



RAPPORT



ETUDE D'OPPORTUNITE SUR LA REUTILISATION DES MATERIAUX ISSUS DU BARRAGE DE VINÇA DANS LE CONTEXTE DE L'INCISION DE LA TET AVAL

5 septembre 2023



Informations relatives au document

INFORMATIONS GÉNÉRALES

Auteur(s) CB, RY, RDO
Version V01
Référence

HISTORIQUE DES MODIFICATIONS

Version	Date	Vérfié par	Fonction	
V01	24/04/2023	Rabab YASSINE	Ingénieure chargée d'études	Spécialiste en hydromorphologie
V01	25/04/2023	Romain DE OLIVEIRA	Chef de projet	
V02	19/05/2023	Rabab YASSINE	Ingénieure chargée d'études	Spécialiste en hydromorphologie
V03	22/06/2023	Rabab YASSINE	Ingénieure chargée d'études	Spécialiste en hydromorphologie
V04	05/09/2023	Rabab YASSINE	Ingénieure chargée d'études	Spécialiste en hydromorphologie

DESTINATAIRES

Nom	Entité
Ava Hervieu	Syndicat Mixte de la Têt Bassin Versant

Cette étude a fait l'objet d'un soutien financier de l'Agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse (50%) et du Conseil départemental des Pyrénées Orientales (30%)



SOMMAIRE

1	CONTEXTE GENERAL DE L'ETUDE	7
1.1	Rappel du contexte général et des objectifs de l'étude	7
1.2	Présentation du territoire	7
2	ACTUALISATION DE L'ETAT DES LIEUX ET DU DIAGNOSTIC	9
2.1	Fonctionnement du barrage de Vinça	9
2.2	Historique des réinjections réalisées	10
2.3	Analyse diachronique	13
2.3.1	Analyse du profil en long	13
2.3.2	Analyse planimétrique	16
3	ANALYSE DU POTENTIEL DE REMOBILISATION DES MATERIAUX	18
3.1	Méthodologie	18
3.1.1	Granulométrie	19
3.1.2	Présentation de l'outil de calcul	22
3.1.3	Analyse bibliographique pour le choix d'une formule de transport adaptée à la Têt	23
3.1.4	Débit liquide d'entrée	26
3.2	Analyse des capacités de transport – état actuel	26
3.2.1	Transport solide annuel	27
3.2.1.1	Exemple de résultats sur la section 1	27
3.2.1.2	Compilation des résultats sur l'ensemble des sections	28
3.2.1.3	Bilan	30
3.2.2	Transport solide évènementiel	30
3.2.2.1	Exemple de résultats sur la section 1	30
3.2.2.2	Compilation des résultats sur l'ensemble des sections	31
3.2.2.3	Bilan	33
3.3	Analyse des capacités de transport – état futur	33
3.3.1	Analyse des sédiments disponibles à Vinça	33
3.3.2	Analyse du transport solide annuel et évènementiel – état futur	34
3.3.3	Granulométrie transportée	35
3.4	Conclusion	40
4	PROPOSITION DE SECTEURS DE REINJECTION	43
4.1	Retours d'expériences	43
4.1.1	Le cas du Buèch	43
4.1.2	Le cas du Drac	44
4.1.3	Le cas du Rhin	46
4.1.4	Conclusion	47
4.2	Analyse des sites de réinjections antérieurs et proposition de nouveaux sites	47
4.3	Approximation des volumes disponibles au niveau des bancs déconnectés (perchés)	51

4.4 Estimation des bilans carbone des opérations envisagées.....	56
4.5 Estimation des coûts des opérations	57
4.6 Proposition de scénarios et de protocoles de réinjection	59
5 PROPOSITION DE PROTOCOLES DE SUIVI	60
6 CONCLUSION	63
REFERENCES	64

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Bassin versant de la Têt.....	8
Figure 2 : Deux seuils d'arrêt des matériaux en amont du barrage de Vinça.....	9
Figure 3 : Matériaux extraits au niveau du seuil de Soulane.....	9
Figure 4 : Réinjections de mai 2022 sur le site 1 lors de la visite d'EGIS en 2023	10
Figure 5 : Réinjections antérieures.....	11
Figure 6 : Evolution du profil de long de la Têt 1937-2005 (sources : Morpheau 2022 – Burgeap 2014 – BRL 2012).....	13
Figure 7 : Evolution de profil en long de la Tet entre 2011 et 2021 (Sources : PPRI – 3DSI – Morph'eau conseils)	15
Figure 8 : Evolution de la bande active entre 2018 et 2021 (Sources : IGN – 3DSI)	17
Figure 9 : Sections homogènes sur la Têt.....	18
Figure 10 : Axe b mesuré dans le cadre des échantillonnages granulométriques effectués	19
Figure 11 : Localisation des relevés granulométriques sur la Tet (Egis 2023)	20
Figure 12 : Granulométrie des sédiments relevés sur la Tet.....	21
Figure 13 : Plateforme Bedloadweb et différentes fonctionnalités pour le calcul du transport sédimentaire à l'échelle de la section en travers (Recking, 2019)	22
Figure 14 : Schématisation des étapes du calcul du transport solide (Recking, 2020).....	23
Figure 15 : Formules les plus performantes sur deux rivières d'amérique du nord ayant des caractéristiques similaires à la Têt	25
Figure 16 : Volumes solides annuels transportés sur plusieurs périodes sur la Têt à Vinça.....	28
Figure 17 : Capacité de transport solide moyen annuel sur la période 2005-2023 sur la Têt.....	29
Figure 18 : Capacité de transport solide moyen annuel sur la période 2005-2010 (calme hydrologique) sur la Têt.....	29
Figure 19 : Volumes solides annuels transportés sur plusieurs périodes sur la Têt à Vinça.....	31
Figure 20 : Capacité de transport solide moyen annuel de la Têt sur Gloria (2020-Q20)	32
Figure 21 : Capacité de transport solide moyen annuel de la Têt sur une crue de 2002 (Q5-10)	32
Figure 22 : Fractions de matériaux disponibles sur la plateforme de Vinça	34
Figure 23 : Evolution des Volumes solides annuels transportés en etat futur	35
Figure 24 : Présentation des formules de calcul de granulométrie transportée	36
Figure 25 : Granulométrie transportée pour plusieurs débits sur la section 1.....	37
Figure 26 : Granulométrie transportée pour plusieurs débits sur la section 2.....	37
Figure 27 : Capacités de transport par section : analyse des granulométries transportées. l'acronyme CTS désigne « Capacité de transport solide ».....	38
Figure 28 : Courbe granulométrique grossière théorique	39
Figure 29 : Localisation des secteurs d'incision et de dépôt.....	41
Figure 30 : Analyse des secteurs pertinents pour les réinjections	42
Figure 31 : Retour d'expérience sur les réinjections du Buech.....	44
Figure 32 : Retour d'expérience sur les réinjections du DRAC	45
Figure 33 : Localisation des sites de réinjections antérieurs	48
Figure 34 : Présentation des sites de réinjections antérieurs.....	49
Figure 35 : Réinjections de mai 2022 sur le site 1 lors de la visite d'EGIS en 2023	50
Figure 36 : Exemple de site de réinjection possible entre les sites 3 et 4.....	51
Figure 37 : Exemple de banc s'étant fixé et végétalisé au cours du temps.....	52
Figure 38 : Méthodologie de détermination des volumes de bancs perchés.....	53
Figure 39 : Localisation des bancs perchés.....	54
Figure 40 : Approche volumétrique des bancs perchés par section.....	55
Figure 41 : Schéma d'instrumentation prévisionnel du lac des Gaves (Source : PLVG).....	61

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Sections homogènes de la Têt.....	19
Tableau 2 : Classification granulométrique utilisée	19
Tableau 3 : Diamètres caractéristiques des sections de calcul.....	21
Tableau 4 : caractéristiques des sections de calcul.....	21
Tableau 5 : Comparaison des caractéristiques physiques de la Têt à Nefiach avec d'autres cours d'eau à l'échelle mondiale.....	24
Tableau 6 : Périodes hydrologiques retenues pour l'analyse du transport sédimentaire	26
Tableau 7 : Débits retenus pour l'analyse de la granulométrie transportée.....	36
Tableau 8 : Analyse des granulométries transportées	38
Tableau 9 : Analyse des granulométries transportées pour le débit maximal réservé en sortie de barrage.....	39
Tableau 10 : Diamètres caractéristiques théoriques grossiers	39
Tableau 11 : Rappel des volumes réinjectés précédemment.....	49
Tableau 12 : Approche volumétrique des bancs perchés par section.....	55
Tableau 13 : Approche financière : retour d'expériences	57
Tableau 14 : Approche financière par type d'actions.....	58
Tableau 15 : Bilan des scénarios de réinjection.....	59

1 CONTEXTE GENERAL DE L'ETUDE

1.1 Rappel du contexte général et des objectifs de l'étude

Depuis une cinquantaine d'années, le lit de la Têt aval (en aval du barrage de Vinça) s'enfonce et se chenalise sur différents secteurs. Les causes de cette incision sont multiples : extractions en lit mineur, blocage du transit sédimentaire par le barrage de Vinça, modification du régime hydrologique, construction de la RN116 en rive droite dans le lit majeur, ... et ont des conséquences socioéconomiques et environnementales préoccupantes.

La Têt semble également avoir connu des modifications planimétriques majeures sur son linéaire depuis la création du barrage. Les modifications les plus importantes sont observées au droit de la commune de Millas. Les méandres historiques (XIX^{ème} siècle) ont laissé place à un tracé rectiligne contraint par la présence du remblai de la RN116.

Plusieurs actions conjointes majeures peuvent être considérées pour résorber ce déficit sédimentaire et revenir à une situation d'équilibre : réactivation des apports par les affluents de la Têt aval, élargissement du lit et recharge par déblais/remblais depuis les berges à proximités, remobilisation des atterrissements actuellement fixés par la végétation, ... Pour réduire l'impact du barrage de Vinça sur le transport solide de la Têt, le Conseil Départemental des Pyrénées Orientales, propriétaire de l'ouvrage, a mené une étude sur les possibilités et modalités de transfert des matériaux depuis l'amont du barrage vers l'aval (ISL, 2011). Au vu de l'importance des crues de 2020 (tempêtes Gloria et Vera), la réinjection dans la Têt aval des sédiments accumulés dans le barrage de Vinça mérite d'être actualisée d'un point de vue technique et économique.

L'objet de cette étude est donc d'analyser la réinjection, sur la Têt aval, de sédiments provenant de la plateforme de Vinça. Ces matériaux étant issus du seuil de la Soulane, premier des deux pièges en amont du barrage de Vinça, afin de trouver des solutions pour contrer l'incision.

L'objectif de la présente étude est donc d'effectuer une analyse critique des résultats des études antérieures et notamment celle d'ISL (2011) et de vérifier la pertinence d'une opération de réinjection de l'ensemble des matériaux extraits, en aval immédiat du barrage pour éviter des coûts de transport et un bilan carbone trop importants.

1.2 Présentation du territoire

La Têt est un cours d'eau côtier méditerranéen situé dans le département des Pyrénées Orientales (66). Elle prend sa source au pied du massif du Carlit (2 921 mNGF) et rejoint la mer en aval de Perpignan après environ 115 km. Son bassin Versant couvre environ 1 471 km². La partie amont de la Têt, montagneuse, présente un comportement torrentiel, alors que la partie aval adoptait un style de rivière en tresses. Ces tresses historiques sont aujourd'hui fortement altérées et ont laissé place à un style plutôt rectiligne à bancs alternés. Le barrage de Vinça marque la délimitation entre ces deux comportements (Figure 1). Le barrage a été mis en service en 1978 avec la double fonction d'écrêter les crues et de soutenir l'étiage.

Le barrage a cependant plusieurs incidences sur le cours d'eau. Il bloque, d'une part, la quasi-totalité de la charge solide provenant de l'amont et, d'autre part, il modifie considérablement le régime hydrologique à partir de la crue biennale¹ (175 m³/s) et donc le comportement hydro-sédimentaire du cours d'eau en aval.

La mission porte donc sur un linéaire d'environ 35 km, entre l'entrée dans le barrage de Vinça et l'autoroute A9 à Perpignan.

¹ Le barrage est transparent d'un point de vue hydraulique uniquement jusqu'à un débit de 175 m³/s ce qui correspond à la crue biennale de la Têt à Rodes

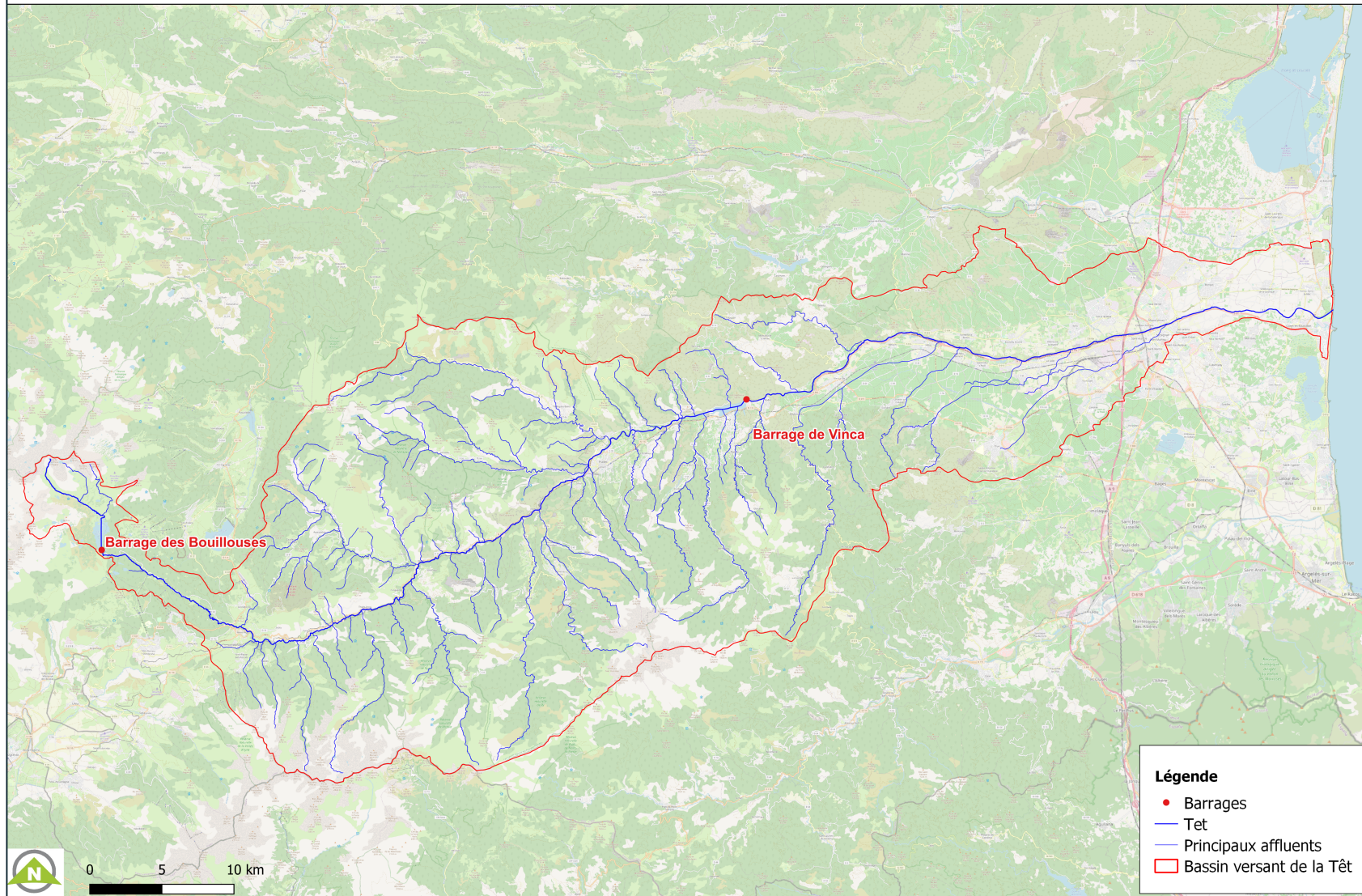


FIGURE 1 : BASSIN VERSANT DE LA TET

2 ACTUALISATION DE L'ETAT DES LIEUX ET DU DIAGNOSTIC

2.1 Fonctionnement du barrage de Vinça

Le barrage de Vinça a été mis en service en 1978 avec la double fonction d'écrêter les crues et de soutenir l'étiage. Il a cependant plusieurs incidences sur le cours d'eau :

- Il stoppe d'une part la quasi-totalité des matériaux provenant de l'amont générant ainsi un déficit sédimentaire en aval. Ce déficit serait d'environ 6 000 m³/an (ISL, 2011) ce qui correspond approximativement à la capacité de transport moyenne annuelle de la Têt en amont du barrage de Vinça ;
- Il modifie le régime hydrologique en aval qui a une incidence directe sur la puissance hydraulique et par conséquent les capacités de transport du cours d'eau.

En effet, le barrage laisse passer les crues jusqu'à un débit entrant de 175m³/s (légèrement supérieur à un débit Q2 à la station de Rodès) et à partir de cette valeur, il commence son rôle d'écrêtement et de stockage. Le barrage est très efficace pour lisser les pics de crues de fortes intensités et de faible durée mais il devient moins efficace sur des épisodes pluvieux plus étendus. Lorsque la cuvette est pleine, il ne peut plus écrêter et le débit entrant est intégralement restitué en sortie. Ce cas de figure correspond notamment à ce qui s'est produit lors de la tempête Gloria en janvier 2020.

Pour assurer le bon fonctionnement du barrage et éviter son engravement, deux seuils d'arrêt des matériaux sont présents en queue de retenue (Figure 2), dont un (seuil du Mas del Rat) a été emporté par la crue de janvier 2020 (Gloria) puis reconstruit fin 2022. Les matériaux en provenance de l'amont se déposent principalement en amont de ces seuils. Seuls les matériaux en amont du seuil de la Soulane ont été considérés et utilisés pour cette étude. Les matériaux présents en amont du seuil du Mas del Rat sont essentiellement constitués de sables et de MES organiques et minérales.



FIGURE 2 : DEUX SEUILS D'ARRET DES MATERIAUX EN AMONT DU BARRAGE DE VINÇA



FIGURE 3 : MATERIAUX EXTRAITS AU NIVEAU DU SEUIL DE SOULANE

2.2 Historique des réinjections réalisées

Un premier programme de réinjection a été mené entre 2014 et 2018 (étude ISL, 2011). Environ 2 000 tonnes (soit environ 1 000m³) de matériaux ont été réinjectés annuellement sur 1 ou 2 des 6 sites identifiés par ISL, à partir de matériaux issus de carrière (le dégravolement du barrage étant réalisé uniquement lorsque les seuils sont pleins, pour des questions économiques et d'accès). Un suivi de la réinjection a été réalisé en 2019/2020 sur 6 stations pour évaluer l'impact des réinjections sur la morphologie du lit et la faune aquatique.

La dernière opération de dégravolement a eu lieu début 2022 sur la zone du seuil de Soulane. 13 800 m³ de matériaux ont été extraits et triés en fonction de leur taille :

- Inférieure à 1 cm : 6 778 m³ ;
- De 1 à 10 cm : 2 832 m³ ;
- Supérieure à 10 cm : 4 223 m³.

En mai 2022 et selon les recommandations de l'étude ISL (2011), 890 m³ (1 800 tonnes) de matériaux, parmi la granulométrie intermédiaire [1-10]cm, ont été réinjectés sur le site n°1 en aval immédiat du barrage. Cette opération a nécessité 137 rotations de camions. Les matériaux ont été déposés en rive droite en cône en hauteur sur la berge (Figure 4).

