



PAYS DE LOURDES ET DES VALLÉES DES GAVES

Classement du système d'endiguement du gave de Cauterets sur les communes de Pierrefitte-Nestalas et de Soulom et étude de faisabilité d'aménagements hydrauliques



NOTE TECHNIQUE
HYDROMORPHOLOGIE

N° d'Affaire ARI-18-044

Version 1.0

Avril 2020

Classement du système d'endiguement du gave de Cauterets sur les communes de Pierrefitte-Nestalas et Soulom

HYDROMORPHOLOGIE

Réf. ARI-18-044/NOTE METHODOLOGIQUE - HYDROMORPHOLOGIE/Version 1.0

Avril 2020

Avril 2020

ARI-18-044/NOTE METHODOLOGIQUE/Version 2.0



HYDRETTUDES

SUIVI ET VISA DU DOCUMENT

Réf. ARI-18-044

Etude : Classement du système d'endiguement du gave de Cauterets sur les communes de Pierrefitte-Nestalas et de Soulom et étude de faisabilité d'aménagements hydrauliques

Phase : NOTE METHODOLOGIQUE - HYDROMORPHOLOGIE

Date de remise : Avril 2020

Version : 1.0

Statut du document : Définitif

Propriétaire du document : PLVG

Rédacteur : Jean-Manuel DELEUZE Vérificateur : Philippe MARTIN



SOMMAIRE

SUIVI ET VISA DU DOCUMENT	3
SOMMAIRE	4
LISTE DES FIGURES	4
LISTE DES TABLEAUX	7
1 PRESENTATION ET VOCABULAIRE.....	8
1.1 Présentation	8
1.2 Question de vocabulaire	8
2 LE CONE DE DEJECTION DU GAVE DE CAUTERETS	9
2.1 Généralités concernant les cônes de déjection	9
2.1.1 Définition et morphologie	9
2.1.2 Morphogénèse des cônes de déjection	10
2.1.3 Anthropisation des cônes de déjection	11
2.2 Le cône de déjection du gave de Cauterets	11
2.2.1 Eléments généraux concernant le cône du gave de Cauterets	11
2.2.2 Analyse diachronique du cône de déjection du gave de Cauterets.....	17
2.3 Une morphologie à suivre dans le cadre d'un système d'endiguement.....	65
2.3.1 Des éléments de connaissance essentiels pour une gestion dynamique	65
2.3.2 Suivi topographique dynamique.....	66
3 BIBLIOGRAPHIE	70

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Exemple de cône de déjection en suisse.....	9
Figure 2 : Spatialisation de la dangerosité sur un cône de déjection d'après Antoine & Desailly (2002).....	11
Figure 3 : (1) et (2) cône de déjection du gave de Cauterets ; (3) géologie du secteur (carte géologique 1/50.000ème, BRGM, 1980).	15
Figure 4 : Cône de déjection résiduel du gave de Cauterets	16
Figure 5 : Gave de Cauterets en 1947, avant les travaux de confortement des berges de la traversée de Pierrefitte-Nestalas et Soulom	19
Figure 6 : Ancien bras du gave de Cauterets situé en aval du pont de Soulom.....	20
Figure 7 : Evolution de la bande active du Gave de Cauterets entre 1947 et 1979.....	22
Figure 8 : Evolution de la bande active du Gave de Cauterets entre 1979 et 1983.....	23



Figure 9 : Evolution de la bande active du Gave de Cauterets entre 2006, 2013 et 2016	24
Figure 10 : Evolution de la bande active du Gave de Cauterets entre 1983 et 2006.....	25
Figure 11 : Bande active et cône de déjection post-crue 2013.....	26
Figure 12 : Levé Grandes Forces Hydrauliques, octobre 1913.....	28
Figure 13 : Comparaison des profils en long GFH 1913, et des fils d'eau levés par GEOFIT en 2018 et 2019	30
Figure 14 : Comparaison des profils 2009 (TCEP)-2015 (RTM)-2018 et 2019 (GEOFIT) sur le cône résiduel.....	31
Figure 15 : carte des zones équivalentes en termes d'évolution verticale.....	32
Figure 16 : Evolution de la confluence entre le gave de Cauterets et le gave de Gavarnie (1947-1978)	35
Figure 17 : Evolution de la confluence entre le gave de Cauterets et le gave de Gavarnie (1978-1979)	36
Figure 18 : Evolution de la confluence entre le gave de Cauterets et le gave de Gavarnie (1979-1983)	37
Figure 19 : Evolution de la confluence entre le gave de Cauterets et le gave de Gavarnie (1983-2001)	38
Figure 20 : Evolution de la confluence entre le gave de Cauterets et le gave de Gavarnie (2001-2006)	39
Figure 21 : Evolution de la confluence entre le gave de Cauterets et le gave de Gavarnie (2006-2013)	40
Figure 22 : Evolution de la confluence entre le gave de Cauterets et le gave de Gavarnie (2013-2016)	41
Figure 23 : Emprise des données utilisées pour estimer le volume de matériaux déposés dans le secteur de Pierrefitte-Nestalas et Soulom lors de la crue de juin 2013.	44
Figure 24 : la séquence paraglaciale d'après Church & Ryder (1972)	46
Figure 25 : Localisation des granulométries réalisées en 2019.....	47
Figure 26 : Courbe granulométrique effectuée en amont du pont de la RD 921	48
Figure 27 : Photographie du substrat du lit en amont du pont de Soulom, matériaux grossiers (cailloux grossiers à blocs soit 64-1024 mm dans la classification de Wentworth) avec grains plus petits (graviers grossiers à cailloux grossiers soit 8-64 mm). L'armure du lit n'est pas colmatée. Les grains sont émoussés ou émoussés-cassés donc dans le stock alluvial depuis un certain temps.....	48
Figure 28 : (1) gros grain émoussé (dm = 146.73, m = 1 574 g), ; (2) grain émoussé-cassé (dm = 106.78, m = 675 g). Ces deux items représentatifs des matériaux en lit (en termes de forme) sont dans le stock depuis longtemps et ont été transportés-déposés à plusieurs reprises	48
Figure 29 : Courbe granulométrique effectuée en aval de l'apex du cône	49



Figure 30 : Courbe granulométrique en mm effectuée en amont proche de la confluence	49
Figure 31 : Section utilisée pour calculer le transport solide à l'amont du pont de Soulom	51
Figure 32 : atterrissements relevés en avril 2019	54
Figure 33 : (1) et (2) → Granulométrie très grossière sur l'atterrissement n° 10. L'échelle est donnée par la mire qui fait 50 cm	55
Figure 34 : (1) et (2) → Atterrissement n° 9, on note le début de végétalisation (par un peuplier) et surtout la granulométrie très grossière avec un faible affinage amont aval ..	55
Figure 35 : (1) → vue de l'atterrissement n° 7 présentant une passée sableuse recouvrant partiellement le substrat grossier ; (2) → focus sur un cluster grossier entouré de bed patchiness. Echelle de 50 cm.....	55
Figure 36: (1)→ matériaux grossiers - pluridécamétriques ; (2) → matériaux grossiers bordés par une bed patchiness. On note une granulométrie composée essentiellement de matériaux émoussés ou cassés-émoussés témoignant d'un faible renouvellement de la charge solide	56
Figure 37 : Granulométrie grossière sur les atterrissements en amont proche du pont Interzone avec lit plurichenalisé. Sur ces photos on ne note pas de tri granulométrique (affinage amont → aval). (1)→ Atterrissement n° 4 , les matériaux grossiers sont déposés dans une zone de basculement permettant de raccorder le chenal de rive droite avec la mouille générée par le pont Interzone. (2) → Atterrissement n° 4, les matériaux les plus grossiers semblent s'être déposés de part et d'autre de la structure.	56
Figure 38: (1) et (2) → Matériaux de l'atterrissement n° 4 à granulométrie étendue et grossière dans la partie interne d'un atterrissement, entourée de zones plus grossières et par endroit de quelques passées sableuses (bed patchiness). Echelle de 50 cm.	56
Figure 39 : (1) et (2) → La granulométrie est très hétérogène et est étendue comme l'illustrent ces deux photos prises sur l'atterrissement n° 3. Echelle de 50 cm	57
Figure 40 : Seuil de raccordement en amont immédiat de la confluence semblant indiquer une érosion régressive provenant de l'abaissement du gave.....	57
Figure 41 : (1) et (2) seuil de raccordement en vue proche. Au niveau de ce seuil le gave de Cauterets diffuse et se sépare ainsi en deux bras	57
Figure 42 : (1) → Atterrissement central en amont du seuil en tête de zone d'étude ; (2) → matériaux stockés en rive droite sous la forme d'un masque rocheux.....	58
Figure 43 : (1) et (2) →vue du point d'inflexion au niveau du garage Palette ; (3) →vue depuis l'aval de ce point d'inflexion dans le tronçon où la section est déjà élargie. On note la granulométrie extrêmement grossière de l'atterrissement à cet endroit (blocs au sens de la classification de Wentworth, soit des matériaux dont le diamètre est compris entre 256 et 1 024 mm).....	59
Figure 44 : Analyse de la zone d'expansion-contraction de la bande active corsetée.....	60
Figure 45 : (1) → zone de l'apex fixé du cône résiduel (début d'ouverture de la section et début du masque rocheux); (2) → zone de l'apex (A), on note le désaxement du lit et le	



masque rocheux (B) en rive droite ainsi que le mur-digue en rive gauche. Le lit commence à divaguer voire tresser. 61

Figure 46 : (1) et (2) → Structures alluvionnaires remobilisables (n° 6, 5 et 4, cf. Figure 32), dans la bande active en aval de l'apex, on note le masque rocheux présent 62

Figure 47 : Atterrissement n° 6 (cf. Figure 32 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) en cours de végétalisation. Cette végétation s'est développée sur une zone de dépôts fins type bed patchiness , (1) → strate herbacée et arbustive avec essentiellement des peupliers ; (2) → saules frangeant la structure..... 62

Figure 48 : (1) → Le gave de Cauterets en amont du pont interzone, ayant débordé sur sa rive droite lors de la crue de 2005, photo Hydrétudes ; (2) → vue du secteur du pont interzone en post-crue 2012, on note les traces de débordements et les accrétions en rive droite en amont du pont, photo CD 65..... 63

Figure 49 : (1) et (2) → Impact du pont interzone sur les écoulements lors de la crue de 2012. Le gave a largement débordé sur sa rive gauche, la ripisylve permet de matérialiser la berge de rive droite (photographie : Gendarmerie nationale)..... 63

Figure 50 : le pont interzone en post-crue 2012, vu depuis sa rive droite On note les traces de débordement et les accrétions en rive droite ainsi que la répartition des deux chenaux. 63

Figure 51 : Pont interzone en post-crue 2012 64

Figure 52 : La partie distale du cône du gave de Cauterets en post-crue 2013..... 64

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : missions photographiques retenues pour l'analyse diachronique en plan..... 18

Tableau 2 : Profils retenus pour l'analyse diachronique en altimétrie..... 27

Tableau 3 : Pente moyenne du Gave de Cauterets par tronçons..... 33

Tableau 4 : Evolution verticale du fond du lit en comparant la topographie du fond du lit 33

Tableau 5 : Evolution verticale du fond du lit en comparant les fils d'eau 34

Tableau 6 : tendances d'évolution verticale du lit..... 34

Tableau 7 : comparaison (indicative) des granulométries effectuées par Péteuil (2004) et Hydrétudes (20196) 50

Tableau 8 : Plage de validité de la formule de Recking 50

Tableau 9 : valeurs caractéristiques..... 51

Tableau 10 : Volume de matériaux transportés lors de la crue de 2013 en fonction de trois granulométries différentes 53

Tableau 11 : Volume des structures alluvionnaires de la zone d'étude..... 53

Tableau 12 : Stratégie de gestion à développer 67



1 PRESENTATION ET VOCABULAIRE

1.1 PRESENTATION

Le présent document détaille le fonctionnement hydromorphologique du gave de Cauterets sur son cône de déjection anthropisé.

Il s'intègre dans l'étude du **Classement du système d'endiguement du gave de Cauterets sur les communes de Pierrefitte-Nestalas et de Soulom et étude de faisabilité d'aménagements hydrauliques** lancée par le PLVG.

Son objectif principal est de comprendre le fonctionnement dynamique récent de ce cône de déjection fortement anthropisé, pour l'intégrer à la stratégie de gestion du système d'endiguement.

1.2 QUESTION DE VOCABULAIRE

Le cône de déjection du gave de Cauterets, comme nous le préciserons plus loin présente une morphologie particulière nécessitant l'**emploi de termes particuliers**. C'est pourquoi des termes comme demi-cône tronqué, bande active mineure et majeure ont été introduits.

La lecture du document et les explications qui y sont fournis explicitent ces néologismes.



2 LE CONE DE DEJECTION DU GAVE DE CAUTERETS

En déclaration liminaire nous indiquerons la difficulté d'une approche géomorphologique sur un cône de déjection fortement anthropisé.

En effet, nous n'avons pas d'exemple similaire (dans la bibliographie scientifique) d'étude sur des cônes contraints par anthropisation et l'utilisation des méthodes classiques (approche calculatoire...) s'en trouve ici inopérante et doit donc être fortement adapté

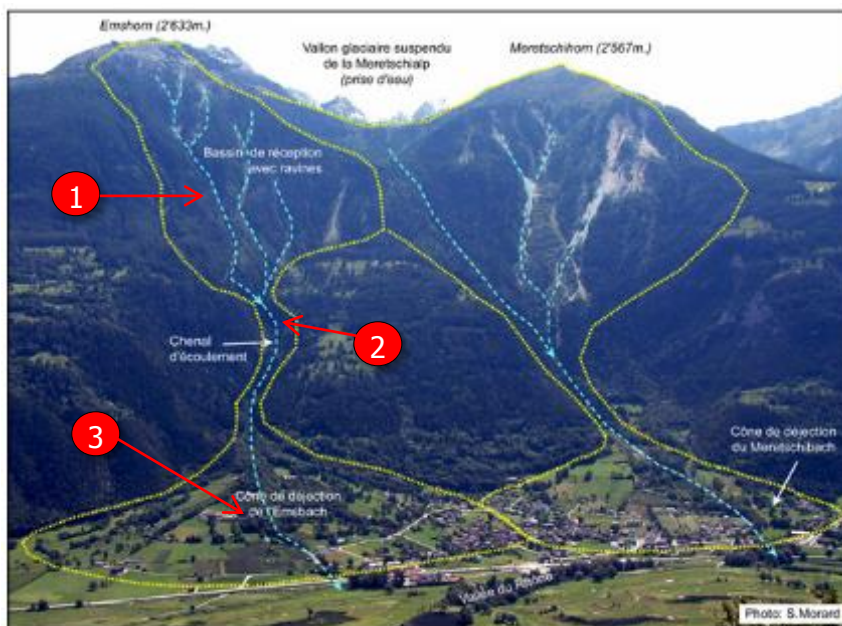
2.1 GENERALITES CONCERNANT LES CONES DE DEJECTION

2.1.1 Définition et morphologie

Un cône de déjection torrentiel est une forme liée à l'**épandage de matériaux** alluvionnaires qui se rencontre au débouché d'un torrent à l'endroit où il quitte sa vallée pour se jeter dans son tributaire.

Cette forme se met en place à cause de la perte de compétence au transport solide générée par une **rupture de pente**, généralement marquée, entre la vallée secondaire et la vallée principale.

Le cône de déjection est le plus souvent en **éventail** et lobé, et les matériaux y sont grano-classés, c'est-à-dire qu'ils présentent un gradient amont (matériaux grossiers) → aval (matériaux fins) généralement très net (Marchi & Brochot, 2000).



Exemple de cônes de déjection

L'exemple ci-contre montre deux cours d'eau torrentiels des Alpes suisses (l'Emsbach et le Meretschibach).

Ils présentent les trois zones caractéristiques d'un bassin définies par Sear & Newson (1993) : (1) la zone de production ou bassin d'accumulation, (2) la zone de transfert ou chenal d'écoulement et enfin (3) la zone de sédimentation en l'occurrence ici les cônes de déjection.

Il est à noter que ces cônes sont occupés par des villages et des espaces boisés et agricoles. En effet, ces cônes de déjection bien que dangereux (crues) sont des zones fertiles.

Figure 1: Exemple de cône de déjection en suisse

Les cônes alluviaux constituent ainsi de véritables pièges sédimentaires (Amelot *et al.*, 2003).

Les données morphométriques principales permettant de caractériser les cônes de déjection sont :

- La **forme en éventail** bombé, avec un apex à l'amont et une limite aval souvent en arc-de-cercle (élargissement),
- Le **profil en long**, courbe et de forme légèrement convexe, qui est fonction de la granulométrie des matériaux, du débit, de la fourniture sédimentaire, de la morphologie du bassin (Salomon, 2007),
- Le **point d'inflexion**, (ou apex) qui caractérise le point de passage du profil en long de chenal à celui de cône *stricto sensu*. Ce point d'inflexion peut ainsi varier spatialement dans le temps,
- La **superficie du cône**, celle-ci n'est pas directement liée à la surface du bassin, mais plutôt à divers critères combinés : lithologie des encaissants du bassin, pluviométrie, tectonique, végétation, possibilités d'épandage... Elle serait ainsi plutôt liée à la largeur disponible dans la vallée principale, qui permet au cône de se développer ou au contraire de se trouver tronqué (Marchi & Brochot, 2000).

La relation morphométrique la plus reconnue (par divers auteurs comme Ryder, 1971 ; Church & Mark, 1980 ; Kostaschuk *et al.*, 1986...) entre le bassin et son cône terminal est la relation entre le dénivelé spécifique du bassin et la pente du cône. Le dénivelé spécifique (Melton, 1965) est un indice de pente (noté D_s) tel que :

$$D_s = \frac{(H_{\max} - H_{\min}) \cdot 10^{-3}}{S^{0.5}} \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{Avec :} \\ H_{\max} = \text{sommet du bassin [m]} \\ H_{\min} = \text{sommet du cône [m]} \end{array} \right.$$

Il est à noter que les cônes liés au bassin fonctionnant par laves torrentiels sont particuliers, notamment ils présentent de fortes pentes. Pour les cônes non affectés par des laves torrentiels, comme celui du gave de Cauterets, on parlera alors de cône à charriage (ce dernier étant le processus exclusif de construction).

2.1.2 Morphogénèse des cônes de déjection

La **morphogénèse** des cônes torrentiels est directement liée aux variations de charge et de débit du cours d'eau dans le temps avec deux modes de construction par :

- Les **écoulements réguliers** qui apportent ainsi des matériaux par aggradation sélective (c'est-à-dire par tri granulométrique ou granoclassement). Cette aggradation est liée à la brusque perte de compétence qui s'exerce au niveau de la rupture de pente lors de l'entrée dans la vallée principale,
- Les **crues morphogènes** qui favorisent le creusement et la chenalisation particulièrement en récession de crue. Ainsi, en début de crue morphogène les matériaux érodables en amont du cône sont mobilisés et exportés. Si la crue présente une durée importante, elle pourra disséquer le cône, s'y chenaliser, voire y créer plusieurs chenaux.



Ainsi, généralement, les cônes sont composites et construits à partir d'un cône simple originel qui évolue. Ce cône se surcreuse au niveau de l'apex et dépose à l'aval les matériaux.

2.1.3 Anthropisation des cônes de déjection

Antoine & Desailly (2001), expliquent le choix des cônes de déjection comme sites privilégiés d'implantation des villages dans les Pyrénées. Ils indiquent ainsi que les plaines alluviales sont marécageuses avec des cours d'eau mobiles, les versants trop pentus, les bas de versant peu fertiles...

Le choix des cônes de déjection comme site d'implantation de villages notamment lors du Moyen-Âge répond ainsi à des logiques et des stratégies d'ordre technique et sociétal.

Les cônes alluviaux présentent ainsi des atouts intéressants : ils sont hors d'atteinte des crues de la vallée principale, non-marécageux, généralement bien ensoleillés même coté soulane et surtout comportent des sols fertiles se réessuyant rapidement, sont proches de l'eau utilisables comme énergie et comme ressource (boisson, irrigation...).

Par contre l'inconvénient majeur reste les crues torrentielles qui peuvent engraver le cône voire générer des catastrophes (exemples : Verdun-sur-Ariège en 1875 avec 81 morts, Ancizan en 1953 avec 7 morts, Biescas en Espagne en 1996 avec 84 morts dans un camping...).

Le schéma suivant (d'après Antoine & Desailly, 2001), illustre la dangerosité sur un cône de déjection.

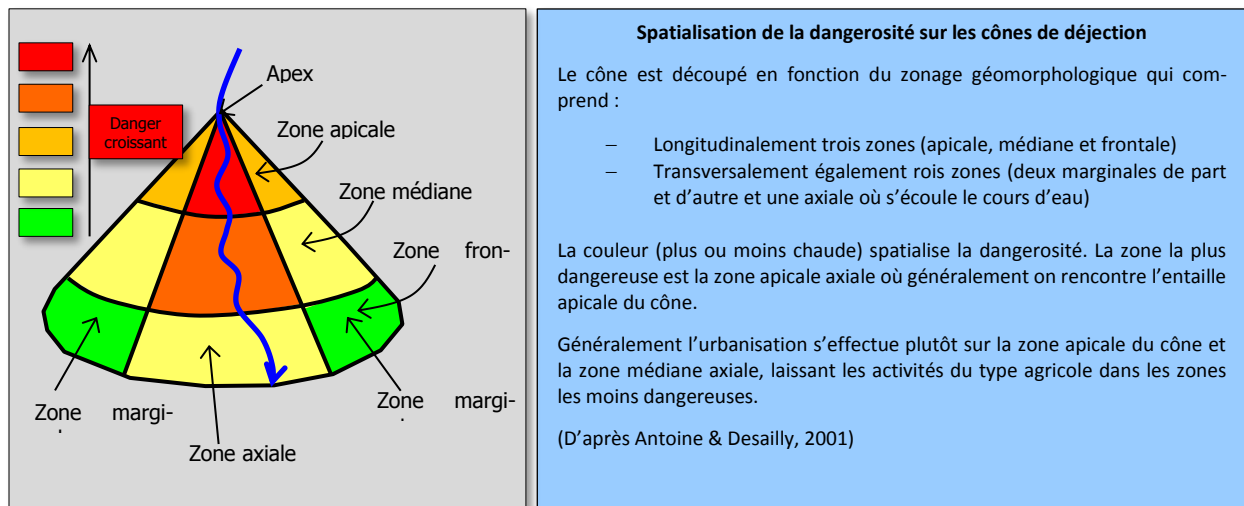


Figure 2 : Spatialisation de la dangerosité sur un cône de déjection d'après Antoine & Desailly (2002)

2.2 LE CONE DE DEJECTION DU GAVE DE CAUTERETS

2.2.1 Eléments généraux concernant le cône du gawe de Cauterets

Le cône de déjection initial du gawe de Cauterets présente une conformation générale qui apparaît au prime abord assez classique, avec une forme en éventail et un front bien élargi

en aval (*cf.* Figure 3). Historiquement, il s'insère dans la topographie locale en se déployant à la sortie du tracé en gorge du gave.

Il s'est ainsi développé en s'élargissant et en occupant largement la rive gauche de la vallée alluviale du gave de Pau, dans le bassin intramontagnard d'Argelès-Gazost. L'apex « historique » (point de transition entre le chenal d'écoulement et le cône) se situait en amont du pont de Soulom.

On note sur la carte géologique (datée de 1980) la présence du cône alluvial et d'éboulis du ruisseau de Batz qui est en appui sur le cône du gave de Cauterets. On remarque également la différenciation bien visible en partie frontale du cône entre les alluvions de la plaine alluviale du gave de Pau *stricto sensu*.

La carte montre que le cône fossilisait également partiellement la terrasse alluviale dite « terrasse fluviatile du Lavedan » notée Fy sur la carte géologique et composée de matériaux provenant de récurrences froides ayant affecté le Tardiglaciaire et serait au contact des alluvions subactuelles du gave de Pau (notées Fz), *cf.* Figure 3-3. La carte géologique donne ainsi une image du cône historique du gave de Cauterets.

La superficie du cône telle que présentée dans la carte géologique est d'environ 1 km² soit donc une centaine d'hectares.

Toutefois, ce cône est actuellement **fortement anthropisé**, les berges du chenal d'écoulement du cône étant corsetées partiellement en rive droite et quasi-totalement en ce qui concerne la rive gauche. Le pont interzone en aval impacte également de manière importante le fonctionnement hydraulique et sédimentaire.

Cette situation a **métamorphosé le cône** dont le fonctionnement dynamique est actuellement très particulier :

- La partie amont de l'ancien cône (zone d'apex) est totalement corsetée (sauf très localement) et ne participe pas à la dynamique du cône,
- L'apex actuel est artificialisé et positionné à la sortie du double-corsetage, au seul endroit où les alluvions peuvent s'épancher en rive droite (la rive gauche restant corsetée),
- Jusqu'à cet endroit le lit est contraint notamment par des barrettes rugueuses,
- La partie aval à l'apex est contrainte sur sa berge urbanisée et industrialisée et comprend l'ancien seuil de la canalisation et le pont interzone.

En conséquence, ce cône et en particulier son chenal d'écoulement ont un fonctionnement singulier lié à ces contraintes et il ne répond donc plus au fonctionnement « classique » d'un cône de déjection (apex mobile, chenal (ou chenaux) mobile(s) librement, étalement à peu près symétrique autour de la zone axiale avec élargissement latéral depuis l'apex jusqu'au front aval, étagement en lobes des apports des crues morphogènes...).

En fait, les différents travaux ont fixé l'apex et limité latéralement et longitudinalement le cône, le réduisant quasiment à une bande active et un champ de stockage-régulation sur sa rive droite, en quelque sorte on peut ainsi parler d'un « **demi-cône tronqué** » (*cf.* 1.2 sur le vocabulaire).

Le fonctionnement actuel est un **fonctionnement diachronique à deux temps** à partir de l'apex :



- Jusqu'à un certain niveau de crue les écoulements restent dans la bande active que nous connaissons aujourd'hui. Cette bande active comprend un ou plusieurs chenaux et des structures alluvionnaires évolutives qui encombrant plus ou moins cette bande active. Tant que les écoulements ne sortent pas de cette bande active on est plutôt dans un phénomène d'aggradation, lié à la rupture de pente, et en particulier tant que l'on restera dans le temps de relaxation de la crue de 2013 qui a mobilisé de gros volumes alluvionnaires. On peut qualifier cette bande active de **bande active mineure** (BAm) (cf. 1.2 concernant mes éléments de vocabulaire).
- Lorsqu'une crue BFHM¹ survient, le lit va fonctionner dans la BAm jusqu'à ce que celle-ci s'engrave et devienne insuffisante pour évacuer les débits liquides et solides. Le gave va alors avoir tendance à s'avulser en créant un nouveau système de bras (construit autour d'un bras principal) coté rive droite en l'érodant en aval de son apex. C'est ce qui s'est passé en 2013. Le gave exploite alors sa **bande active majeur** (BAM) (cf. 1.2 sur les éléments de vocabulaire). Suivant la charge solide, la morphogénie et la durée de la crue il pourra exporter une partie des matériaux présents et en apporter de nouveaux. Toutefois en récession de crue il devrait plutôt avoir tendance à disséquer le cône en y générant des chenaux.

Les **travaux post-crue 2013** se sont inscrits dans ce système en créant un musoir fusible (masque rocheux) qui permet ainsi une amélioration du fonctionnement.

En effet, ce système permet de maintenir une bande active (BAm) fonctionnelle, favorisant temporairement un stockage-régulation des apports solides. Lorsque le masque rocheux cède, l'avulsion déclenche le basculement du lit dans la BAM, dans laquelle se dissèque par érosion régressive un nouveau lit. L'effacement du masque rocheux va ainsi faciliter et guider l'avulsion vers la BAM, lorsque la BAm est saturée. Il s'agit donc d'une **avulsion dirigée**.

Les travaux réalisés en post-crue 2013 se servent ainsi du **fonctionnement dégradé** et **l'accompagne dynamiquement** par cette **avulsion dirigée**, ce qui constitue certainement la meilleure option dans le contexte de ce cône fortement anthropisé (demi-cône tronqué).

Il est à noter que la présence du pont interzone favorise l'aggradation à son amont dans la bande active (BAm) de la zone de stockage-régulation décrite précédemment. C'est un **point noir** du fonctionnement actuel avec un fort pouvoir perturbateur du transit sédimentaire.

