zone touchée connue.

☞ Pour une analyse de la dynamique fluviale et torrentielle, un **vol à basse altitude**, après que les niveaux dans les cours d'eau aient libéré les lits majeurs, est recommandé. En fonction des conditions climatiques et hydrologique, cela peut correspondre à quelques jours ou une semaine, après la pluie génératrice.

Le point clé est de disposer d'une bonne **couverture image (nadirale)** du territoire le plus touché par les ajustements morphologiques, avant que les travaux de dégagement et de terrassement ne soient trop avancés. La réalisation préalable d'un vol pour des prises de vue obliques peut permettre cette délimitation des zones à couvrir en priorité.

| Chronologie \ Exploitation | Analyse des zones inondées | Analyse de la dynamique fluviale ou torrentielle |
|---|---|---|
| Pendant la crue | Images aériennes nadirales et orthorectifiées | Images aériennes obliques |
| | | Images terrestres (photos, vidéos) – Etat post-crue avant travaux d'urgence |
| Dès la décrue, semaine suivant l'évènement | Images terrestres (photos, vidéos) – Laissez et repères de crue | Images aériennes obliques et nadirales orthorectifiées |
| | Images aériennes obliques | Images terrestres (photos, vidéos) – Etat post-crue avant travaux d'urgence |
| Pendant les travaux d'urgence (sur plusieurs mois) | | Images terrestres (photos, vidéos) – Etat avant travaux |

☞ Après l'acquisition, vient le temps de la **collecte et de l'archivage**. Ce retour d'expérience montre une grande dispersion, dès le moment de la commande, concernant les diverses acquisitions, qu'elles soient publiques (DDT, DREAL, etc.) ou privées (EDF, etc.).

De là découle aussi un **manque d'information et d'échange d'information**, notamment entre services et partenaires institutionnels sur ce qui a été commandé, couvert et restitué.

Les difficultés rencontrées pour collecter ces informations, puis les images, dans le cadre de la présente étude en sont la parfaite illustration. Il a parfois fallu plusieurs mois pour savoir qu'une campagne de prises de vues existait et encore plusieurs semaines pour en disposer, malgré l'appui de la DREAL de bassin ou de l'AEAG.

Il semblerait donc pertinent de mettre en place une sorte de « **guichet unique** », opérationnel dès l'annonce de la crue, qui centralise l'expression des besoins, voire les commandes et les moyens, puis organise la collecte et la mise à disposition, auprès des utilisateurs.

Comme ce type d'évènement ne connaît pas les frontières administratives et peut concerner plusieurs bassins versants en même temps, une **structure (supra)régionale**, comme la DREAL de bassin ou le SCHAPI, serait probablement la plus adaptée pour tenir ce **rôle centralisateur et (re)distributeur**.

La mise en action d'une **cellule opérationnelle SIG/internet en temps de crise**, qui centralise ces données images ou les informations associées, les géo-référence puis les met à disposition via une plate-forme ou un serveur internet dédiée, paraît nécessaire.

Même si le travail de photo-interprétation à partir d'un serveur WMS n'est pas idéal en termes de rapidité, la mise à disposition d'ortho-photos relatives à la crue sur le « **géoportail** » de l'ICGC, en Catalogne, constitue un excellent outil de travail et d'échange. Son équivalent côté français constituerait une avancée significative, même avec un accès plus restreint.

☞ Pour les **images aériennes privées**, photos ou vidéos de la presse écrites ou télévisuelles, il serait souhaitable de mettre en place des conventions afin que le « guichet unique » puisse collecter non seulement les reportages diffusés mais également les rushs vidéos, dans lesquels un spécialiste pourra trouver et analyser des informations intéressantes.

☞ Pour les **images terrestres**, photos ou vidéos, il n'est pas envisageable d'envoyer des cohortes de techniciens sur le terrain. Les riverains concernés constituent une ressource irremplaçable, qui mériterait d'être mieux utilisées et mises en valeur.

A l'exemple du travail de collecte réalisé par le laboratoire Géode (CNRS / Toulouse 2 - <http://cruespyr2013.canalblog.com/>), les **appels à contribution et à témoignage** sont utiles et nécessaires.