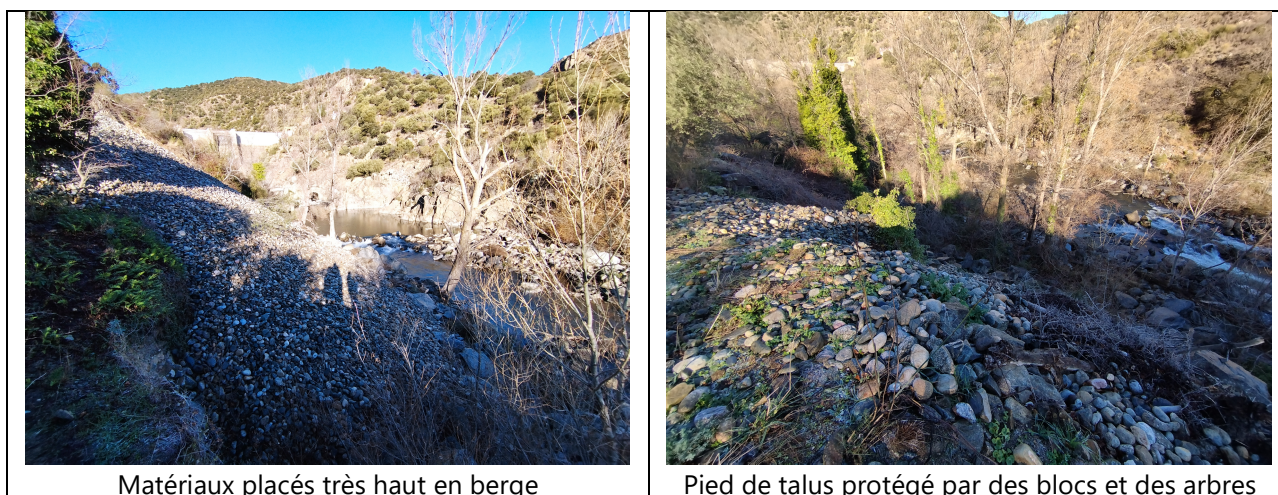


FIGURE 4 : REINJECTIONS DE MAI 2022 SUR LE SITE 1 LORS DE LA VISITE D'EGIS EN 2023

Les dates, emplacements et quantité de réinjection sont résumés sur la Figure 5.

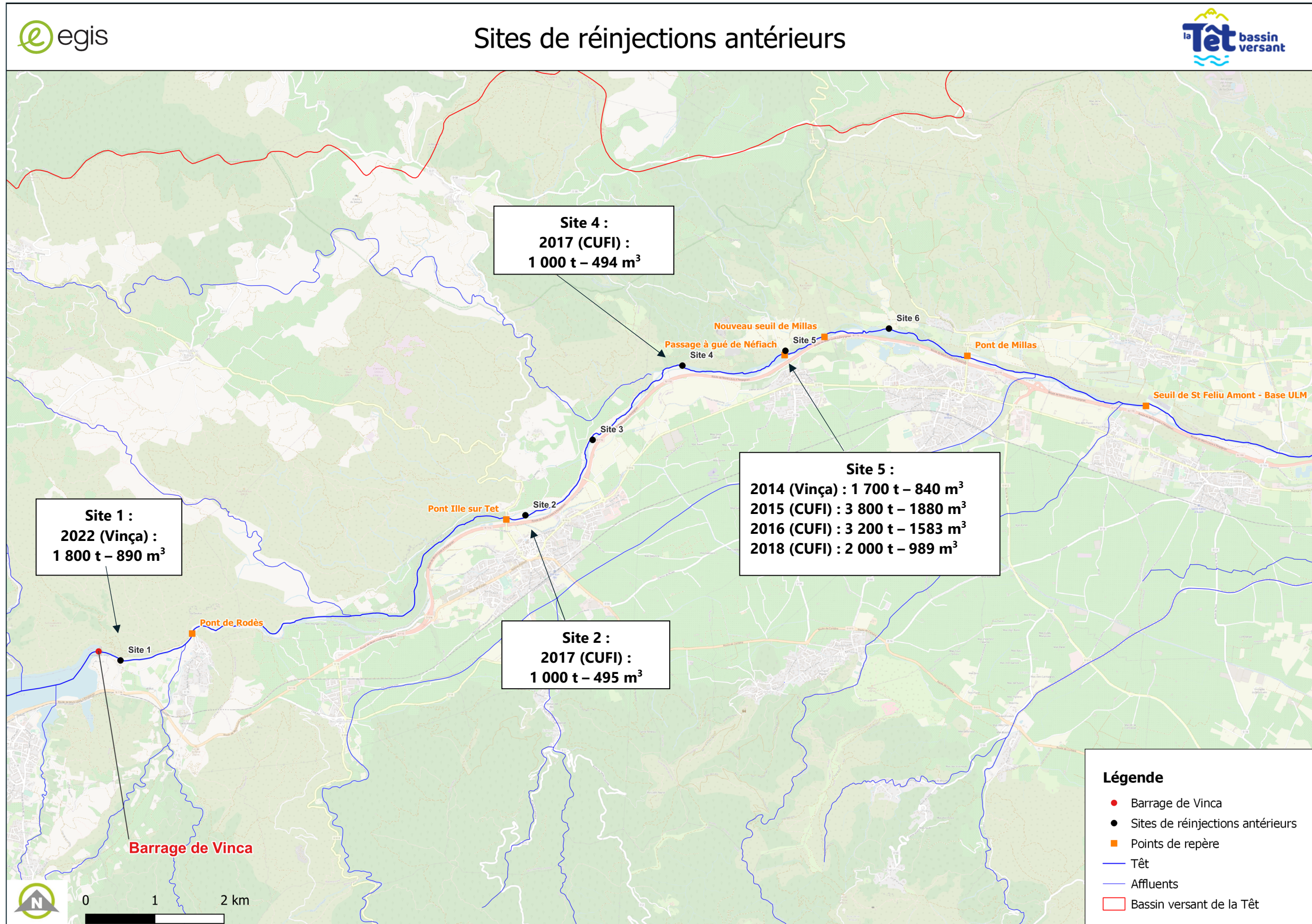


FIGURE 5 : REINJECTIONS ANTERIEURES

Pour évaluer l'impact de ces opérations de réinjections sur le cours d'eau, des investigations ont été menées en 2019 et 2020 par le bureau d'études Aquascop. Six stations de suivi, situées chacune à l'aval d'un site de réinjection, ont été analysées. Les investigations réalisées sont les suivantes :

■ Investigations réalisées en 2019

■ Pour les stations 1, 2, 3, 4 et 6 :

- Suivi hydromorphologiques par le protocole CarHyCE²

■ Pour la station 2, site pilote :

- Suivi des micro-habitats piscicoles : Indice d'Attractivité Morphodynamique (IAM)
- Suivi de la faune piscicole : inventaire poisson
- Suivi de la faune invertébrée : indice I2M2 (Indice invertébrés multi-métriques)

■ Investigations réalisées en 2019 et 2020

- Suivi photographique annuel : du barrage à la station 6

■ Les résultats visibles en 2019 sont les suivants :

- Hydromorphologie :
 - o Interprétation compliquée car difficulté à trouver un état de référence adapté au contexte ;
 - o Stations 3 et 4 : granulométrie plus diversifiée et plus fine que les autres stations ;
- Micro-habitats piscicoles (IAM) :
 - o Résultats nettement inférieurs à la valeur optimale ;
 - o L'état morphologique n'offre pas de bons habitats piscicoles ;
- Faune piscicole :
 - o Qualité moyenne du peuplement ;
 - o Faible disponibilité des substrats fins : facteur limitant ;
- Faune invertébrée :
 - o Peuplement témoignant d'une très bonne qualité d'eau.

■ Les comparaisons entre les campagnes photos de 2019 et 2020 sont difficiles car :

- Le contexte hydrologique est différent entre les deux campagnes (débit plus fort en 2020 qu'en 2019) ;
- Le passage entre les deux campagnes des tempêtes Gloria et Vera a remanié le lit plus fortement que la normale.

Les modifications tout de même visibles sont les suivantes :

- Secteur des gorges en aval du barrage : peu d'évolution morphologique ;
- A partir de Rodès (station CarHyce n°1) : des zones d'érosion marquées sont visibles ;
- Au niveau de l'Ille-sur-Têt : Elargissement du lit, déplacement d'atterrissements et de bancs de galets, disparition de boisements rivulaires ;
- Entre Ille-sur-Têt et Néfiach : dépôt de matériaux grossiers, érosion importante des berges, déplacement des matériaux déposés au niveau du site n°4 ;
- De Néfiach à Millas : dépôt de matériaux fins et élargissement du lit, recouvrement des atterrissements et de la roche mère par des bancs de sables.

Ces suivis sont limités par l'absence de traceurs permettant d'identifier la distance de déplacement des matériaux et par l'ampleur du phénomène Gloria. Ces données, et notamment celles de 2020, permettent toutefois d'avoir un état des lieux de l'état actuel qui pourra être réutilisé si un suivi des réinjections de matériaux est envisagé. Certains de ces paramètres

² Protocole développé par l'OFB permettant de quantifier l'altération hydromorphologique des cours d'eau, d'orienter les mesures de gestion et de définir un cadre de travail lors d'opérations de restauration. Pour plus d'informations, consulter : <https://professionnels.ofb.fr/node/386>

pourront être conservés, comparés et complétés dans le cadre d'un protocole plus abouti pour mieux comprendre la dynamique de déplacement des matériaux.

2.3 Analyse diachronique

2.3.1 Analyse du profil en long

■ Analyse historique

Sources : Morph'eau Conseils (2022) – Burgeap/CCEAU (2014)

A l'aval du barrage de Vinça, BRL a comparé les profils en long de 1937, 1978, 1992, 2003 et 2005 (Figure 6). Bien qu'il soit impossible de distinguer les profils correspondant au point le plus bas du fond du lit mineur de ceux correspondant à la ligne d'eau, l'analyse a globalement mis en évidence un enfoncement important de la Têt entre 1937 et 2003, notamment en aval de Millas.

L'étude de Morph'Eau Conseil (2021) montre que cette incision atteint des niveaux maximums en 2018, soit environ 3 mètres, entre le pont du Soler et le pont de l'autoroute A9 (Perpignan) et jusqu'à 7 mètres en aval du seuil du Soler 1 à l'amont de l'ancien passage à gué de Baho.

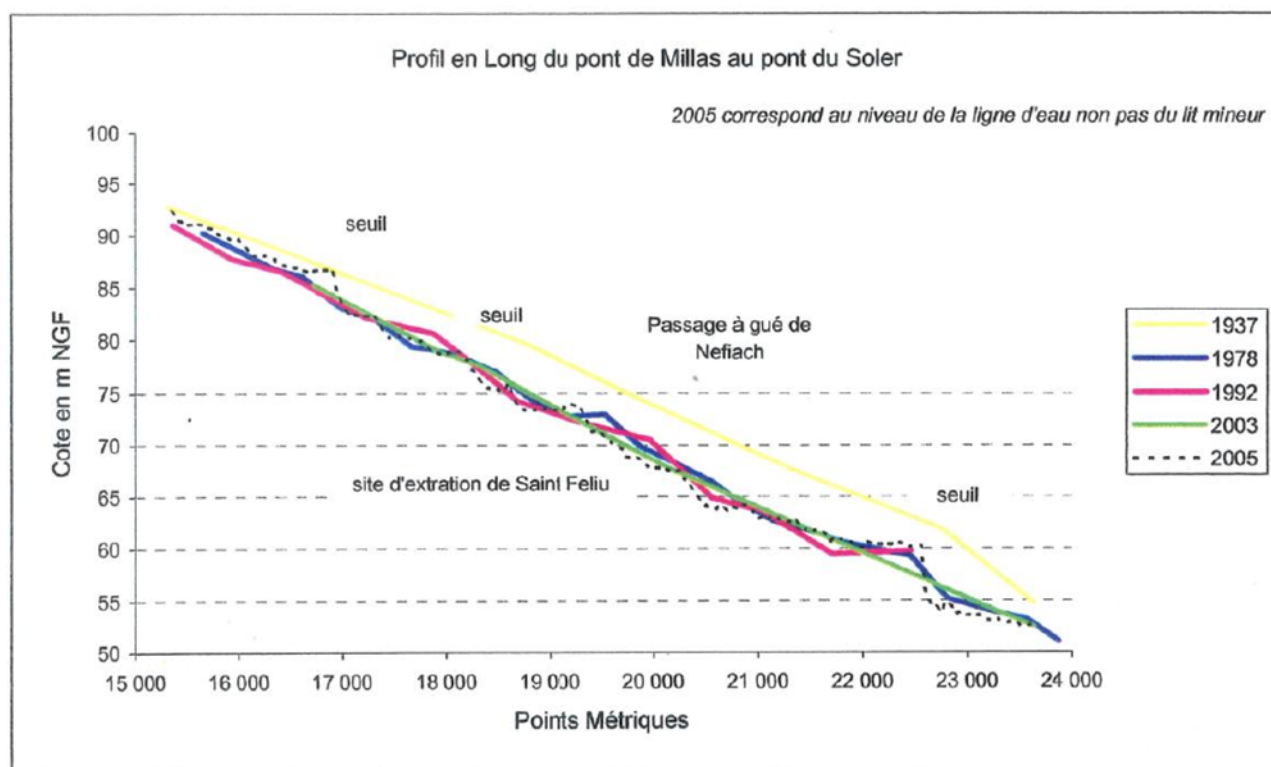


FIGURE 6 : EVOLUTION DU PROFIL DE LONG DE LA TET 1937-2005 (SOURCES : MORPHEAU 2022 – BURGEAP 2014 – BRL 2012)

■ Analyse post Gloria/Vera :

Sources : SMTBV campagne 2021

Le profil en long s'est abaissé de 40 cm en moyenne après les deux crues de 2020. L'enfoncement est compris entre 0,09 m et 1,2 m avec l'évolution la plus forte sur le secteur compris entre le passage à gué de Nefiach et le seuil de Millas dû à la rupture du seuil et à la purge des matériaux associés.

Afin de visualiser les évolutions des incisions et dépôts, les profils en long de 2011 (PPRI) et 2021 (3DSI) ont été superposés entre le seuil de la prise d'eau du canal d'Ille-sur-Tet (en aval du barrage de Vinça) et le pont de l'A9. Pour une meilleure visibilité, les zones de dépôts de plus de 1 m sont affichées en vert et les incisions de plus de -2 m sont affichées en orange. Le secteur du seuil de Millas ressort effectivement comme une forte

zone d'incision, de même qu'en aval du secteur d'Ille-sur-Têt, en aval des seuils de Saint-Feliu et vers le pont de l'A9. A l'opposé, les secteurs principaux de dépôt sont situés en amont du passage à gué de Néfiach et en amont du seuil de Saint Feliu amont.

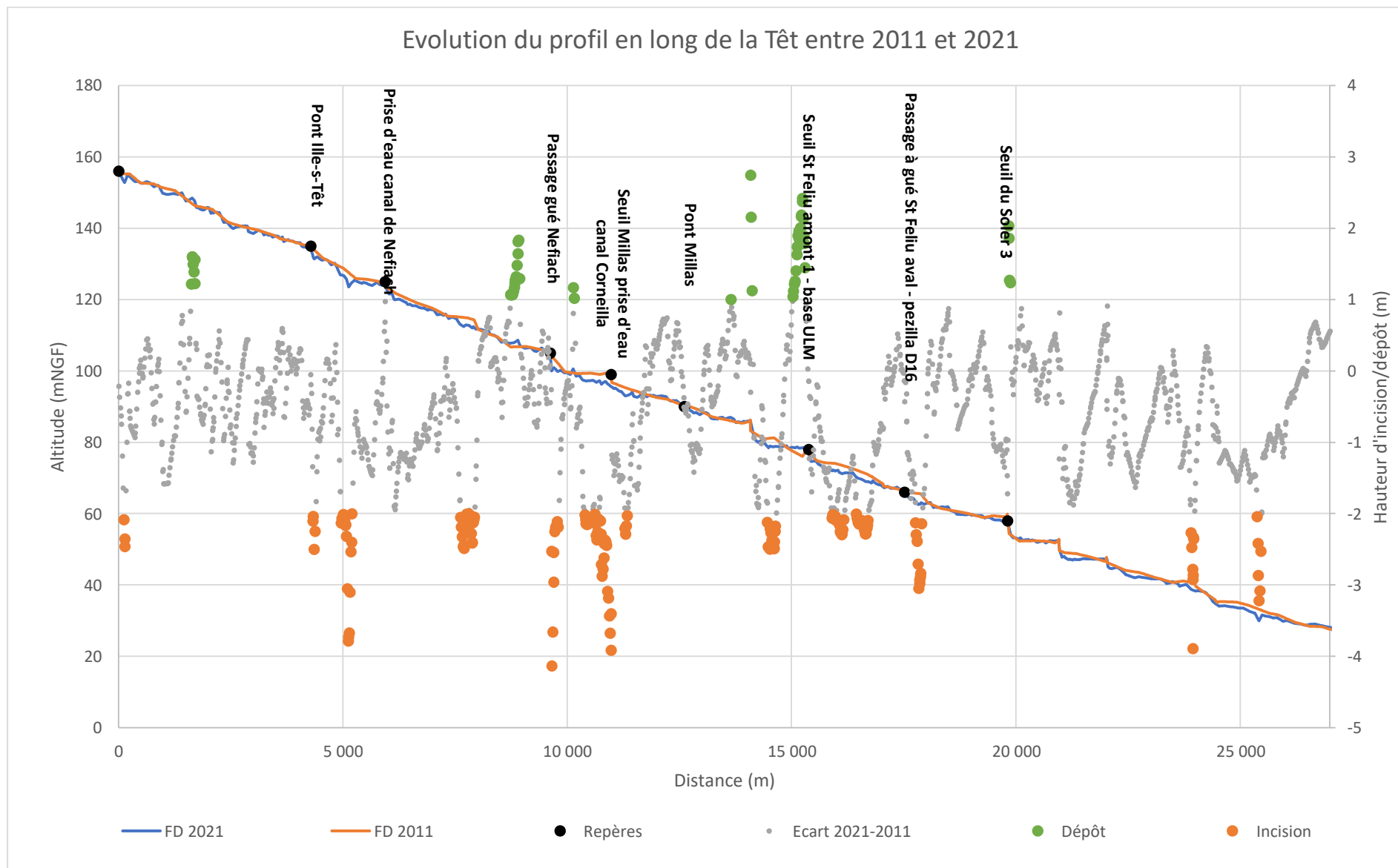


FIGURE 7 : EVOLUTION DE PROFIL EN LONG DE LA TET ENTRE 2011 ET 2021 (SOURCES : PPRI – 3DSI – MORPH’EAU CONSEILS)

NB : Le point d'origine de l'axe des abscisses correspond aux données communes entre 2011 et 2021, soit un démarrage en aval immédiat du seuil de la prise d'eau du canal d'Ille sur Têt et non le barrage de Vinça.

2.3.2 Analyse planimétrique

■ Analyse historique

Sources : *Morph'eau Conseils (2022) – Burgeap/CCEAU (2014)*

L'évènement le plus morphogène qu'a connu la Têt depuis le début du 20^{ème} siècle est la crue de 1940 (Aiguat), qualifiée de crue millénaire. Cette crue a défini l'espace maximal de divagation que peut atteindre le cours d'eau. Le rapport de BRL (2012) comprend une série de cartes présentant l'évolution latérale du lit mineur entre 1940, 1991 et 2010. De manière générale, BRL a observé une simplification du tracé de la Têt, avec un resserrement de la bande active et une progression accrue des boisements.

La route nationale 116 est l'ouvrage le plus contraignant latéralement à l'aval du barrage de Vinça.

■ Analyse post Gloria/Vera :

Sources : *SMTBV campagne 2021*

Les crues de 2020 ont élargi la bande active, la faisant passer d'une largeur moyenne de 37 à 54 m, soit 45%. Les surfaces où la roche mère argileuse est visible ont sensiblement augmenté. Le tronçon de rivière situé entre les prises d'eau des canaux de Corneilla et de Pézilla a quasiment doublé sa largeur du fait de la rupture du seuil de Millas. Le même phénomène est observé sur le tronçon du pont d'Ille-sur-Têt au passage à gué de Néfiach avec un élargissement de 87%. Ces modifications de bandes actives sont représentées sur la Figure 8.