Le fonctionnement hérité (c'est-à-dire fortement anthropisé) contraint l'ensemble du cône, notamment en contrôlant deux éléments :

- La localisation de son **apex** (point haut du cône alluvial) qui se trouve ainsi fixé à la fin du corsetage de la berge de rive droite, et donc le point d'avulsion (basculement BAm vers BAM). La figure 4 présente cet élément.
- La **mobilité latérale de la bande active** (espace de mobilité comprenant BAm et BAM) qui est contrainte strictement en rive gauche (corsetage). La BAM présente un

¹ Basse Fréquence Haute Magnitude



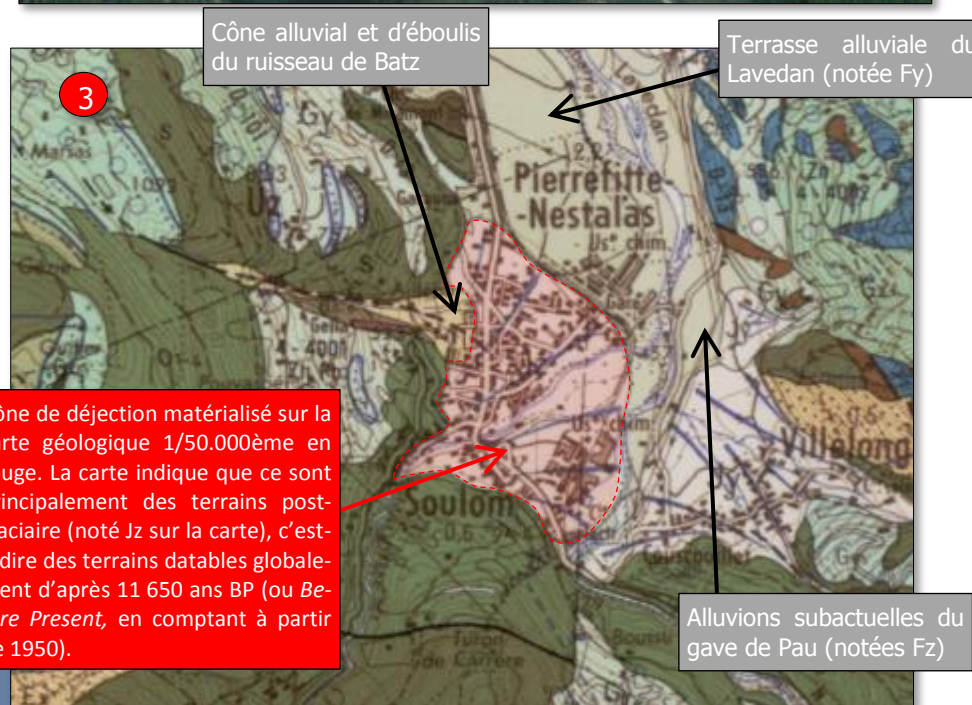
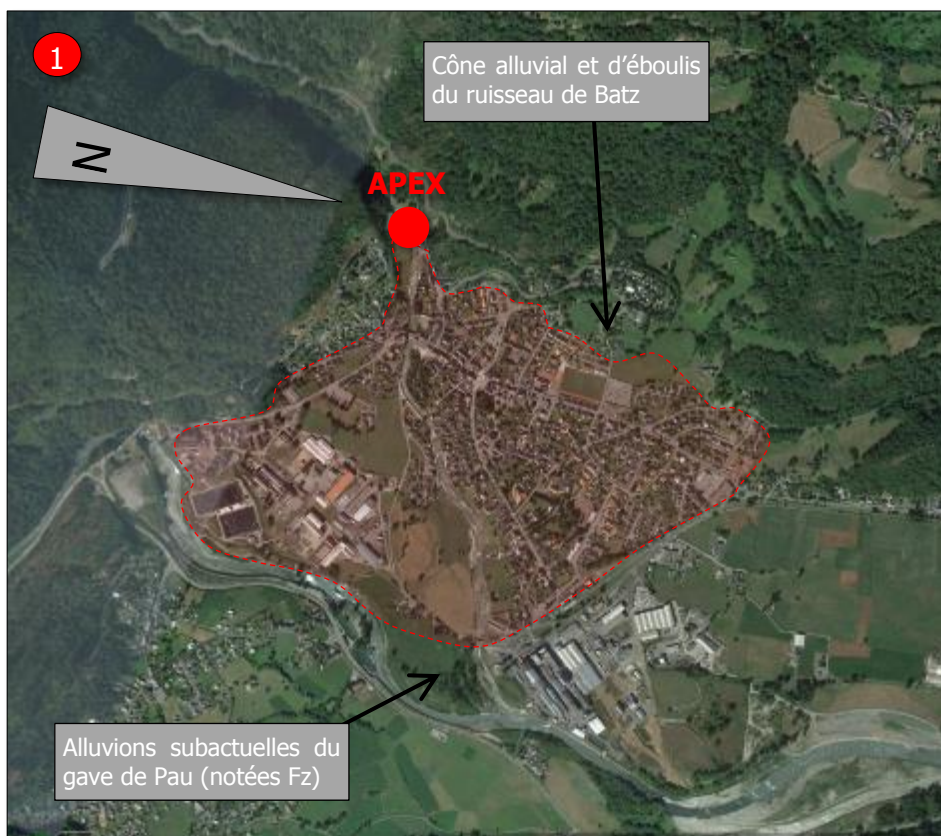
point de passage obligatoire (pont interzone) qui nécessiterait des travaux d'adaptation pour garantir sa fonctionnalité (reconstruction avec un gabarit compatible avec le fonctionnement actuel des bandes actives (Bam et BAM) du gave.

Nous avons essayé de tracer une approche graphique de la partie résiduelle du cône qui est partiellement fixé, le définissant comme la partie *stricto sensu* où peuvent se déposer de manière significative des matériaux alluvionnaires en cas de crue morphogène (cf. Figure 4).

Cette « reconstitution » est complexe car nous n'avons pas de topographie fine de la zone (en dehors du LIDAR) et nous avons une connaissance partielle du transit sédimentaire particulièrement complexe à reconstituer dans ce contexte.

En comparant le cône historique et le cône résiduel on a une vision de la zone initiale de dépôt alluvionnaire (à une époque de fourniture sédimentaire intense notamment grâce à la séquence paraglaciale) et de la zone résiduelle potentielle de sédimentation. Le cône passe ainsi d'environ 110 ha (cône historique) à 15 ha (cône actuel résiduel). **Il reste donc environ 14 % du cône actuellement fonctionnel.**





Cône de déjection du gave de Cauterets
(D'après la carte géologique 1/50.000ème Argelès-Gazost)

La localisation du cône de déjection du gave de Cauterets est faite à partir de la carte géologique (3) et a été reportée sur deux vues à deux échelles différentes, présentant également deux orientations différentes (cf. le Nord sur la photo n°1), pour les deux autres, le Nord est situé conventionnellement en haut).

Le cône a été fortement anthropisé par les unités urbaines de Soulom et de Pierrefitte-N. et les activités industrielles. Ainsi, la partie résiduelle où le gave peut, lors des crues morphogènes, s'épandre (écoulements liquides et solides) est réduite d'autant plus que le lit est fortement corseté (mur-digues, enrochements, ouvrages d'art...).

Nous sommes dans une situation classique de cône urbanisé présentant des risques importants lors des crues morphogènes compte-tenu de la divagation du cours d'eau, de sa chenalisation et des aggradations qu'il est susceptible de générer.

Cône de déjection matérialisé sur la carte géologique 1/50.000ème en rouge. La carte indique que ce sont principalement des terrains post-glaciaire (noté Jz sur la carte), c'est-à-dire des terrains datables globalement d'après 11 650 ans BP (ou *Before Present*, en comptant à partir de 1950).

Figure 3 : (1) et (2) cône de déjection du gave de Cauterets ; (3) géologie du secteur (carte géologique 1/50.000ème, BRGM, 1980).

Cône de déjection résiduel du gave de Cauterets

Ce schéma montre la partie active et résiduelle du cône de déjection du gave de Cauterets et les deux bandes actives emboîtées (BAM et BAM).

En fait le cône fortement corseté a perdu sa mobilité latérale en partie haute (zone apicale) et partiellement en partie médiane. Ce cône corseté ne fonctionne plus comme un cône libre : l'apex fixe constitue un point d'inflexion (point de décompression) à partir duquel l'expansion des écoulements est favorisée vers la rive droite. Le pont interzone et la décompression génèrent des accrétions importantes dans la BAM, qui favorisent l'avulsion du chenal principal vers la rive droite comme en 2013 dans la BAM lors des crues BFHM.

La rive droite fonctionne alors comme un champ d'épandage alluvionnaire, qui stocke les matériaux et régule le transport solide dans le secteur.

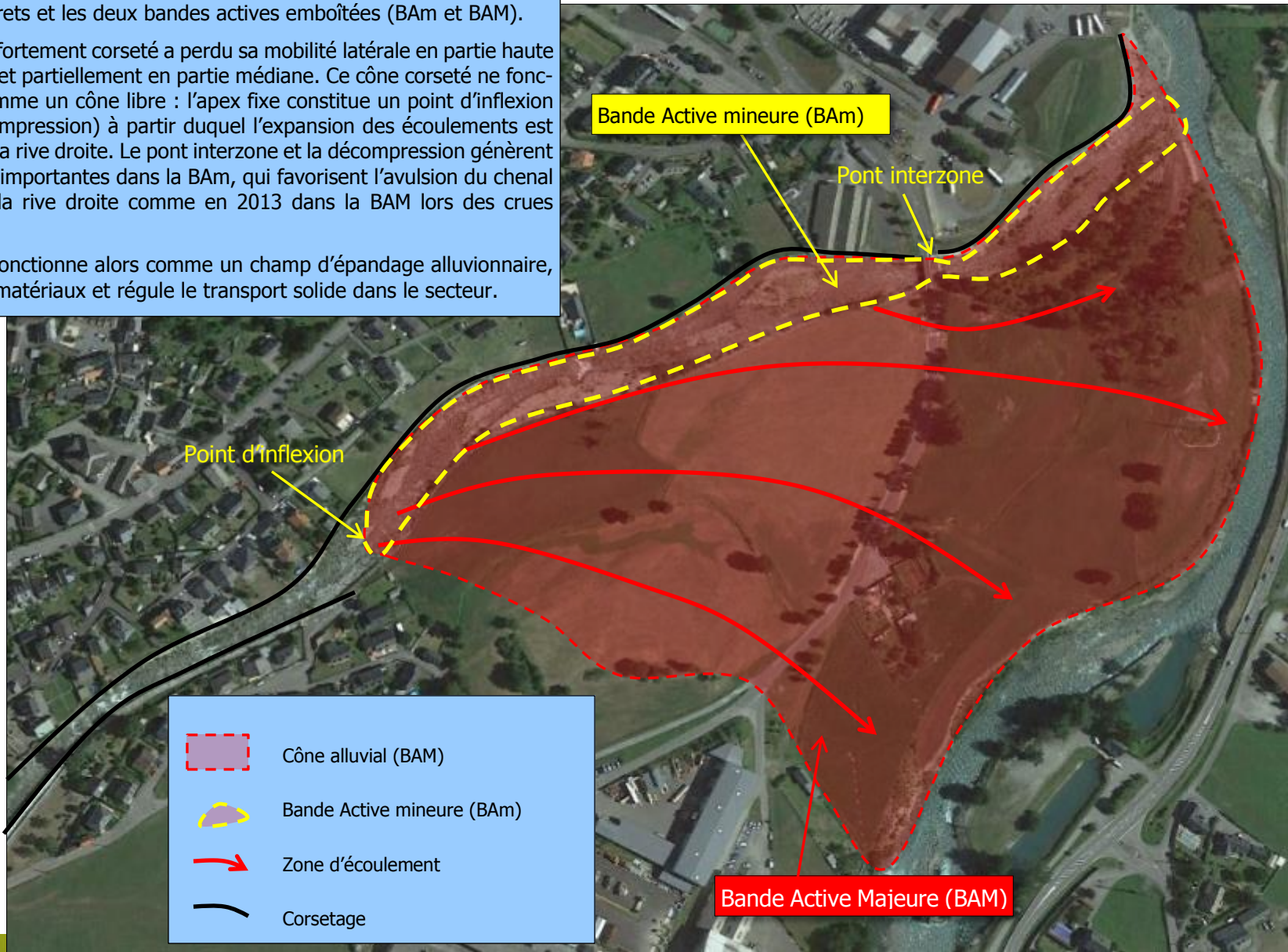


Figure 4 : Cône de déjection résiduel du gave de Cauterets

2.2.2 Analyse diachronique du cône de déjection du gave de Cauterets

L'analyse diachronique comprend deux volets complémentaires :

- L'**analyse diachronique en plan**, axée sur l'évolution de la bande active du cône de déjection (largeur active et chenaux actifs), permettant de comprendre le fonctionnement et l'évolution dynamiques récents du cône.
- L'**analyse diachronique en altimétrie**, axée sur l'évolution de la pente du chenal principal, permettant notamment de distinguer les points singuliers du profil en long, de caractériser le stock alluvial et d'évaluer le transit, lors des crues morphogènes, des alluvions.

☞ *Nota-Bene* : Cette analyse est complexe car le cône et le chenal amont sont anthropisés et ont fait l'objet de travaux depuis la crue de 2013 qui impactent les processus d'évolution et la compréhension des phénomènes. Pour la partie en aval de l'apex il convient de noter que le fonctionnement d'un cône de déjection ne facilite pas cette démarche, étant donné que des phases d'aggradation et d'ablation alternent sur ce type de forme alluviale (cf. supra).

A Analyse diachronique en plan

L'analyse diachronique a été effectuée classiquement par comparaison de photographies aériennes entre 1947 et actuellement.

Nous avons utilisé les photographies apparaissant comme les plus significatives en les mettant en référence avec les crues morphogènes de la période couverte. Ces différents éléments sont présentés dans le tableau suivant :

ELEMENTS RETENUS POUR L'ANALYSE DIACHRONIQUE EN PLAN					Mission photo retenue
Crues morphogènes retenues					
Crues morphogènes	Débit [m ³ /s]	Occurrence	Dégâts	Sources	
1937	250-430 (à la confluence)	Q ₄₀₋₁₃₀	Usines hydroélectriques endommagées	ETRM ; Péteuil (2004)	1947-1948
1965	100 (Station pont de Fanlou)	-	-	Péteuil (2004)	-
1979	Inconnu	-	Inondation du quartier Lacoste	Péteuil (2004)	1979
1982	131 (Station pont de Fanlou)	Q ₂₅₋₃₀	A Pierrefitte-Nestalas, mur-digue de la propriété Baze cède. Rue Boileau inondée (1,5 m d'eau). Une dizaine de maisons évacuées.	Péteuil (2004)	1983
1997	Inconnu	Q ₂₀	Débordements en rive droite en amont du lotissement communal de Soulom. En rive gauche,	Péteuil (2004)	-



			légers débordements en aval du lotissement de Lacoste, au droit du seuil protégeant une canalisation d'assainissement. Pont SNCF mis en charge et terrains en rive droite en amont et en aval de l'ouvrage inondés.		
2003	80 (à la confluence)	Q ₂₋₅	Non débordante dans la traversée de Pierrefitte et Soulom.	Péteuil (2004)	-
2005					2006
2012	120	Q ₂₀		RTM	-
2013	190	Q ₅₀	Habitations et bâtiments industriels inondés, notamment au Nord du cône, pont interzone emporté	RTM	2013

Tableau 1 : missions photographiques retenues pour l'analyse diachronique en plan

Sur les photographies datant de 1947, le gave de Cauterets n'est pas encore aussi corseté qu'aujourd'hui dans la traversée de Pierrefitte et Soulom et des petites zones de tressages sont présente (cf. Figure 5). Un bras secondaire du gave de Cauterets est aussi visible en rive gauche à l'aval du pont de Soulom (cf. Figure 6).

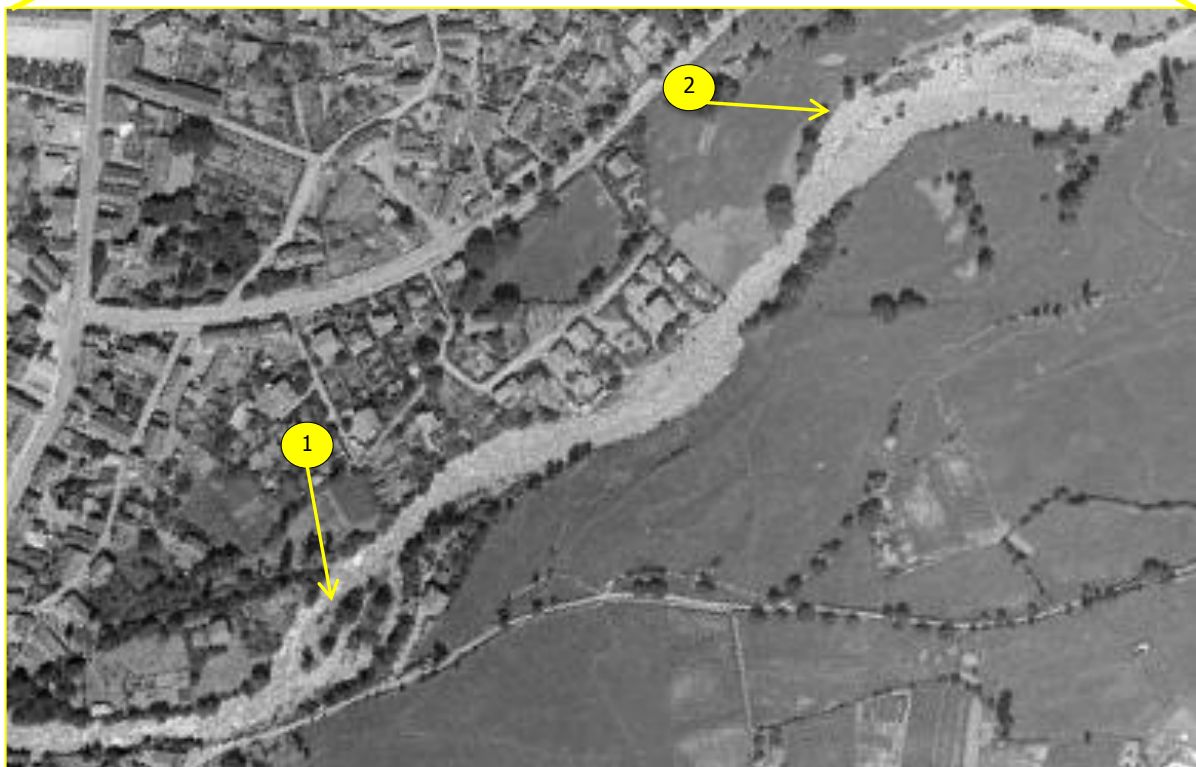
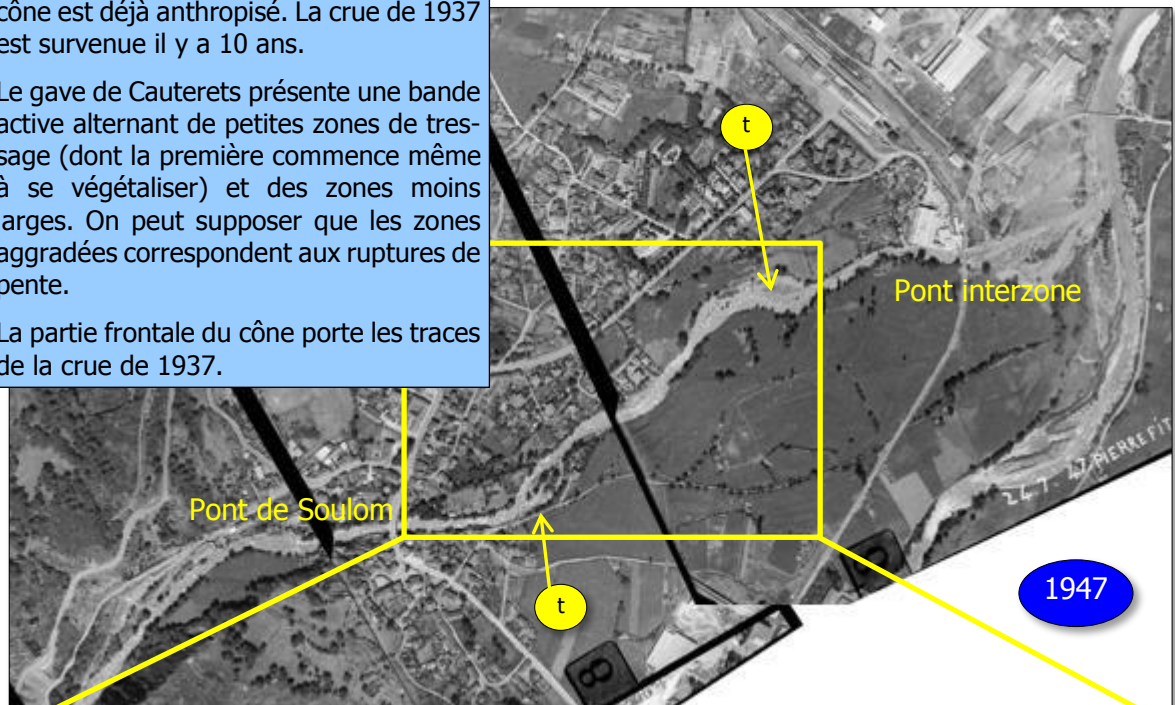


Etude système endiguement Pierrefitte/Soulom, Hydromorphologie

Sur ce montage photographique les travaux ne sont pas encore réalisés, mais le cône est déjà anthropisé. La crue de 1937 est survenue il y a 10 ans.

Le gave de Cauterets présente une bande active alternant de petites zones de tressage (dont la première commence même à se végétaliser) et des zones moins larges. On peut supposer que les zones aggradées correspondent aux ruptures de pente.

La partie frontale du cône porte les traces de la crue de 1937.



Sur cet agrandissement plusieurs zones de stockage-régulation apparaissent, (1) dans le méandre en aval du pont de Soulom un petit tressage (à 3 ou 4 chenaux) se développe et est en cours de fixation, compte-tenu de la présence de la végétation pionnière qui s'y est installée. On peut dater cette végétation certainement à une 10aine d'année, celle-ci s'étant probablement installée après la crue de 1937. (2) dans un second méandre, une zone qui paraît plus active, car moins végétalisée.

Figure 5 : Gave de Cauterets en 1947, avant les travaux de confortement des berges de la traversée de Pierrefitte-Nestalas et Soulom



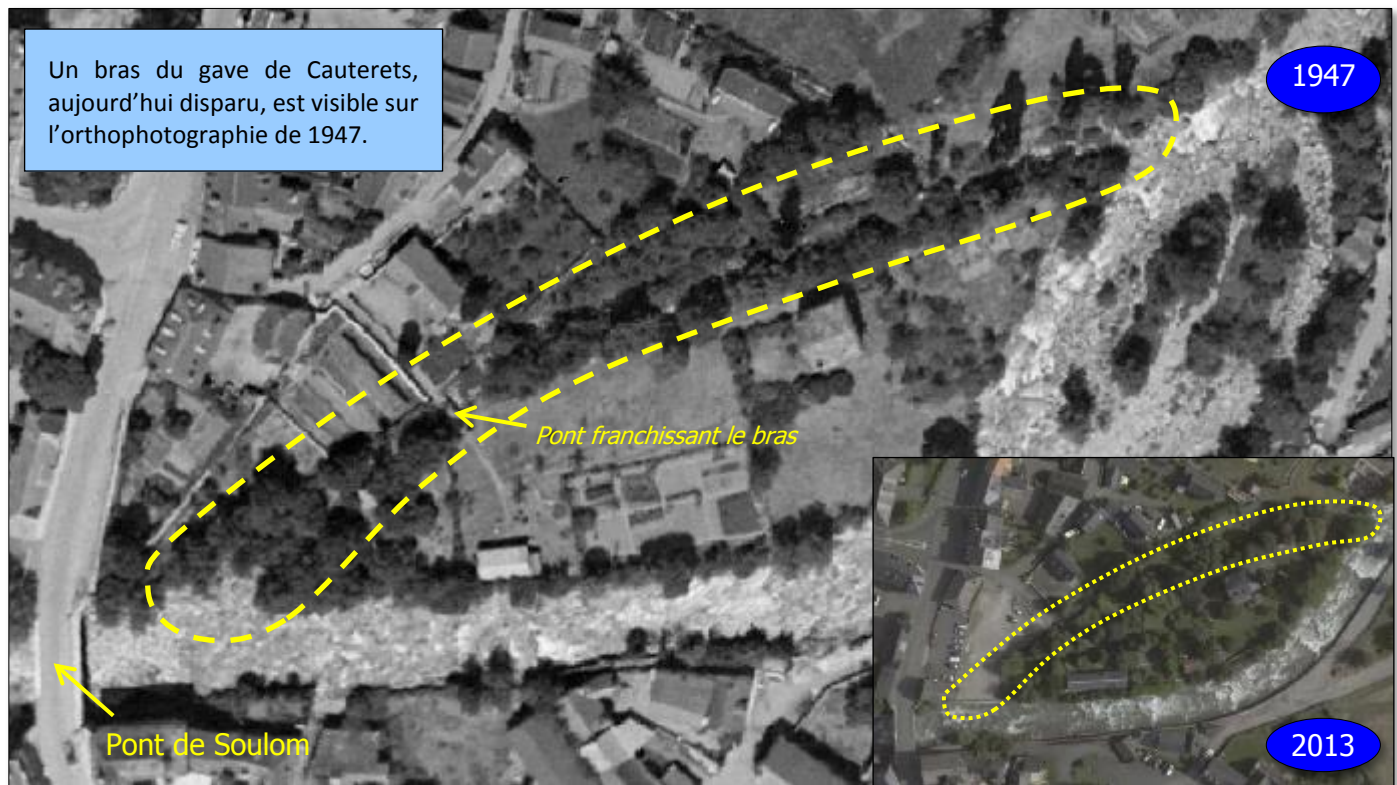


Figure 6 : Ancien bras du gave de Cauterets situé en aval du pont de Soulom

On peut supposer que la crue de 1937 (Q estimé entre 250 et 430 m^3/s par ETRM) a exploité une bande active large (et ce d'autant plus que le corsetage à l'époque était limité). Cette bande active s'est probablement rétractée entre 1937 et 1947 (première série de photographies aériennes). Entre 1947 et 1979, la bande active du gave continuant à se rétracter (cf. Figure 7). Dans la traversée de Pierrefitte et Soulom, la rétraction de la bande active est directement liée aux nouveaux confortements de berges qui sont mis en place.

Le bras secondaire du gave semble également avoir disparu à la suite de ces travaux. En amont du pont interzone, au niveau du lieu-dit *la Lanne*, la bande active s'est aussi rétractée. Les berges sont plus végétalisées. Enfin, dans la partie la plus distale du cône (c'est-à-dire la partie la plus éloignée de l'apex), la bande active s'est déportée vers la rive gauche et des zones végétalisées se sont développées du côté droit.

Entre 1979 et 2006, la bande active (BAm) se réduit encore un peu plus au niveau du lieu-dit *la Lanne* et en aval du pont interzone (cf. Figure 8 et Figure 10). Les crues de 1982 et 2005 n'étaient pas suffisamment morphogènes pour élargir cette bande active.

La crue de 2013 est la crue la plus morphogène observée entre 1947 et aujourd'hui. Nous disposons des photographies aériennes post-crue de cette période prises dans les semaines suivant cet événement.

On constate ainsi qu'un nouveau bras s'est ouvert en rive droite au niveau du lotissement *Lalanne*, ce qui a permis à la bande active de s'élargir (grâce notamment à l'avulsion du lit et à l'activation de la BAM) et d'atteindre près de 500 m de large dans sa partie aval (cf. Figure 9 et Figure 11).



A la suite de la crue, de nombreux travaux ont été engagés afin notamment de remettre le gave dans son lit d'origine.

En 2016, la bande active du gave est donc beaucoup plus étroite qu'en 2013 (*cf.* Figure 9). Néanmoins, elle reste plus large que la bande active de 2006. De plus, entre l'apex fixé et le pont interzone, elle est également plus large que les bandes actives de 1947, 1979 et 1983.

Le système mis en œuvre par la RTM en post-crue 2013 (déjà décrit plus haut) vise à maintenir ainsi une bande active fonctionnelle (BAm). Cette bande active va permettre le passage des écoulements liquides et solides tout en permettant une certaine aggradation (favorisée par la présence du pont) puis, à partir d'un certain niveau, le musoir s'effaçant, les écoulements liquides et solides guidés pourront s'épancher sur la rive droite (partie résiduelle du cône) et exploiter alors la BAM.