Il est également souhaitable de demander à ce que, **avant chaque intervention ou travaux**, des photos (ou vidéos) du site concerné soient prises, par l'entreprise ou le maître d'œuvre, et cela avant les premières interventions.

Face au volume considérable de données potentiellement disponibles, la difficulté vient ensuite de l'archivage et de la consultation des images ainsi collectées.

A nouveau un **géo-référencement (géo-tagage)**, ou un classement géographique, paraît une étape nécessaire, afin de pouvoir rapidement consulter et exploiter les données relatives à un site ou un cours d'eau.

Page d'accueil du blog
<http://cruespyr2013.canalblog.com/>,
mis en place par le laboratoire Géode



Dans le même temps, **l'envoi de spécialistes sur le terrain** peut être intéressante, sur la base d'une présélection de sites prioritaires. De la même manière que quelques spécialistes de l'analyse des inondations sont rapidement mobilisables pour faire l'inventaire des repères de crue, d'autres pourraient être mis à contribution pour faire des observations directes et acquérir rapidement des données relative à la dynamique de la crue, avant que les travaux d'urgence n'aient effacé trop de traces et d'indices.

☞ **L'exploitation et l'analyse des données** reposent principalement sur la **photo-interprétation** et **l'analyse diachronique**, à réaliser par un spécialiste de la dynamique fluviale et torrentielle.

Dans les deux cas, la saisie et la cartographie sous SIG sont les outils paraissant les mieux adaptés.

Pour la **photo-interprétation**, il est nécessaire de disposer d'un référentiel géographique fiable. La BD-ortho (IGN) est tout à fait adapté.

Pour **l'analyse diachronique**, plusieurs échelles de temps sont à considérer. Sur un pas de temps pluriséculaire, les cadastres anciens ainsi que la carte d'état-major (XIX^{ème}) sont intéressants même s'ils ne permettent pas toujours une grande précision.

Sur un pas de temps pluridécennal, les photographies aériennes anciennes, généralement disponibles à partir des années 1940, puis avec une fréquence moyenne d'une nouvelle campagne tout les 5 ans, sont un support idéal. Elles doivent faire l'objet d'un traitement (ortho-rectification, géo-référencement) pour une exploitation optimale sous SIG.

Pour les deux dernières décennies, l'utilisation de la BD-Ortho (IGN) est recommandée, d'autant que des acquisitions à haute définition commencent à être disponibles.

Cependant, comme le montre les analyses réalisées sur le gave de Pau (65), en cas de successions de crues morphogènes entre deux campagnes IGN, il est souhaitable d'avoir un point intermédiaire. Cela conforte l'intérêt de mettre en place une **acquisition systématique après chaque évènement morphogène** significatif, comme l'a fait la DDT 65, après la crue d'octobre 2012.

Concernant les éléments à analyser, ils ont été largement présentés dans la présente étude, à savoir principalement :

- Le tracé des berges (ou de la bande active), avant et après la crue, dont il sera possible de déduire les reculs de berge ou les pertes de terrain ;
- Les zones de sédimentation d'alluvions grossières ;
- Les embâcles et zones d'atterrissement de chablis ;
- Les griffes d'érosion en lit majeur, qui pourront être associées aux rescindements de méandres, amorcés ou effectifs ;
- Les chenaux de crue en lit majeur ;
- Les laisses de crue ;
- Les instabilités de versants ;
- L'occupation des sols des zones érodées ;
- Etc.

L'inventaire cartographique de ces éléments directement relatifs à l'évènement pourra être mis en relation avec celui, plus stable, des **points durs** et des **ouvrages transversaux** (pont, seuil, etc.) **ou longitudinaux** (digue, protection de berge, etc.) présents au sein du lit mineur, de l'espace de mobilité fonctionnel ou du champ d'inondation de la crue.

A noter que cet inventaire peut être réalisé en-dehors de l'analyse évènementielle. Il s'agira ensuite de le tenir à jour, en fonction des nouvelles constructions ou aménagements, ainsi qu'après chaque crue morphogène, en notant l'état et le comportement des plus impliqués d'entre eux. Une autre mise à jour sera à envisager au terme des travaux post-crue.