Les tronçons ayant le moins évolué sont ceux des gorges de la Têt à Rodès, l'amont de l'embouchure et le secteur de Baho. Ce dernier secteur s'est cependant nettement enfoncé avec -40 cm de moyenne et jusqu'à 1 m localement.

La Têt a globalement perdu entre 360 000m³ et 620 000 m³ ³ de matériaux entre 2018 et 2021, la plus grande partie relevant des crues de 2020. Les secteurs les plus déficitaires sont les tronçons du pont d'Ille-sur-Têt au passage à gué de Néfiach avec de fortes érosions de berge (export de l'ordre de -138 000 m³).

³ Estimation à considérer davantage comme un ordre de grandeur que comme des valeurs absolues du fait de la qualité des données historiques et des méthodes de calcul

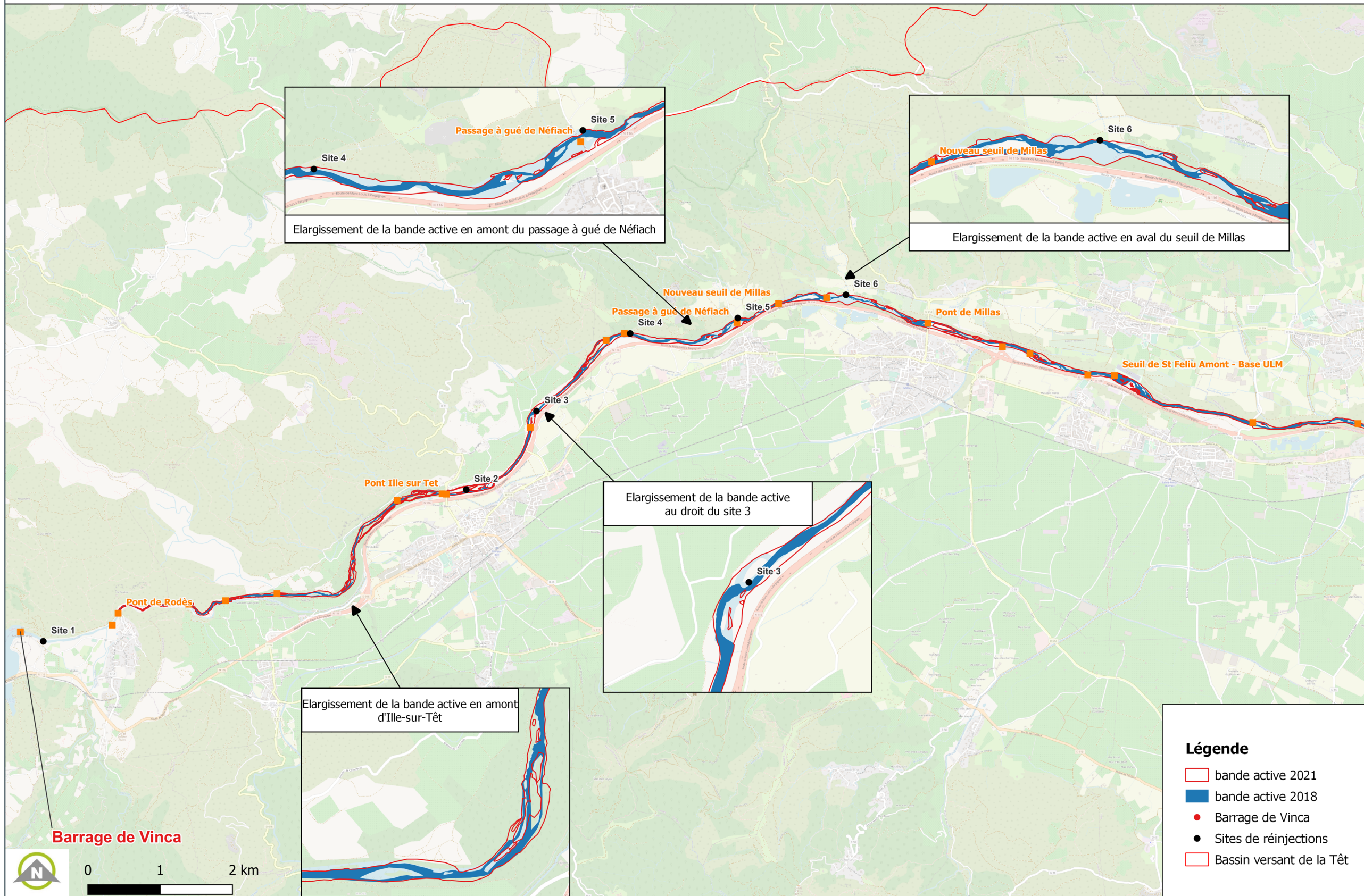


FIGURE 8 : EVOLUTION DE LA BANDE ACTIVE ENTRE 2018 ET 2021 (SOURCES : IGN – 3DSI)

3 ANALYSE DU POTENTIEL DE REMOBILISATION DES MATERIAUX

3.1 Méthodologie

Après concertation avec le SMTBV, les calculs du transport solide ont été effectués sur les tronçons homogènes validés en 2014 avec BURGEAP et redécoupés en 2021 par Morph'eau Conseils (tronçons 6 et 8). Ces tronçons sont présentés sur la Figure 9.

La zone d'étude s'étend depuis la section 1 jusqu'à la section 6b. En aval de cette dernière section, le fonctionnement de la Têt est particulier : le transport sédimentaire s'effectue plutôt par suspension étant donné que tout le stock alluvial semble avoir été épuisé sur ce secteur. Le cours d'eau s'écoule directement sur la couche argilo-limoneuse (correspondant au pliocène) ce qui lui donne la surprenante allure de canyon que nous pouvons observer aujourd'hui. Le processus de transport concerné par la présente étude est le charriage et non la suspension et l'ambition en termes de temporalité est déjà d'essayer de restaurer le cours d'eau jusqu'à la section 6b. Il n'est évidemment pas incompatible d'envisager d'autres mesures de restauration complémentaires en aval, en attendant les effets des réinjections de matériaux en amont.

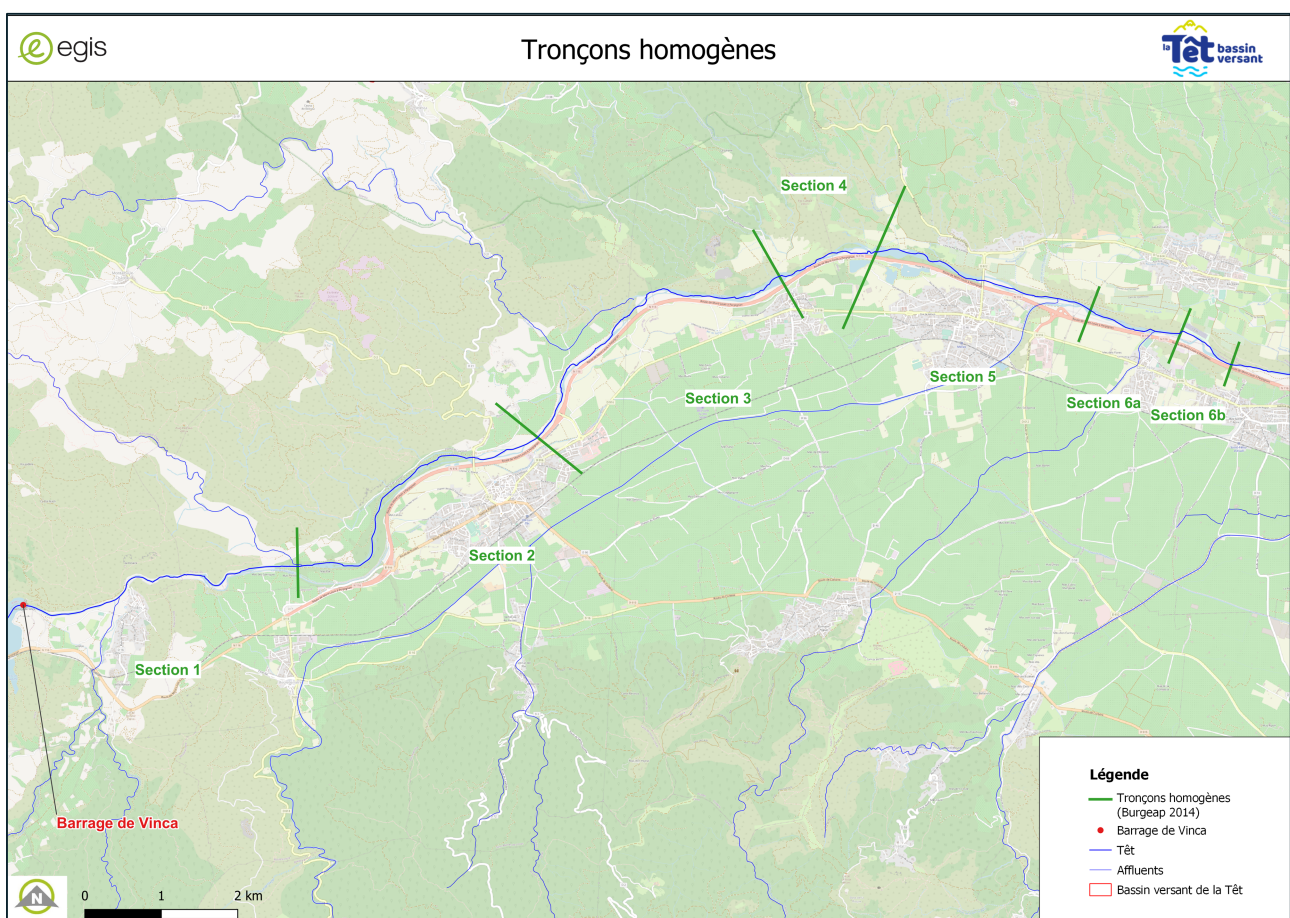


FIGURE 9 : SECTIONS HOMOGENES SUR LA TET

Suite à l'analyse des données existantes et aux inventaires terrain, nous considérons que ces tronçons sont représentatifs d'une dynamique sédimentaire à peu près homogène le long de leur linéaire.

L'analyse du transport sédimentaire permettra de qualifier le comportement de la Têt sur chaque section. En effet, le débit liquide sera couplé au débit solide pour prendre en considération les phénomènes d'incision/aggradation et érosion/rétractation en mesure de modifier le comportement du cours d'eau.

TABLEAU 1 : SECTIONS HOMOGENES DE LA TET

Tronçon homogène	Limite amont	Limite aval
Têt aval 1	Barrage de Vinça	Sortie des gorges (Fontaine St-Jules)
Têt aval 2	Sortie des gorges (Fontaine St-Jules)	Aval du pont d'Ille-sur-Têt
Têt aval 3	Aval du pont d'Ille-sur-Têt	Passage à gué de Néfiach
Têt aval 4	Passage à gué de Néfiach	Seuil de Millas - Prise d'eau canal de Corneilla
Têt aval 5	Seuil de Millas - Prise d'eau canal de Corneilla	Seuil de Saint Feliu d'Amont 2
Têt aval 6a	Seuil de Saint Feliu d'Amont 2	Seuil de St Feliu Amont 1 - Base ULM
Têt aval 6b	Seuil de St Feliu Amont 1 - Base ULM	Amont de la station d'épuration de Saint-Féliu-d'Aval

3.1.1 Granulométrie

La granulométrie constitue une des données les plus importantes à mobiliser pour la quantification du transport sédimentaire.

Dans le cadre de cette étude, nous avons repris les échantillonnages granulométriques effectués par SETEC en 2019. Suite aux tempêtes Gloria et Vera en 2020 ayant fortement influencé le cours d'eau, nous avons actualisé ces données en refaisant une analyse granulométrique sur 5 sites entre la Riberette et le seuil de Saint Feliu d'Amont (limite aval du tronçon 6a). Ces sites sont représentés sur la Figure 11.

Nous avons utilisé la technique de comptage granulométrique de Wolman (Wolman, 1954). Cette méthode se base sur la collecte aléatoire de galets disponibles sur la surface à échantillonner divisée en lignes ou en grille (Bunte and Abt, 2001). Le second plus grand axe, couramment appelé l'axe b (Figure 10), est celui qui est considéré pour quantifier la taille des matériaux.

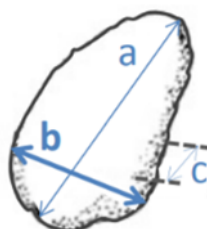


FIGURE 10 : AXE B MESURE DANS LE CADRE DES ECHANTILLONNAGES GRANULOMETRIQUES EFFECTUES

Afin de bien capturer l'hétérogénéité des sédiments présents dans les lits des cours d'eau, des comptages sur au moins 100 particules ont été réalisés.

La classification granulométrique utilisée est présentée dans le tableau ci-dessous.

TABLEAU 2 : CLASSIFICATION GRANULOMETRIQUE UTILISEE

Code Classe	Signification	Classe (mm)
Fines	Sédiments fins	< 2
GF	Graviers fins	2 – 8
GG	Graviers grossiers	8 – 18
CF	Cailloux fins	16 – 32
CG	Cailloux grossiers	32 – 64
PF	Pierres fines	64 – 128
PG	Pierres grossières	128 – 256
B	Blocs	256 – 1024
R	Roche	> 1024

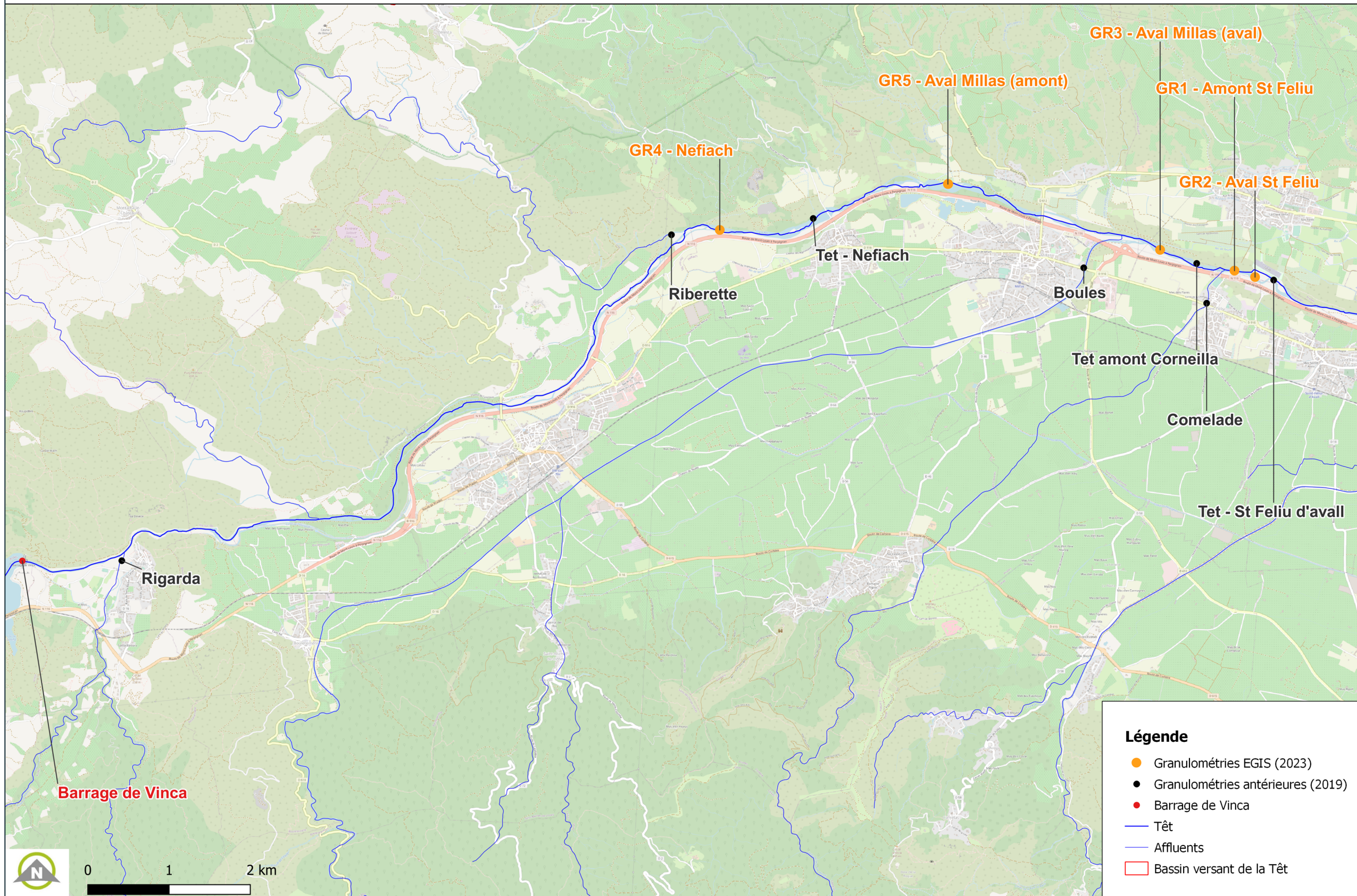


FIGURE 11 : LOCALISATION DES RELEVES GRANULOMETRIQUES SUR LA TET (EGIS 2023)

Les courbes granulométriques supplémentaires ainsi obtenues sont représentées sur la Figure 12 ci-dessous.

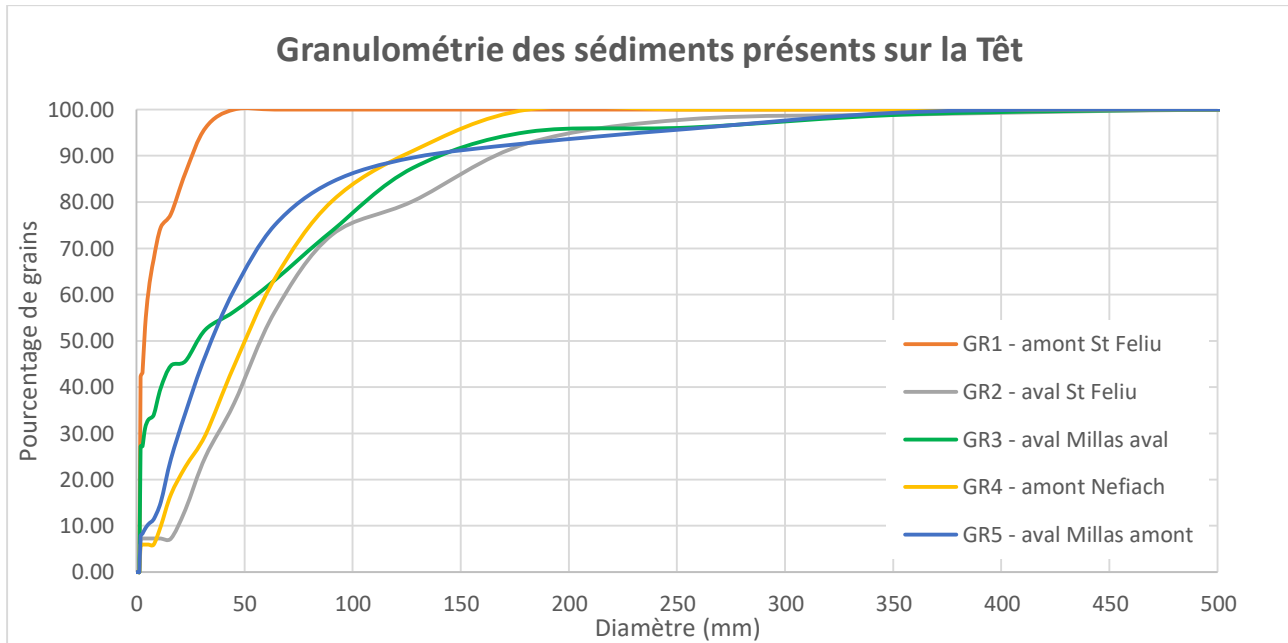


FIGURE 12 : GRANULOMETRIE DES SEDIMENTS RELEVES SUR LA TET

A partir de ces courbes, les diamètres caractéristiques nécessaires au calcul du transport sédimentaire ont été relevés (Tableau 3). Il s'agit des diamètres pour lesquels xx% de l'échantillon est plus petit. Les diamètres les plus couramment utilisés dans les formules de transport sédimentaire sont, entre autres, le diamètre médian D_{50} , le D_{84} et le D_{90} , respectivement diamètres pour lesquels 50%, 84% et 90% de l'échantillon est plus petit. Ces derniers sont reportés dans le tableau ci-dessous.