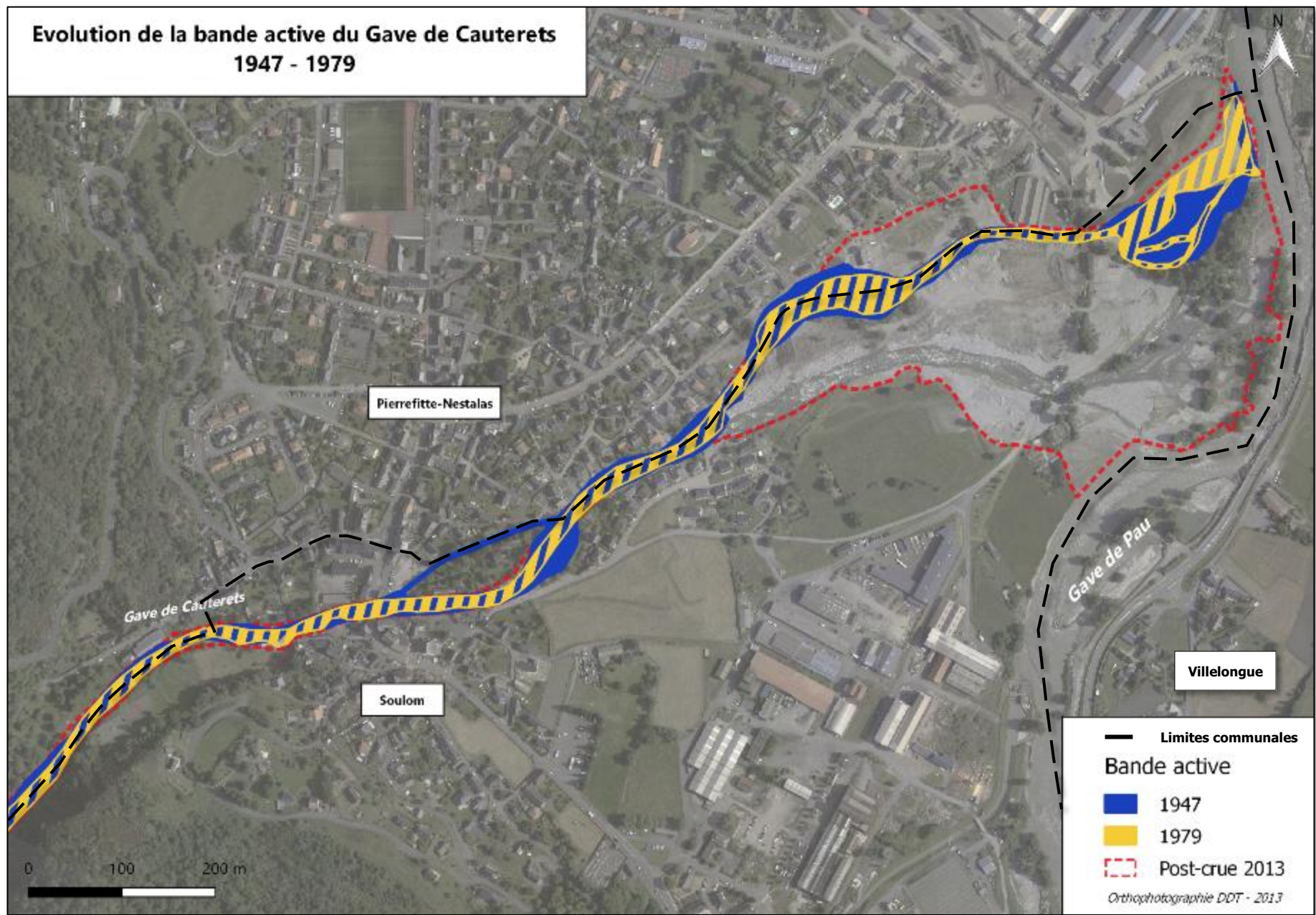


Figure 7 : Evolution de la bande active du Gave de Cauterets entre 1947 et 1979



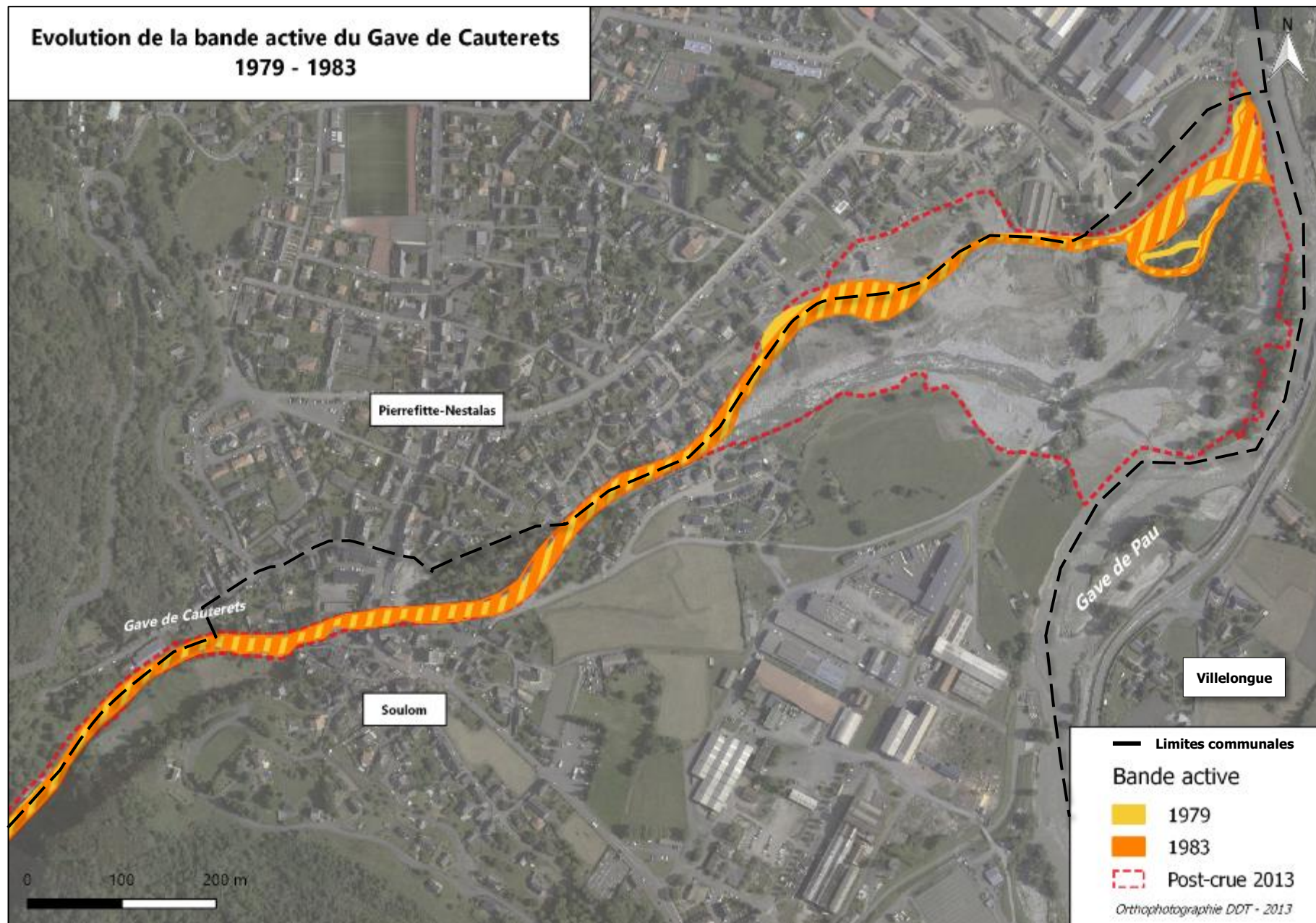


Figure 8 : Evolution de la bande active du Gave de Cauterets entre 1979 et 1983



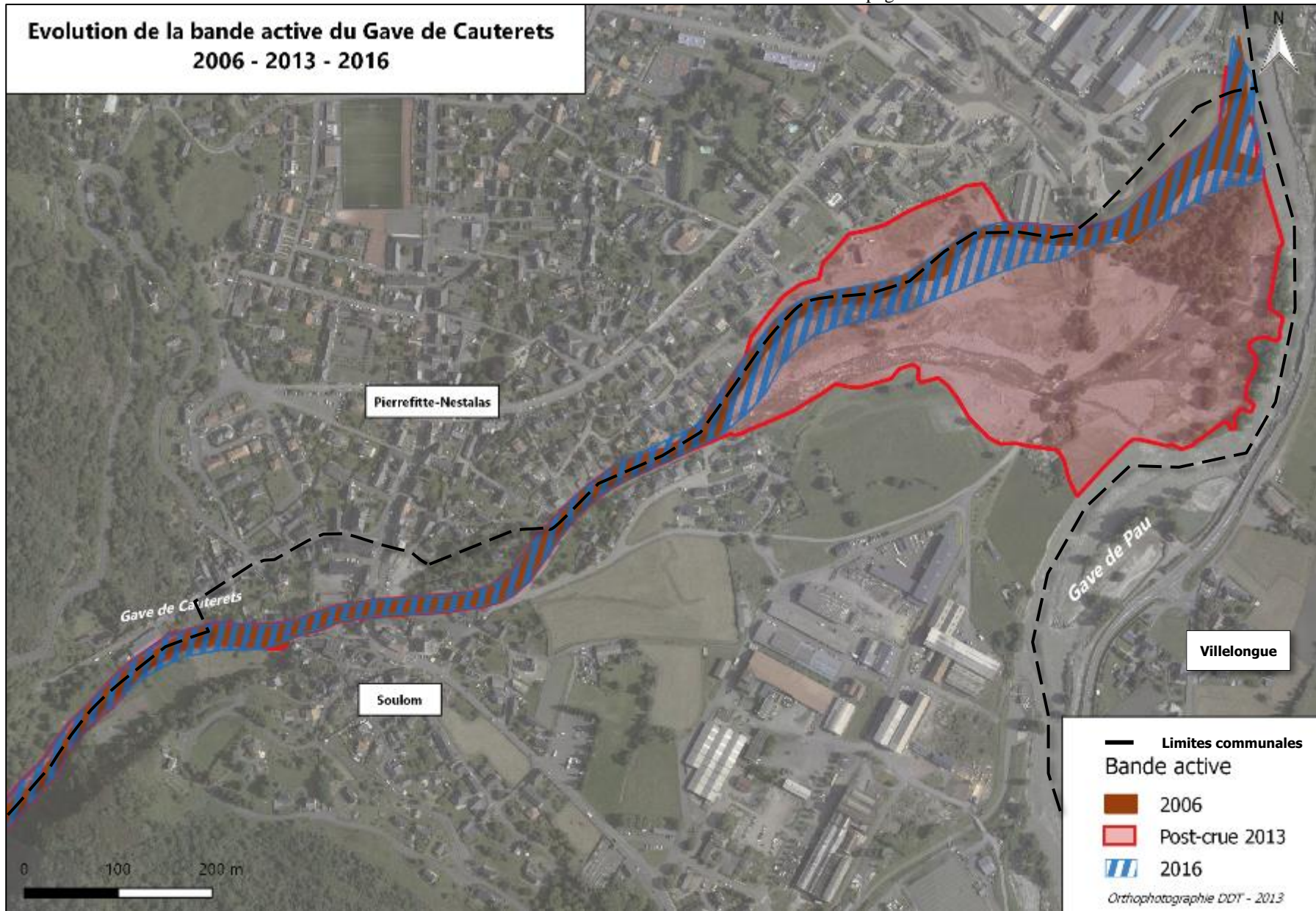


Figure 9 : Evolution de la bande active du Gave de Cauterets entre 2006, 2013 et 2016



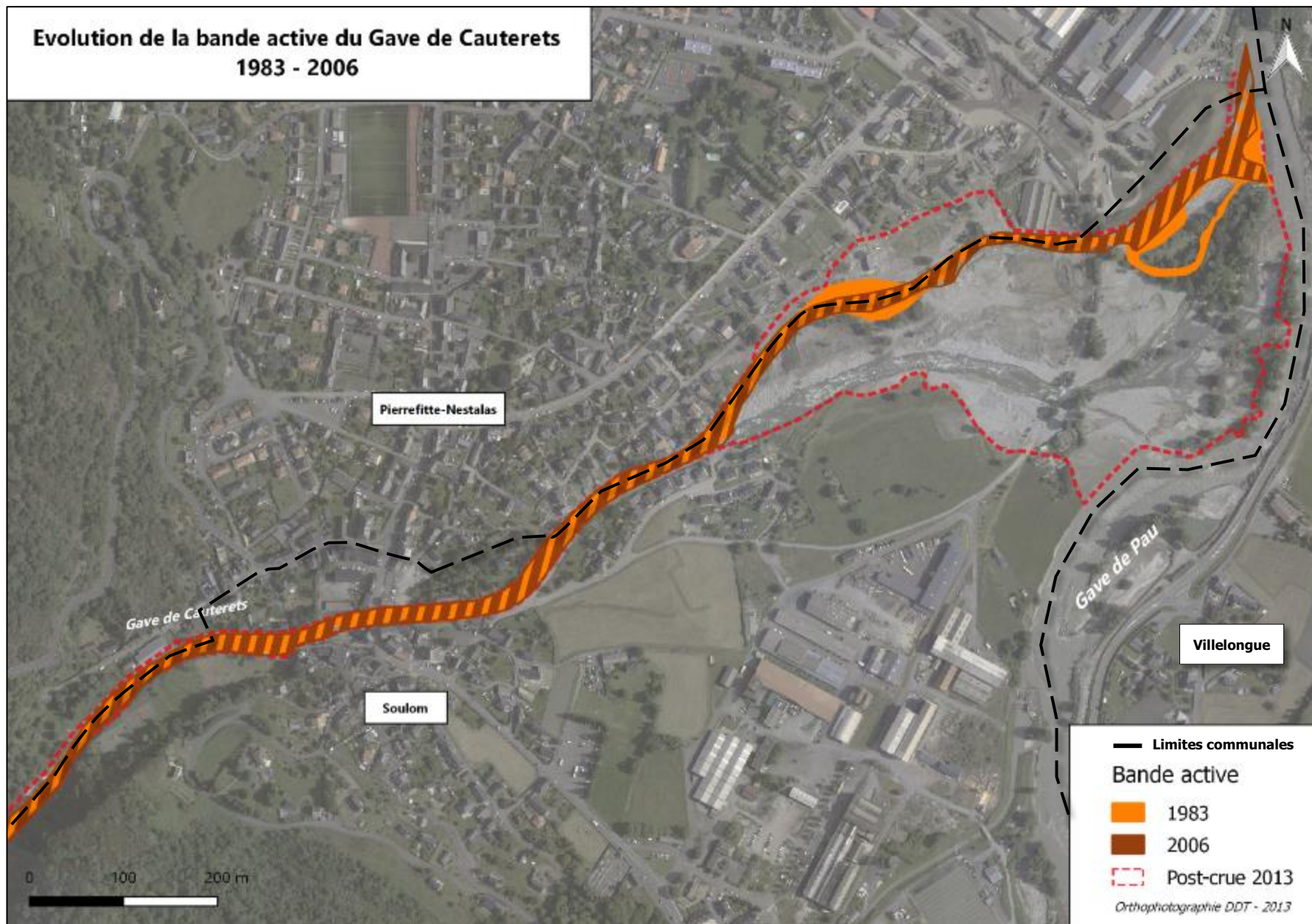


Figure 10 : Evolution de la bande active du Gave de Cauterets entre 1983 et 2006



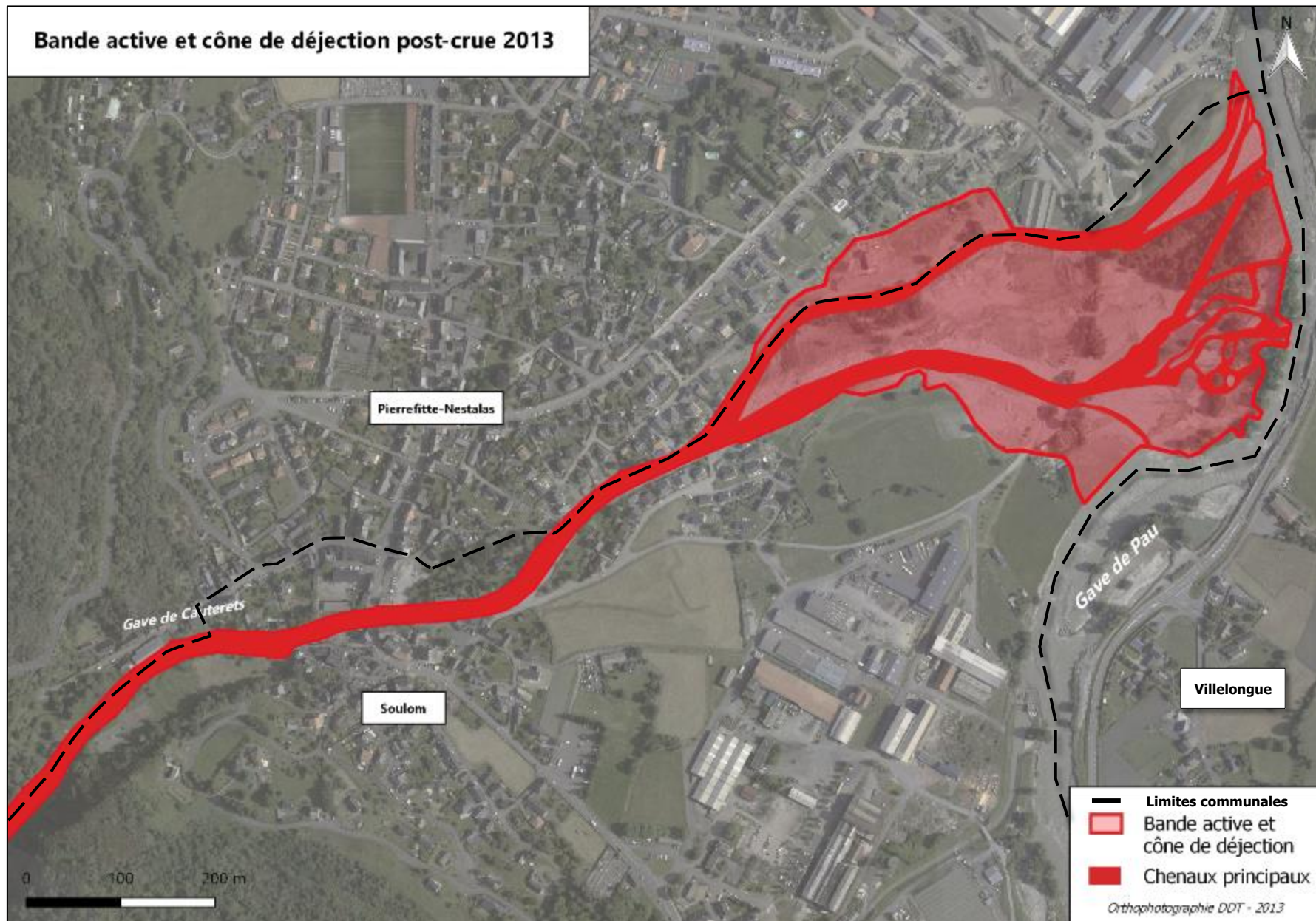


Figure 11 : Bande active et cône de déjection post-crue 2013



B Analyse diachronique en altitude

Cette analyse en altimétrie s'effectue en superposant les profils en long disponibles. Pour le secteur d'étude nous disposons des profils détaillés dans le tableau ci-dessous :

PROFILS UTILISES POUR L'ANALYSE DIACHRONIQUE EN ALTIMETRIE		
Date	Auteur	Levé
1913	Grandes Forces Hydrauliques	Ligne d'eau
1986	Duversin A. (Géomètre expert)	Ligne d'eau
2004	RTM 65	Ligne d'eau et fond du lit
2009	TCEP	Fond de lit
2013	IGN	LIDAR
2015	RTM 65	Fond de lit
2018	GEOFIT	Fond de lit et fil d'eau
2019	GEOFIT	Fond de lit et fil d'eau

Tableau 2 : Profils retenus pour l'analyse diachronique en altimétrie

⇒ Evolution altimétrique depuis 1913

Nous disposons d'un profil Grandes Forces Hydrauliques (GFH) levé en 1913. Ce profil a été recalé pour être ensuite comparé à certains des profils à disposition.

Cette comparaison reste complexe pour plusieurs raisons qui favorisent les biais :

- La méthode de levé (levé de la ligne d'eau et non du fonds, technique nécessitant calage et corrections, levés en NGF Lallemand orthométrique),
- La nature du cours d'eau, particulièrement lorsque le pas de temps entre profils comparés est long et que le cours d'eau est mobile. Ici l'exercice est compliqué par le fait qu'on est sur un cône de déjection et qu'il a été fortement anthropisé,
- Le pas des levés est trop lâche et sur notre zone les points sont peu nombreux.
-



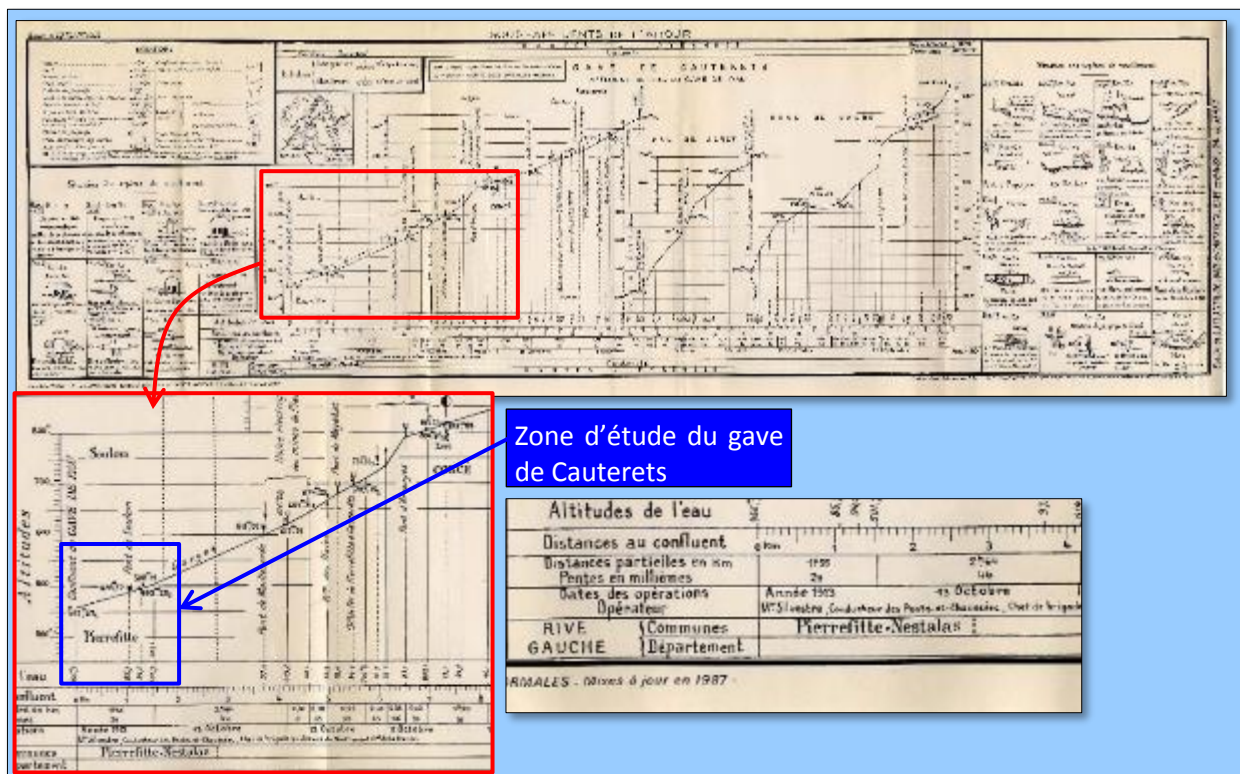


Figure 12 : Levé Grandes Forces Hydrauliques, octobre 1913

Il convient également de noter que le profil en long est très sensible aux crues et au transport solide. En effet, les cônes (même contraints) alternent :

- Des **phases d'aggradation** lorsque les crues sont plutôt des crues de forte récurrence, le transport solide s'y ségrégant du fait de la brusque perte de compétence. C'est pour cela que généralement les accrétions sont granoclassées longitudinalement (Salomon, 2007) ;
- Des **phases d'ablation voire de dissection** de leur surface lors des crues BFHM (Basse Fréquence Haute Magnitude). Ce phénomène se rencontre en fin de crue lorsque le cours d'eau conserve une énergie importante et qu'il a exporté la majeure partie de sa charge grossière (Salomon, 2007).

La crue de juin 2013 qui s'est caractérisée par une phase d'aggradation est en contradiction avec ce fonctionnement, mais ce fonctionnement est fortement altéré par le corsetage et cette crue, s'exprimant dans le temps de relaxation de celle d'octobre 2012 a ainsi pu mobiliser une masse importante de matériaux (artéfact sédimentaire). Nous rappelons que le profil GFH a été levé avant le corsetage du chenal (qui commence dès la sortie du tronçon en gorges, c'est-à-dire à partir du seuil de la SHEM en amont).

Ce profil passe parfois au-dessus, parfois au-dessous du profil correspondant au LIDAR post-crue **2013**, montrant donc qu'en post-crue il n'y a pas globalement d'incision marquée entre ces deux profils et même par endroit le profil s'est exhaussé. Cette situation est certainement due à un apport massif de matériaux (estimé > 100 000 m³ par la RTM en 2013) et à la conformation même du profil.



En effet entre la **sortie des gorges** (cf. Figure 13-1) et le **point d'inflexion-décompression (apex actuel)** (5) situé en amont du lotissement La Lanne, le lit est contraint ce qui favorise les mises en vitesse par effet Venturi et il est globalement rectiligne, la pente y est également forte. Cela constitue autant d'éléments favorisant des vitesses élevées et une forte compétence au transport de la charge grossière. Dans ce secteur le profil 2013 est globalement au-dessous du profil 1913 entre le seuil SHEM (2) et le pont de Soulom (4).

Le profil actuel (du fait notamment de sa section) est peu propice à l'engravement (corsetage, étroitesse, rectiligne). Le seul endroit s'aggradant légèrement est situé en rive droite amont du pont de Soulom, ce réajustement géométrique est induit par la variation de la section d'écoulement tant en largeur qu'en axe.

A partir du **lieu-dit la Lanne** (5), les écoulements s'épandent coté rive droite (rive non corsetée) d'autant plus qu'en aval le pont interzone (7) constitue un point de ralentissement des écoulements. Dans cette zone les profils se superposent sur plus d'une centaine de mètres. C'est une zone résiliente de dépôt. Nous sommes dans la BAm favorable à la sédimentation lors des crues de forte occurrence, jouant un rôle de stockage-régulation.

Par contre les profils **2018** et **2019** se positionnent de manière significative sous GFH 1913 et sous 2013. Toutefois des travaux importants ont été réalisés en post-crue 2013 et 2018 qui rendent l'interprétation plus complexe.

Des différences sont aussi visibles entre les données levées en juillet-août **2018** et celles levées en février **2019**. Cependant, il ne semble pas y avoir eu de crue morphogène entre ces dates. En effet, aucun pic de crue n'a été relevé à la station d'Argelès-Gazost, qui est située en aval sur le Gave de Pau. Le pic le plus important est inférieur à une crue biennale (octobre 2018). Les variations altitudinales du profil en long sont donc liées soit à des travaux à la suite de la crue de juin 2018, soit aux épisodes de crues courantes qui ont eu lieu à cette période, soit à des incertitudes dans les levés.

Ainsi, on note entre 2018 et 2019 entre le pont de Soulom (4) et le point d'inflexion (5) un exhaussement présent en 2018 qui disparaît en 2019 (incision) éventuellement corréléable à un léger engraissement en aval du point d'inflexion et en amont du pont interzone (7) entre ces deux dates. Cela pourrait traduire le passage de ces matériaux vers l'aval.