Sur ce point, il apparaît que des **observations de terrain** sont nécessaires pour compléter l'exploitation des données images. A nouveau, plus elles interviennent tôt, après l'évènement hydrologique, une fois les niveaux d'eau suffisamment bas mais avant que les travaux d'urgence ne soient trop avancés, plus les informations collectées seront fiables, précises et pertinentes.

Idéalement, certaines d'entre elles pourraient être couplées à une géo-localisation (trace GPS), s'il apparaît nécessaire de préciser certains points des cartographies envisagées, ainsi qu'à de **levés topographiques**. Ces derniers, peu exploités dans le cadre de la présente étude, en raison notamment de son démarrage « tardif », peuvent aider à décrire la morphologie des cours d'eau et ses évolutions et à quantifier certaines d'entre elles : érosions, dépôts d'alluvions, profil en long, sections d'écoulement, etc.

Le recours aux levés Lidar ou photogrammétriques est également intéressant pour une analyse altimétrique sur des zones étendues. Dans ce cas aussi, disposer d'un référentiel anté-crue pour décrire les évolutions et effectuer des quantifications est une nécessité. **Acquérir rapidement ces informations**, avant que les travaux n'aient trop profondément modifié l'état directement héritée de la crue, est également indispensable.

6.2 – Pour le partage et la gestion intégrée de l'espace rivière

6.2.1 – La crue est aussi un outil de connaissance

Vécue comme une catastrophe par les riverains, qui voient un paysage familier être modifié voire se transformer en véritable chaos, une telle crue constitue un **outil de connaissance** irremplaçable, dès lors qu'il est mis à profit dans ce sens et avec une réactivité équivalente à celle conduisant à la mise en œuvre des premiers travaux d'urgence.

Elle permet de mieux connaître :

- Les **processus hydrodynamiques** (donc les aléas) et les espaces exposés aux risques naturels associés ;
- Les **espaces tampons** et leur rôle ou comportement pendant ce type d'évènement ;
- Les **facteurs aggravants**, d'origine naturelle ou anthropique et leurs principaux impacts ;
- Le **niveau d'efficacité** ou de fragilité des **protections** existantes ;
- Le **niveau de vulnérabilité** des ouvrages transversaux ou longitudinaux, ainsi que des autres **enjeux humains** implantés sur le lit majeur, la bande active ou le cône de déjection des cours d'eau concernés ;
- Les **défauts de gestion**, d'entretien ou de maintenance, qui peuvent concerner les boisements ou des ouvrages ;
- Etc.

Judicieusement prises en considération, ces informations permettent de tirer partie d'une catastrophe pour mieux se prémunir contre les dommages d'évènements futurs, d'importance équivalente ou supérieure. Elles renvoient donc aux questions relatives à :

- La **prévention** des inondations et de la mobilité fluviale ou torrentielle ;
- La **reconstruction** après un tel évènement ;
- **L'occupation des espaces** exposés à ces risques, notamment des zones tampons ;
- Etc.

Elles contribuent donc à répondre à des préoccupations, locales mais également régionales ou nationales, relatives à **l'aménagement du territoire**, au **développement économique** des zones de montagne, à la **prévention des risques naturels**, à la **gestion des milieux aquatiques** et à leur **gouvernance**.

6.2.2 – Les réflexes post-crise

Dans ce contexte de crues torrentielles et de cours d'eau à forte mobilité latérale, la protection des enjeux riverains contre l'inondation ou l'érosion est fortement concurrentielle :

- Entre une rive et l'autre ;
- Entre l'amont et l'aval.

Chacun voudrait pouvoir protéger ses biens ou ses activités, contenir le cours d'eau dans un espace réduit et éloigné.

Pour expliquer l'ampleur des dégâts, le « réflexe » conduit souvent à incriminer le **transport solide** et la **végétation** alluviale ou rivulaire alors que ...

- Ils ne sont pas les seuls facteurs aggravants (naturels ou anthropiques) concernés ;
- Ils jouent également des rôles positifs du point de vue sécuritaire (rugosité accrue, dissipation d'énergie, stabilisation des terrains, effet peigne, etc.) ;
- Leurs impacts peuvent être temporaires.