TABLEAU 3 : DIAMETRES CARACTERISTIQUES DES SECTIONS DE CALCUL

Localisation	D_{50} (mm)	D_{84} (mm)
G1 – amont St Feliu	4	21
G2 – aval St Feliu	58	144
G3 – aval seuil de Millas aval	29	119
G4 – amont Nefiach	51	82
G5 – aval seuil de Millas amont	35	89

TABLEAU 4 : CARACTERISTIQUES DES SECTIONS DE CALCUL

Localisation	Alt (mNGF)	D_{50} (mm)	D_{84} (mm)	Pente (m/m)	Lit mineur (m)
SECTION 1 : Vinca – Rigarda	194-150	42	104	0.0065	100
SECTION 2 : Rigarda – aval Ille-sur-Têt	150-125	42	104	0.0034	250
SECTION 3 : Ille-sur-Têt - Nefiach	125-105	51	103	0.0048	200
SECTION 4 : Nefiach – Millas amont	105-95	51	103	0.0022	125
SECTION 5 : Millas amont – Millas aval	95-85	35	89	0.0032	150
SECTION 6a : Millas aval – St Feliu	85-75	29	119	0.0020	100
SECTION 6b : St Feliu – aval St Feliu	75-71	58	144	0.0015	200

3.1.2 Présentation de l'outil de calcul

Il existe une grande variété de formules de transport solide dans la littérature. La principale difficulté réside dans le choix de la formule appropriée. Les relevés de terrain (granulométrie, largeur de la section, type, etc.) permettent d'effectuer une première sélection des formules adaptées à travers l'analyse de leur domaine de validité. L'outil BedloadWeb⁴ développé par Alain Recking (INRAE de Grenoble) pour le compte de l'OFB présente l'avantage de mutualiser les formules de transport solide les plus utilisées dans la littérature. Par ailleurs, cette plateforme offre la possibilité de comparer les résultats obtenus avec les différentes équations disponibles ce qui rend le choix de la formule adaptée au terrain d'étude plus aisé (Figure 13).

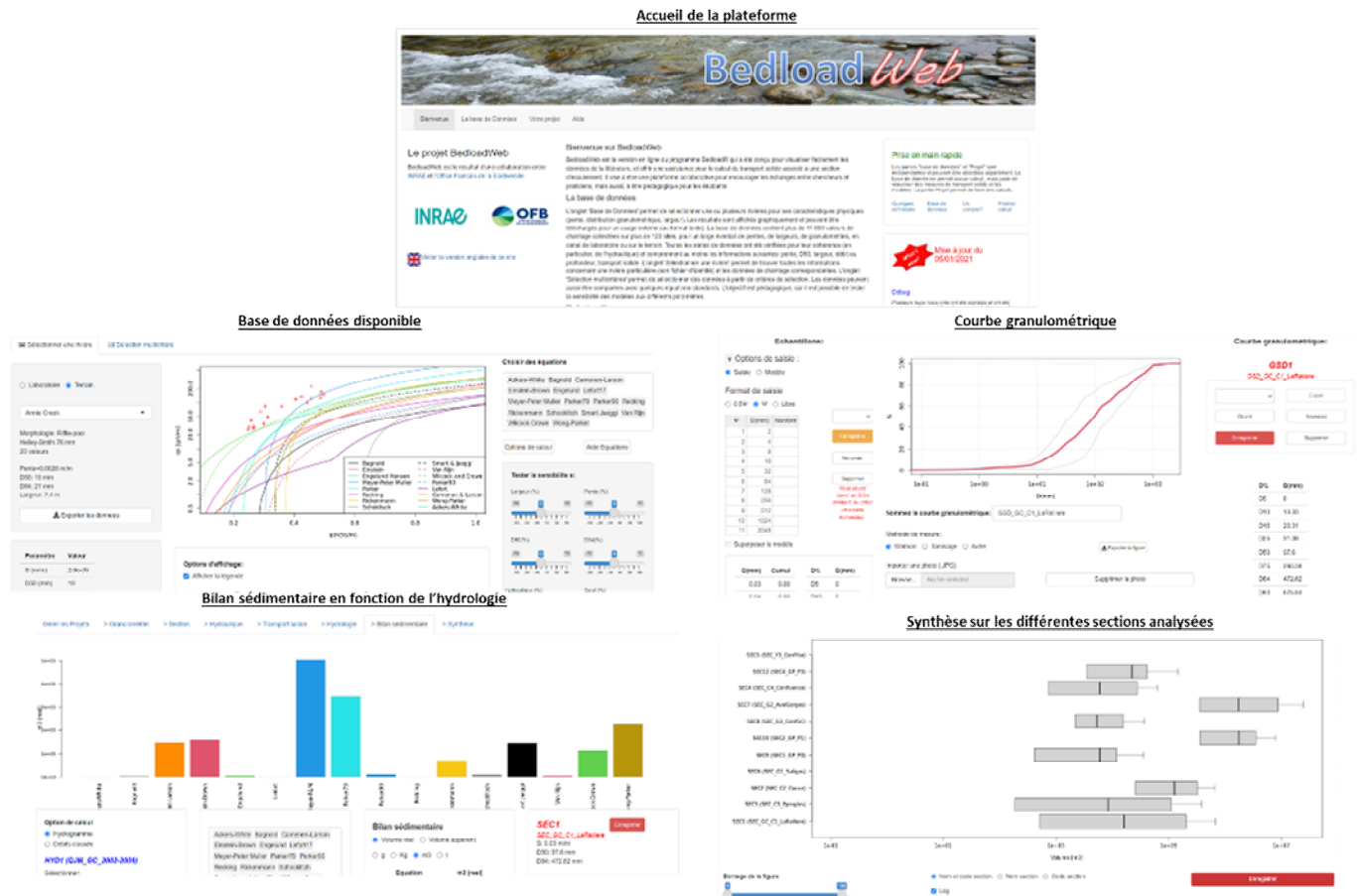


FIGURE 13 : PLATEFORME BEDLOADWEB ET DIFFERENTES FONCTIONNALITES POUR LE CALCUL DU TRANSPORT SEDIMENTAIRE A L'ECHELLE DE LA SECTION EN TRAVERS (RECKING, 2019)

Les étapes considérées pour le calcul du transport solide sur la Têt sont les suivantes :

1. Localisation et caractérisation des sections de calcul : profil en travers, pente, granulométrie ;
2. Estimation de l'hydraulique à l'échelle de la section en travers. Les principaux paramètres considérés sont la vitesse, le rayon hydraulique et la hauteur d'eau. Les calculs sont effectués avec l'hypothèse d'un régime permanent et uniforme ;
3. Estimation de la contrainte hydraulique ou contrainte de cisaillement τ (N/m^2) qui représente la force $F(N)$ divisée par la surface sur laquelle s'effectue le contact. La contrainte hydraulique s'exprime de la manière suivante : $\tau = \rho ghS$ avec ρ la masse volumique de l'eau (kg/m^3), g la constante gravitationnelle, h la hauteur d'eau et S la pente ;

⁴ <https://www.bedloadweb.com/>

4. Choix d'une loi de frottement. Dans notre cas nous utilisons la loi de Ferguson (2007) qui a été testée sur des cours d'eau de configurations hydrauliques différentes et est considérée adaptée aux faibles profondeurs relatives ($h/D < 7$) ce qui correspond au cas de la Têt ;
5. Le début de transport et le transport solide :
 - a. Estimation du nombre de Shields ;
 - b. Pour les formules à seuil comparaison au nombre de Shields critique de début de mouvement ;
 - c. Calcul du transport solide avec les différentes formules disponibles dans BedloadWeb.

Ces trois dernières étapes sont schématisées sur la figure ci-dessous.

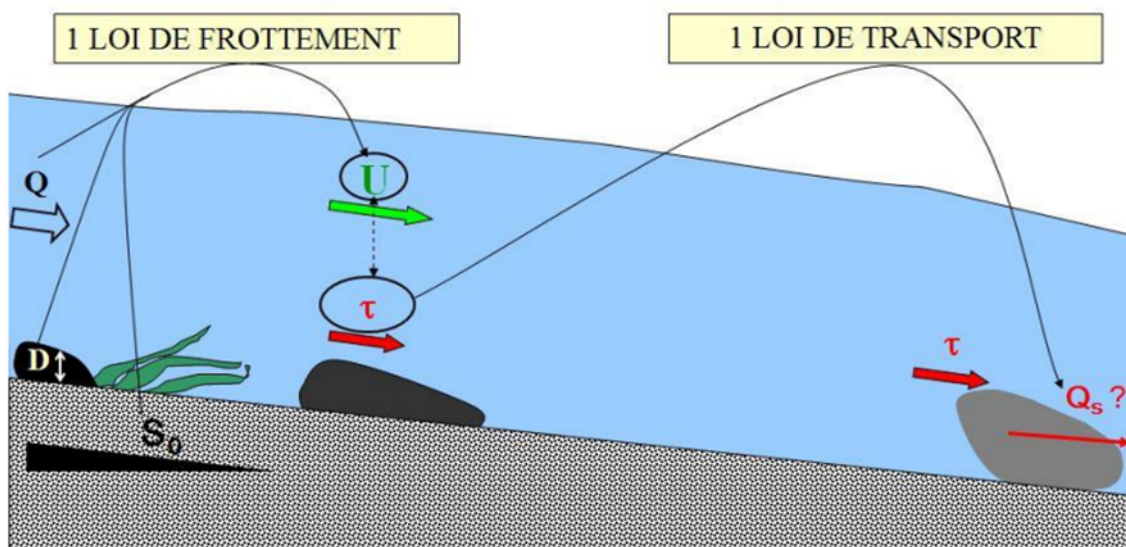


FIGURE 14 : SCHEMATISATION DES ETAPES DU CALCUL DU TRANSPORT SOLIDE (RECKING, 2020)

3.1.3 Analyse bibliographique pour le choix d'une formule de transport adaptée à la Têt

Le choix d'une formule de transport solide adaptée est un exercice difficile. En effet, le transport solide présente de grandes incertitudes et seules quelques équations s'avèrent applicables dans chaque condition de pentes et de granulométries.

Il existe deux grandes familles de formules de calcul du transport solide : les formules à seuil et les formules sans seuil. La plupart des formules existantes considèrent un phénomène de seuil à travers la définition d'une contrainte critique de Shields, en dessous de laquelle il n'y a pas de transport. Leur particularité réside dans le fait que le flux solide est considéré comme nul si $\tau^* < \tau_c$. Les formules sans seuil font quant à elle intervenir le taux de transport caractérisé par τ^*/τ_c^* . Ces dernières présentent l'avantage d'être moins restrictives car elles prévoient toujours du transport même s'il est très faible quand τ^* tend vers 0.

Toutes les équations existantes n'expriment que la capacité maximale de charriage. Cette situation ne peut être atteinte que si aucune limitation de la fourniture de sédiments par le lit n'intervient. On parle alors de charriage saturé, ce qui veut dire que le cours d'eau peut se fournir en matériaux dans les proportions qu'il nécessite ce qui est rarement le cas. Il est donc nécessaire de garder à l'esprit les limites de cet exercice.

Les études existantes, notamment SETEC (2019), ont déjà fait un travail d'identification des formules adaptées aux caractéristiques de la zone d'étude. Ces équations sont les suivantes :

- Sogreah-Lefort (1991) ;
- Meunier (1991) ;
- Rickenmann (1991) ;
- Lefort (2007 et 2015) ;
- Recking (2008).

Les formules de Sogreah-Lefort et Meunier ne nous semblent pas adaptées au contexte de la Têt. En effet :

- Sogreah-Lefort (1991) représente le charriage et la suspension et est adaptée à des pentes bien supérieure à 0.2%. Elle suppose aussi un ratio largeur du lit sur hauteur d'eau constant : B/H=18 ;
- Meunier (1991) est une formule qui a plutôt été développée pour représenter des phénomènes de lave torrentielle et elle ne prend pas en compte la granulométrie du cours d'eau, uniquement la pente et le débit liquide. Son application au contexte de la Têt pourrait donc mener à une surestimation des capacités de transport du cours d'eau.

Nous avons effectué une analyse bibliographique supplémentaire sur des cours d'eau ayant des caractéristiques similaires à la Têt pour identifier les formules de transport solide adaptées et effectuer une analyse critique des résultats obtenus dans le cadre des autres études. Les critères de comparaison retenus sont la pente, la largeur et la granulométrie du cours d'eau. Cette analyse a été effectuée sur la plateforme BedloadWeb. En effet, un travail de centralisation important des caractéristiques de plusieurs cours d'eau a été effectué par Recking (2018) dans le cadre de ses travaux de recherche et du développement de la plateforme BedloadWeb. La base de données concentre plus de 11 000 valeurs de charriage collectées sur plus de 120 cours d'eau permettant de manipuler les formules et de déterminer leur validité pour une large gamme de pentes, de largeurs, de granulométrie et d'avoir des données de laboratoire et de terrain.

Pour chacune des sections retenues pour les calculs (Tableau 3), nous avons essayé d'analyser la performance des formules de transport pour la reproduction du débit solide relevé sur des terrains possédant des caractéristiques proches. La performance des calculs a été analysée à travers les calculs des pourcentages de ratios $q_{s_{calculé}}/q_{s_{mesuré}}$ compris dans des enveloppes [0.1 – 10] (E10) et [0.2 – 5] (E5). Lorsqu'une prédiction est proche de l'enveloppe inférieure (0.1 ou 0.2) cela veut dire qu'on a tendance à sous-estimer le transport. Au contraire, si les résultats sont proches de l'enveloppe supérieure (5, 10) cela veut dire qu'on surestime le transport. Les calculs sont effectués avec 16 formules de transport dont les caractéristiques et domaines de validité sont différents.

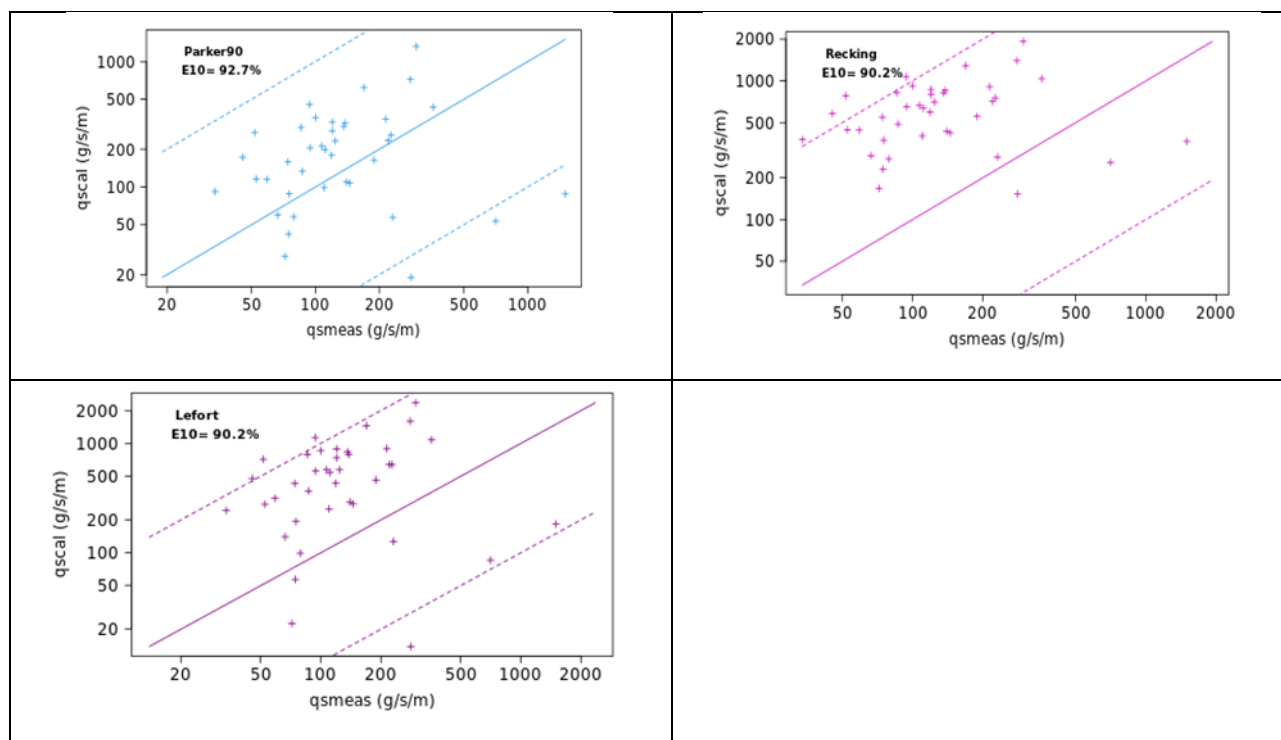
Un exemple de cours d'eau sélectionnés pour la Têt à Néfiach sont présentés dans le Tableau 5.

TABLEAU 5 : COMPARAISON DES CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DE LA TET A NEFIACH AVEC D'AUTRES COURS D'EAU A L'ECHELLE MONDIALE

Variable	La Têt à Nefiach	Valley creek (Idaho, USA)	Susitna River (Talkeetns, Alaska, USA)	Susitna River (Sunshine, Alaska, USA)
S (m/m)	0.0048	0.004	0.0014	0.0017
D₅₀ (mm)	50	42	52	42
D₈₄ (mm)	103	105	96	88
L (m)	200	22	185	286

Un exemple de résultat est présenté ci-dessous (Figure 15) pour des cours d'eau ayant des caractéristiques proches de celles de la Têt à Néfiach.

Résultats sur la Susitna River (Sunshine, USA) comparable à la Têt à Néfiach



Résultats sur la Boise (USA) comparable à la Têt au seuil de Millas amont

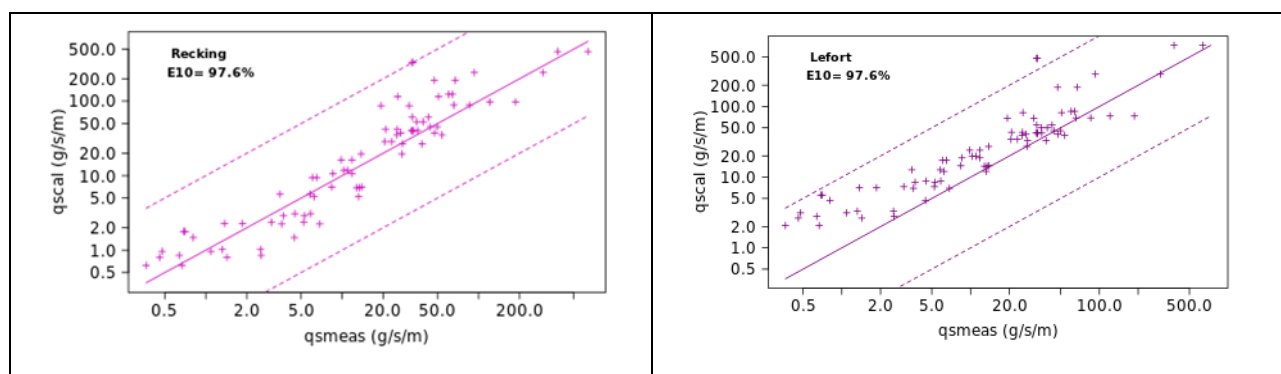


FIGURE 15 : FORMULES LES PLUS PERFORMANTES SUR DEUX RIVIERES D'AMERIQUE DU NORD AYANT DES CARACTERISTIQUES SIMILAIRES A LA TET

Parmi les 16 équations disponibles sur la plateforme BedloadWeb, les plus performantes sur la zone d'étude sont donc celles de :

- **Lefort (2007)** : calée sur plusieurs données de laboratoire et de terrain, couramment utilisée en torrent de montagne et rivières torrentielles ;
- **Recking (2013)** : spécialement développée à partir de données de terrain et validée sur une très grande gamme de jeux de données indépendantes ;
- **Parker (1990)** : formulée pour reproduire uniquement le transport de la charge grossière, sans prendre en compte la fraction sableuse.