Profils en long du Gave de Cauterets entre la sortie des gorges et la confluence avec le gave de Pau Comparaison entre le profil Grandes Forces Hydrauliques 1913 et les profils levés en Juillet-Aout 2018 et Février 2019 (fils d'eau)

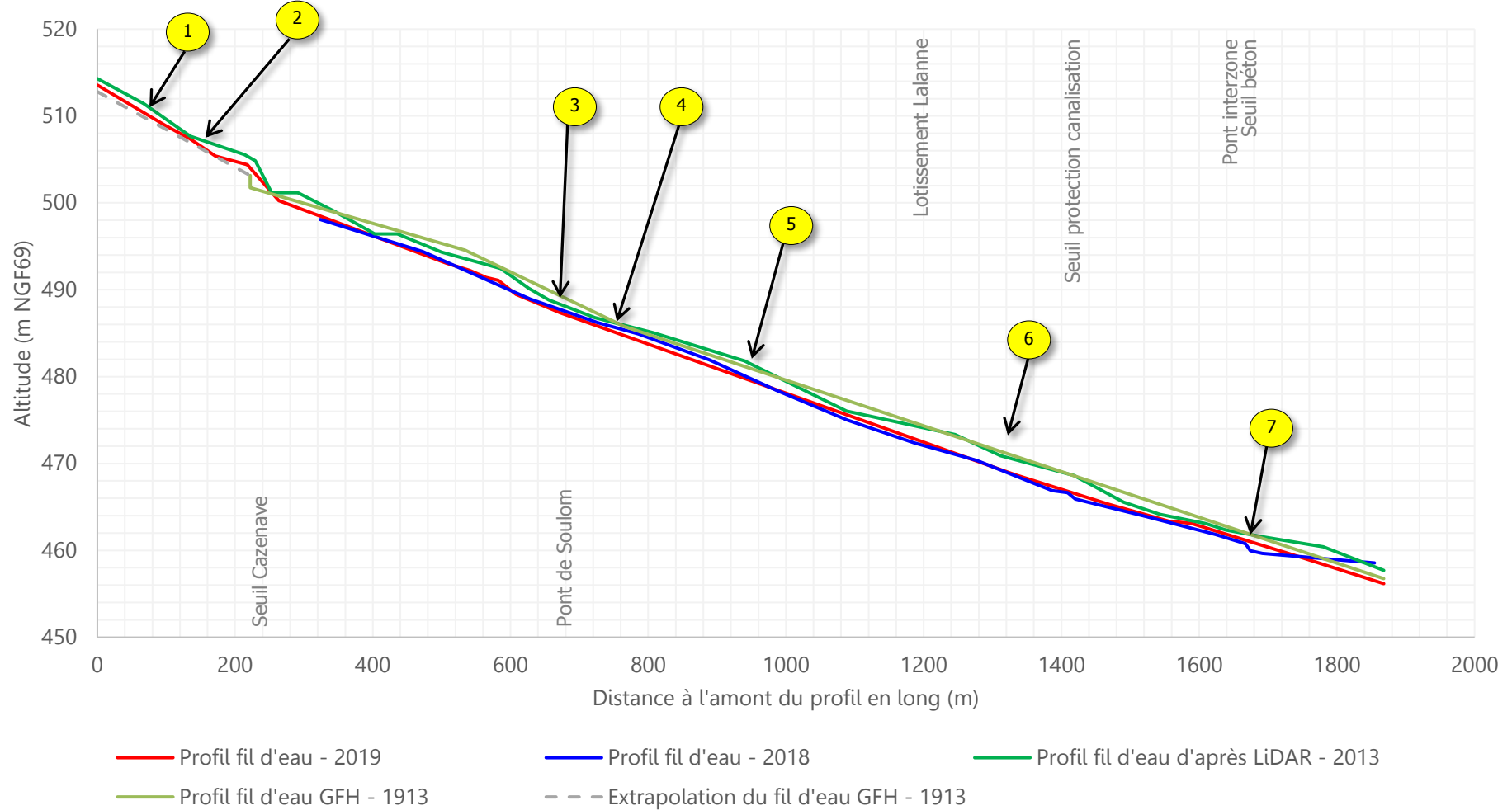


Figure 13 : Comparaison des profils en long GFH 1913, et des fils d'eau levés par GEOFIT en 2018 et 2019

Profils en long du Gave de Cauterets entre le lotissement Lalanne et la confluence avec le Gave de Pau
 Comparaison entre Juillet-Aout 2018 et Février 2019 (fond de lit)

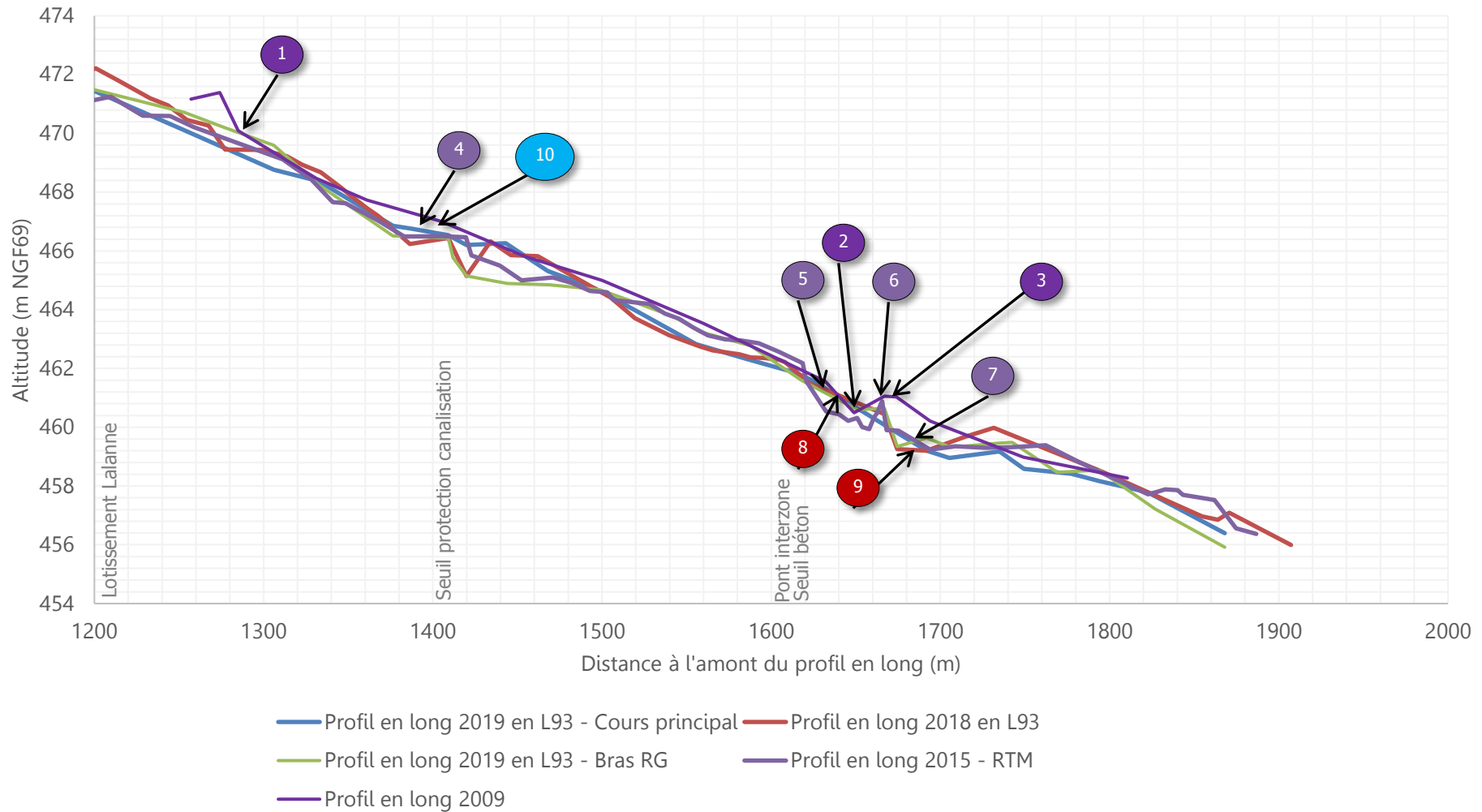


Figure 14 : Comparaison des profils 2009 (TCEP)-2015 (RTM)-2018 et 2019 (GEOFIT) sur le cône résiduel

Sur le deuxième graphique (*cf.* Figure 14), la comparaison concerne essentiellement le cône résiduel c'est-à-dire la partie développée entre le lotissement La Lanne et la confluence avec le gave de Pau.

On note une évolution entre les différents profils disponibles et en particulier les points singuliers suivants :

- Le profil 2009 présente un exhaussement vers l'apex du cône résiduel (1), puis un profil quasi continu jusqu'en amont du pont Interzone avec un surcreusement amont (2) et un exhaussement au niveau du pont (3), certainement en appui sur le seuil parafouille ;
- Le profil 2015 est plus complexe avec une mouille amont en aval immédiat du seuil de protection de la canalisation (4) qui se retrouve sur les autres profils (sauf celui de 2009), une zone d'environ 160 m jusqu'à la zone d'influence marquée du pont Interzone qui se matérialise par un surcreusement amont (5) et aval (7) et un point de rehausse qui correspond au seuil parafouille (6) ;
- Le profil 2018 qui montre un fonctionnement différent au niveau du pont Interzone avec un lissage du surcreusement amont (8) au profit d'une incision en aval du seuil (9) ;
- Le profil 2019 (cours principal) où l'on voit l'effet de l'effacement partiel du seuil (10), la fosse amont du pont Interzone complètement lissée (8) par contre le seuil parafouille ne semble pas avoir été relevé, il est donc difficile de caractériser la fosse aval au pont.

Pour définir l'évolution passée et récente du lit du gave de Pau nous avons sectorisé la zone d'étude en zones présentant une cohérence en termes d'évolution verticale. Ces différentes zones sont présentées sur la carte ci-dessous (*cf.* Figure 15) :

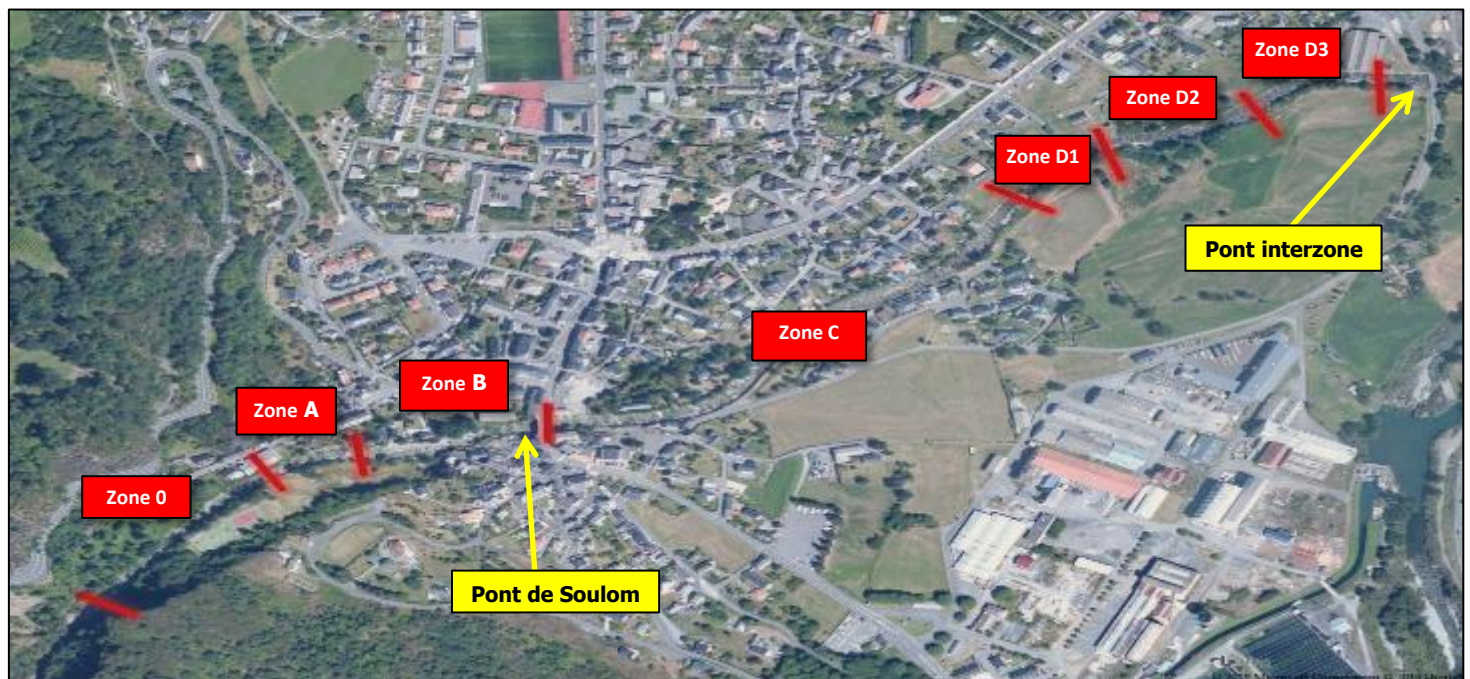


Figure 15 : carte des zones équivalentes en termes d'évolution verticale

A titre indicatif, le tableau suivant présente les pentes de chaque tronçon sur les différents profils dont nous disposons.

Pente moyenne du Gave de Cauterets par tronçon						
Zones	Distance au point amont	Profil 2015	Profils 2018		Profils 2019	
		Fond de lit	Fond de lit	Fil d'eau	Fond de lit	Fil d'eau
Zone 0	300 - 515	2,87%	3,14%	2,58%	2,63%	2,90%
Zone A	515 - 600	4,24%	4,06%	3,50%	3,72%	3,50%
Zone B	600 - 765	2,43%	2,28%	2,74%	2,14%	2,96%
Zone C	765 - 1270	2,96%	3,02%	2,97%	2,91%	2,81%
Zone D1	1270 - 1375	2,97%	2,49%	3,15%	3,17%	2,70%
Zone D2	1375 - 1505	1,91%	2,04%	2,18%	1,63%	2,32%
Zone D3	1505 - 1620	2,43%	2,45%	2,07%	2,45%	2,17%

Tableau 3 : Pente moyenne du Gave de Cauterets par tronçons

Pour chacun des tronçons, l'évolution du lit en fonction des profils existant a été synthétisée sous la forme de tableaux. Ces éléments incision/exhaussement maximaux ont été utilisés dans la modélisation.

Dans ces tableaux, l'analyse de l'incision commence en aval du seuil de Cazenave, soit 300 m en aval des premières données topographiques (cf. Figure 13).

Incision ou exhaussement maximaux par zone - Profils fond de lit					
Zones	Distance au point amont	2015 - 2018	2018 - 2019	2015 - 2019	Commentaire
Zone 0	300 - 515	+0.60	-0.82	-1.42	Zone principalement en exhaussement entre 2015 et 2018, puis en incision forte entre 2018 et 2019
Zone A	515 - 600	+0.91	-0.50/+0.50	+0.72	Zone en exhaussement de 2015 à 2018, entre 2018 et 2019 zone mixte
Zone B	600 - 765	+0.34	-0.70	-0.50	Zone stable avec léger exhaussement entre 2015 et 2018 puis incision entre 2018 et 2019
Zone C	765 - 1270	-0.57/+1.10	-0.93	-0.95	Incision marquée depuis 2018
Zone D1	1270 - 1375	-0.30/+0.70	-0.53	-0.42	Zone en incision principalement depuis 2018
Zone D2	1375 - 1505	+1.33	+1.05	+1.20	Zone en exhaussement, seuil a disparu sous les matériaux
Zone D3	1505 - 1620	-0.70	-0.30	-0.60	Incision marquée entre 2015 et 2018-2019, fond du lit relativement stable entre 2018 et 2019.

Tableau 4 : Evolution verticale du fond du lit en comparant la topographie du fond du lit



Incision ou exhaussement maximaux par zone - Profils ligne d'eau						
Zones	Distance au point amont	1913-2013	2013-2018	2018-2019	1913-2019	Commentaire
Zone 0	300 - 515	-1.20	-1.70	-0.30/+0.30	-2.10	Zone en incision
Zone A	515 - 600	-0.95	-2.00	+0.45	-2.15	Zone en incision de 1913 à 2013, exhaussement récent
Zone B	600 - 765	-1.18	-1.70	-0.50	-2.30	Zone en incision
Zone C	765 - 1270	-1.20/+0.50	-2.00	-0.80/+0.50	-2.20	Zone en incision
Zone D1	1270 - 1375	-0.50	-2.34	-0.30/+0.40	-2.00	Zone en incision
Zone D2	1375 - 1505	-1.10	-2.50	+0.58	-2.00	Zone en incision puis exhaussement récent
Zone D3	1505 - 1620	-1.20	-2.10	+0.50	-1.70	Zone en incision puis exhaussement récent

Tableau 5 : Evolution verticale du fond du lit en comparant les fils d'eau

Incision ou exhaussement maximaux par zone - Tendances générales		
Zones	Distance au point amont	Commentaire
Zone 0	300 - 515	Zone en incision avec phase d'exhaussement entre 2015 et 2018
Zone A	515 - 600	Zone en incision entre 1913 et 2013 puis en exhaussement entre 2015 et 2018 voire 2019
Zone B	600 - 765	Zone en incision
Zone C	765 - 1270	Zone mixte entre 1913 et 2015 puis phase d'incision marquée depuis 2015 à 2018
Zone D1	1270 - 1375	Zone en incision
Zone D2	1375 - 1505	Zone en incision jusqu'à 2013 puis à partir de 2015 exhaussement
Zone D3	1505 - 1620	Zone en incision, fond de lit stable entre 2018 et 2019

Tableau 6 : tendances d'évolution verticale du lit

☞ **Nota-bene** : La zone en aval du pont interzone n'a pas été intégrée à cette analyse car le chenal d'écoulement principal a fortement évolué et changé au fil des crues ou s'est démultiplié, la comparaison entre les profils en long dans cette zone est donc sujette à de fortes incertitudes. En effet, le chenal principal se déplace latéralement fortement ou les bras se multiplient, la comparaison diachronique ne peut donc être significative. Et ce, d'autant plus que suivant les crues et les intercrues plus ou moins prolongées la zone s'encombre de matériaux ou s'en libère.

Nous avons toutefois intégré une analyse diachronique complémentaire (cf. supra) de l'évolution de la bande active qui est présentée ci-dessous.



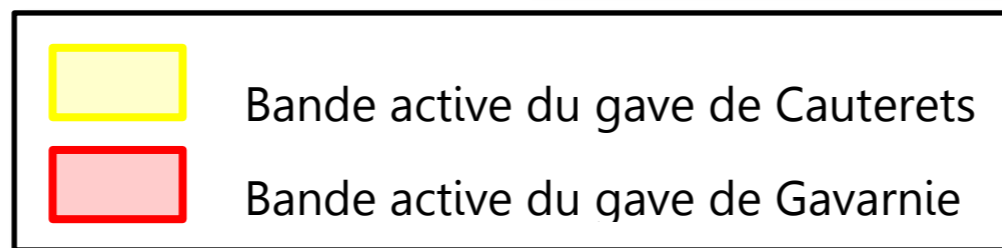
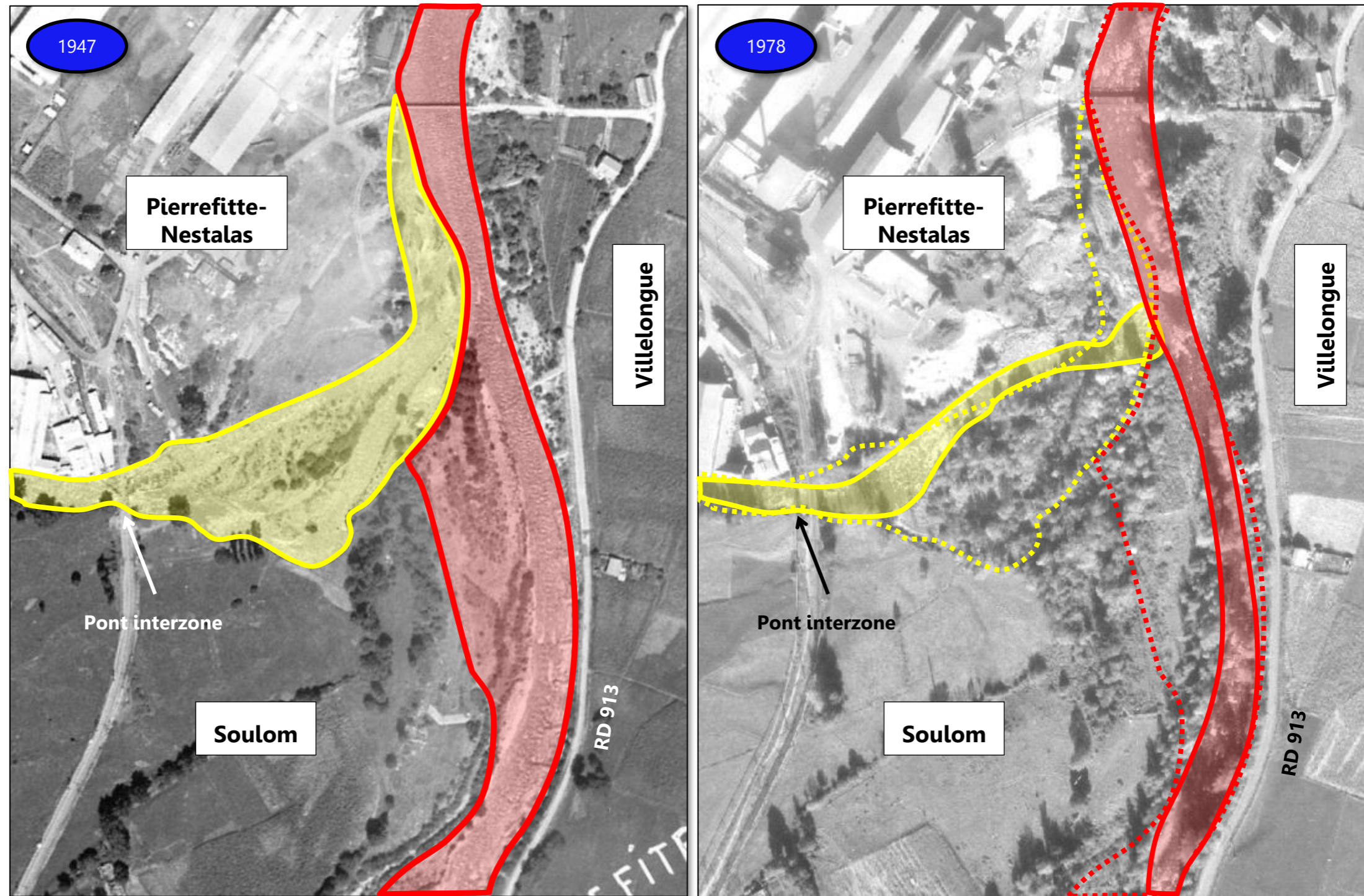


Figure 16 : Evolution de la confluence entre le gave de Cauterets et le gave de Gavarnie (1947-1978)



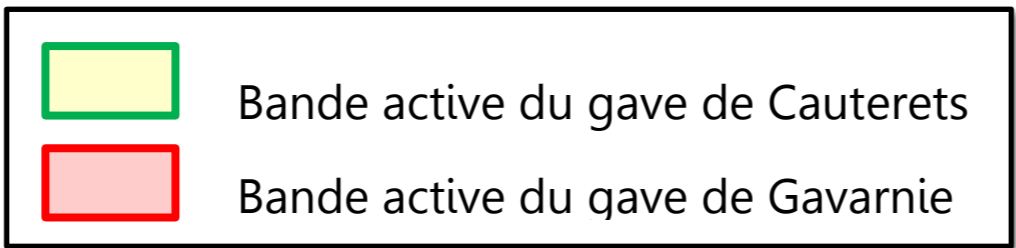
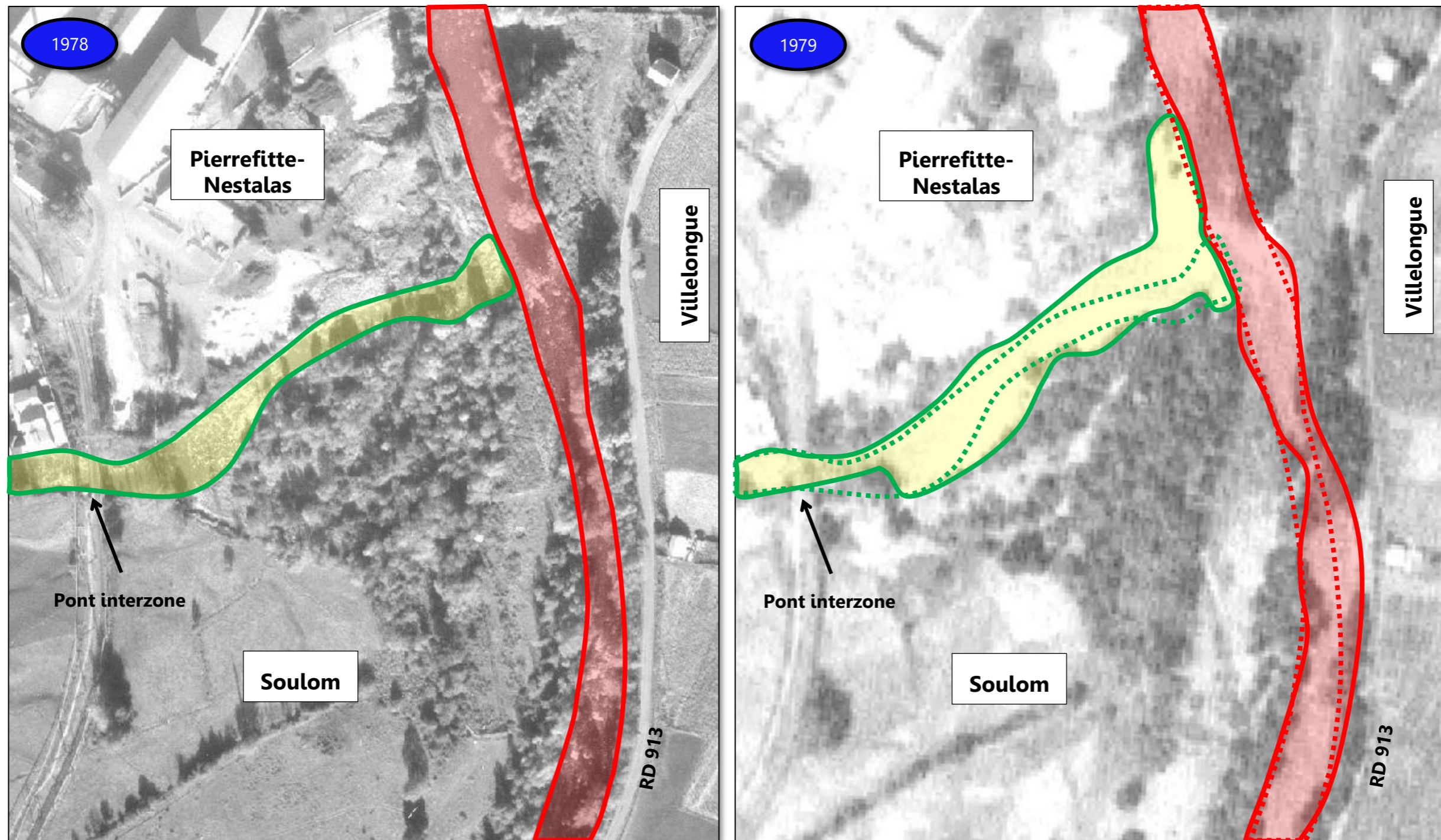


Figure 17 : Evolution de la confluence entre le gave de Cauterets et le gave de Gavarnie (1978-1979)



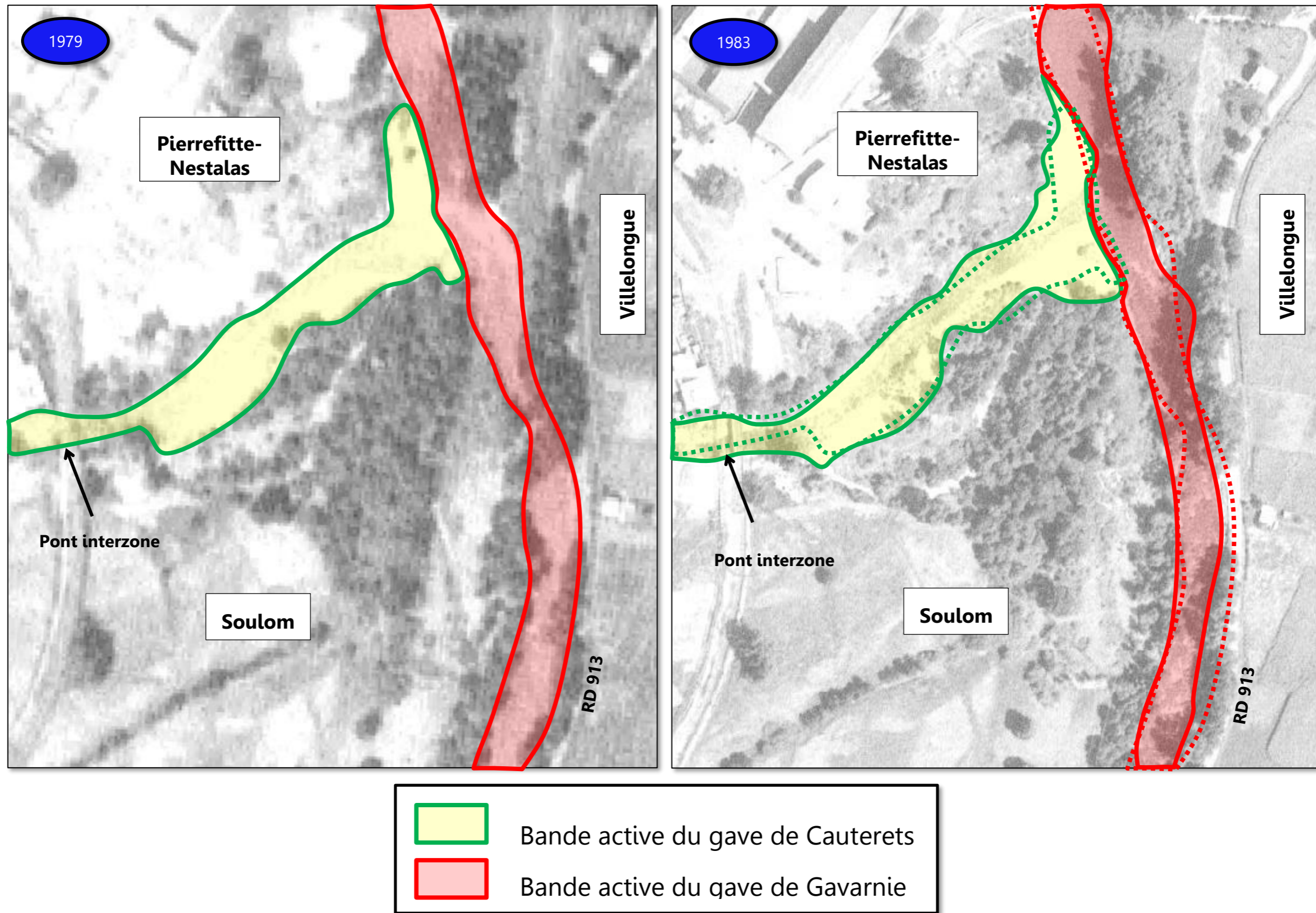


Figure 18 : Evolution de la confluence entre le gave de Cauterets et le gave de Gavarnie (1979-1983)