☞ Pour remettre en état ou se protéger, les solutions « réflexes » conduisent à **supprimer les boisements**. Cela revient aussi à :

- ☹ Supprimer des points durs ;
- ☹ Limiter le risque de formation d'embâcles.

Mais également à :

- ☹ Réduire la rugosité des chenaux d'écoulement ;
- ☹ Limiter les effets de « peigne » joués par les arbres.

Après la crue de juin 2013, de nombreux avis se sont exprimés pour que tous les arbres présents le long des cours d'eau soient supprimés. Si cela peut effectivement réduire le risque de formation des embâcles, la perte de rugosité et de stabilisation des berges par les systèmes racinaires ne peuvent qu'accroître la dynamique d'une crue équivalente et les dommages associés.

Zones alluviales déboisées, à gauche sur le cône du Bastan à Esquièze (65), à droite sur celui du gave de Cauterets à Soulom (65) – source GéoDiag/Avion jaune



☞ Pour remettre en état ou se protéger, les solutions « réflexes » conduisent à **déplacer les bancs de galets et/ou recalibrer les lits mineurs par curage**. Cela revient aussi à :

- ☹ Augmenter le gabarit des chenaux d'écoulement ;
- ☹ Abaisser la ligne d'eau ;
- ☹ Réduire les risques de débordement.

Mais également à :

- ☹ Réduire la sinuosité et accroître la pente longitudinale ;
- ☹ Réduire la rugosité des chenaux d'écoulement ;
- ☹ Limiter les possibilités de reconstitution d'un pavage ;
- ☹ Réduire les stocks d'alluvions facilement mobilisables ;
- ☹ Altérer la continuité du transport solide par charriage ;
- ☹ Limiter le fonctionnement des champs d'expansion de crue.

Les bancs de galets sont perçus comme un facteur d'encombrement et de rehaussement des lits fluviaux ou torrentiels. Ces modifications topographiques existent. Cependant, elles peuvent être temporaires, jusqu'à ce que la prochaine crue morphogène reprenne une partie des alluvions et favorisent aussi le fonctionnement des espaces tampons (débordement, mobilité, stockage), donc la dissipation de l'énergie des crues.

Curage et régalinge de galets, à gauche sur la Pique à Bagnères-de-Luchon (31), à droite sur la Neste du Iouron à Artiguelongue (65)



☞ Pour remettre en état ou se protéger, les solutions « réflexes » conduisent à **durcir les berges**. Cela revient aussi à :

- ☺ Consolider les berges ;
- ☺ Limiter la mobilité latérale des cours d'eau.

Mais également à :

- ☹ Réduire la rugosité des chenaux d'écoulement ;
- ☹ Réduire les stocks d'alluvions mobilisables ;
- ☹ Limiter les possibilités de reconstitution d'un pavage ;
- ☹ Altérer la continuité du transport solide par charriage ;
- ☹ Limiter l'effet « tampon » des zones de mobilité latérale ;
- ☹ Augmenter le nombre ou le linéaire des points durs ou verrous ;
- ☹ Augmenter le risque d'érosion verticale.

La (re)mise en place de protections de berge en génie civil conduit à **chenaliser** le cours d'eau, à augmenter le nombre et l'étendue des points durs.

Si elle est réalisée de manière systématique, sans prendre en compte la nature ou l'importance des **enjeux** protégés, elle peut conduire à limiter significativement les possibilités **d'ajustements morphologiques**, lors des prochaines crues morphogènes.

En réponses à ces contraintes, parfois nouvelles, le cours d'eau cherchera d'autres modalités d'ajustement pour dissiper son énergie, par exemple en s'incisant au droit de la portion contrainte ou en érodant une portion de berge, plus en aval.

Protections de berge, à gauche sur la Garonne en val d'Aran (31), à droite sur le gave de Pau à Pierrefitte (65)



☞ Pour remettre en état ou se protéger, les solutions « réflexes » conduisent à **endiguer les cours d'eau**. Cela revient aussi à :

- ☺ Augmenter le gabarit des chenaux d'écoulement ;
- ☺ Réduire les risques de débordement.

Mais également à :

- ☹ Limiter l'effet « tampon » des champs d'expansion de crue ;
- ☹ Augmenter le nombre ou le linéaire des points durs ou verrous ;
- ☹ Augmenter le risque de mise en vitesse par surverse ou ouverture de brèche.