En comparant avec les formules utilisées par SETEC en 2019, nous retrouvons la formule de Lefort 2017 ainsi que la version actualisée de la formule de Recking (2013). La formule de **Rickenmann (1991)** sera également utilisée car habituellement performante sur ce genre de configuration.

Plus de détails concernant les formules présentées peuvent être trouvés dans plusieurs ouvrages et publications à cet effet (Malavoi et al., 2011; Recking et al., 2013; Recking, 2020).

Les calculs seront effectués sur les différents tronçons géomorphologiquement homogènes identifiés. Nous proposons d'analyser différents scénarios de transit :

- Estimation des volumes moyens charriés en état actuel, annuellement et à l'échelle événementielle ;
- Estimation des volumes moyens charriés après réinjection de la granulométrie disponible sur la plateforme de tri de Vinça, annuellement et à l'échelle événementielle.

Nous proposons donc de retenir **4 formules de calcul du transit sédimentaire** :

- Les formules de Recking (2013) et de Lefort (2017) en priorité ;
- La formule de Parker (1990) afin d'élargir l'enveloppe des matériaux transportés ;
- La formule de Rickenmann (1990) pour définir la fourchette haute des capacités de transport.

Les résultats obtenus sont bien évidemment comparés aux résultats des études antérieures.

3.1.4 Débit liquide d'entrée

Pour l'estimation des capacités de transport à l'échelle annuelle et événementielle, les hydrogrammes journaliers issus de la **station hydrométrique de la Têt à Rodès** ont été employés pour les différentes périodes étudiées.

Plusieurs périodes ont été considérées.

TABLEAU 6 : PERIODES HYDROLOGIQUES RETENUES POUR L'ANALYSE DU TRANSPORT SEDIMENTAIRE

Période	Comportement hydrologique associé
Annuelle	
2005-2023	Chronique disponible complète
2005-2010	Période de calme hydrologique (sans crues)
2010-2015	Période d'enchaînement de petites crues
2015-2019	Période de calme hydrologique (sans crues)
Évènementielle	
Gloria (2020)	Période de retour : vicennale
Vera (2020)	Période de retour : décennale
Crue de 1996	Période de retour inférieure à la crue quinquennale
Crue de 2002	Période de retour inférieure à la crue décennale

3.2 Analyse des capacités de transport – état actuel

Comme évoqué précédemment, la plateforme BedloadWeb a été considérée pour les calculs du transport solide.

L'objectif de ces calculs est de montrer à quel point les résultats peuvent très fortement varier en fonction du choix de la formule de transport. Ceci montre à quel point il est nécessaire de bien comprendre le fonctionnement de l'équation ainsi que son domaine de validité avant de la sélectionner dans le cadre d'une étude. Sans même analyser dans le détail les résultats, il apparaît que les estimations du transport solide varient

très fortement d'une formule à une autre. Ces résultats peuvent avoir des conséquences importantes en lien avec le choix des ouvrages ou des mesures de restauration à mettre en place.

Suite à l'analyse bibliographique présentée précédemment, les calculs du transport solide ont été effectués avec les 4 formules retenues.

3.2.1 Transport solide annuel

Afin d'analyser l'influence de l'hydrologie sur le transport sédimentaire, les calculs ont été effectués sur les périodes hydrologiques présentées dans le Tableau 6.

De manière générale, si l'on compare les quatre formules obtenues :

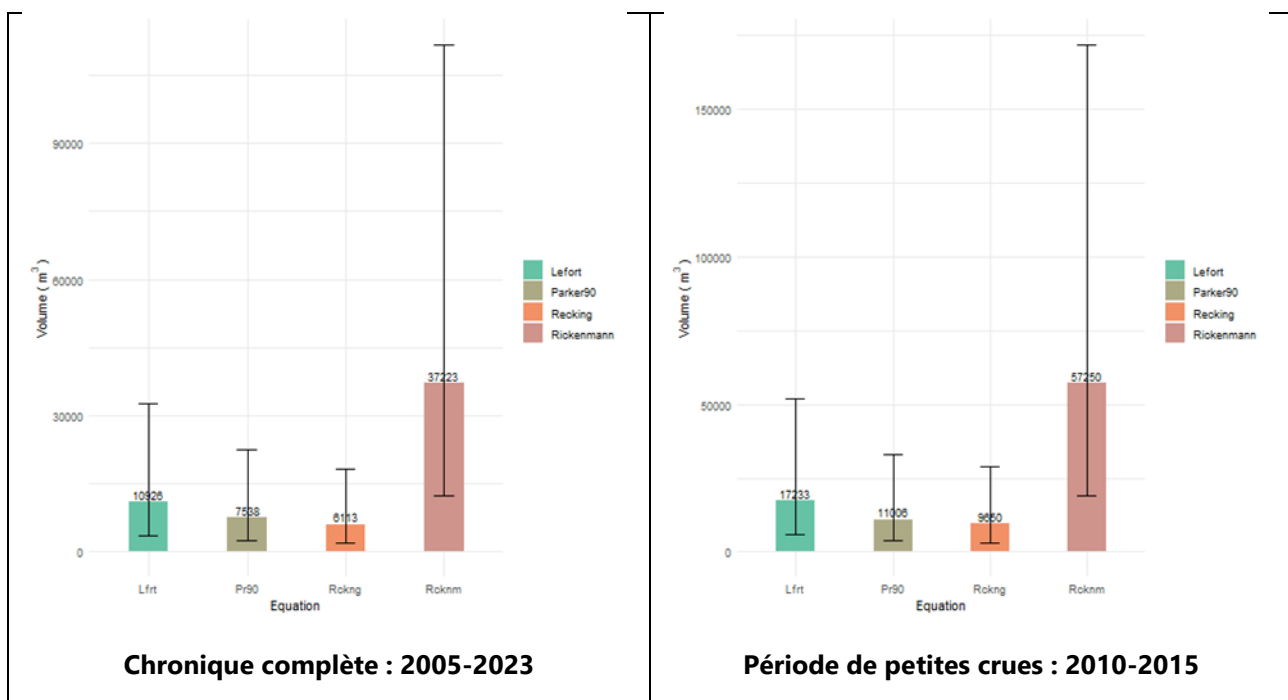
- L'équation de Lefort (2017) donne des volumes transportés élevés ;
- Les formules de Recking (2013) et Parker (1990) fournissent quant à elles des volumes moins importants ;
- La formule de Rickenmann, formule à seuil, peut présenter des volumes très importants ou nuls si le seuil n'est pas atteint.

Il semblerait que l'équation de Lefort (2017) fournisse des estimations plutôt caractéristiques des volumes totaux transportés (charriage + suspension). La formule de Recking (2013) ne considère quant à elle que le charriage ce qui explique les volumes bas estimés.

L'équation de Recking semble être la plus adaptée pour la Têt pour estimer le **transport sédimentaire moyen annuel**.

3.2.1.1 Exemple de résultats sur la section 1

Les capacités de transport solide ont été calculées sur l'ensemble des sections et les résultats sur la section 1 sont présentés sur la Figure 16 ci-dessous par période hydrologique. Les résultats sur les autres sections sont présentés en Annexe 1.



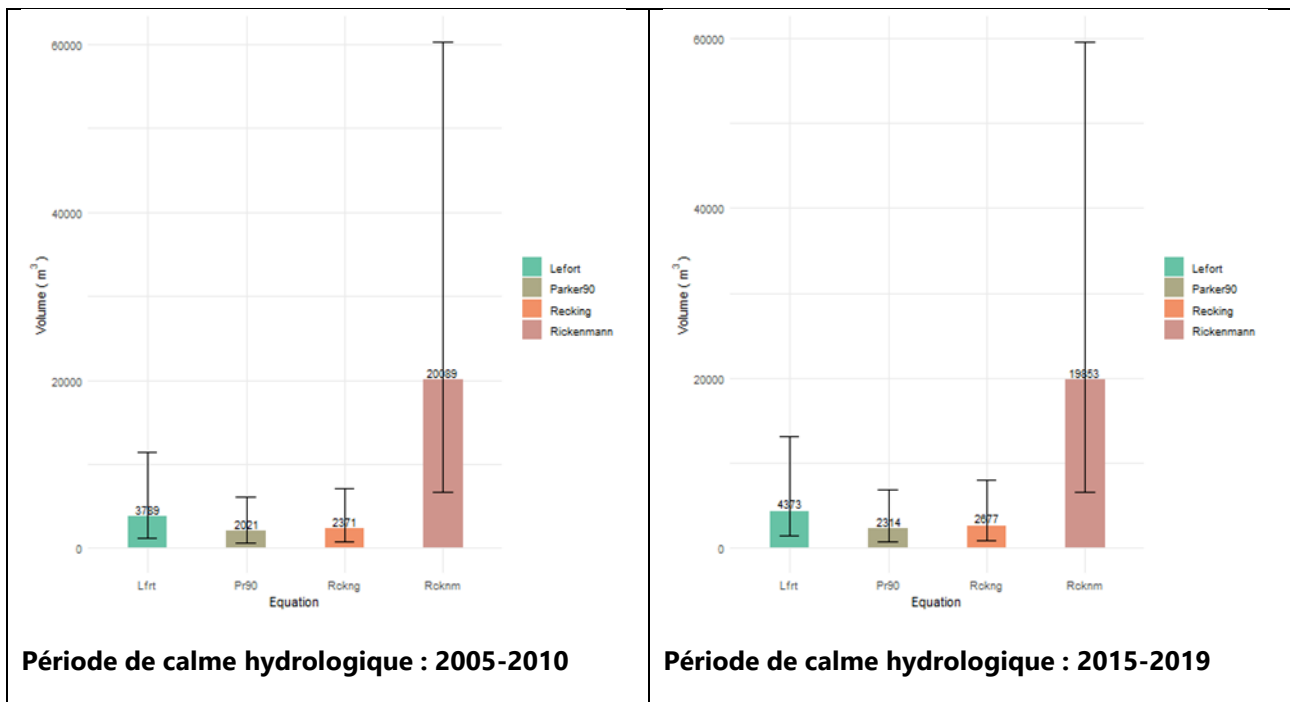


FIGURE 16 : VOLUMES SOLIDES ANNUELS TRANSPORTES SUR PLUSIEURS PERIODES SUR LA TET A VINCA

NB : Les barres d'incertitudes ont été définies de manière arbitraire : estimations empiriques /3 et *3 (Piton & Recking, 2017 ; Recking et al., 2012 ; Recking et al., 2013).

Les résultats obtenus peuvent surprendre étant donné que les estimations peuvent varier de plusieurs ordres de grandeur. C'est pour cela qu'il est nécessaire de prendre en compte les incertitudes associées aux calculs du transport sédimentaire et ne pas annoncer un volume sans qu'il ne soit encadré.

Sur le cas de la Têt, nous nous intéressons principalement à la comparaison relative des sections les unes par rapport aux autres afin d'identifier les zones de transports, propice à des réinjections de matériaux, et les zones de dépôts, pour lesquelles les réinjections seront moins efficaces à l'échelle du cours d'eau et d'une temporalité moyenne (en décennies, même si la notion de temporalité est également tributaire de l'hydrologie) car les matériaux tarderont à être remobilisés et pourraient se stabiliser.

3.2.1.2 Compilation des résultats sur l'ensemble des sections

Les résultats sur l'ensemble des sections sont résumés sur les Figure 17 et Figure 18 ci-dessous pour :

- La chronique complète 2005-2023 ;
- La période de calme hydrologique 2005-2010.

Les fourchettes de valeurs affichées pour chaque section correspondent aux résultats minimum et maximum obtenus avec les formules retenues, en éliminant celles qui ne sont pas adaptées sur la section.

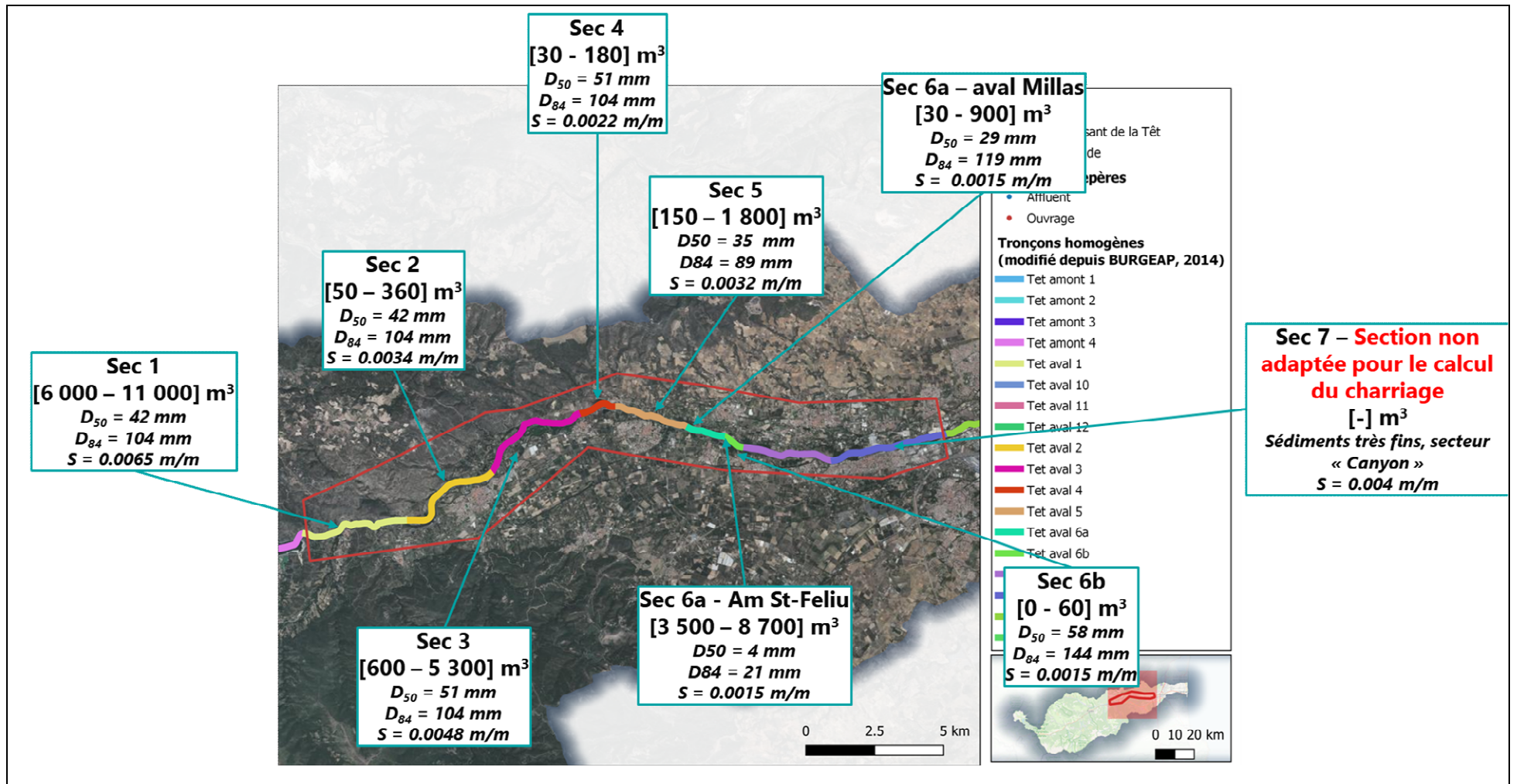


FIGURE 17 : CAPACITE DE TRANSPORT SOLIDE MOYEN ANNUEL SUR LA PERIODE 2005-2023 SUR LA TET

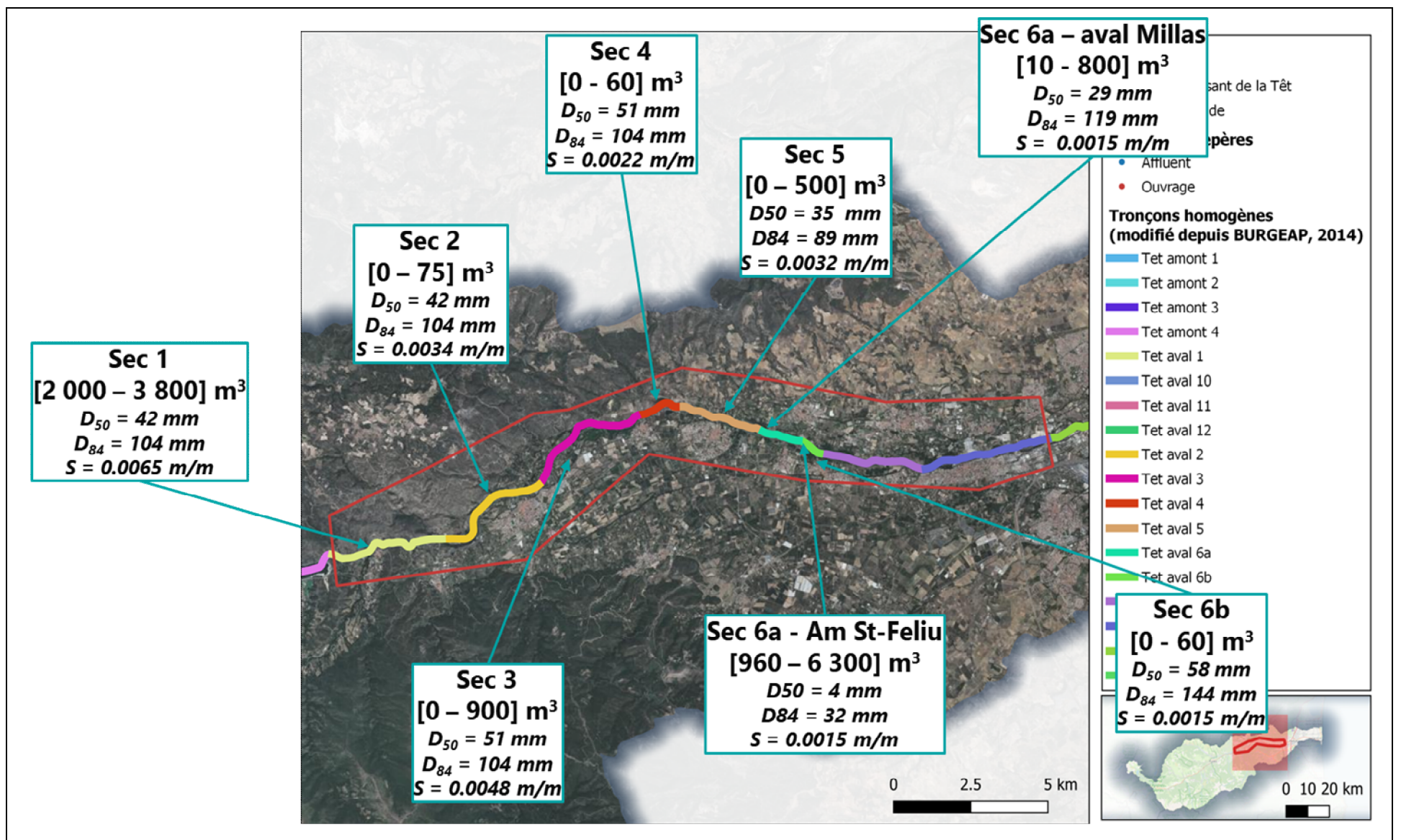


FIGURE 18 : CAPACITE DE TRANSPORT SOLIDE MOYEN ANNUEL SUR LA PERIODE 2005-2010 (CALME HYDROLOGIQUE) SUR LA TET

3.2.1.3 Bilan

Les valeurs affichées sur la Figure 17 montrent :

- Une capacité de transport solide correcte sur les sections 1 (de la sortie du barrage jusqu'à la sortie des gorges, au niveau de la fontaine St Jules) et 3 (de la déchetterie d'Ille sur Têt au passage à gué de Néfiach) ;
- Une faible capacité de transport sur les sections 2 (de la sortie des gorges à la déchetterie d'Ille sur Têt), 4 (du passage à gué de Néfiach au seuil de Millas) et 6b (du seuil de St Féliu d'Amont – base ULM à l'amont de la station d'épuration de St Feliu d'Aval correspondant au front d'incision généralisée).