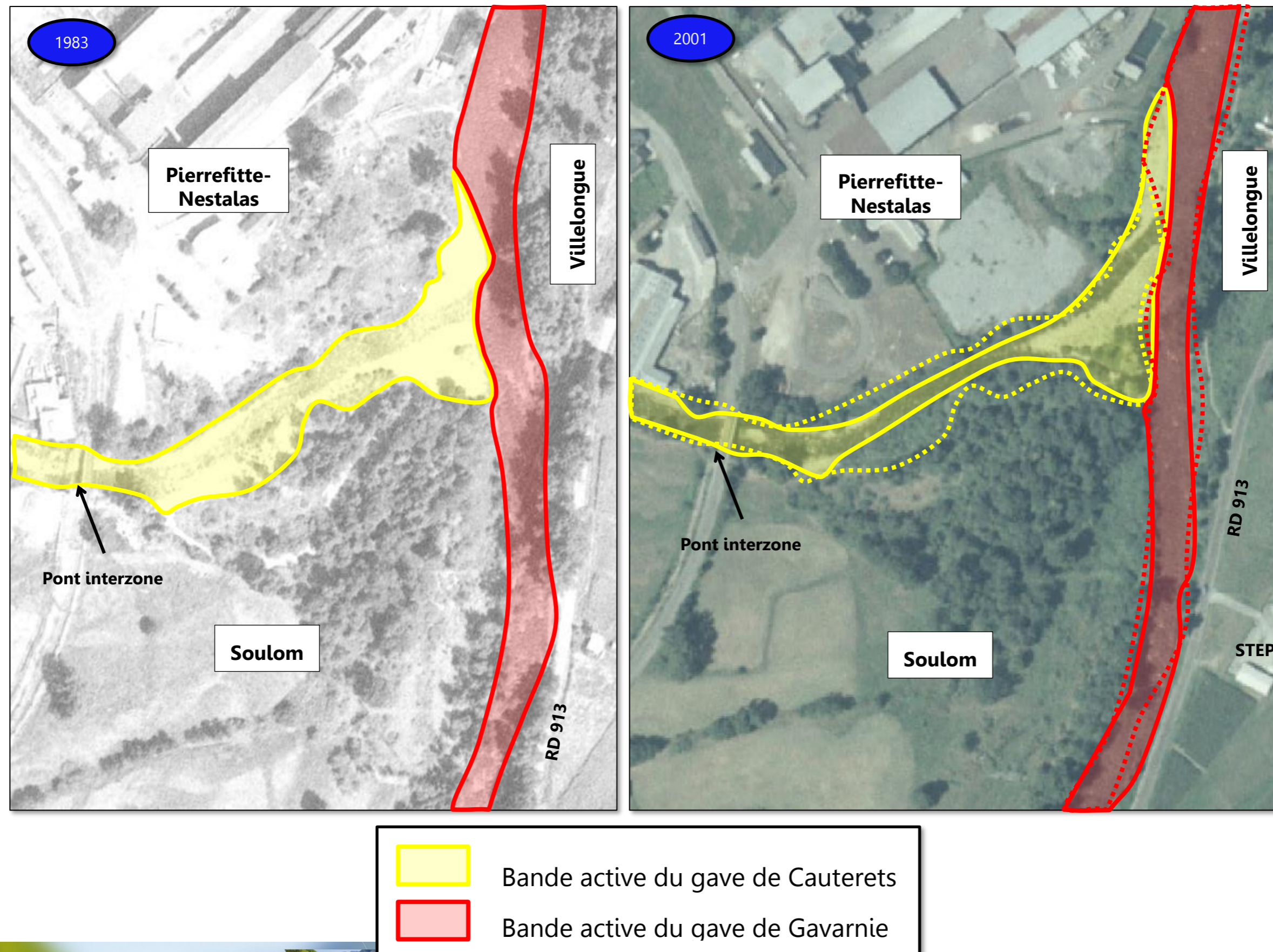


Figure 19 : Evolution de la confluence entre le gave de Cauterets et le gave de Gavarnie (1983-2001)

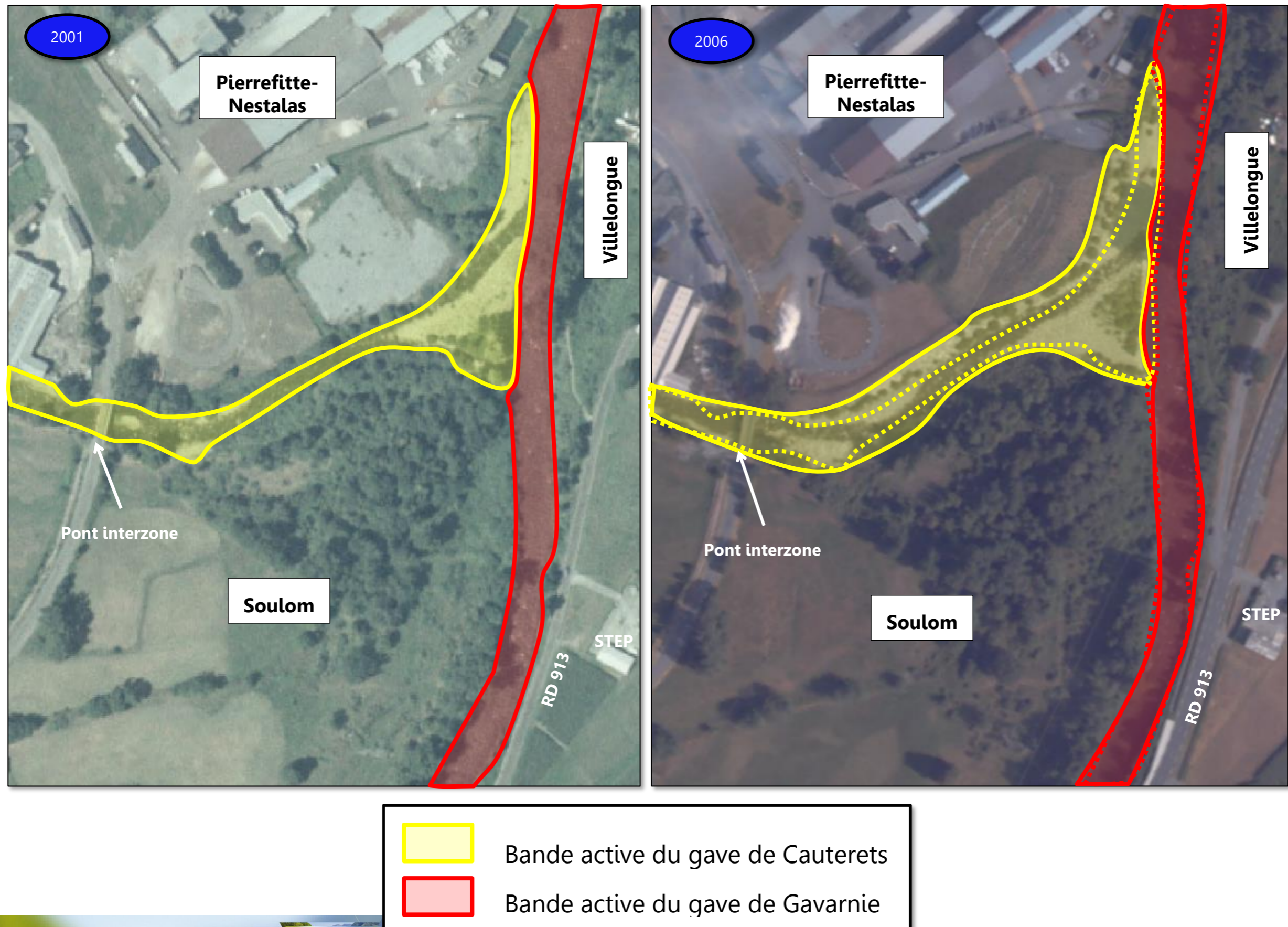


Figure 20 : Evolution de la confluence entre le gave de Cauterets et le gave de Gavarnie (2001-2006)

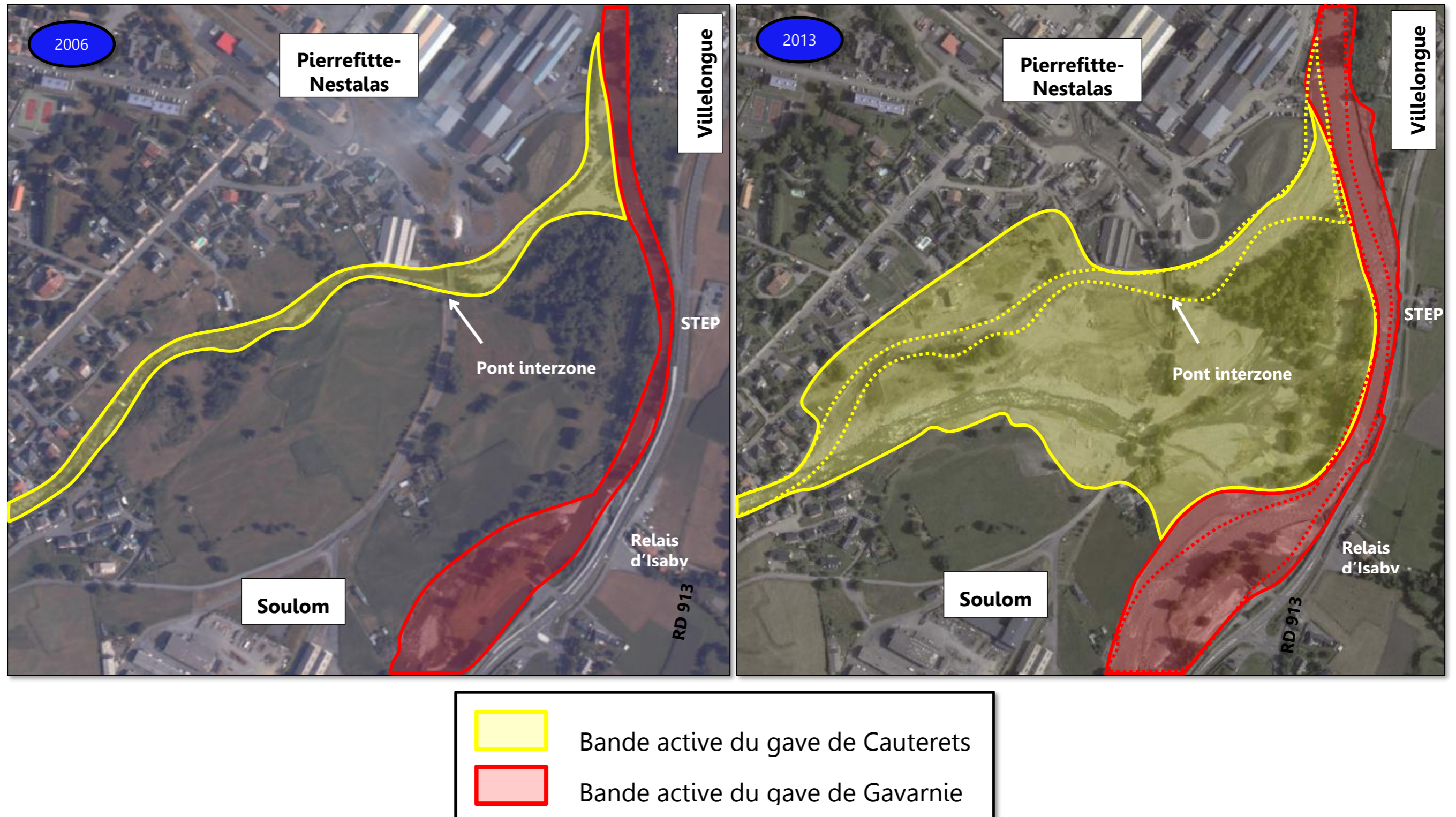


Figure 21 : Evolution de la confluence entre le gave de Cauterets et le gave de Gavarnie (2006-2013)



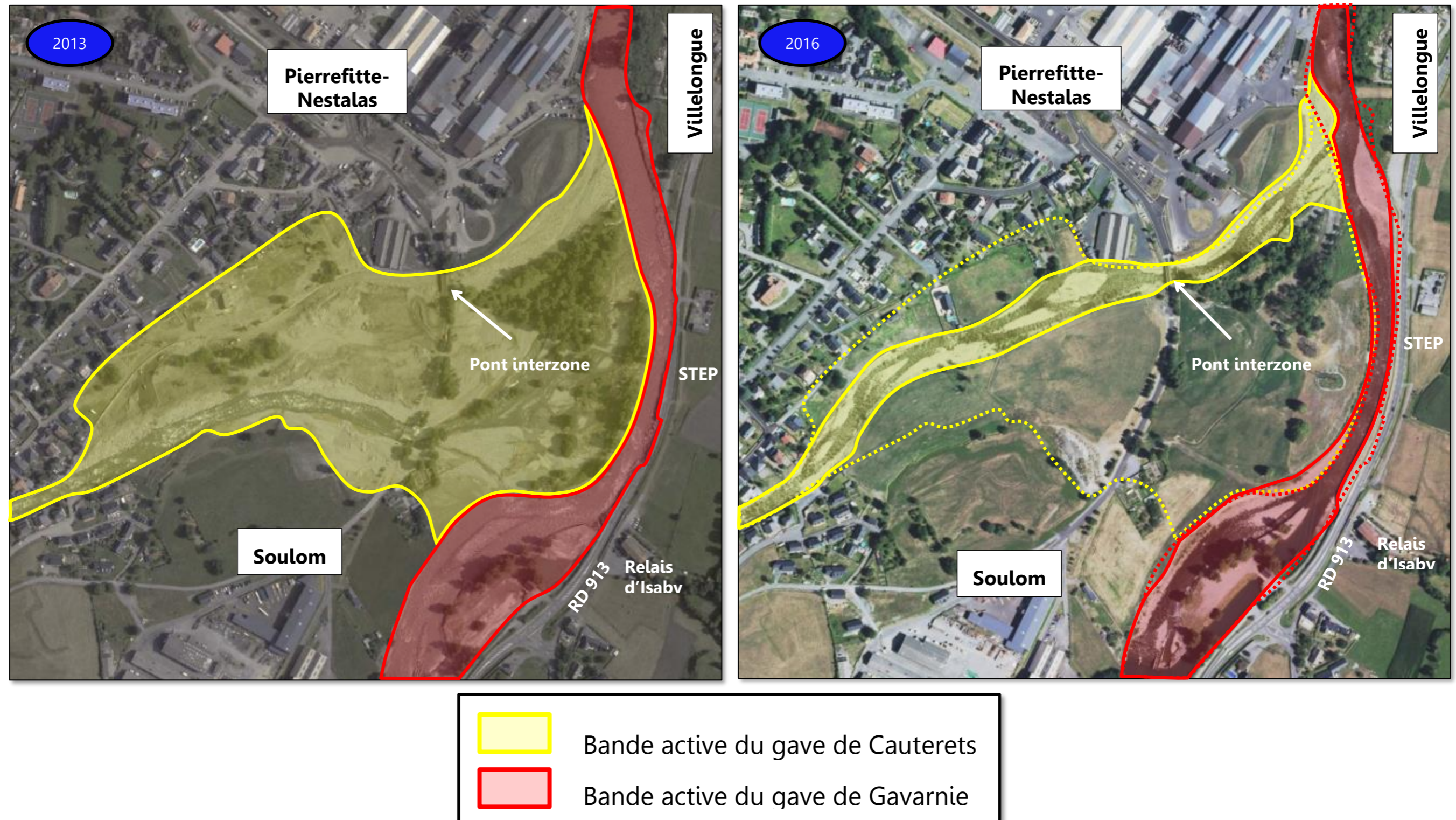


Figure 22 : Evolution de la confluence entre le gave de Cauterets et le gave de Gavarnie (2013-2016)



Nous n'avons pas de données pour 1937, dernière crue BFHM fortement morphogène avant 2012 – 2013. Ces éléments auraient été intéressants en termes de comparaison avec le fonctionnement actuel, d'autant plus que le cône était moins anthropisé.

Globalement, entre 1947 et 2006, la confluence entre le gave de Cauterets et le gave de Gavarnie change peu malgré les crues morphogènes.

Le gave de Cauterets s'écoule toujours sur la partie gauche du cône de déjection dans sa Bam, tandis que le reste de cône reste inactif.

Au point de confluence, l'emprise du cône de déjection actif du gave de Cauterets et l'axe du gave de Gavarnie restent globalement les mêmes.

Ainsi pour des crues morphogènes de type Q20-Q30, le gave de Gavarnie reste plus puissant et empêche la progression du cône du gave de Cauterets.

La crue de 2013 est plus puissante que les crues précédentes, sa période de retour est estimée à Q50, et s'effectuant dans le temps de relaxation de celle de 2012, cela facilite la mobilité des matériaux. Lors de cette crue, le cône de déjection de gave de Cauterets s'est largement réactivé, il a ainsi utilisé la BAM.

La RD 913 qui longe le gave de Gavarnie a subi des dommages entre le relais d'Isaby et la station d'épuration. Ces dommages sont accentués par le fonctionnement du gave de Cauterets avulsé dont le flux s'est déversé contre la route. Lors de la crue l'axe principal d'écoulement au niveau de la confluence était perpendiculaire à la route.

En l'absence de cette route, le gave de Cauterets aurait probablement déplacé l'axe d'écoulement du gave de Gavarnie vers la rive droite. Le gave de Gavarnie a, quant à lui, érodé une portion en amont du cône réactivé (en face du relais d'Isaby), mais sa puissance n'était pas suffisante pour l'éroder davantage.

En conclusion, la zone de confluence entre le gave de Cauterets et le gave de Gavarnie évolue principalement lors de crues morphogènes exceptionnelles (type 2013, Q50 ou supérieur). Toutefois, les possibilités d'évolution de la morphologie de la zone de confluence restent contraintes par le RD 913 protégée par un enrochement de berge reconstruit en post-crue 2013.

C [Transit sédimentaire sur le cône de déjection](#)

Le transit sédimentaire est directement contrôlé par deux éléments : (i) la **fourniture sédimentaire** variable de contrôle et (ii) la part du **stock alluvial remobilisable** (c'est-à-dire non végétalisé et stocké en lit sous la forme de bancs de galets). Ces éléments ont ainsi un impact direct sur la pente qui constitue alors une variable de réponse.

Nous rappelons également qu'une crue morphogène peut générer un **artéfact sédimentaire** en remobilisant des matériaux du stock alluvial et en les déplaçant, pouvant laisser penser à des apports nouveaux et conséquents dans ce stock, alors même que, dans un contexte de péjoration sédimentaire ces apports sont limités, voire fortement péjorés. Cette péjoration est due généralement à une connexion latérale limitée (végétation...) des zones de production.



Dans ce contexte particulier la crue morphogène va augmenter globalement la mobilité du stock alluvial et « libérer » ainsi une masse de matériaux, sans forcément apporter des matériaux neufs dans ce stock.

Une crue morphogène augmente ainsi de fait la masse de matériaux du stock alluvial qui deviennent transportables soit en les transportant, soit en les dévégétalisant ou en fragilisant leur fixation végétale, favorisant ainsi la mobilité lors de la crue suivante (si celle-ci survient rapidement, avant une nouvelle fixation végétale).

Au-delà de ces éléments, il est également nécessaire de poser les limites d'une évaluation du transit sédimentaire.

On remarque déjà la complexité de l'exercice en mettant en relation les éléments à disposition : l'évaluation effectuée par la RTM en 2013 (en post-crue) indique un volume supérieur à 100 000 m³ pour la crue de 2013 d'occurrence environ cinquantennale sur le gave de Cauterets, alors que l'étude réalisée en 2004 donne une fourchette haute de la capacité maximale de transport en amont de la zone d'étude en crue centennale de 80 000 m³ et de 12 000 m³ en crue décennale. Ces calculs sont basés sur un code numérique, en l'occurrence la formule de Lefort (1991).

Bien que ces éléments ne soient pas directement comparables (maximum de matériaux potentiellement transitant issus d'un calcul (notés MatQ100) *versus* matériaux estimés en post-crue (notés Mat2013), ils donnent des ordres de grandeur.

Toutefois, il convient de préciser les points suivants :

- Le volume calculé MatQ₁₀₀ (80 000 m³) reste conditionné par la fourniture sédimentaire et le stock alluvial présent en amont, mais également lors de la crue morphogène par certains apports liés à l'évènement : érosion par apports latéraux (érosion de berge, érosion de bas de talus, tabliers d'éboulis, déstabilisation de versants ...) et/ou remobilisation du stock alluvial et/ou incision du lit. De plus la formule peut facilement être affectée de biais notamment dans l'estimation de la granulométrie (d₉₀, d₃₀ et d₅₀) qui reste complexe à obtenir (granulométrie étendue, présence d'éléments de rugosité au sens de Lamarre & Roy (2001), variabilité spatiale de la granulométrie parfois importante dans un secteur...);
- Le volume estimé Mat2013 (> 100 000 m³) est une donnée plus robuste, liée à une estimation topographique post-crue.

Nous avons estimé ce même volume (crue 2013) par comparaison à partir des données suivantes :

- Le semis de points levé en 2009 sur la partie du cône de déjection située à l'amont du pont interzone ;
- Le LiDAR post-crue 2013

Lors de la crue de 2012, les débordements dans le secteur de Pierrefitte-Nestolas et Soulom ont été limités. Ils ont déposé très peu de matériaux en dehors du lit mineur (*cf.* Figure 48).

Par contre, en 2013, le gave de Cauterets a largement débordé en rive droite en se créant notamment un nouveau chenal d'écoulement par avulsion (*cf.* Figure 52). Les volumes de matériaux estimés en comparant les données de 2009 et 2013 correspondent donc principalement à des matériaux déposés lors de la crue de 2013.



Le semis de point de 2009 s'étendant uniquement sur la partie amont du cône de déjection, les données ont dû être extrapolées au reste de cône de déjection en effectuant un rapport de surface (cf. Figure 23).

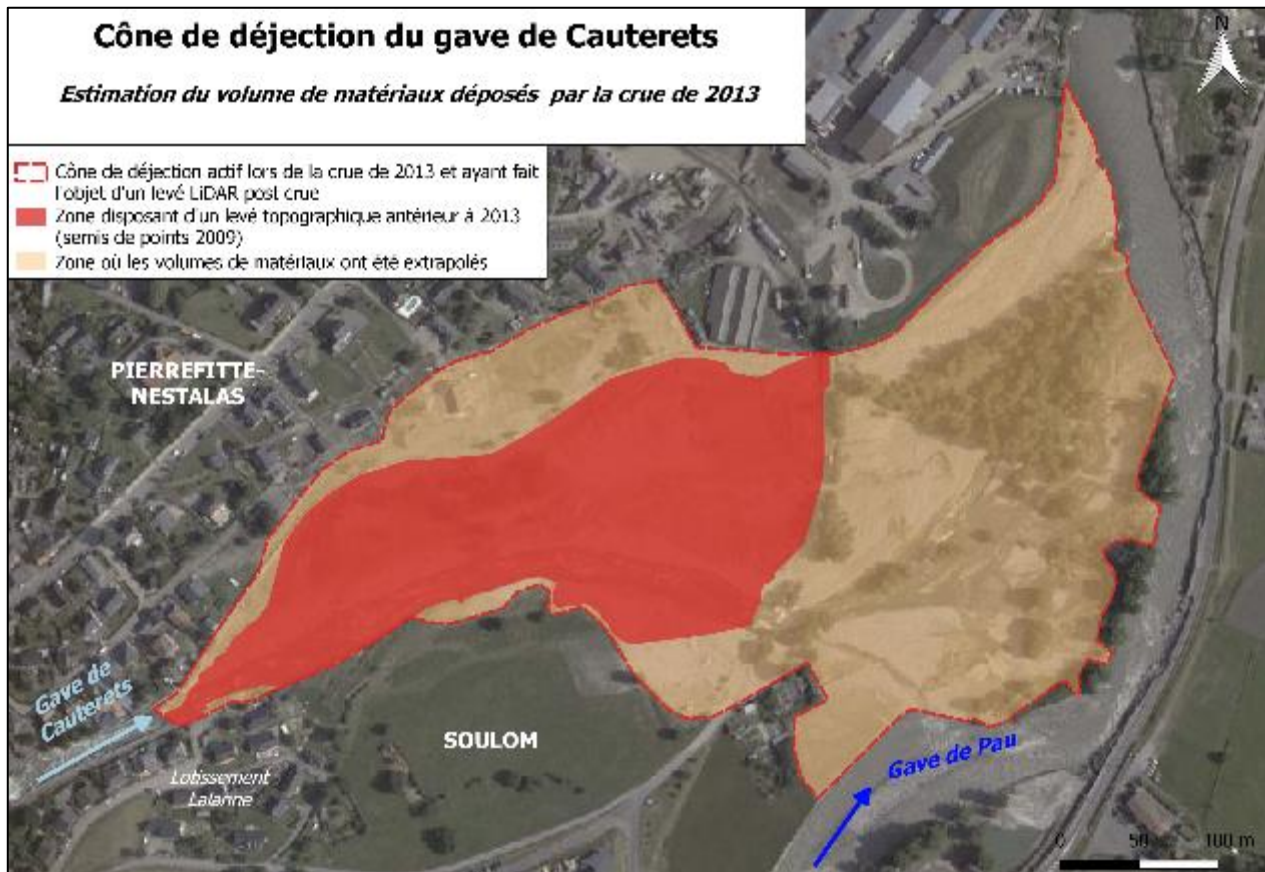


Figure 23 : Emprise des données utilisées pour estimer le volume de matériaux déposés dans le secteur de Pierrefitte-Nestalas et Soulom lors de la crue de juin 2013.

Le volume de matériaux déposés par la crue de 2013 sur la partie amont du cône est de 46 000 m³. En extrapolant cette valeur pour le cône complet, le volume de matériaux total est d'environ **118 000 m³**. Cette valeur coïncide avec l'ordre de grandeur donné par la RTM en 2013.

⇒ La fourniture sédimentaire

Le contexte actuel (forçages climatique et anthropique) **est peu propice au développement d'une fourniture sédimentaire importante** et les bassins sont souvent en déficit sédimentaire présentant alors une incision chronique.

Sur le bassin du gave de Cauterets, les zones de production sédimentaires sont peu érodées et fortement végétalisées ce qui laisse supposer une fourniture sédimentaire limitée, allant dans le sens d'une incision. C'est d'ailleurs le cas du gave de Pau qui présente des incisions par endroit plurimétriques.



Il est à noter que la séquence paraglaciale (Church & Ryder, 1972), liée au passé glaciaire de la vallée, est certainement tarie. Cette séquence paraglaciale libère ainsi une grande masse de matériaux pendant une période plurimillénaire et soutient ainsi fortement la fourniture sédimentaire... jusqu'à l'épuisement des sources sédimentaires (matériaux mobilisables) qui sont exportées, tandis que d'autres matériaux restent sous la forme de réservoirs sédimentaires (non connectés au cours d'eau).

La vallée du gave de Cauterets est une ancienne vallée glaciaire quasiment déglacée (il reste seulement deux petits appareils glaciaires relictuels en amont du gave des Oulettes de Gaube).