Les endiguements longitudinaux, destinés à empêcher les débordements, sont généralement implantés en haut de berge et ont souvent été réalisés à partir de matériaux de curage (alluvions grossières). Une implantation plus proche des enjeux à protéger contre les inondations et une construction selon des normes géotechniques ou de génie civil adaptées à ce type d'ouvrage seraient plus efficace et fiable.

Endiguements longitudinaux, à gauche sur la Neste d'Oô à Oô (31), à droite sur la Pique à Salles-et-Pratviel (31)



☞ Pour remettre en état ou se protéger, les solutions « réflexes » conduisent à **reconstituer les terrains perdus** du fait de la mobilité latérale. Cela revient aussi à :

- ☺ Restaurer le paysage ;
- ☺ « Récupérer » des espaces pour les implantations de bâtiments, d'équipements ou d'activités économiques.

Mais également à :

- ☹ Réduire les capacités fonctionnelles des espaces tampons ;
- ☹ Concentrer les flux liquides et solides des prochaines crues ;
- ☹ Maintenir voire augmenter la vulnérabilité face aux risques d'inondation ou de mobilité.

Reconstruction d'une partie du camping d'Esterre (65), inondé par le Bastan en 2013



6.2.3 – Des « réponses réflexes » qui amènent de nouvelles questions

Au bilan, pour remettre en état ou se protéger, les solutions « réflexes » conduisent dans l'urgence et de manière assez systématique et peu discriminante, à :

- Reconstituer les terrains perdus ;
- Recalibrer/recentrer les lits mineur ;
- Supprimer les boisements rivulaires ou alluviaux ;
- Durcir les berges ;
- Endiguer les cours d'eau ;
- Curer/déplacer les galets.

Cela amène donc à :

- **Refermer les espaces** tampons activés par la crue ;
- **Reporter les flux** liquides et solides et les contraintes hydrodynamiques des futures crues vers d'autres zones ou portions de cours d'eau.

Du fait de ces travaux post-crise, les capacités de prévision qui découlent du retour d'expérience de ce type d'évènement sont immédiatement amoindries. Chaque changement d'état, de géométrie, de configuration découlant de ces travaux, aura ses propres impacts. Chaque situation nouvelle, ainsi engendrée, sera susceptible d'occasionner un autre comportement local du cours d'eau, même pour une crue similaire.

Les questions qui découlent de cette fermeture et de ces reports peuvent se résumer comme suit :

- Quelles (nouvelles) zones recevront les flux ?
- Quels seront leurs niveaux de vulnérabilité ?
- Quelles sont les capacités de prévision en la matière ?
- Quels niveaux de précision présentent les prévisions possibles ?
- Quelle gestion pour les zones réceptrices (charriage, embâcles, etc.) ?
- Quelle gestion des boisements alluviaux et rivulaires ?

☞ Le cas du gave de Pau entre Soulom et Préchac (65) permet d'illustrer cette problématique. Les protections mises en place pour les uns (industrie, prairies, etc.) peuvent constituer des facteurs aggravants pour les autres (route départementale, seuil SHEM, etc.).

En amont, le cône de déjection du gave de Cauterets va être totalement réaménagé et en majeure partie déboisé.

En rive gauche, la berge qui supporte la zone industrielle de Pierrefitte a été protégée sur plusieurs centaines de mètres, en amont d'une portion où le gave menace directement la route départementale, en rive droite.

Vers l'aval, la bande active ouverte par la crue de juin 2013, a été partiellement refermée pour reconstituer des prairies détruites et protéger des habitations sur la commune d'Adast.

En vis-à-vis et dans le prolongement de cette zone à forte mobilité latérale, le gave longe à nouveau la route départementale, qui n'est que partiellement protégée.

Enfin, le seuil de Beaucens, verrou anthropique par lequel le gave est censé passé, est menacé par la mobilité latérale, comme en témoigne son contournement par la rive droite, en juin 2013.