La variation des valeurs entre la Figure 17 et la Figure 18 ci-dessous illustre bien que malgré les capacités de transport possibles d'une section, l'hydrologie reste indispensable à la mise en mouvement des sédiments.

Il se dégage de cette analyse annuelle :

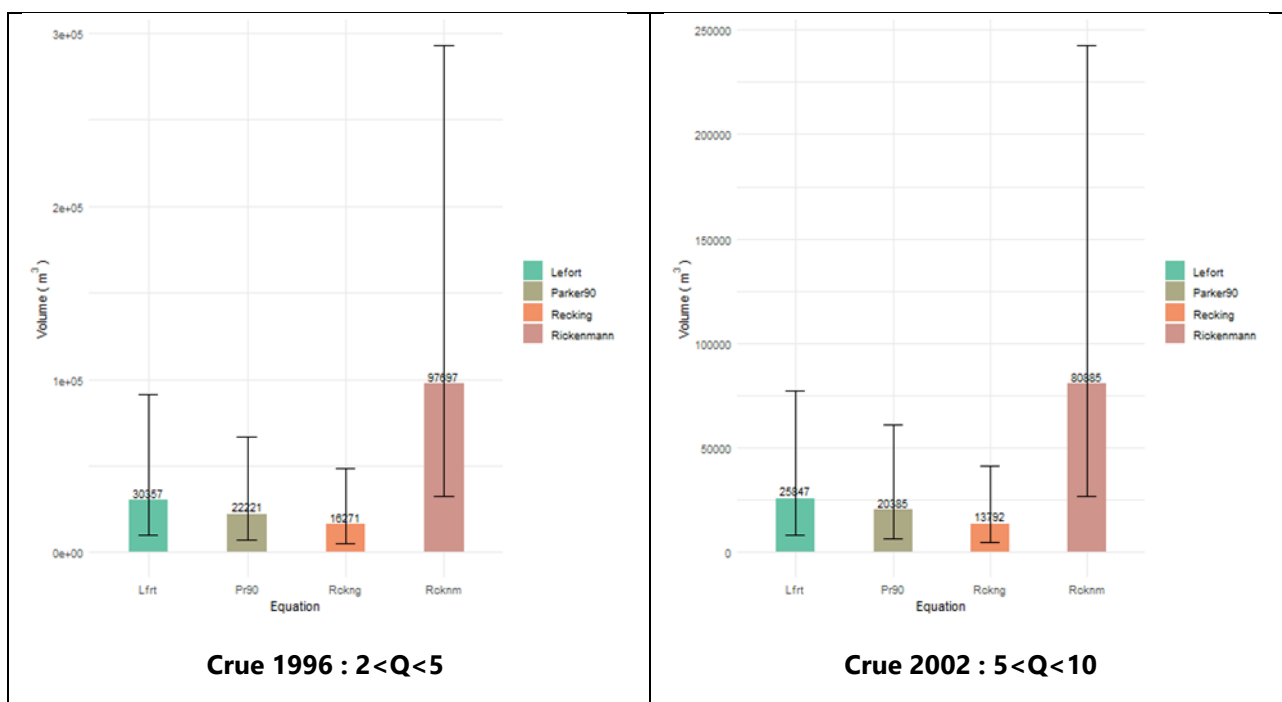
- **Une capacité de transport solide non négligeable sur les sections 1 et 3 ;**
- **Une capacité de transport plus réduite sur les sections 2, 4 et 6b.**

3.2.2 Transport solide évènementiel

De même, les calculs ont été effectués sur les évènements particuliers présentés dans le Tableau 6.

3.2.2.1 Exemple de résultats sur la section 1

Les capacités de transport solide ont été calculées sur l'ensemble des sections et les résultats sur la section 1 sont présentés sur la Figure 16 ci-dessous par évènement. Les résultats sur les autres sections sont présentés en Annexe 2.



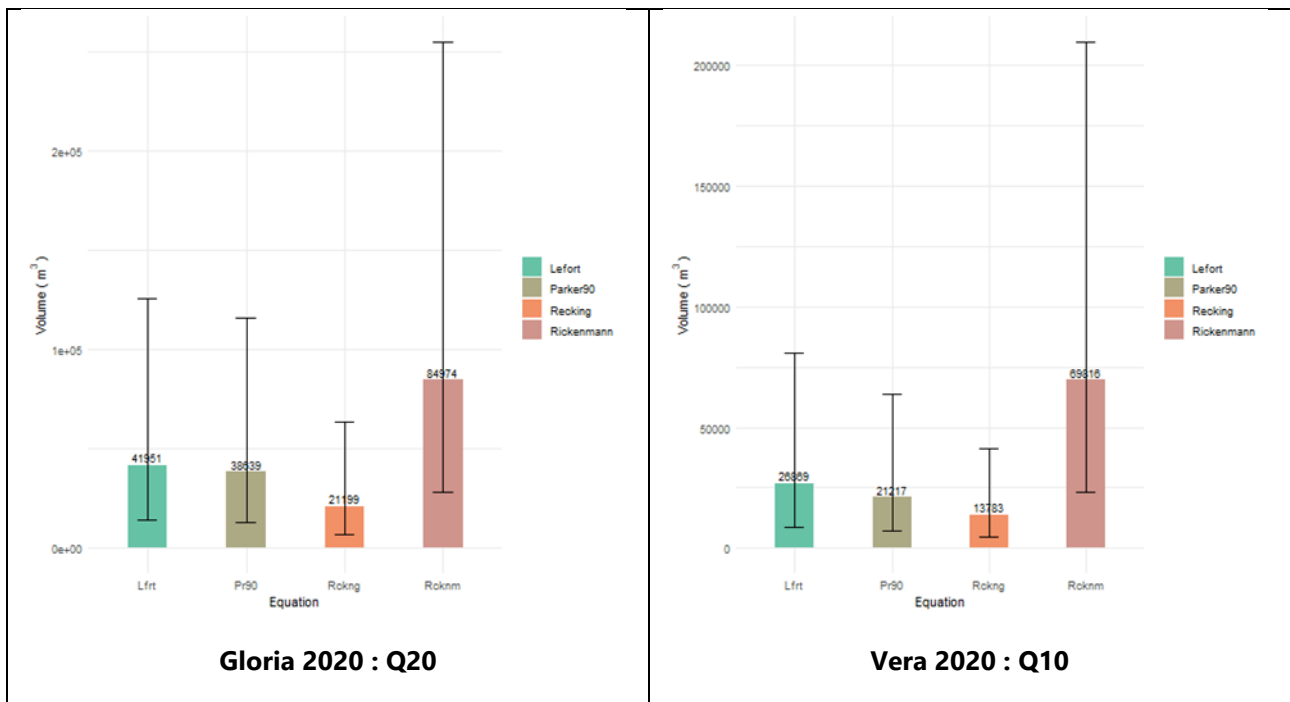


FIGURE 19 : VOLUMES SOLIDES ANNUELS TRANSPORTES SUR PLUSIEURS PERIODES SUR LA TET A VINCA

NB : Les barres d'incertitudes ont été définies de manière arbitraire : estimations empiriques /3 et *3 (Piton & Recking, 2017 ; Recking et al., 2012 ; Recking et al., 2013).

NB 2 : Finalement on questionne la pertinence de la formule de Rickenmann (1990) qui semble fournir des capacités de transport beaucoup trop importantes connaissant le contexte de la Têt. Pour la suite de l'analyse, les résultats obtenus avec cette formule sont exclus de l'intervalle d'incertitudes.

3.2.2.2 Compilation des résultats sur l'ensemble des sections

Les résultats sur l'ensemble des sections sont résumés sur les Figure 20 et Figure 21 ci-dessous pour :

- La tempête Gloria de 2020 (Q20) ;
- Une crue de 2022 ($5 < Q < 10$).

Les fourchettes de valeurs affichées pour chaque section correspondent aux résultats minimum et maximum obtenus avec les formules retenues, en éliminant celles qui ne sont pas adaptées sur la section.

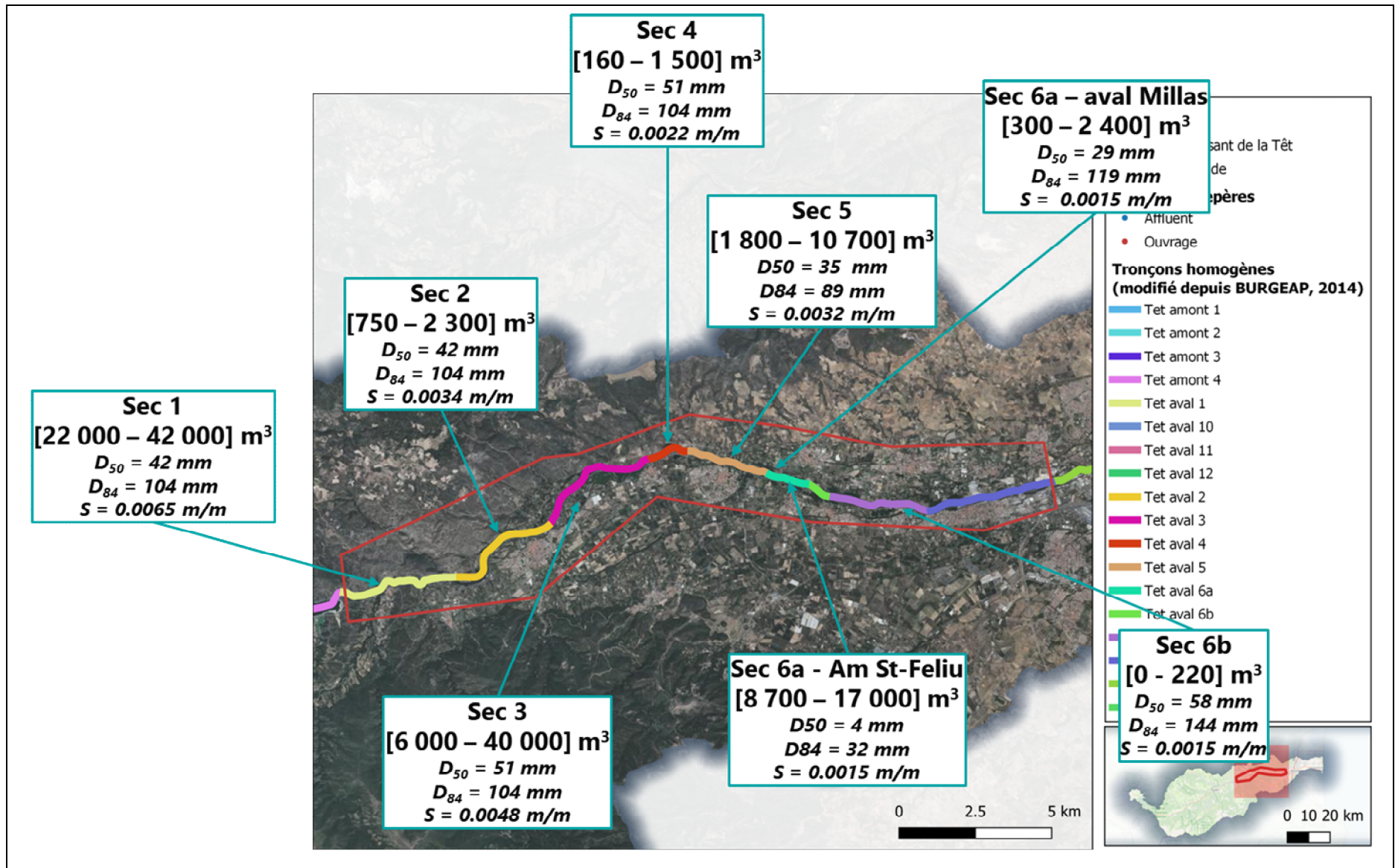


FIGURE 20 : CAPACITE DE TRANSPORT SOLIDE MOYEN ANNUEL DE LA TET SUR GLORIA (2020-Q20)

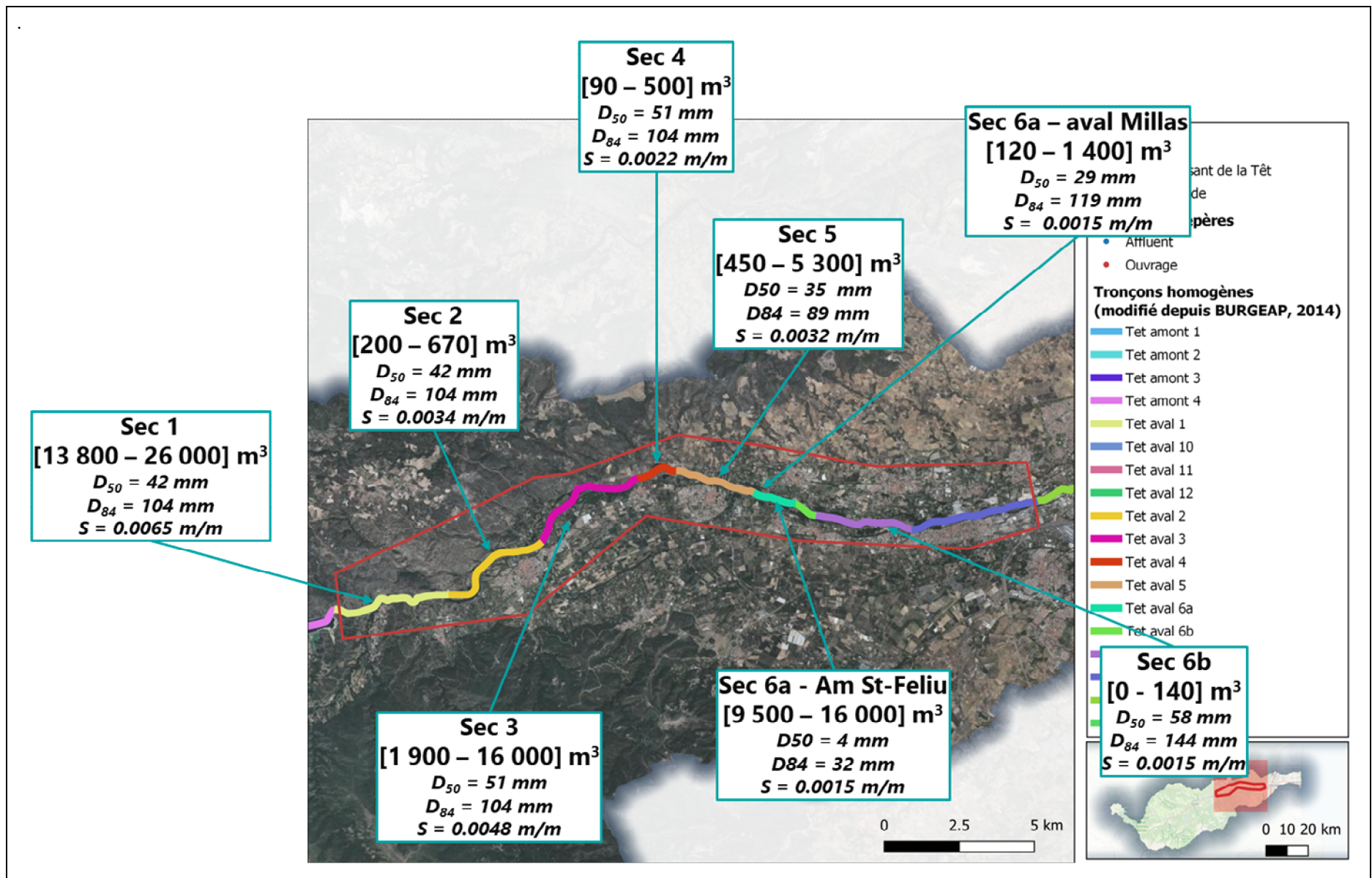


FIGURE 21 : CAPACITE DE TRANSPORT SOLIDE MOYEN ANNUEL DE LA TET SUR UNE CRUE DE 2002 (Q5-10)

3.2.2.3 Bilan

L'analyse évènementielle confirme les tendances illustrées dans les analyses annuelles moyennes sur l'alternance de zones à forte capacité de transport et de zones de régulation.

De plus, dès l'occurrence d'une crue de période de retour comprise entre 5 et 10 ans à Rodès, les capacités de transport moyennes annuelles sont fortement augmentées. Cependant, ces valeurs sont dépendantes de l'hydrogramme de la crue, de son intensité et de sa durée. Des crues de même période de retour peuvent donc mobiliser des quantités différentes sur un même secteur.

Enfin, les valeurs calculées pour la tempête Gloria montrent bien l'ampleur de cet évènement bien au-delà des valeurs annuelles moyennes sur l'ensemble de la période. Cependant, malgré l'étendue de cet évènement, les capacités de transport sur les sections 2 et 4 restent très modestes. Il s'agirait donc plutôt de zones dites de « régulation » du transport solide.

Comme pour les calculs annuels, il se dégage de cette analyse évènementielle :

- **Une capacité de transport solide non négligeable sur les sections 1 et 3 ;**
- **Une capacité de transport plus limitée sur les sections 2, 4 et 6b.**

3.3 Analyse des capacités de transport – état futur

3.3.1 Analyse des sédiments disponibles à Vinça

Les matériaux extraits en 2022 de la retenue de Vinça ont été séparés selon 3 fractions granulométriques (Figure 22) pour un total de 13 833 m³ :

- Les matériaux de taille inférieure à 1 cm, cette fraction représente 6 778 m³, soit 50% des matériaux disponibles ;
- Les matériaux de taille comprise entre 1 et 10 cm, cette fraction représente 2 832 m³, soit 20% des matériaux disponibles ;
- Les matériaux de taille supérieure à 10 cm, cette fraction représente 4 223 m³, soit 30% des matériaux disponibles.

Sur ces 13 833 m³ de matériaux, 890 m³ (1 800 tonnes) ont été réinjectés en mai 2022 sur le site 1, soit un stock restant de 12 943 m³. La fraction inférieure à 1 cm n'est toutefois plus disponible. Cette dernière a été revalorisée par le carrier. Il ne reste donc plus que 6 156 m³ qui peuvent être réinjectés dans la Têt.

Des granulométries selon le protocole de Wolman ont été relevées par le SMTBV, le Conseil départemental (CD66) et le RTM sur ces matériaux extraits mais sans prendre en considération les gros blocs. Ces différentes granulométries ont été assemblées afin de reconstituer une courbe granulométrique toutes fractions confondues. Les caractéristiques de cette granulométrie toutes fractions confondues sont les suivantes :

- D50 = 7.4 mm correspondant au diamètre médian ;
- D84 = 71.4 mm.

NB : A l'avenir, il sera important de réaliser les relevés granulométriques sur les matériaux bruts, non remaniés et triés, et de prendre en considération toutes les gammes de taille.

NB2 : Le D50, diamètre médian (diamètre pour lequel 50% des matériaux ont des diamètres plus faibles), est différent du Dm, diamètre moyen (valeur moyenne de tous les matériaux disponibles).



FIGURE 22 : FRACTIONS DE MATERIAUX DISPONIBLES SUR LA PLATEFORME DE VINÇA

3.3.2 Analyse du transport solide annuel et évènementiel – état futur

Un état futur après réinjection de la courbe granulométrique de Vinça sur l'ensemble des sections a été imaginé afin de visualiser l'impact de cette nouvelle granulométrie sur les volumes transportés. Les évolutions sont présentées pour les sections 1 et 2 sur la Figure 23 ci-dessous, pour :

- La période hydrologique complète 2005-2023 ;
- L'évènement exceptionnel Gloria 2020.

Il est nécessaire de préciser que les calculs considèrent que la totalité du stock (13 833 m³), sans criblage préalable a été réinjecté. Ce stock n'est plus disponible aujourd'hui mais cette analyse permet d'avoir une idée de l'évolution potentielle du cours d'eau si un nouveau volume identique venait à se former en amont du barrage et réinjecté par la suite dans la Têt.