Le glacier du gave de Pau (qui allait jusqu'au lac de Lourdes et Saux à Adé) a connu un maximum d'extension vraisemblablement au Riss et son Dernier Maximum Glaciaire (DMG) entre 70 000 et 50 000 ans BP², au Würm inférieur. Les datations effectuées à Biscaye près de Lourdes indiquent un retrait glaciaire à partir de 38 400 BP (Mardones & Jalut, 1983). Puis la glace stagne en arrière du DMG entre 30 et 25 000 BP (Andrieu, 1987).

Dès 25 000 BP on assiste à une décrue généralisée et vers 15 000 BP la haute montagne est largement déglacée (Andrieu *et al.*, 1988), y compris le bassin du gave de Cauterets. Les glaciers résiduels sont alors des glaciers de cirque.

Les modèles (comme celui de Ballantyne, 2002) concernant les séquences paraglaciaires montrent :

- Une **phase de fourniture sédimentaire abondante** (la séquence paraglaciale *stricto sensu*) qui peut durer plusieurs milliers d'années suite notamment à la décompression paraglaciale, c'est une phase de transition vers l'étape suivante.
- Une **phase de tarissement sédimentaire** qui constitue un nouvel état d'équilibre avec un chenal s'encaissant dans les remplissages glaciaires et fluvio-glaciaires que seuls les événements du type BFHM (Basse Fréquence Haute Magnitude) perturbent (Mercier, 2010).

Dans le modèle de tarissement proposé par Church & Ryder (*op. cit.*, cf. Figure 24) la fourniture sédimentaire liée à la déglaciation se tarit petit à petit, et ce à partir du dernier DMG. Cette séquence paraglaciale peut durer plusieurs millénaires.

Compte-tenu de la datation du dernier DMG et du processus de déglaciation de la vallée, on peut penser les sources sédimentaires issues de la séquence paraglaciale sont taries, il qu'il ne reste plus que des réservoirs sédimentaires sur les versants qui sont difficilement activables, voire impossibles à activer actuellement.

² BP = *Before present*, littéralement « avant le présent » mode de comptage du temps en géomorphologie en partant du 1^{er} janvier 1950 et en remontant vers le passé.



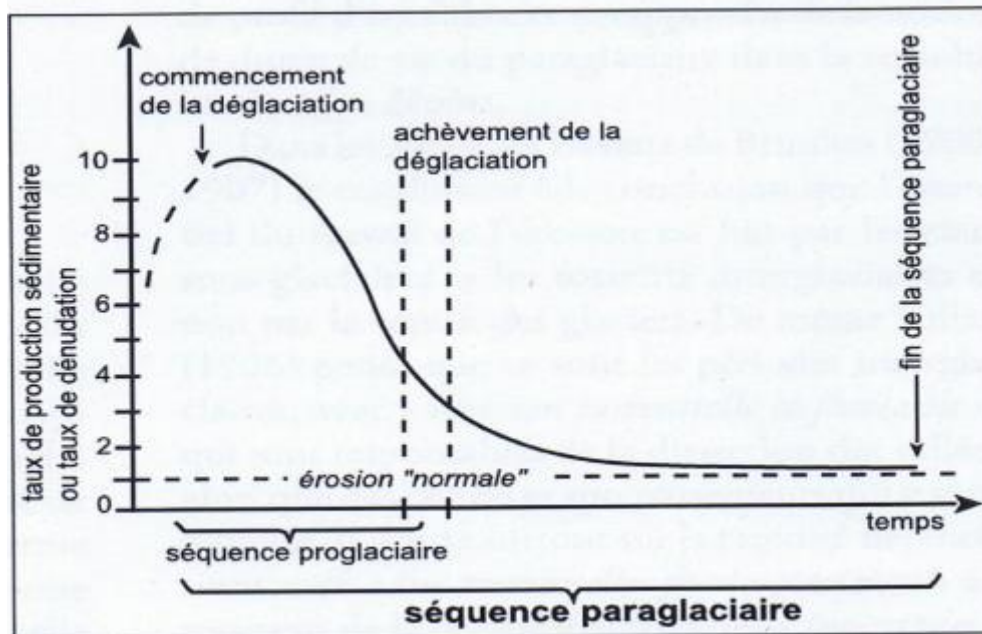


Figure 24 : la séquence paraglaciaire d'après Church & Ryder (1972)

⇒ Evaluation du transport solide

La première opération a consisté à estimer la granulométrie du lit. Nous avons effectué la granulométrie en lit en utilisant la méthode de Wolman (1954) et en la précisant par une double discrimination :

- **Discrimination haute** : en ne prenant pas les éléments de rugosité. En effet ils ne participent qu'exceptionnellement au transport solide (Martini, 1977 ; Zimmerman & Church, 2001).
- **Discrimination basse** : en ne prenant pas les éléments inférieurs à 8 mm, car ils ne transitent pas *stricto sensu* par charriage.

La discrimination basse est basée sur les éléments suivants :

La limite « granulométrique » entre **charriage** et **suspension** a été fixée à 0,5 mm pour une vitesse de 20 cm/s dès 1935 par Hjulström. Mais en fait, **cette limite est graduelle jusqu'à 8 mm**.

Moss (1972) et Middleton (1976) ont montré que les particules de taille jusqu'à **8 mm** et proches de cette taille, transitent encore par suspension, mais aussi par charriage.

De nombreux auteurs parmi lesquels Kellerhals & Bray (1971), Adams (1979), Bray & Church (1980), Brierley & Hickin, (1985), Simon (1986) et Couvert *et al.* (1999) confirment que la ségrégation entre charriage et suspension est **8 mm**.

En-deçà de ce diamètre, les particules présentes dans les armures (au sens de Bray & Church, 1980) seraient des **particules de colmatage** s'infiltrant entre les grains grossiers provenant de la récession de crue. Ces particules peuvent ainsi pénétrer plus ou moins profondément dans les espaces interstitiels entre les grains grossiers (donc > 8mm).



Ainsi, on peut considérer qu'en dessous de 0,5 mm, tous les matériaux transitent par suspension, entre 0,5 et 8 mm les deux modes de transport alternent et au-dessus de 8 mm, c'est le charriage seul qui agit.

C'est pourquoi 8 mm peut être considéré comme la taille minimale des matériaux se déposant en récession de crue et participant au transport solide *stricto sensu*.

Trois granulométries ont ainsi été effectuées dans le lit du gave, le document suivant localise ces granulométries :

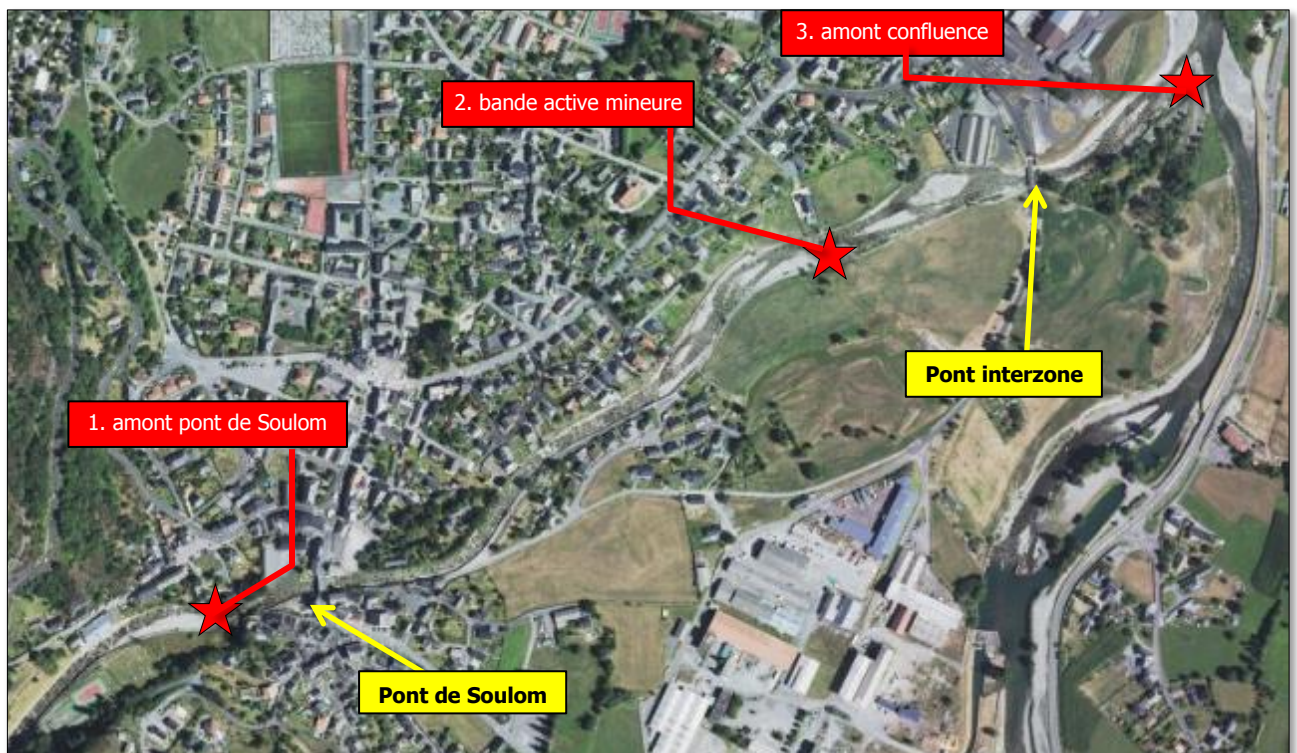


Figure 25 : Localisation des granulométries réalisées en 2019

Les résultats des trois granulométries sont présentés ci-dessous :

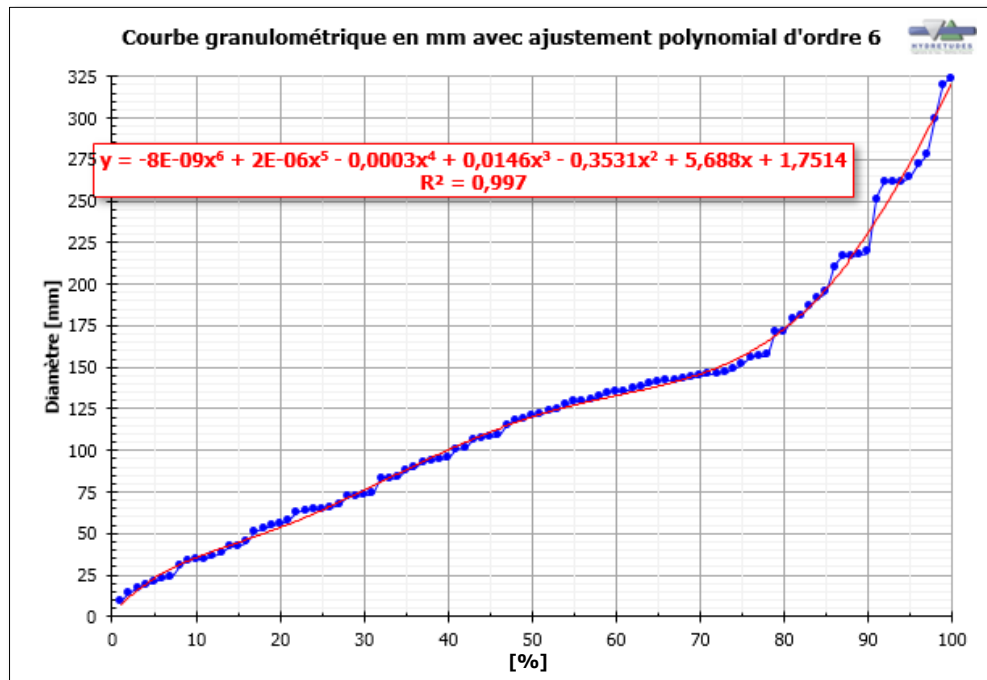


Figure 26 : Courbe granulométrique effectuée en amont du pont de la RD 921



Figure 27 : Photographie du substrat du lit en amont du pont de Soulom, matériaux grossiers (cailloux grossiers à blocs soit 64-1024 mm dans la classification de Wentworth) avec grains plus petits (gravier grossiers à cailloux plus petits soit 8-64 mm). L'armure du lit n'est pas colmatée. Les grains sont émoussés ou émoussés-cassés donc dans le stock alluvial depuis un certain temps.

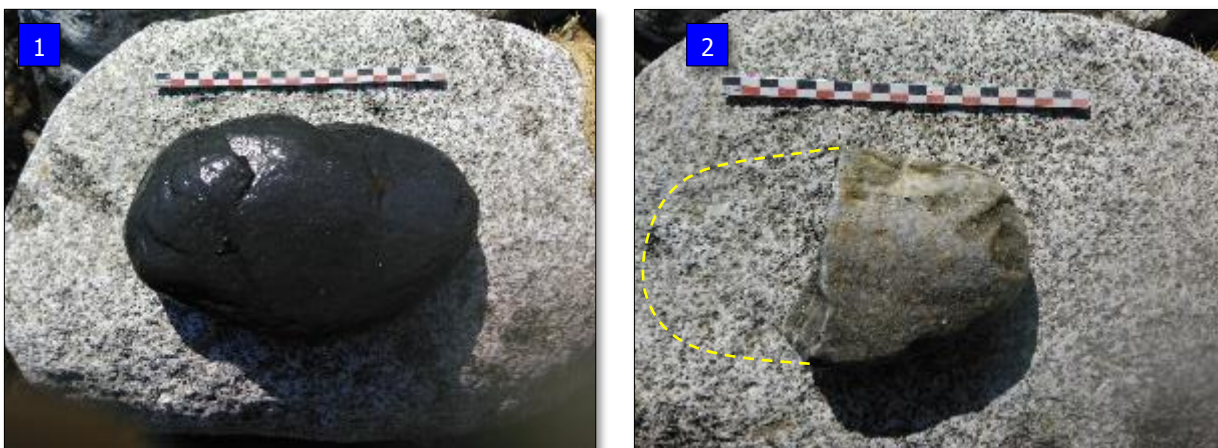


Figure 28 : (1) gros grain émoussé (dm = 146.73, m = 1 574 g) ; (2) grain émoussé-cassé (dm = 106.78, m = 675 g). Ces deux items représentatifs des matériaux en lit (en termes de forme) sont dans le stock depuis longtemps et ont été transportés-déposés à plusieurs reprises

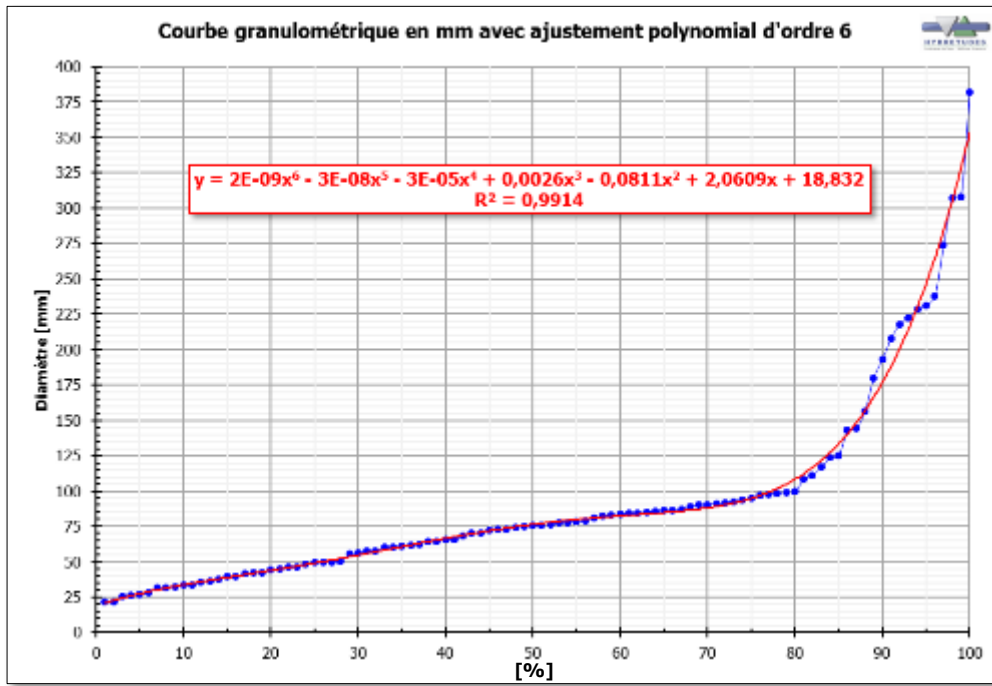


Figure 29 : Courbe granulométrique effectuée en aval de l'apex du cône

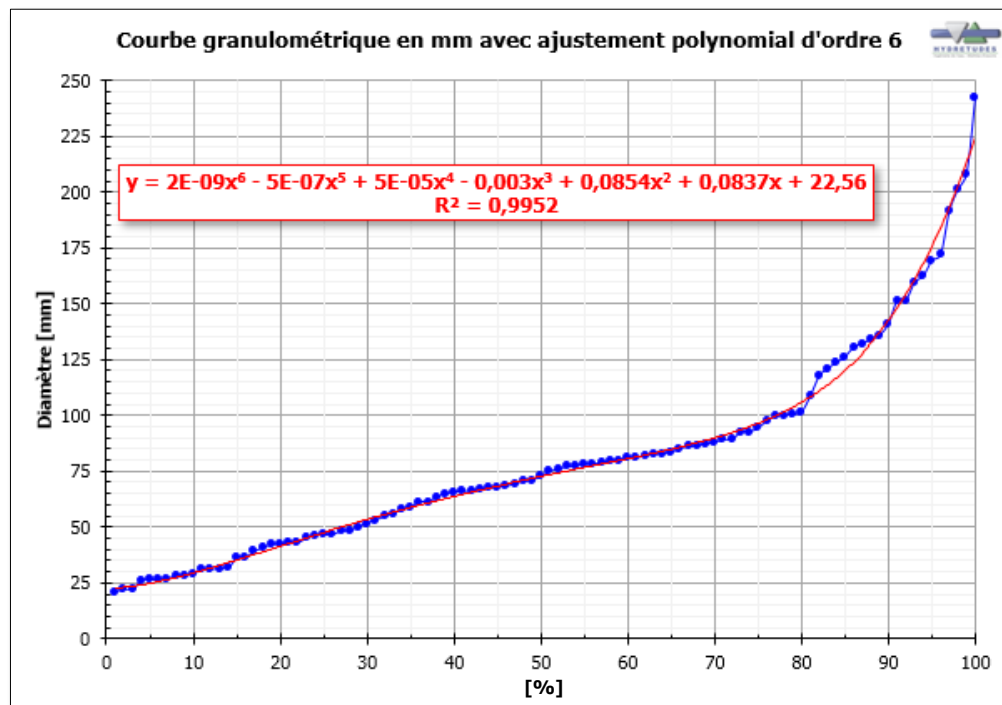


Figure 30 : Courbe granulométrique en mm effectuée en amont proche de la confluence



☞ **Nota-bene** : réserves concernant la granulométrie.

La granulométrie dans ce secteur est complexe à déterminer car il a été fortement remanié et des travaux ont été réalisés encore récemment (en amont du pont de Soulom).

De plus la granulométrie est excessivement hétérogène avec des patches grossiers très variables en taille, des clusters, des alignements, des éléments de rugosité (au sens de Lamarre & Roy, 2001). Nous avons donc essayé de discriminer les éléments de rugosité qui sont peu ou pas mobilisés (Martini, 1977 ; Zimmerman & Church, 2001). C'est d'ailleurs ces éléments de rugosité (isolés ou regroupés) qui déterminent la morphologie du chenal et la stabilité des lits fluviaux (Thompson, 2001). Ce qu'il convient également de remarquer c'est que les grains sont généralement peu colmatés, comme lavés.

Les seules sources existantes en matière de granulométrie (à notre connaissance) sont celles de Péteuil (2004). Elles concernent la partie basse du cône de déjection.

Nous avons effectué une granulométrie dans la partie basse du cône de déjection et présentons ci-après les résultats comparés :

Comparaison des granulométries Péteuil (2004) et Hydrétudes (2019)			
Intervenant	RTM – Péteuil (2004)		Hydrétudes
Site	Pont SNCF	Confluence	Aval cône - Att. N° 1
D ₃₀	25	15	50.35
D ₅₀	57	37	73.05
D ₉₀	195	125	150.01
D ₉₀ /D ₃₀	7.8	8.3	1.95

Tableau 7 : comparaison (indicative) des granulométries effectuées par Péteuil (2004) et Hydrétudes (2019)

La comparaison de deux granulométries avec un tel pas de temps est indicative.

Toutefois l'écart temporel, les différentes crues survenues (2012 et 2013), le fonctionnement du cône et les remaniements importants (travaux) constituent des facteurs d'explication de ce décalage.

Afin de mieux comprendre le fonctionnement du cône de déjection du gave de Cauterets, une estimation du transport solide lors de la crue de 2013 a été réalisée à l'amont du pont de Soulom.

☞ Equation et paramètres d'entrée

Les calculs ont été effectués à partir de la formule de Recking (2013) qui dispose d'une plage de validité adaptée au gave de Cauterets (cf. tableaux ci-dessous).

Plage de validité de la formule de Recking (2013)	
Éléments	Plages
Pente	Entre 0.01% et 7%
Granulométrie (diamètres)	Entre 0.5 mm et 600 mm

Tableau 8 : Plage de validité de la formule de Recking



Valeurs caractéristiques du gave en amont du pont de Soulom	
Éléments	Résultats
Pente	2.94%
D _{min}	9.47 mm
D ₅₀	119.09 mm
D ₈₄	198.37 mm
D _{max}	323.56 mm

Tableau 9 : valeurs caractéristiques

Les paramètres d'entrée de la formule de Recking sont la pente, la granulométrie du lit (D₅₀ et D₈₄), la largeur du cours d'eau et le débit.

La pente et la largeur du cours d'eau ont été estimées à partir des données topographiques levées en 2018-2019.

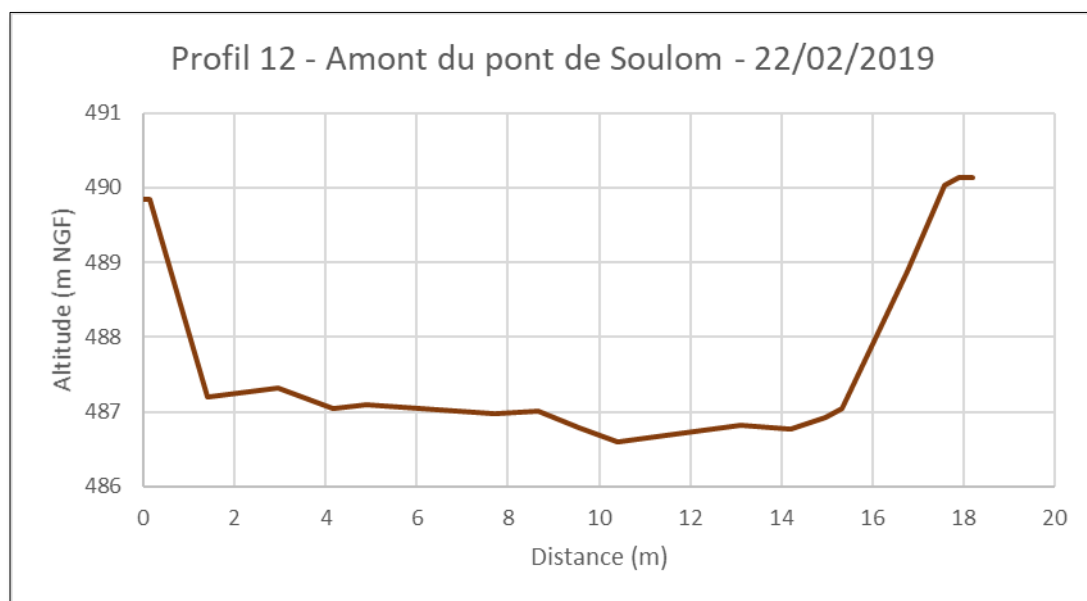


Figure 31 : Section utilisée pour calculer le transport solide à l'amont du pont de Soulom

Les diamètres caractéristiques sont issus des granulométries réalisées par HYDRETUDES en mai 2019 selon la méthode de Wolman (1954). Une granulométrie a été réalisée spécifiquement à l'amont du pont de Soulom **en lit** (cf. Figure 26) et deux granulométries complémentaires ont été effectuées en aval (amont du pont interzone et amont confluence).

Enfin, l'hydrogramme de débit de la crue de 2013 est celui proposé par HYDRETUDES dans le cadre de l'analyse hydrologique du gave de Cauterets.

☞ Incertitudes :

Il est important de souligner que l'utilisation des formules de transport solide est associée à de nombreuses incertitudes :

- Les données d'entrée présentent déjà une part intrinsèque d'incertitudes. Par exemple, la granulométrie n'est plus la même qu'avant la crue de 2013. Afin de limiter les incertitudes liées à ce point, nous avons réalisé plusieurs calculs avec différentes granulométries,
- Les formules de transport solide permettent de calculer une capacité maximale de transport solide. Cette capacité de transport est potentielle puisqu'elle dépend de la disponibilité en matériaux provenant de l'amont et des versants,
- Les formules de transport solides sont calibrées pour être utilisées sur des sections alluviales et non contraintes où hydraulique et géométrie du lit sont liées (Recking, 2019). Dans le secteur de Pierrefitte-Nestalas et Soulom, le gave de Cauterets a un fonctionnement spécifique. Il s'écoule sur son cône de déjection et est contraint par des murs et des digues. Les formules de transport solide ne sont donc normalement pas adaptées à notre cas ;
- Les formules de transport solide ne prennent pas en compte l'évolution du fond du lit au cours de la crue.

En connaissance de ces incertitudes, nous avons décidé d'utiliser la formule de Recking pour estimer le volume de matériaux potentiellement transporté lors de la crue de 2013 au niveau de Pierrefitte-Nestalas. En effet, les résultats obtenus apportent tout de même des éléments de compréhension du fonctionnement du gave de Cauterets dans la zone d'étude.

☞ Résultats

Les calculs ont été réalisés sur le site BedLoadWeb dont le code est géré par Alain Recking. Ce site permet notamment de réaliser des bilans sédimentaires.

La granulométrie étant variable entre l'amont et le cône de déjection, les calculs de transport solide ont été effectués trois fois :

- Une fois avec la granulométrie effectuée à l'amont du pont de Soulom qui est plus grossière (G1 : $D_{50} = 119$ mm) ;
- Une fois avec les granulométries effectuées au niveau du lotissement Lalanne et à l'aval du pont interzone qui est plus fine (G2 : $D_{50} = 73$ mm). Ces deux granulométries sont très similaires. Une courbe granulométrique moyenne a été utilisée ;
- Une fois avec une courbe granulométrique moyennant les trois granulométries réalisées (G3 : $D_{50} = 81$ mm).

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau ci-dessous :



Volume maximal de matériaux transporté lors de la crue de 2013 à l'amont du pont de Soulom			
Granulométrie utilisée	G1 D ₅₀ = 119 mm	G2 D ₅₀ = 73 mm	G3 D ₅₀ = 81 mm
Volume maximal réel transporté ³	50 635 m ³	137 275 m ³	102 921 m ³
Volume maximal apparent transporté ⁴	67 092 m ³	181 889 m ³	136 371 m ³

Tableau 10 : Volume de matériaux transportés lors de la crue de 2013 en fonction de trois granulométries différentes

Les résultats obtenus sont très variables en fonction de la granulométrie utilisée. Cependant, ils confirment que la crue de 2013 a bien pu transporter plus de 100 000 m³ de matériaux.

En effet, dans la partie précédente, nous avons estimé qu'environ 118 000 m³ de matériaux avaient été déposés lors de la crue de 2013 (cf. supra).

Les différents calculs que nous avons effectués laissent penser que la granulométrie générale des matériaux transportés par la crue était plus fine que celle actuellement présente au niveau du pont de Soulom. Elle correspondait probablement à une granulométrie intermédiaire entre les relevés que nous avons effectués (cf. Tableau 10, dernière colonne).

⇒ Le stock alluvial

Le stock alluvial présent sur le cône est concentré en quelques points qui sont détaillés dans le tableau ci-dessous :

PRINCIPALES STRUCTURES ALLUVIONNAIRES DU SECTEUR ETUDIÉ			
Localisation	Volume	Morphogénèse	Fixation
Amont seuil SHEM	300 m ³	Perte de charge liée au seuil	Non végétalisée
Amont pont RD 921	320 m ³	Perte de charge liée à la pente et à la contraction du lit	Non végétalisée
Entre le pont de Soulom et le pont Interzone	3 800 m ³	Perte de charge liée à l'ouverture et à la pente, ainsi qu'à l'influence du pont interzone	Début de végétalisation
En aval du pont interzone	1 500 m ³	Partie aval du cône, méandrage	Début de végétalisation
TOTAL	5 920 m³		

Tableau 11 : Volume des structures alluvionnaires de la zone d'étude

Nous avons effectué des relevés des surfaces des structures alluvionnaires couplés à une évaluation des hauteurs de matériaux du stock alluvial présent en lit.