Le gave de Pau à Beaucens/Adast (65) – les protections et aménagements réalisés en amont ou en rive gauche peuvent constituer des facteurs aggravants pour les enjeux présents en rive droite et en aval (source DDT65)



6.3 – Les messages clés à retenir

Lieux des dégâts et des transformations les plus frappantes, les **espaces tampons** (voir § 5.1), leur vulnérabilité (enjeux présents / aléas possibles) mais également leur fonction sécuritaire (écrêtement des inondations, ralentissement de la propagation des crues, stockage des sédiments charriés et des chablis, etc.) nécessitent d'être pris en compte dans la prévention comme dans la « reconstruction ».

La Neste d'Aure à Grézian (65) – En amont du verrou, la zone tampon a permis à la Neste d'inonder, de divaguer et de déposer les alluvions charriées et de nombreux chablis – (source DDT65)



La diminution de leur **capacité de stockage** (eau, sédiments) ou de divagation conduirait à l'accroissement des risques pour l'aval, toutes choses étant égales par ailleurs.

Le maintien de leurs capacités à recevoir les flux liquides et solides nécessite :

- Le curage des alluvions charriées et de définir le devenir des matériaux curés pour assurer le continuum du transport solide ;
- De choisir une occupation des sols compatible avec une exposition forte aux risques d'inondation ou d'érosion mais pose la question du rétablissement de certaines activités présentes avant la crue.

Dans ce contexte montagnard et torrentiel, la crue comme la gestion post-crise mettent en lumière la **forte interdépendance** sur les plans fonctionnel (inondation, mobilité, charriage) et sécuritaire (aléas, vulnérabilité) qui existent entre les fonds de vallées, dans un voisinage direct mais également à des distances pluri-kilométriques.

Ainsi plusieurs témoignages font part des craintes de riverains qui voient les berges de leurs « voisins » être consolidées ou endiguées et pressentent bien qu'ils risquent d'en subir les conséquences dans la mesure où « on n'arrête pas l'eau ! ».

De même, certains élus de la vallée de Fos / St-Béat ont exprimé leur crainte en constatant l'ampleur des travaux de chenalisation de la Garonne réalisés dans le val d'Aran. Même s'ils sont tentés de demander des aménagements similaires sur leur territoire, ils imaginent bien que les futures crues pourraient être d'autant plus dommageables sur leur portion de fleuve.

Cela conduit à mettre en avant certains messages clés à destination des gestionnaires, des techniciens comme des riverains :

☞ Il est nécessaire de s'appuyer sur une **connaissance** large et précise de tels phénomènes. Cela permet d'asseoir les analyses techniques et scientifiques, de les adapter au contexte local et d'accroître les capacités de prévisions et de prévention des risques.

Il faut donc faire une place pleine et entière au **retour d'expérience** et l'organiser pour une meilleure réactivité et efficacité, d'autant qu'il se trouve souvent en concurrence avec la mise en œuvre rapide des travaux d'urgence.

☞ Il est nécessaire d'accepter et de préserver les **zones tampons** et leur fonctionnement, qui ont un rôle déterminant pour atténuer la dynamique de telles crues. Dans le cas contraire, il faut prévoir des **mesures compensatoires**, afin de limiter l'aggravation des risques d'inondation ou de mobilité vers l'aval ou en vis-à-vis.

☞ Il est illusoire et dangereux de contraindre la rivière sur de longues portions. Il est préférable de sélectionner les enjeux et les zones à protéger et de privilégier des protections au **plus près des enjeux prioritaires**, plutôt que sur la berge ou le haut de berge.

☞ Il est nécessaire de prendre en compte le fait que les **espaces sécurisés** propices aux enjeux anthropiques sont limités, dans ces zones de montagnes. De plus, les protections mises en place nécessitent une **surveillance** et une **maintenance** qui exigent des moyens appropriés et inscrits dans la durée.

A leur tour, ces messages renvoient à des notions qui concernent :

- La gouvernance relative à la gestion des milieux aquatiques et des risques naturels ;
- La gestion intégrée pour ces domaines de compétence ;
- Les échelles territoriales et temporelles adaptées pour répondre aux contraintes imposées par le milieu physique et disposer des moyens suffisants.



Merci à tous les contributeurs, publics ou privés, directs ou indirects, qui par leurs images et leurs témoignages ont permis ces constats et ces analyses.
C. Beaufrère, GéoDiag – Gan, juillet 2014-07-25