Les graphiques de la Figure 23 illustrent bien une augmentation des volumes transportés en utilisant la courbe granulométrique des matériaux de Vinça. La réinjection de ces matériaux serait donc bénéfique à la dynamique sédimentaire du cours d'eau au vu de l'augmentation des capacités de transport observée. Les résultats sont similaires sur les autres sections et sont présentés en Annexe 3.

Il est toutefois nécessaire de noter que ces calculs supposent que les matériaux sont réinjectés de manière à remplacer la granulométrie actuelle de chaque tronçon, sur l'ensemble du tronçon, supposé géomorphologiquement homogène par le modèle. Cela afin de voir les évolutions de comportement des sections suite à la réinjection. **Il s'agit donc d'une situation fictive, correspondant à la situation idéale envisagée pour chaque tronçon.** L'objectif de cet exercice est surtout d'identifier les sections en mesure de transporter efficacement les matériaux injectés afin que ces derniers ne soient pas « perdus » sur le court-moyen terme. Sans surprises, c'est de nouveau les sections 2, 4 et 6b qui possèdent les plus faibles capacités de transport.

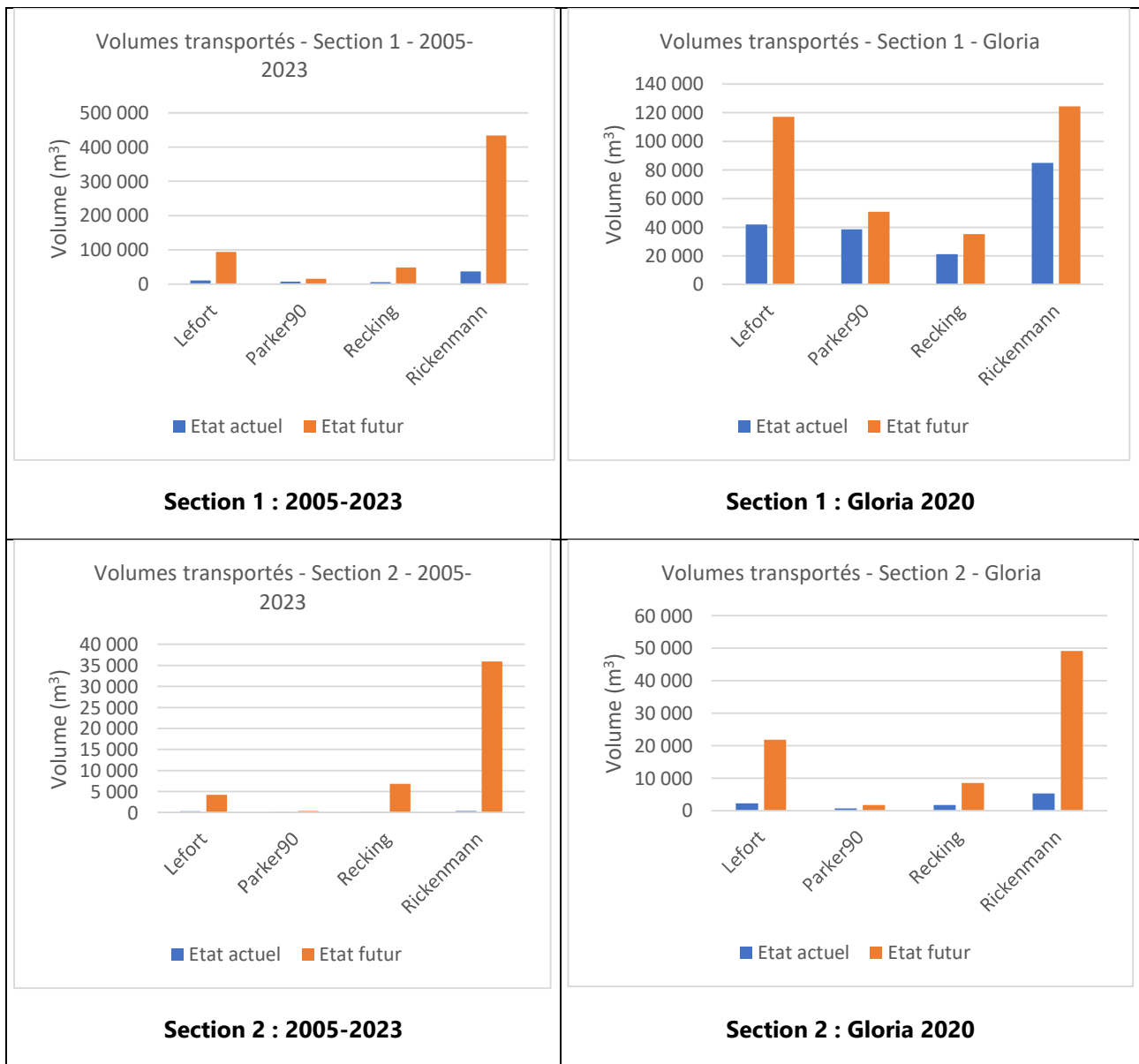


FIGURE 23 : EVOLUTION DES VOLUMES SOLIDES ANNUELS TRANSPORTES EN ETAT FUTUR

3.3.3 Granulométrie transportée

L'outil BedLoadWeb permet aussi d'étudier la fraction de granulométrie transportée sur une section pour un débit donné. La granulométrie transportée est calculée avec 3 formules :

- Wilcock and Crowe : formule calée sur des données de laboratoire, transport partiel sans pavage ;
- Parker : il s'agit d'une formule de calcul fractionné, qui consiste à calculer un flux solide non pas pour un diamètre unique représentatif, mais pour toutes les classes granulométriques en présence ;
- GTM : il s'agit d'un modèle qui étend le concept de début de transport à toute la classe granulométrique présente sur le lit du cours d'eau (Recking, 2016).

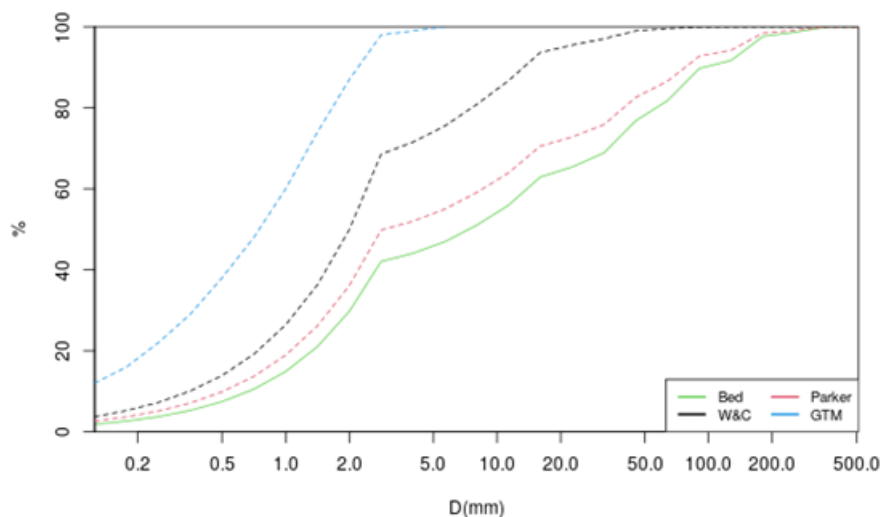


FIGURE 24 : PRESENTATION DES FORMULES DE CALCUL DE GRANULOMETRIE TRANSPORTEE

La formule GTM est souvent plus pessimiste et plus proche de la réalité du terrain car elle est calée sur les résultats de nombreuses campagnes de terrain. Elle sera donc principalement conservée pour les analyses poussées sur la granulométrie transportée par tronçons homogènes sur la Têt.

Ces calculs sont appliqués sur chacune des sections étudiées pour lesquelles la granulométrie relevée sur la plateforme de Vinça, toutes fractions confondues, est attribuée pour les calculs des capacités de transport. Cela permet de modéliser un état post-réinjection des matériaux disponibles et d'estimer les capacités de transport de chaque section pour plusieurs tranches de débits. Les débits retenus sont issus de l'analyse de la station hydrométrique de Rodès et sont résumés sur le Tableau 7 ci-dessous.

TABEAU 7 : DEBITS RETENUS POUR L'ANALYSE DE LA GRANULOMETRIE TRANSPORTEE

Période de retour	Valeur (m ³ /s)
Module	8
Q1 (valeur dépassée 10jours/an)	28
Q2	157
Qmax réservé du barrage	175
Q5	286
Q10	371
Q20	453
Q max obtenu depuis dernière réinjection (mai 2022)	19

Les résultats des fractions de granulométriques transportées sont représentés sur les graphiques suivants pour les sections 1 et 2. Les courbes sur les autres sections sont présentées en Annexe 6. La courbe noire représente systématiquement la courbe granulométrique complète des matériaux de Vinça. Plus les autres courbes se rapprochent de celle-ci, plus les matériaux transportés sont identiques. Pour les courbes les plus éloignées, seule la plus petite fraction de matériaux est transportée, la valeur de diamètre atteinte pour 100% indiquant le diamètre maximal pouvant être transporté sur cette section pour ce débit.

■ Section 1 : de la sortie du barrage jusqu'à la sortie des gorges, au niveau de la fontaine St Jules

Sur la section 1, la Figure 25 représente les granulométries transportées pour les débits présentés dans le Tableau 7. Dès la crue biennale, la grande majorité de la granulométrie de Vinça est transportée. Si cette granulométrie est réinjectée sur la section 1, il suffirait d'une crue biennale pour permettre de remettre en

mouvement ces matériaux. Le diamètre maximal mobilisable pour un débit biennal sur la section 1 est de 256 mm.

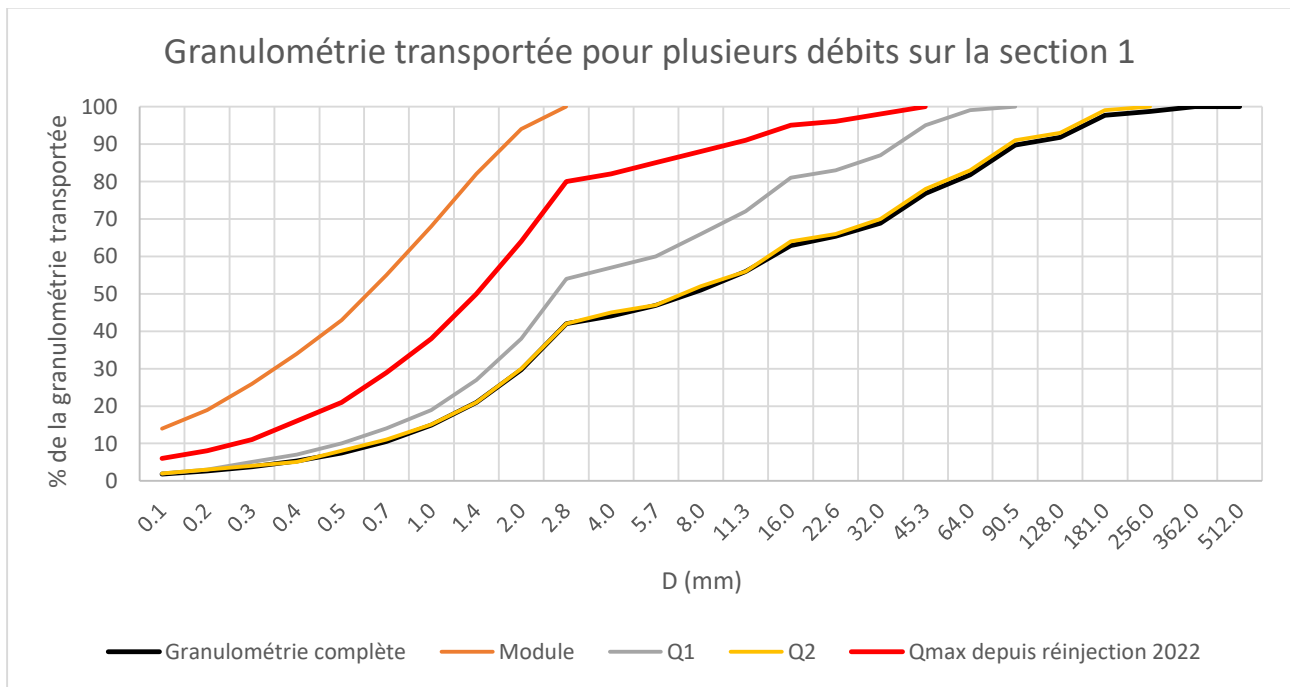


FIGURE 25 : GRANULOMETRIE TRANSPORTEE POUR PLUSIEURS DEBITS SUR LA SECTION 1

■ Section 2 : de la sortie des gorges à la déchetterie d'Ille sur Têt

Sur la section 2, la Figure 26 représente les granulométries transportées pour les débits présentés dans le Tableau 7. Contrairement à la section 1, sur la section 2 il faudra atteindre une crue vicennale afin de transporter une grande partie de la granulométrie de Vinça. Même pour le débit Q20 les matériaux les plus volumineux ne seront pas remobilisés sur cette section. Le diamètre maximal mobilisable pour un débit vicennal sur la section 2 est de 90 mm et uniquement de 11 mm pour un débit biennal. La granulométrie réinjectée sur la section 2 nécessitera une forte crue avant d'être entièrement remobilisée. Cela confirme donc bien le fait qu'il s'agit d'une zone de régulation du transport solide.

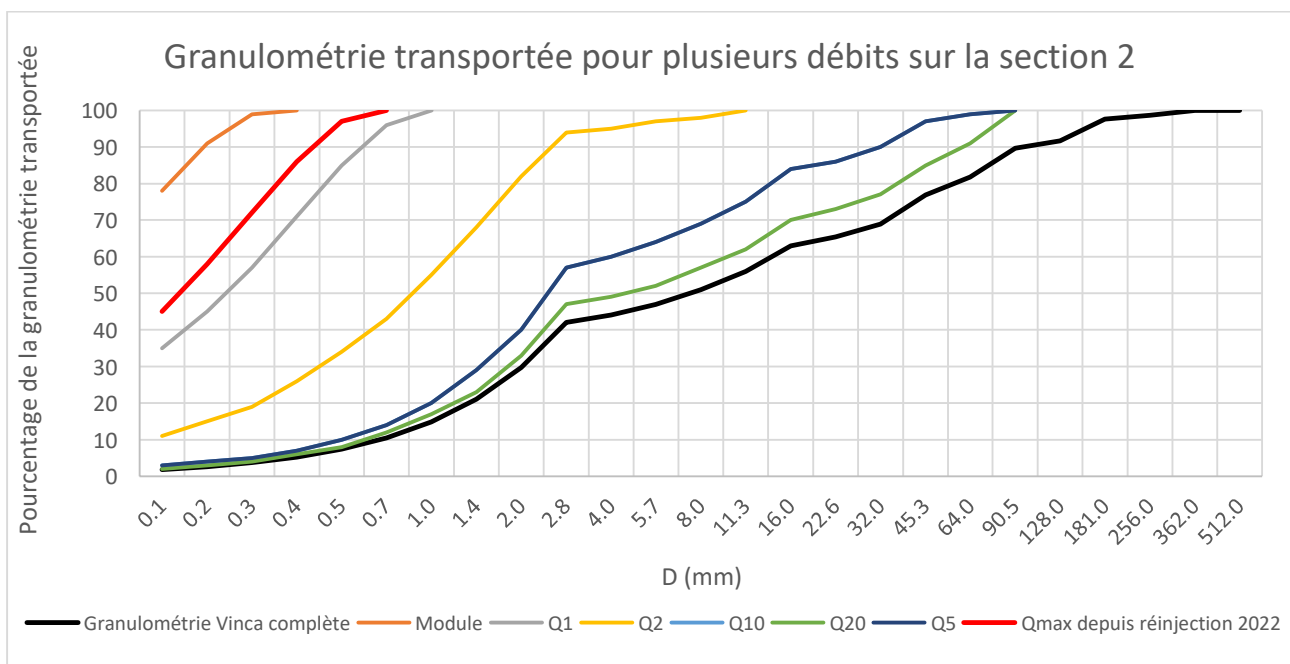


FIGURE 26 : GRANULOMETRIE TRANSPORTEE POUR PLUSIEURS DEBITS SUR LA SECTION 2

■ Les capacités de transport des matériaux de la plateforme de Vinça sont reportées pour chaque section sur la figure ci-dessous.

Capacités de transport par sections : analyses des granulométries transportées

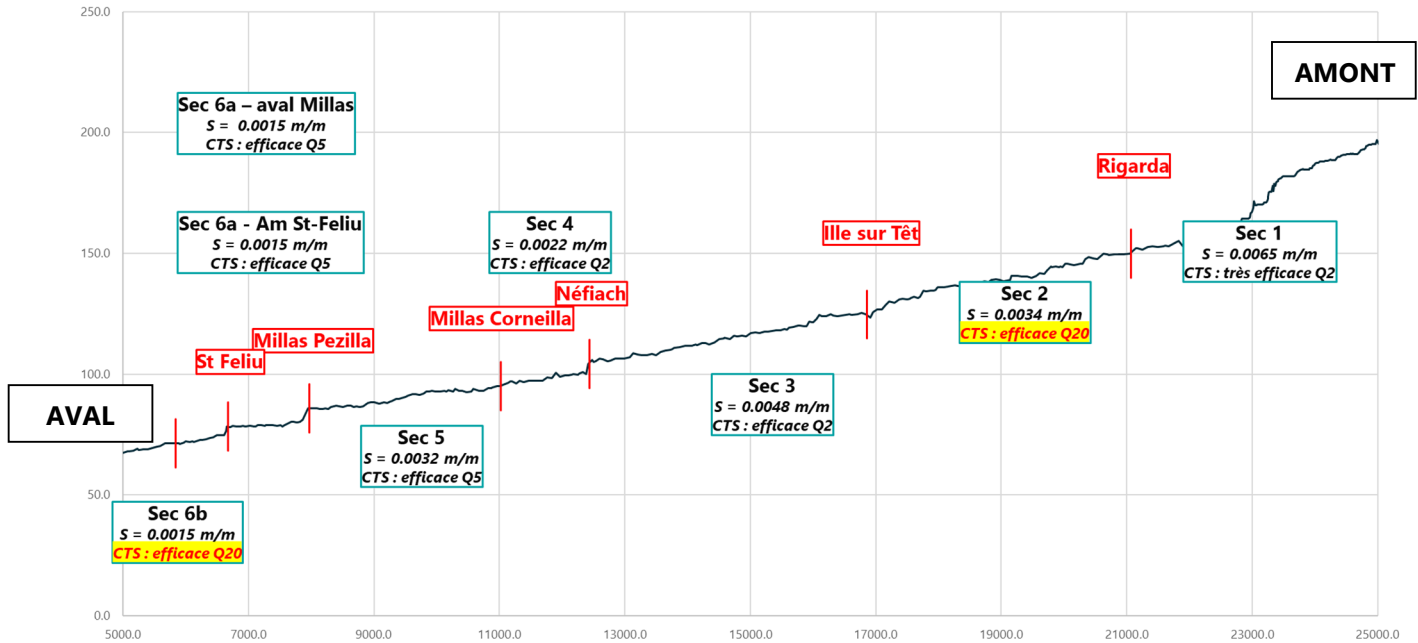


FIGURE 27 : CAPACITES DE TRANSPORT PAR SECTION : ANALYSE DES GRANULOMETRIES TRANSPORTEES. L'ACRONYME CTS DESIGNE « CAPACITE DE TRANSPORT SOLIDE »

Le Tableau 8 ci-dessous liste les diamètres maximaux pouvant être transportés sur chaque section pour les différentes valeurs de débit. Les valeurs de diamètres transportés sont plafonnées sur les sections 1 et 3 par la courbe granulométrique ayant été reconstituée à partir des relevés effectués sur les matériaux de Vinça. Or les relevés granulométriques n'ont pas considéré les gros blocs (jusqu'à 1.5 m environ) qui ne sont malheureusement pas représentés par la courbe granulométrique. Le diamètre maximal des matériaux échantillonnés est de 512 mm (D100) pour un D95 de 157 mm.