³ Ne tient pas compte des vides, $\rho_s = 2650 \text{ kg/m}^3$

⁴ Tient compte des vides, $\rho_s = 2000 \text{ kg/m}^3$



Le stock alluvial actuellement présent dans la zone d'étude comprend 10 structures alluvionnaires principales (dont la superficie varie entre 398 m² et 1 838 m²) totalisant un volume d'environ **6 000 m³**.

Ces différents éléments sont présentés dans la carte ci-après. La numérotation retenue sera utilisée ensuite dans le présent document.

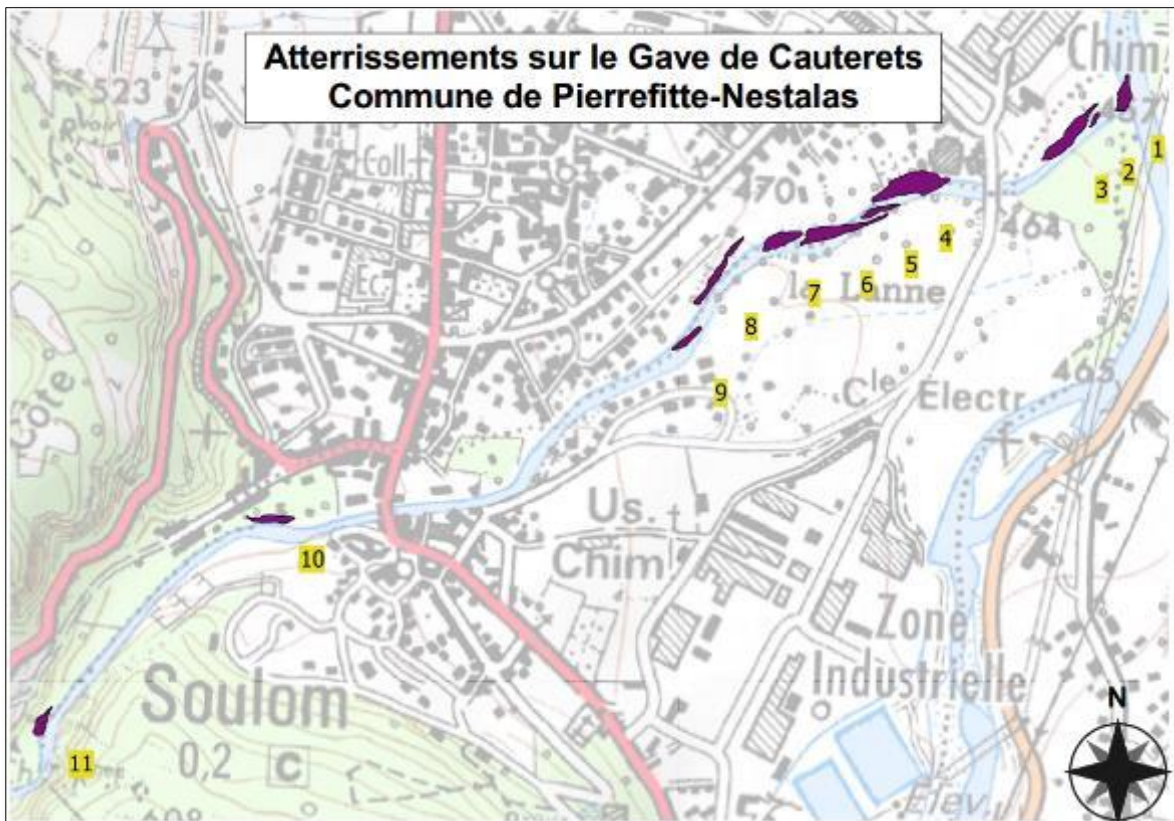


Figure 32 : atterrissements relevés en avril 2019

En ce qui concerne la granulométrie des structures alluvionnaires elle est grossière et très variable (tant au niveau du profil en long que sur la plupart des atterrissements avec un tri granulométrique, le gave se déchargeant des matériaux les plus grossiers en tête d'atterrissement).

Les photographies suivantes illustrent ces éléments :





Figure 33 : (1) et (2) → Granulométrie très grossière sur l'atterrissement n° 10. L'échelle est donnée par la mire qui fait 50 cm

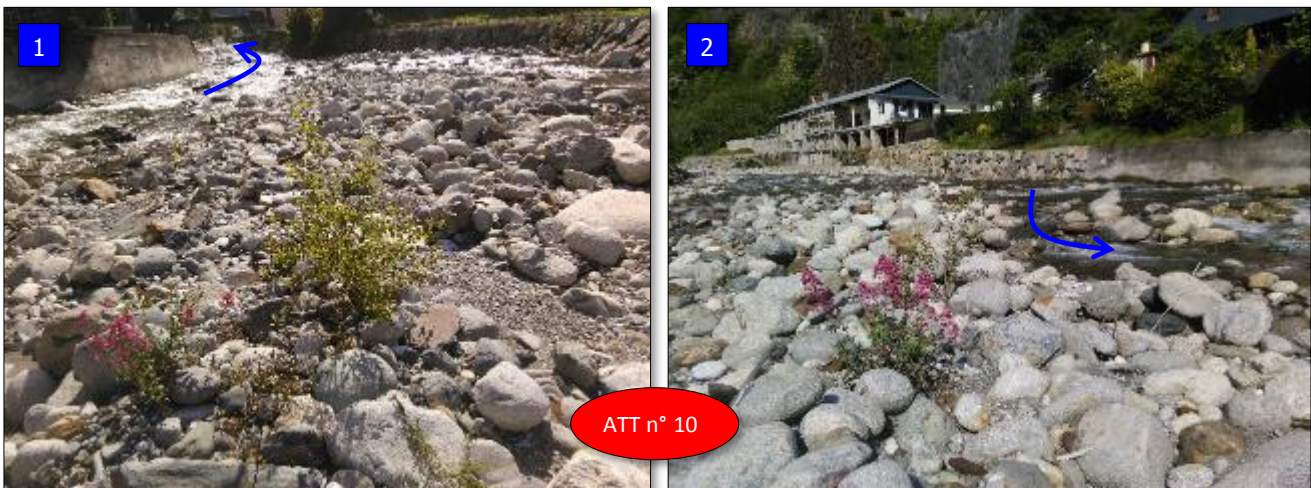


Figure 34 : (1) et (2) → Atterrissement n° 9, on note le début de végétalisation (par un peuplier) et surtout la granulométrie très grossière avec un faible affinage amont aval



Figure 35 : (1) → vue de l'atterrissement n° 7 présentant une passée sableuse recouvrant partiellement le substrat grossier ; (2) → focus sur un cluster grossier entouré de bed patchiness. Echelle de 50 cm.

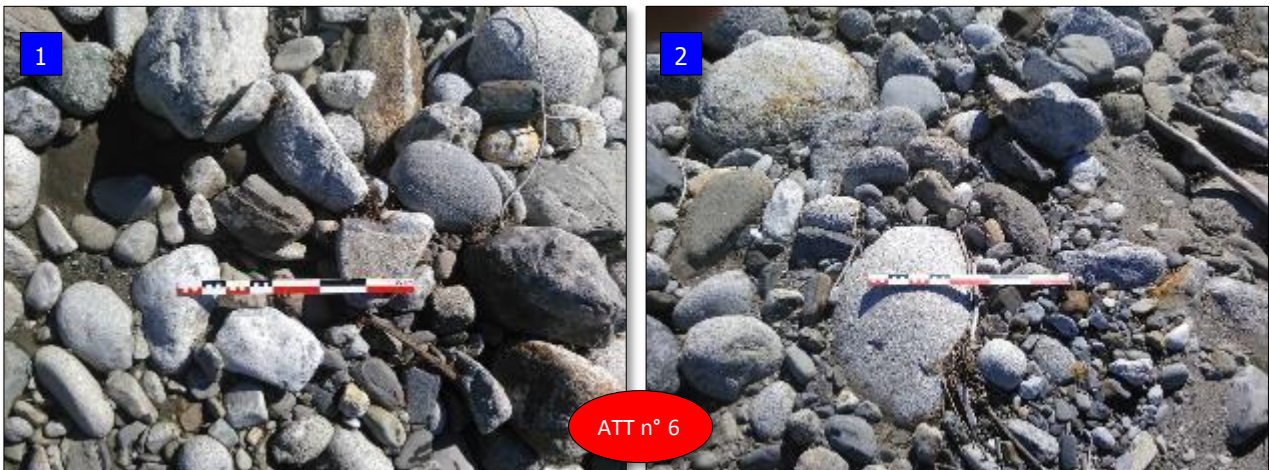


Figure 36: (1) → matériaux grossiers - pluridécamétriques ; (2) → matériaux grossiers bordés par une bed patchiness. On note une granulométrie composée essentiellement de matériaux émoussés ou cassés-émoussés témoignant d'un faible renouvellement de la charge solide



Figure 37 : Granulométrie grossière sur les atterrissements en amont proche du pont Interzone avec lit plurichenalisé. Sur ces photos on ne note pas de tri granulométrique (affinage amont → aval). (1) → Atterrissement n° 4, les matériaux grossiers sont déposés dans une zone de basculement permettant de raccorder le chenal de rive droite avec la mouille générée par le pont Interzone. (2) → Atterrissement n° 4, les matériaux les plus grossiers semblent s'être déposés de part et d'autre de la structure.



Figure 38: (1) et (2) → Matériaux de l'atterrissement n° 4 à granulométrie étendue et grossière dans la partie interne d'un atterrissement, entourée de zones plus grossières et par endroit de quelques passées sableuses (bed patchiness). Echelle de 50 cm.

Avril 2020

PH18-035/NOTE METHODOLOGIQUE/Version 1.0



HYDRETUDES

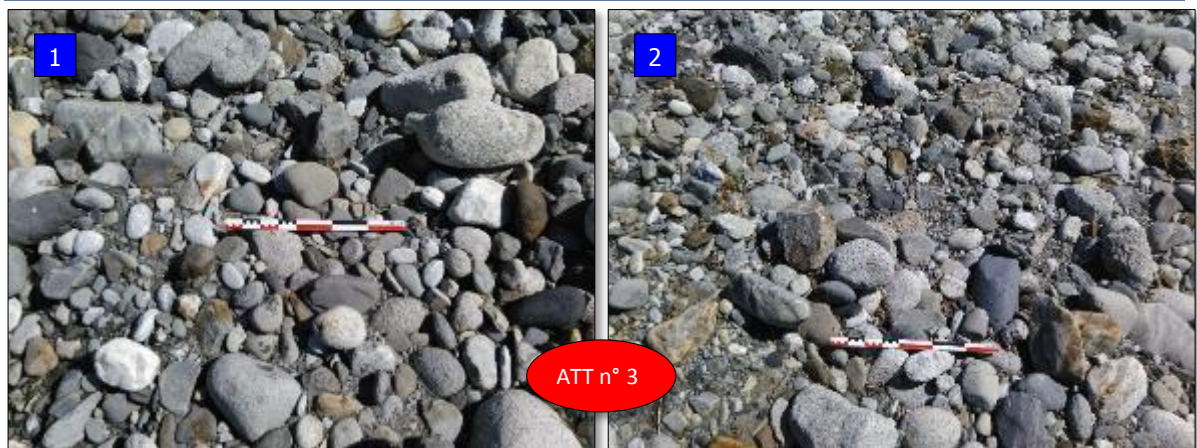


Figure 39 : (1) et (2) → La granulométrie est très hétérogène et est étendue comme l'illustrent ces deux photos prises sur l'atterrissement n° 3. Echelle de 50 cm



Figure 40 : Seuil de raccordement en amont immédiat de la confluence semblant indiquer une érosion régressive provenant de l'abaissement du gave

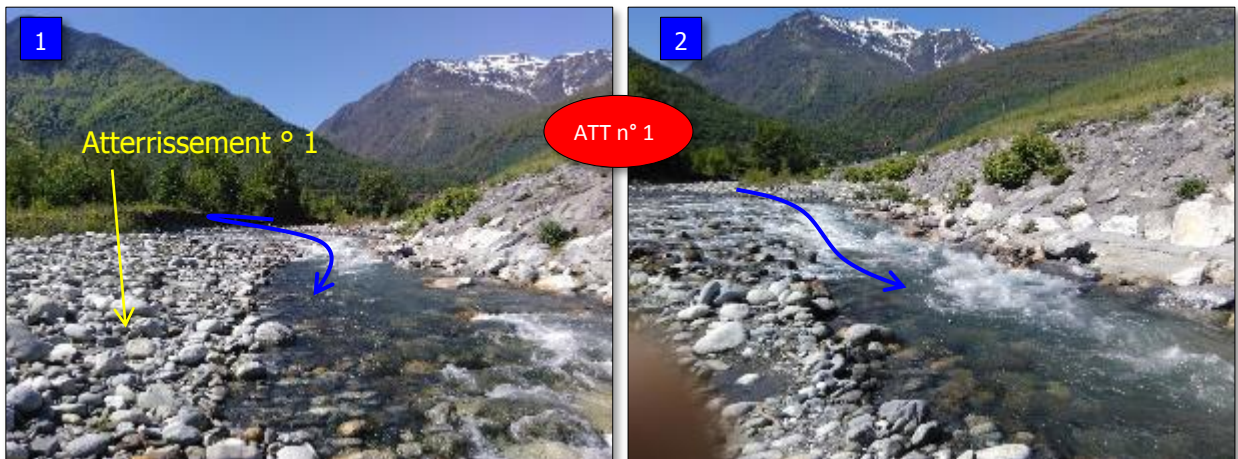


Figure 41 : (1) et (2) seuil de raccordement en vue proche. Au niveau de ce seuil le gave de Cauterets diffinue et se sépare ainsi en deux bras

⇒ Travaux impactant le transit sédimentaire et points singuliers du profil en long

Le secteur d'étude a fait l'objet de travaux (y compris en amont de son apex) afin de « contenir » sa mobilité latérale et de diminuer l'impact des débordements.

Les travaux les plus lourds se sont étagés entre 1965 et 1997, puis en post-crue 2013. Ces aménagements impactent plus ou moins fortement le transport solide en créant des points singuliers favorables à des accrétions, voire des aggradations.

Le corsetage bilatéral et les variations de largeur qu'il introduit dans la section d'écoulement impactent le fonctionnement et l'évolution dynamiques du chenal d'écoulement et du cône.

Le corsetage bilatéral « contrôle » et limite la divagation latérale, conduisant à une forte réduction de l'espace de mobilité du gave (réduction par endroit à 15 m alors que l'espace théorique serait de 20 m pour Q_{10} et 30 m environ pour Q_{100} , Péteuil, 2004).

En tout état de cause la bande active du gave de Cauterets est fortement impactée par le corsetage, ce dernier équivalent à une **rétraction irréversible de cette bande**. Ce corsetage a ainsi favorisé l'incision du lit.

A contrario, dans les zones de décontraction latérale (zone où l'endiguement s'élargit et s'efface sur la berge de rive droite, comme en aval du pont de la RD 921 à Soulom) les accrétions sont favorisées, suite à la perte de compétence au transport solide induite.

On peut ainsi citer les principaux **points singuliers** impactant le transport solide qui sont rencontrés d'amont en aval :

(1) Le **seuil de la SHEM** en amont de la zone d'étude, positionné quasiment au sortir du secteur de gorges qui favorise l'atterrissement des matériaux à son amont proche et immédiat. Actuellement on y trouve un atterrissement de matériaux grossiers (cf. Figure 42) qui a été remanié en post-crue 2013 et dont une partie des matériaux atterris ont été stockés en rive droite derrière un enrochement succinct (cf. Figure 42). Cet atterrissement est directement lié à la présence du seuil qui constitue un niveau de base local. Sa superficie actuelle est de 356 m² pour un volume d'environ 280 m³.



Figure 42 : (1) → Atterrissement central en amont du seuil en tête de zone d'étude ;
(2) → matériaux stockés en rive droite sous la forme d'un masque rocheux

(2) Le **secteur en amont proche du pont de la RD 921**. Ce secteur se caractérise par une variation forte de la section d'écoulement (largeur *versus* axe). En effet, celle-ci passe d'environ 14 m dans la partie amont corsetée à jusqu'à 25 m dans la partie élargie, soit une

brusque augmentation en une centaine de mètres de 78,5 %. De plus ce secteur se caractérise également par plusieurs changements d'axe (cf. Figure 44).

Le premier point d'inflexion correspondant à un changement d'axe et à un début d'ouverture de section se situe au niveau du garage Palette (RG) et de la fin des courts de tennis (RD), cf. Figure 43.



Figure 43 : (1) et (2) →vue du point d'inflexion au niveau du garage Palette ; (3) →vue depuis l'aval de ce point d'inflexion dans le tronçon où la section est déjà élargie. On note la granulométrie extrêmement grossière de l'atterrissement à cet endroit (blocs au sens de la classification de Wentworth, soit des matériaux dont le diamètre est compris entre 256 et 1 024 mm).

Cette partie élargie se trouve également dans un tronçon présentant plusieurs changements d'axe ce qui génère une légère sinuosité. Il est à noter que premier désaxement conduit le gave à venir buter sur la digue de rive gauche (cf. Figure 44).

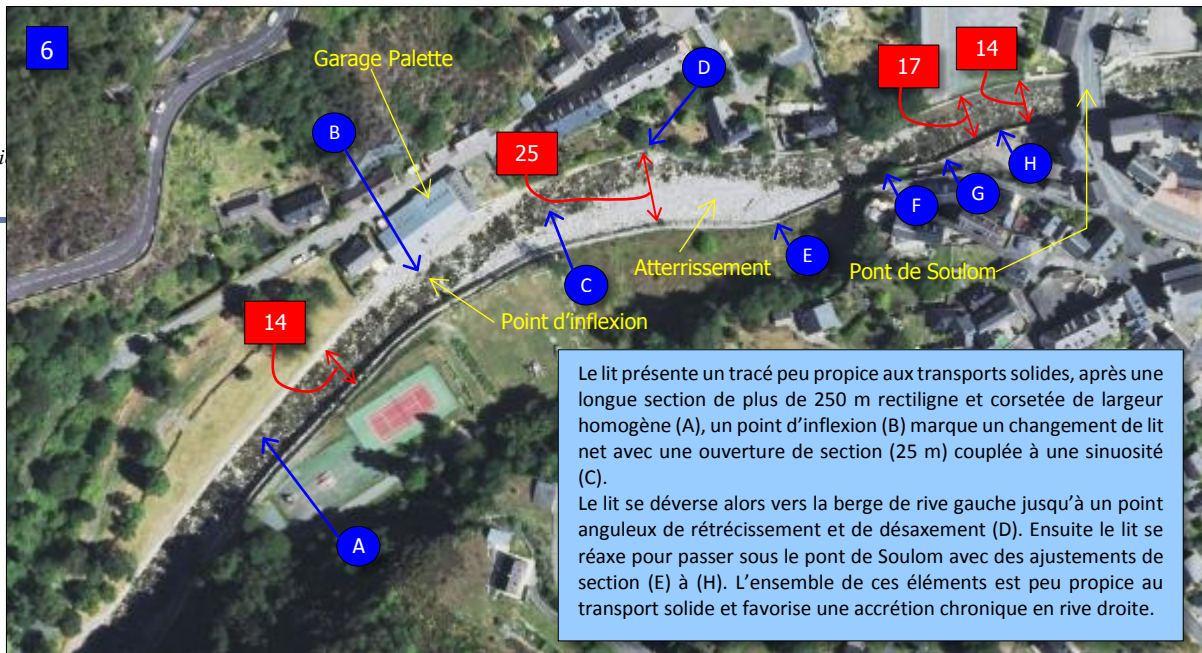
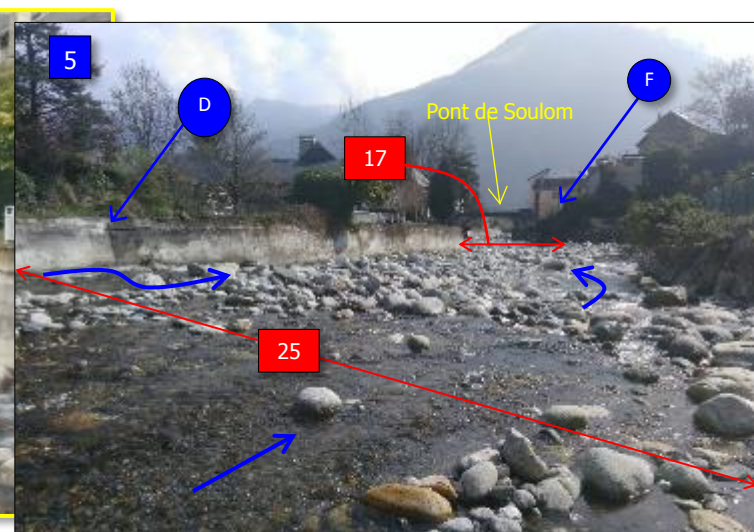
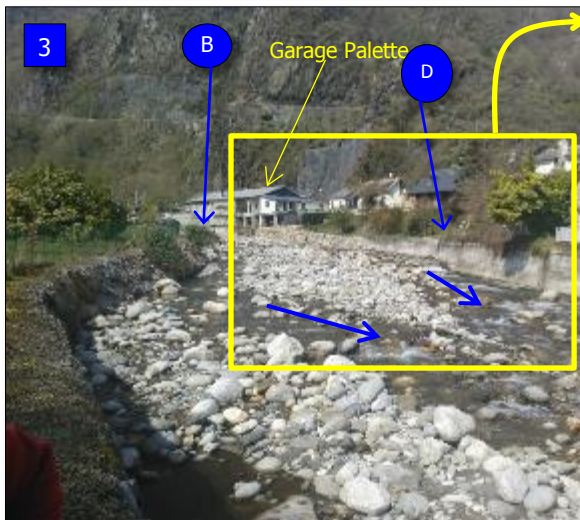
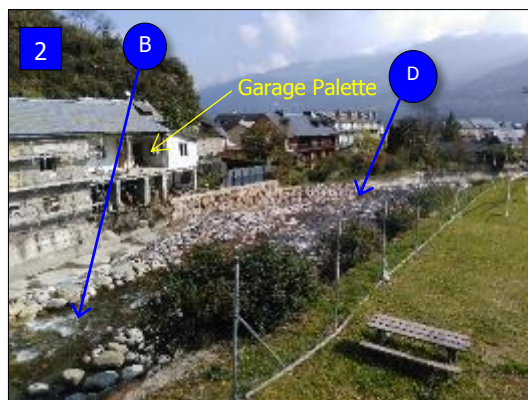
Ainsi le lit s'écrase sur le mur-digue (point D sur les illustrations de la Figure 44) puis se désaxe pour se déporter en berge antagoniste. Cette berge corsetée présente plusieurs petites variations de section et permet de Reader le lit sous le pont de Soulom.

Ce tronçon n'est pas propice à la continuité du transport solide (à cause de l'ouverture, du déport du lit de basses-eaux vers la digue de rive gauche, du rétrécissement aval – cf. Figure 44). Cette situation favorise des réajustements géométriques en générant ainsi des aggrada-tions en rive droite sous la forme d'un atterrissement constitué de matériaux grossiers. Ce tronçon constitue ainsi une petite zone de décompression hydraulique et hydromorphologique notamment en constituant une petite zone de **stockage-régulation** de transport solide, en amont du pont de Soulom.

La structure alluvionnaire constituée de matériaux grossiers fait diffuser les écoulements de basses-eaux en deux chenaux, le principal en rive gauche et un secondaire en rive droite. Le point de difffluence se caractérise par un radier. Les données morphométriques relevés indiquent une superficie actuellement atterrie de 398 m² pour un volume d'environ 320 m³.

Elle sera à surveiller en post-crue en cas d'engravement trop important ou de piégeage d'embâcles, mais pourrait également constituer un point de faiblesse en cas de crue « hypermorphogène » (en quasi-saturation en termes de transport solide).





Le lit présente un tracé peu propice aux transports solides, après une longue section de plus de 250 m rectiligne et corsetée de largeur homogène (A), un point d'inflexion (B) marque un changement de lit net avec une ouverture de section (25 m) couplée à une sinuosité (C).
 Le lit se déverse alors vers la berge de rive gauche jusqu'à un point anguleux de rétrécissement et de désaxement (D). Ensuite le lit se réaxe pour passer sous le pont de Soulom avec des ajustements de section (E) à (H). L'ensemble de ces éléments est peu propice au transport solide et favorise une accretion chronique en rive droite.

Commentaires des différentes photographies

1 → vue de la section amont corsetée (A) et du point d'inflexion (B) ; 2 → vue du pont d'inflexion (B) et du point anguleux du mur-digue contre lequel le lit de basses-eaux vient s'écraser puis se déporter ; 3 → Vue vers l'amont depuis l'atterrissement, on distingue ainsi le point d'inflexion (B) et le point anguleux du mur-digue (D) ; 4 → agrandissement de la zone de déhanchement du mur-digue (D) favorisant le déport par désaxement vers la berge opposée ; 5 → vue vers l'aval, on note le point (D) et le déhanchement berge de RG → berge de RD, puis le rétrécissement (25 m → 17 m) ; 6 → vue générale du site

Figure 44 : Analyse de la zone d'expansion-contraction de la bande active corsetée

(3) Le **secteur de décompression** (BAm et BAM) situé au lieu-dit la Lanne, en aval du lotissement de Soulom (rive droite) et le pont interzone. Après une section légèrement sinueuse d'environ 400 m depuis le pont de Soulom, le secteur s'élargit. Cet élargissement constitue ainsi l'apex fixe du cône de déjection résiduel du gave de Cauterets. Cet apex (et donc cet élargissement de section) correspond également à un désaxement du lit qui bascule vers sa rive gauche contre le mur-digue (Cf. Figure 45).



Figure 45 : (1) → zone de l'apex fixé du cône résiduel (début d'ouverture de la section et début du masque rocheux); (2) → zone de l'apex (A), on note le désaxement du lit et le masque rocheux (B) en rive droite ainsi que le mur-digue en rive gauche. Le lit commence à divaguer voire tresser.

A partir de cet endroit le gave a la possibilité de divaguer sur sa rive droite d'autant plus que celle-ci n'est pas corsetée comme c'est le cas en amont.

Les travaux post-crue 2013 ont utilisé cette conformation en matérialisant une Bande Active mineure (BAm) présentant un masque rocheux en rive droite (en aval proche de l'apex). A partir d'une certaine occurrence de crue, ce masque rocheux s'efface, permettant ainsi l'épanchement des écoulements (solides et liquides) sur la Bande Active Majeure (BAM). Cette technique permet à la fois de guider les écoulements en début de crue dans la BAm, puis de guider leur débordement lorsque la Bam est insuffisante pour contenir la crue et d'activer alors la BAM. Ainsi un système [bande active mineure – bande active majeure] est créé favorisant les transits en crue en utilisant la partie résiduelle du cône non anthropisée.

Dans la BAm se développent des structures alluvionnaires relativement importantes, ce secteur fonctionnant alors comme un petit secteur de stockage-régulation du transport solide (cf. Figure 46). Du fait de la présence de l'artéfact sédimentaire (cf. *supra*) et donc d'une certaine abondance actuelle de la charge grossière, il fonctionne presque comme un tressage en se multi-chenalisant [la caractéristique principale des tressages étant la surabondance de la charge grossière, Léopold & Wolman, 1957 ; Schumm, 1977... Et bien souvent une rupture de pente (diminution) importante (Terrier *et al.*, 2019)].

Attention ☞ *actuellement un début de végétalisation commence sur ces structures (par des espèces pionnières, cf. Figure 47), il est impératif d'éviter la fixation des matériaux par végétalisation.*





Figure 46 : (1) et (2) → Structures alluvionnaires remobilisables (n° 6, 5 et 4, cf. Figure 32), dans la bande active en aval de l'apex, on note le masque rocheux présent



Figure 47 : Atterrissement n° 6 (cf. Figure 32) en cours de végétalisation. Cette végétation s'est développée sur une zone de dépôts fins type bed patchiness, (1) → strate herbacée et arbustive avec essentiellement des peupliers ; (2) → saules frangeant la structure

(4) Le **pont interzone**. Cet ouvrage d'art s'appuie sur un seuil parafouille. Il impacte fortement le transport solide (favorisant également les aggradations en amont et les débordements en rive droite) du fait de son ouverture réduite dans le contexte du cône de déjection.

Il présente toujours un risque de contournement par sa rive droite et constitue un des points noirs du transit sédimentaire du secteur (cf. photo Figure 49). La présence de la pile en lit et de la sous-poutre en sous-face du tablier augmentent encore l'impact de l'ouvrage sur le transport solide. Il est à noter que le pont primitif a été détruit en 1937 puis reconstruit suite à son embâclage (Péteuil, 2004).

Nota-Bene ☞ Mis à part l'aspect économique c'est certainement un des points le plus facile à traiter techniquement et qui aurait un impact important sur le transit sédimentaire dans le secteur, en particulier lors des crues morphogènes chargées grossièrement. Il est à noter que ces éléments sont connus depuis longtemps.



Figure 48 : (1) → Le gave de Cauterets en amont du pont interzone, ayant débordé sur sa rive droite lors de la crue de 2005, photo Hydrétudes ; (2)→ vue du secteur du pont interzone en post-crue 2012, on note les traces de débordements et les accrétions en rive droite en amont du pont, photo CD 65



Figure 49 : (1) et (2) → Impact du pont interzone sur les écoulements lors de la crue de 2012. Le gave a largement débordé sur sa gauche, la ripisylve permet de matérialiser la berge de rive droite (photographie : Gendarmerie nationale)

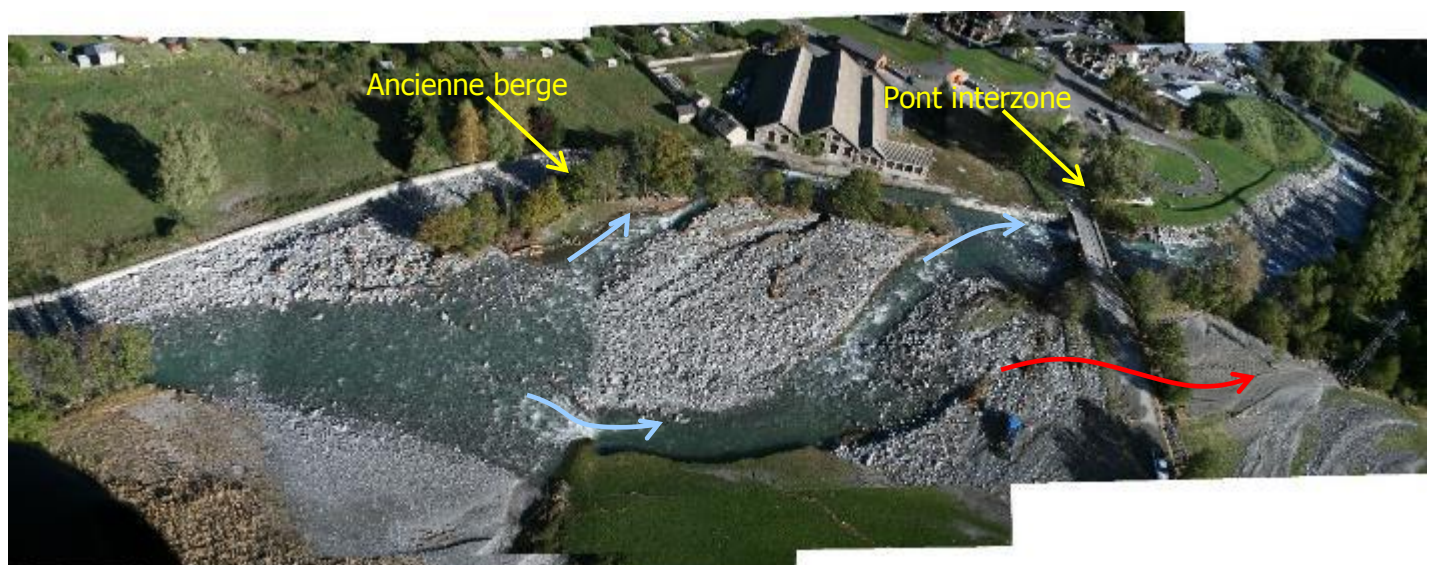


Figure 50 : le pont interzone en post-crue 2012, vu depuis sa rive droite On note les traces de débordement et les accrétions en rive droite ainsi que la répartition des deux chenaux.



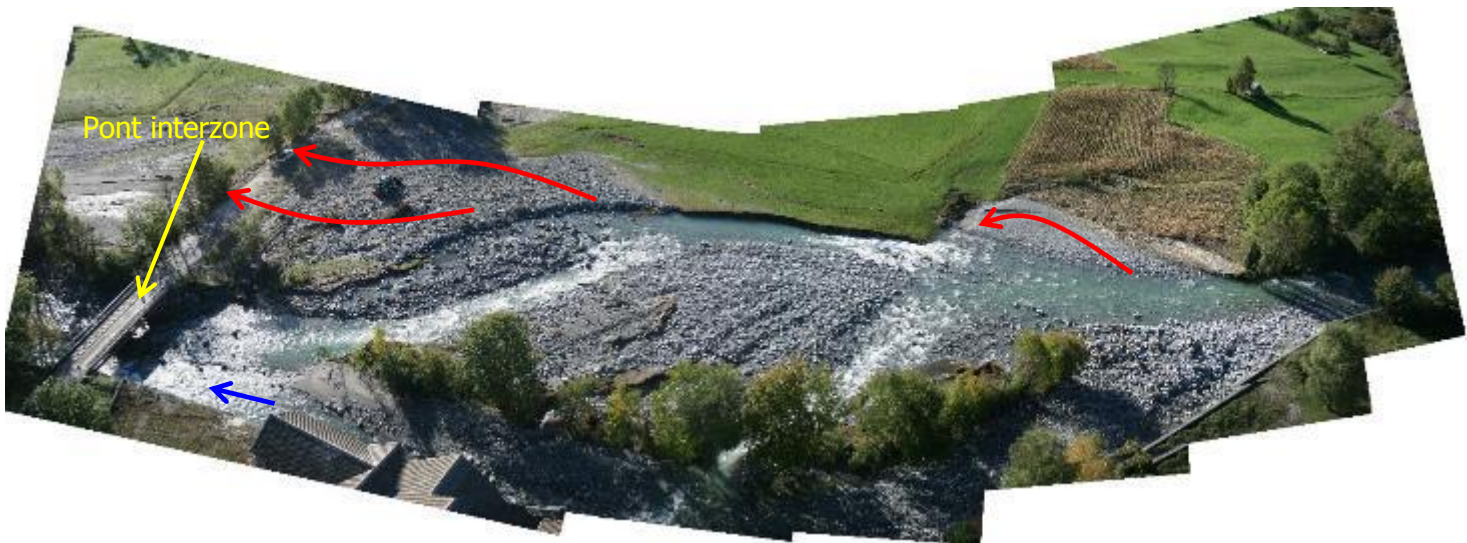


Figure 51 : Pont interzone en post-crue 2012

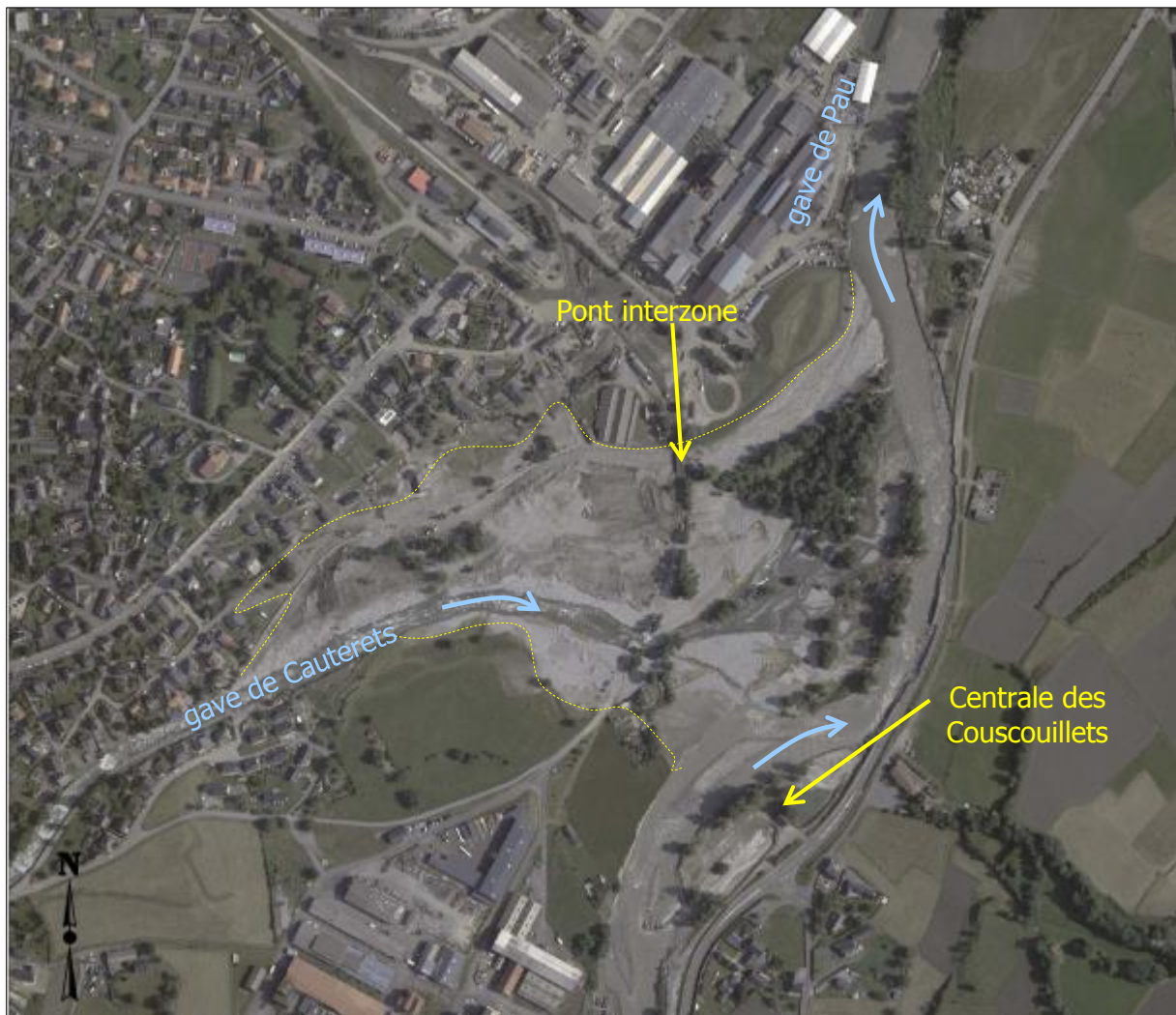


Figure 52 : La partie distale du cône du gave de Cauterets en post-crue 2013



2.3 UNE MORPHOLOGIE A SUIVRE DANS LE CADRE D'UN SYSTEME D'ENDIGUEMENT

Le système d'endiguement contraint les écoulements liquides et impacte le transport solide. Le cône anthropisé est à surveiller particulièrement aux points singuliers évoqués ci-dessus, après chaque crue morphogène.

En effet les zones d'accrétions chroniques (avec donc un risque d'aggradation) sont les points faibles du système (en dehors des ouvrages eux-mêmes) en pouvant stocker des matériaux et modifier ainsi la performance hydraulique et hydromorphologique du système d'endiguement.

Ainsi plusieurs **points nodaux** sont à surveiller lors des **intercrues** et bien évidemment en **post-crue morphogène**. Des interventions dont l'objectif principal sera de maintenir le plus fonctionnel possible le secteur pour y favoriser le passage des flux liquides et solides tout en les guidant, seront donc à effectuer.

2.3.1 Des éléments de connaissance essentiels pour une gestion dynamique

A l'heure actuelle plusieurs éléments ne sont pas suffisamment connus. Ces éléments sont toutefois essentiels à la compréhension des processus d'évolution du lit anthropisée et à la précision d'une stratégie de gestion dynamique basée sur le fonctionnement et l'évolution dynamiques du gave. Il s'agit notamment :

- Des **apports solides** qui sont fortement variables lors des crues morphogènes (suivant la durée de la crue, le rapport débit solide/débit liquide, saturation sédimentaire, la nature de la récession de la crue, la respiration effective du lit...) et de l'environnement spatio-temporel du cours d'eau au moment de la survenue de cette crue (survenue dans le temps de relaxation de la crue précédente, végétalisation du lit liée à une intercrue prolongée...). Ces apports conditionnent la rapidité de saturation de la BAM et donc la rapidité de l'avulsion vers la BAM.
- Du fonctionnement en **récession de crue** (exportation éventuelle de matériaux du cône et dissection d'une partie de celui-ci, *cf. supra*).

Ces différents éléments conditionnent l'évolution locale et globale du profil en long, et donc :

- De l'**inondabilité** qui en résulte (premiers débordements notamment),
- De la **tenue des ouvrages** du système d'endiguement (affouillement en pied *versus* hauteur en lit de la fondation).

Le système à défluviation dirigée entre la BAM et la BAM fonctionnera d'autant mieux que la BAM est libre (faiblement encombrée par des structures alluvionnaires) et que les structures qui y sont présentes ne sont pas fixées, c'est-à-dire reste le plus mobile possible.

Les crues de forte occurrence qui peuvent être morphogènes (par exemple les crues de fonte nivale) constituent des éléments de fragilisation du système lorsqu'elles apportent



des matériaux qui engraisent les structures alluvionnaires ou en créent de nouvelles, ou encore favorisent l'embâclage du lit. Ces éléments peuvent ainsi modifier substantiellement le profil en long, particulièrement aux points singuliers détaillés ci-avant.

Dans notre cas, l'approche calculatoire apparaît inadaptée pour gérer fonctionnement et évolution dynamiques, celle-ci ne conduisant pas à une simulation fonctionnelle d'évolution. En effet, l'approche calculatoire donne des indications sur le transport solide sans pouvoir intégrer tous les paramètres d'une crue (durée effective, pic...). De plus, le fonctionnement très particulier de la zone (apex fixé, avulsion de la BAM vers la BAM modifiant les vitesses, la compétence au transport, spécificité d'un cône de déjection *a fortiori* fortement contraint...) rend cette approche complexe et nous proposons une approche plus simple et certainement plus robuste par un suivi dynamique évolutif.

☞ C'est pourquoi il va donc être important de mettre en œuvre un **suivi dynamique** permettant d'évaluer l'efficacité du système (état d'encombrement et de végétalisation de la Bam, état du masque rocheux...) après chaque crue morphogène et lors de chaque intercrue prolongée.

2.3.2 Suivi topographique dynamique

A La topo-bathymétrie

Il s'agira donc d'avoir une **approche topographique dynamique**, à partir d'un ensemble de profils dits « **point zéro** » (PZ) servant de profils de référence⁵. Cet ensemble devra comprendre *a minima* :

- Un profil en long **reproductible point par point** (prenant en compte les bras en aval de l'apex) dans le cas où le lit serait plurichenalisé,
- Un ensemble de profils en travers précis, avec un pas suffisant augmenté dans tous les points singuliers décrits ci-dessus) et **reproductibles point par point**.

Ces éléments doivent ainsi être suffisamment précis pour pouvoir évaluer en post-crue en comparant le profil PZ et antérieur et le profil post-crue (comparaison point à point, c'est-à-dire que **chaque point des profils devra être relevé strictement au même endroit** (point par point) pour bénéficier de **comparaisons significantes** :

- L'évolution du profil en long,
- L'évolution du fond du lit au niveau des singularités du lit
- L'évolution de la section et des bras.

Ces éléments dynamiques (incision ou stabilité ou exhaussement) seront à mettre en relation directe avec les hauteurs d'eau et lignes d'énergie correspondantes en crue et les

⁵ **La comparaison de profil en long du fond du lit est l'approche à privilégier.** En effet, la comparaison entre des données de fil d'eau (LiDAR, profil en long fil d'eau) est trop incertaine puisqu'il est quasiment impossible de lever ces données au même débit (exemples d'incertitudes : variabilité des débits d'un jour de levé à un autre, conditions météorologiques empêchant le levé du LiDAR le bon jour, etc.). L'utilisation de données de fond de lit permet de s'affranchir de ces incertitudes.



ouvrages pour développer des stratégies de gestion cohérentes et basées sur la réalité de l'évolution des fonds :

Stratégies de gestion à développer (suivi topographique)			
Etat post-crue mesuré	Référence	Condition SNQ (<i>Sine-Qua-Non</i>)	Actions
Exhaussement	Cote maximale atteinte ou dépassée	Revanche suffisante	Dégravement avec transfert-réinjection des matériaux en zone incisée
Incision	Cote minimale atteinte ou dépassée	Connaissance exhaustive de la fondation d'ouvrage	Injection ou réinjection de matériaux voire pavage du lit

Tableau 12 : Stratégie de gestion à développer

Cette approche permettra également de suivre précisément l'**incision du lit**. En effet, ce risque lié à la péjoration sédimentaire et à la morphogénie des crues peut difficilement être anticipé (notamment par modélisation) surtout dans ce contexte très particulier.

Pour compléter le suivi dynamique, son gestionnaire, pour être exhaustif, pourra mettre en œuvre une **bathymétrie de pied** de tous les ouvrages susceptibles d'être incisés et un suivi en fonction de la connaissance de leur fondation.

B [La topographie par LIDAR](#)

Ce suivi doit être **complété par un LIDAR** (concernant l'aval de l'apex jusqu'à la confluence) qui permettra notamment dans la BAm d'avoir une approche volumétrique et topographique plus fine et en cas de crue BFHM extrême (*cf. supra*), d'avoir des données sur la BAm (bras générés, matériaux déposés...). Il permettra également de réaliser un bilan volumétrique entre les levés ante-crue et post-crue.

☞ C'est l'analyse conjointe de la topographie PZ et profils en travers + LIDAR qui permettra de suivre et d'affiner la gestion du site, et éventuellement de planifier en post-crues les nécessaires travaux à mettre en œuvre pour maintenir l'efficacité du système d'endiguement.

Une **base de données REX** pourra être construite intégrant ainsi le niveau de crue et les **caractéristiques de la crue** (durée, pic...), les **évolutions topographiques** (PZ, profils en travers, volumes de matériaux via le LIDAR) et l'**évolution des points singuliers** et de tout autre élément important en termes de gestion du système d'endiguement pour éviter les débordements (accrétions nouvelles, aggradations, embâclage du lit, incision, exhaussement, érosions, bras...).

C [Les intercrues](#)

Souvent négligées les **intercrues** sont pourtant des périodes propices à la **végétalisation des structures alluvionnaires** et donc à leur **fixation**. Elles impactent ainsi le fonctionnement dynamique des cours d'eau.

Actuellement le stock alluvial du gave de Cauterets dans la zone d'étude comporte 10 atterrissements (*cf.* Figure 32 et Tableau 11) à granulométrie grossière qui ne sont pas



végétalisés. Leur végétalisation devrait ainsi être relativement lente compte-tenu du régime du cours d'eau, mais surtout de la granulométrie.

Toutefois, plusieurs structures présentent des zones sablonneuses (*bed patchiness*) propices à la végétalisation par des espèces pionnières (peupliers, saules...). C'est d'ailleurs ce qui commence à se passer notamment sur la structure n° 6.

Il est essentiel de ne pas laisser se végétaliser ces structures car leur végétalisation rendrait plus difficile la mobilisation des matériaux stockés, d'autant plus que ce sont ces zones à granulométrie plus fine qui devraient être remobilisées le plus rapidement. La végétalisation favoriserait également le piégeage des embâcles... et donc les accrétions. La fixation des structures alluvionnaires conduirait ainsi à diminuer la débitance hydraulique et sédimentaire de la BAM et à favoriser ainsi l'avulsion en amont (au niveau du masque rocheux).

Lors des intercrues longues une végétation pionnière (salicacées : saules et peupliers) peut s'installer contre laquelle il est donc essentiel de lutter. L'ensemble des 10 atterrissements présents est donc à surveiller lors des intercrues.

D [Les post-crues](#)

Ce chapitre concerne les **crues morphogènes** « non-extrêmes » comme celle de 2013 (une crue BFHM de ce type nécessitant des interventions lourdes et d'urgence). Ces crues morphogènes sont celles s'écoulant dans la BAM, sans avulsion, les crues dites extrêmes sont celles créant une avulsion vers la BAM.

Ces crues pourraient passer pour négligeables mais par leur effet cumulatif ou lors d'une crue plus morphogène, elles pourraient générer un impact finalement important, du fait de la morphologie du lit et du fonctionnement du secteur.

L'objectif d'une surveillance dans ce cadre serait de « **préparer le lit à la crue suivante** », en suivant les points singuliers et leur niveau « d'encombrement solide ». En effet, le niveau d'encombrement en fonction de son positionnement peut favoriser les débordements en réduisant la section et/ou localement une aggradation péjorant alors le passage des écoulements lors des crues et/ou le déport des flux et/ou en augmentant la ligne d'énergie...

En post-cru morphogène les éléments à surveiller particulièrement sont :

- Les **atterrissements actuels** et d'éventuelles **nouvelles accrétions** sur ceux-ci ou de **nouvelles structures**. Suivant le niveau de morphogénie de la crue et donc son impact en termes de transport solide il serait intéressant de **réévaluer le stock alluvial** pour avoir un bilan (en effet on est sur un cône fortement anthropisé et nous n'avons pas d'antériorité). Pour les structures alluvionnaires se développant en aval de l'apex (atterrissements n°9 à 1), cette analyse devra intégrer leur impact sur la BAM, (avulsion, défluviation...). Les atterrissements les plus impactant étant



-
- les atterrissements proches de l'apex, entre celui-ci et le pont Interzone (point noir pour le transport solide), favorisant accrétions et avulsion (atterrissements n°9 à 4),
- Les **ouvrages d'art** et en particulier le pont Interzone qui dans sa conformation actuelle affecte le transport solide et contrôle plus ou moins l'aggradation à son amont, favorise les débordements vers sa rive droite et reste potentiellement contournable.
 - La **confluence** qui reste encombrée de matériaux : atterrissements n°3 à 1 de la BAM,
 - Et bien évidemment les ouvrages du système d'endiguement.

Pour les crues BFHM plus extrêmes avec défluviation, comme 2012 ou 2013 le déplacement du chenal principal et l'expansion des écoulements dans la bande active nécessitent des travaux spécifiques. En particulier (suivant l'état post-crue) :

- La BAM devra certainement être travaillée : façonnage du lit par dégravement, canalisation, retrait d'embâcles...,
- Le masque rocheux reconstitué, voire amélioré (REX),
- La BAM sera également travaillée : façonnage du lit par remblaiement des chenaux, retrait d'embâcles...



3 BIBLIOGRAPHIE

ADAMS, J., 1979. Gravel size analysis from photographs. *Journal of the Hydraulics Division*, 105(10).

ANDRIEU, V., 1987. Le paléo-environnement du piémont nord pyrénéen occidental de 27 000 BP au Postglaciaire : la séquence de l'Estarrès (Pyrénées atlantiques, France) dans le bassin glaciaire d'Arudy. *Compte Rendus de l'Académie des Sciences, Paris*, 304, série 2, 103-108.

ANDRIEU, V., HUBSCHMAN, J., JALUT, G., HERAIL, G., 1988. Chronologie de la déglaciation des Pyrénées françaises. Dynamique de sédimentation et contenu pollinique des paléolacs : application à l'interprétation du retrait glaciaire. *Bulletin de l'Association Française pour l'Etude du Quaternaire* 213. Pp. 55-67.

ANTOINE, J-M, DESAILLY, B. 2001. Habitat, terroirs et cônes de déjection torrentiels dans les Pyrénées commingeoises, in : Villages pyrénéens – morphogénèse d'un habitat de montagne, Berthe M. & Cursente, B., éd., CNRS, Université de Toulouse-le-Mirail, pp. 27-44.

BALLANTYNE, C.K., 2002. Paraglacial geomorphology. *Quaternary Science Review*, 21, pp. 1935-2017.

BRAY, D.I., CHURCH, M., 1980. Armored versus paved gravel beds. *Jour. Hydraul. Div.*, 106, pp. 1937-1940.

BRIERLEY, G.J, HICKIN, E.J., 1985. The downstream gradation of particles sizes in the Squamish River, British Columbia. *Earth, Surface, Process and Landforms*, 10, pp. 597-606.

CHURCH, M., RYDER, J.M., 1972. Paraglacial sedimentation: consideration of fluvial processes conditioned by glaciation. *Geological Society of America Bulletin*, 83, pp. 3059-3072.

COUVERT, B., LEFORT, P., PEIRY, J.L., BELLEUDY, P., 1999. La gestion des rivières. Transport solide et atterrissements. Etude des agences de l'eau n° 65, 94 p.

HJULSTROM, F., 1935. Studies of the Morphological Activity of Rivers as Illustrated by the River Fyris. *Geografiska Annaler*, Vol. 18, pp. 121-123.

KELLERHALS, R., BRAY, D., 1971. Sampling procedures for coarse fluvial sediments. *Journal of the Hydraulics Division*, 97(8).

LAMARRE, H. & ROY, A-G., 2002. Organisation morphologique des blocs et amas de galets dans les cours d'eau à lit à graviers. *Géographie Physique et Quaternaire*. 56(3), pp. 275-287.

LÉOPOLD, L.B., WOLMAN, M.G., 1957. River channel patterns : braided, meandering and straight. Physiographic and hydraulic studies of rivers. *Geological Survey, Professional Paper*, 282-B. 85 p.

MARCHI, L. & BROCHOT, S., 2000. Les cônes de déjection torrentiels dans les Alpes françaises : morphométrie et processus de transport solide torrentiel. *Revue Géographique Alpine*, 88 (3), pp. 22-38.



-
- MARDONES, M., JALUT, G., 1983. La tourbière de Biscaye (alt. 490 m, Hautes-Pyrénées) : approche paléoécologique des 45 000 dernières années. *Pollen et spores*, 25,2, pp. 163-212.
- MARTINI, I., 1977. Channel morphology, gradient profiles and bed stresses during flood in a step-pool channel. *Geomorphology*, 40, pp. 311-327
- MERCIER, D., 2010. La géomorphologie paraglaciale. Changements climatiques, fonte des glaciers et crises érosives associées. Editions Universitaires Européennes. 256 p.
- PETEUIL, Ch. 2004. Communes de Soulom et de Pierrefitte-Nestalas. Etude de l'aléa torrentiel lié à la confluence du gave de Cauterets et du gave de Gavarnie, RTM, 68 p.
- RECKING, A., 2013. Simple method for calculating reach-averaged bed-load transport. *Journal of hydraulic engineering*, pp. 70-75.
- RYDER, J.M., 1971. The stratigraphy and morphology of para-glacial alluvial fans in the South-central British Columbia. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 8, pp. 423-433.
- SALOMON, J-N., 2007. Cônes d'éboulis, de déjection, glacis et piémonts : essai de définitions. *Etudes de Géographie Physique*, XXXIV, 2007, pp. 53-67.
- SCHUMM, S.A., 1977. The fluvial system. John Wiley & Sons, Chichester, 338 p.
- SEAR, D., NEWSON, M., 1993. Sediment and gravel transportation in rivers, including the use of gravel traps. Final report n° C5/384/2 - National River Authority.
- SIMON, L., 1986. Transports solides de sédiments de granulométrie non uniforme. Mémoire de DEA - Laboratoire National d'Hydraulique - EDF - Chatou.
- WENTWORTH, C., 1922. A scale of grade and class terms for clastic sediments. *Journal of Geology*, 30, pp. 311-327.
- WOLMAN, M.G., 1954 Method of sampling coarse river bed material. *Transactions of the American Geophysical Union*, 35(6), pp. 951-956.
- ZIMMERMAN, A., CHURCH, M., 2001. Channel morphology, gradient profiles and bed stresses during flood in step-pool channel. *Geomorphology*, 40, pp. 311-327.





**Siège social – Centre technique principal**

815, route de Champ Farçon
 74 370 ARGONAY
 Tél : 04.50.27.17.26
 Fax : 04.50.27.25.64
 contact@hydretudes.com

<u>Agence Alpes du Nord</u>	<u>Agence Alpes du Sud</u>	<u>Agence Dauphiné-Provence</u>	<u>Agence Grand Sud-Pyrénées</u>	<u>Agence Océan Indien</u>	<u>Pôle hydromorphologie</u>
PA Alpespaces – Bât Alpamayo	Bât 2 – Résidence du Forest d'entraîs	4 bis avenue des Allobroges	58, bis chemin du chapitre	45 rue Luc Lorion	45 rue des Fontaines
429, avenue Léonard de Vinci	25, rue du Forest d'entraîs	26 100 ROMANS SUR ISERE	31 100 TOULOUSE	97 410 SAINT PIERRE	64320 LEE
73800 St HELENE DU LAC	05 000 GAP				
Tél : 04.79.96.14.57	Tél : 04.92.21.97.26	Tél : 04.75.45.30.57.	Tél : 05.62.14.07.43	Tél : 02.62.96.82.45	Tél : 05.64.27.02.76
Fax : 04.70.33.01.63	Fax : 04.92.21.87.83	Fax : 04.75.45.30.57	Fax : 05.62.14.08.95	Fax : 02.62.32.69.05	
contact-savoie@hydretudes.com	contact-gap@hydretudes.com	contact-romans@hydretudes.com	contact-toulouse@hydretudes.com	contact-reunion@hydretudes.com	contact@hydretudes.com