TABEAU 8 : ANALYSE DES GRANULOMETRIES TRANSPORTEES

Section	Crue	Diamètre maximal transporté (mm)
1	Q2 – Q20	145
2	Q20	75
3	Q2	60
	Q20	145
4	Q2	73
	Q20	81
5	Q5	68
	Q20	90
6a	Q5	73
	Q20	103
6b	Q20	27

NB : Les diamètres maximaux reportés ci-dessus correspondent aux diamètres D95 transportés correspondant au diamètre maximal pouvant être transporté.

Le Tableau 9 ci-dessous récapitule les diamètres maximaux pouvant être transportés pour la valeur de débit réservé maximale du barrage soit 175 m³/s.

TABLEAU 9 : ANALYSE DES GRANULOMETRIES TRANSPORTEES POUR LE DEBIT MAXIMAL RESERVE EN SORTIE DE BARRAGE

Section	Crue	Diamètre maximal transporté (mm)
1	Q réservé barrage (175 m ³ /s)	145
2		6
3		68
4		75
5		12
6a		19 - 27
6b		3

NB : Les valeurs de diamètres transportés sont plafonnées sur la section 1 par la courbe granulométrique ayant été reconstituée à partir des relevés effectués sur les matériaux de Vinça (non prise en compte des gros blocs). La section 1 aurait éventuellement transporter de plus gros matériaux pour ce débit.

Une courbe granulométrique constituée de matériaux grossiers essentiellement, a été construite **théoriquement** et appliquée à la section 1 afin d'identifier sa capacité à transporter des matériaux grossiers, de diamètres supérieurs à 157mm. La section 1 semble en effet pouvoir déplacer des matériaux plus grossiers que ceux représentés par la courbe granulométrique issue des échantillonnages effectués sur les matériaux de la plateforme de Vinça.

Cette hypothèse devra toutefois être validée par une campagne d'échantillonnages granulométriques sur le terrain effectuée sur les matériaux bruts excavés, sans qu'ils ne soient passés par l'étape du tri. Les gros blocs seront donc directement intégrés à la courbe granulométrique. La courbe granulométrique théorique est représentée sur la Figure 28 ci-dessous. Les diamètres caractéristiques de cette courbe sont :

TABLEAU 10 : DIAMETRES CARACTERISTIQUES THEORIQUES GROSSIERS

Diamètre	Courbe théorique grossière (mm)	Courbe réelle (mm)
D50	100	7
D84	253	71
D90	512	95
D100	1 448	512

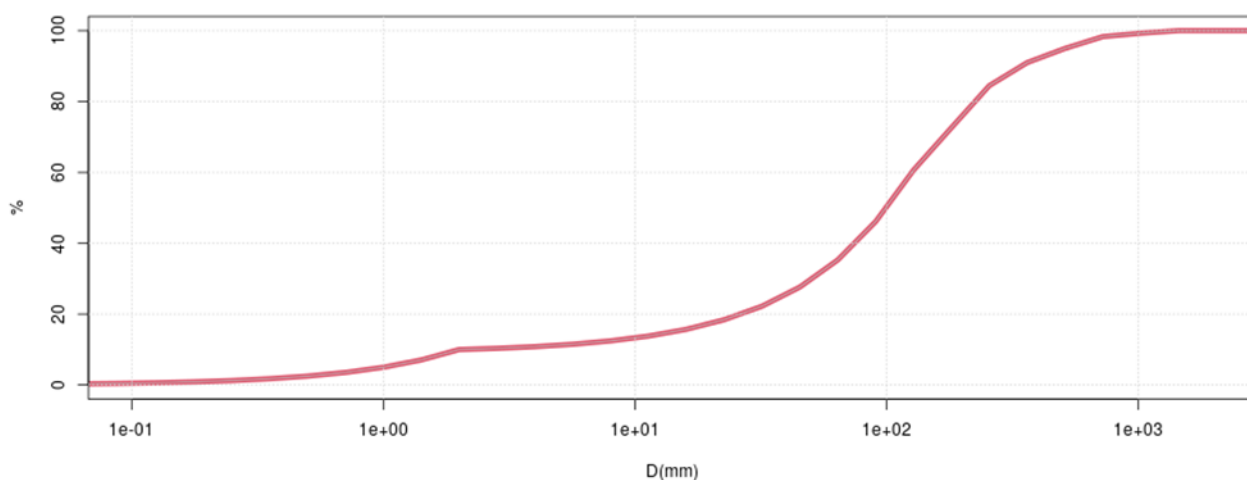


FIGURE 28 : COURBE GRANULOMETRIQUE GROSSIERE THEORIQUE

Les diamètres maximaux transportés sur la section 1 sont alors théoriquement de 167 mm dès la crue quinquennale et jusqu'à 256 mm pour la crue vicennale, illustrant bien la capacité de la section 1 à transporter une fraction plus grossière que celles représentées dans la granulométrie initiale.

NB : D'après les retours d'expérience et les analyses de cette étude, il est possible de réinjecter toute la fraction (gros blocs inclus) extraite des seuils d'arrêt des matériaux à l'aval immédiat du barrage (secteur 1). En effet :

- Les gros blocs serviront à stabiliser le lit et à empêcher un départ massif des diamètres plus faibles en cas de très gros coups d'eau ;
- Ils font partie du lit amont dans les mêmes proportions que ce qui a été extrait. Si le barrage était transparent, ils se retrouveraient en aval dans ces mêmes proportions. A titre de comparaison, ces matériaux ne proviennent pas d'une carrière et ne nécessitent donc pas une réflexion afin d'aboutir à une proportion adaptée au cours d'eau localement ;
- D'après les observations réalisées sur la plateforme, ils représentent une portion de l'extraction et pas la majorité.

3.4 Conclusion

Les différentes analyses effectuées tendent à montrer l'alternance de zones propices aux réinjections (avec des capacités de transport solide correctes) avec des zones de dépôt (avec des capacités de transport solide plus faibles). Ces zones sont illustrées sur la Figure 30. La zone 2 notamment présente les caractéristiques d'une zone de dépôt/régulation du transport solide : blocage de la charge solide avant reprise ultérieure des matériaux, faisant office de « zone d'attente ». Ces zones ne sont pas pénalisantes mais limiteront l'impact à moyen terme d'une réinjection focalisée uniquement sur la section 1. Si l'objectif est d'intervenir efficacement sur les poches d'incisions localisées plus en aval, une action concentrée uniquement sur la section 1 ne sera pas la plus efficace. Les secteurs d'incision et de dépôt sont rappelés sur la Figure 29 ci-dessous. Des actions complémentaires peuvent être envisagées sur les sections plus en aval, notamment les sections 2 et 3, avec potentiellement des possibilités :

- De réinjections complémentaires plus en aval, sur le secteur 3 ;
- De remobilisation des bancs perchés déconnectés de la dynamique du cours d'eau sur des secteurs plus en aval. Cette méthode est expliquée au chapitre 4.3 avec une approche simplifiée de quantification des volumes mobilisables par section.

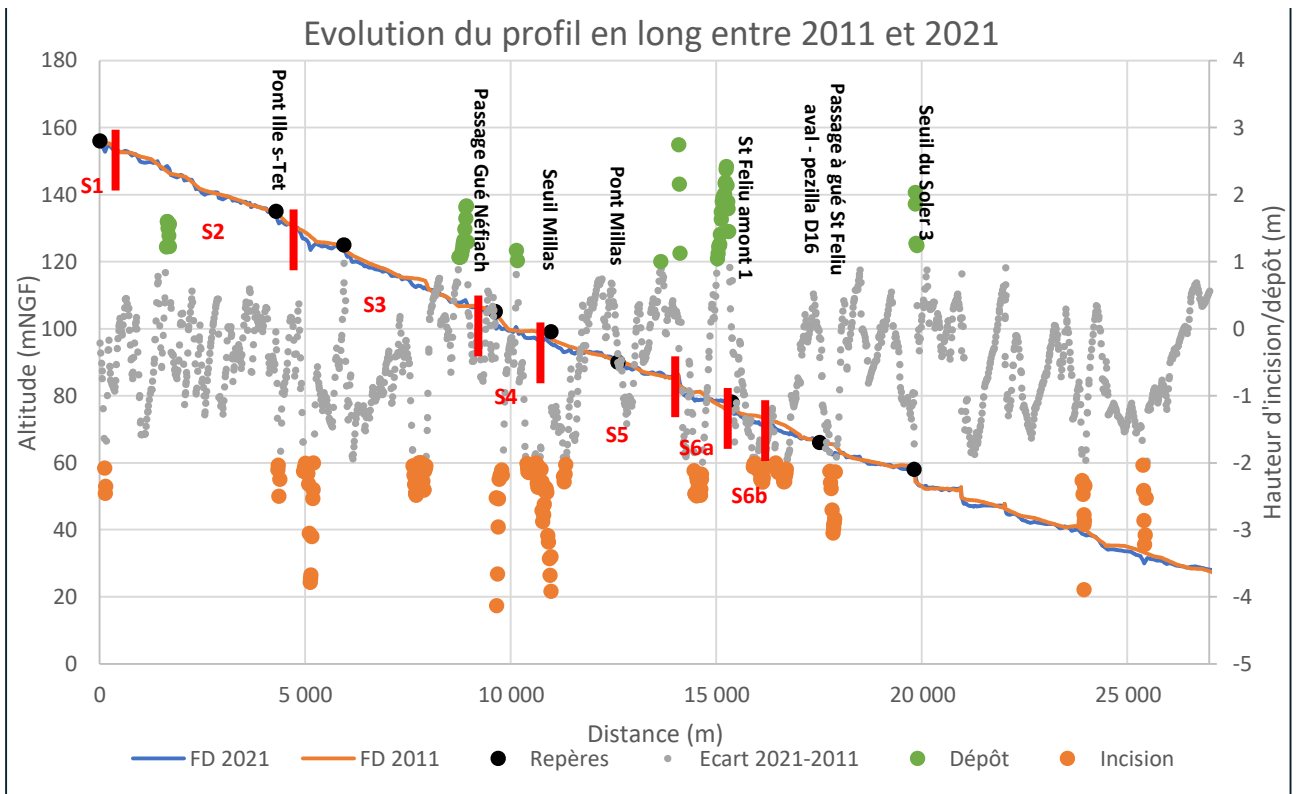


FIGURE 29 : LOCALISATION DES SECTEURS D'INCISION ET DE DEPOT

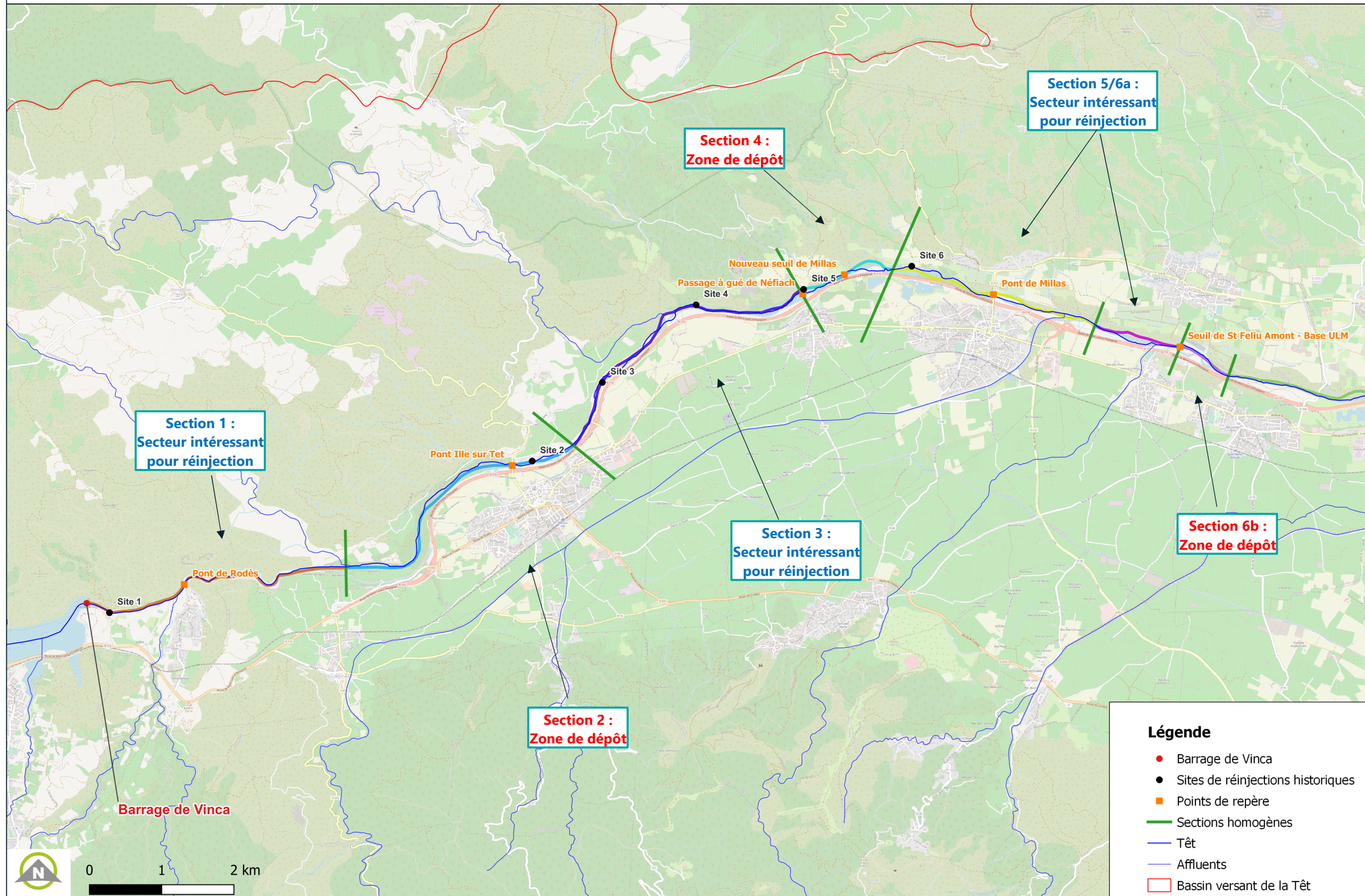


FIGURE 30 : ANALYSE DES SECTEURS PERTINENTS POUR LES REINJECTIONS

4 PROPOSITION DE SECTEURS DE REINJECTION

4.1 Retours d'expériences

Le transport sédimentaire étant une discipline entachée de nombreuses incertitudes, il est utile de s'appuyer sur les retours d'expériences de chantiers existants. Des informations ont été recueillies sur les cours d'eau suivants :

- Le Buëch : réinjection en aval du barrage de Saint-Sauveur (2016) ;
- Le Drac : reconquête des espaces de bon fonctionnement et réinjection massive de sédiments (2013-2014) ;
- Le Rhin : réinjections en aval du barrage de Kembs en Suisse (2010-2015-2016).

4.1.1 Le cas du Buëch

Sources : EDF/Agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse/SMIGIBA (2018) + G.Brousse (2022)

Le barrage de Saint-Sauveur sur le Buëch a été construit entre 1990 et 1991 et mis en service en 1992 pour la production d'énergie hydroélectrique, et à des fins d'irrigation agricole. En crue, l'ouvrage fait l'objet d'une gestion en transparence depuis sa construction afin de limiter au maximum les dépôts de sédiments dans la retenue. Malgré sa mise en transparence, le barrage a eu un impact sur le transit des matériaux alluviaux. Aujourd'hui, la queue de retenue présente un exhaussement des fonds alors qu'un déficit de matériaux est constaté en aval du barrage. Une opération expérimentale « d'ampleur raisonnable et efficace » a été validée avec la réalisation d'un curage mécanisé, localisé au niveau de la queue de retenue du barrage et un re-dépôt de matériaux à l'aval immédiat. Cette opération vient en complément de la modification de la consigne de crue qui vise à améliorer la transparence de l'ouvrage et limiter les dépôts en amont.

Les objectifs de cette opération sont :

- Recharger le lit en déficit sédimentaire à l'aval du barrage de Saint-Sauveur ;
- Mettre en place un suivi d'efficacité après travaux pour évaluer l'amélioration du fonctionnement de la rivière.

Le curage de 43 500 m³ de matériaux grossiers (dm=27-38mm) dans la queue de barrage a été réalisé et les matériaux ont été réinjectés dans le secteur déficitaire en aval du barrage. Les matériaux ont été déposés :

- En rive gauche sous forme de banc avec la présence d'une tranchée médiane : 31 000 m³ ;
- En rive droite en cordon de faible hauteur qui sera immergé lors de la crue de 2016 (Figure 31) : 12 500 m³.

Le transport solide moyen sur le Buëch est estimé à environ 60 000 m³/an.



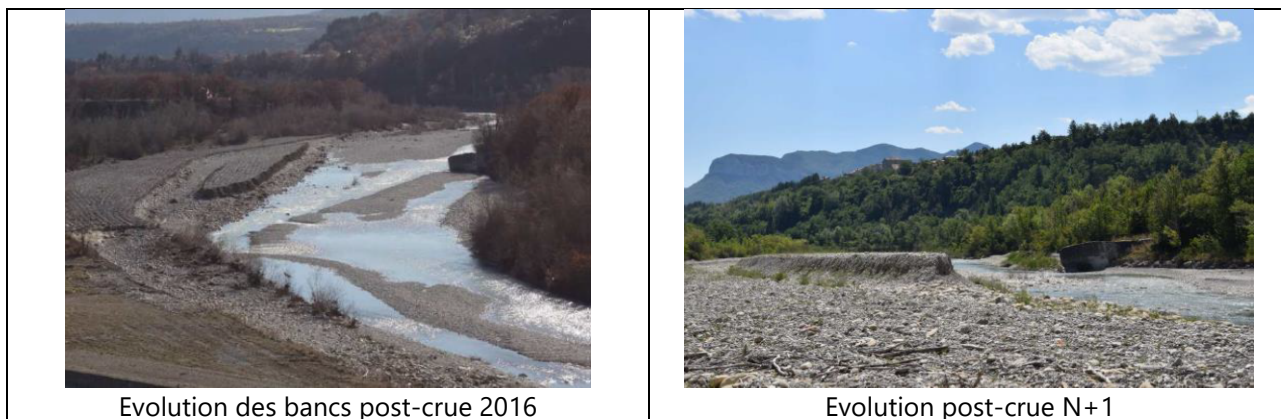


FIGURE 31 : RETOUR D'EXPERIENCE SUR LES REINJECTIONS DU BUECH

Les coûts sont donnés à titre indicatif :

- Travaux : 441 747 € (HT) pour 8 semaines ;
- Suivis : 204 000 € (HT) pour 5 ans (2017-2021).

Des suivis complémentaires (thèse en partenariat avec l'Université Paris 7, l'IRSTEA et l'AFB) à l'initiative et pris en charge par EDF, ont été réalisés jusqu'en 2019 pour un montant de l'ordre de 150 000 €.

Les suivis mis en place sur une période de 5 ans (2017-2021) sont les suivants :

- Suivi morphologique : topographie Lidar et photogrammétrie aérienne, évolution des habitats aquatiques, granulométrie, pavage, affleurement, distance de transport, seuil de mise en mouvement, taux d'érosion des remblais, accumulation de déblais, analyse de la reprise de végétation du lit ;
- Pit-Tags actifs : distance de migration des matériaux (taux de retour de 60%) ;
- Suivi hydro-biologique : pêches inventaires, frayères barbeau et truite, écrevisses, invertébrés, faune/flore terrestre.

En conclusion, la réinjection s'est déjà avérée efficace, une grande partie des matériaux a déjà été remobilisée. 48% du volume réinjecté a été emporté au cours de la première crue.

Le principal retour d'expérience de cette opération pouvant servir à notre étude concerne surtout la manière dont les matériaux ont été réinjectés pour faciliter leur recrutement par le cours d'eau. Les gestionnaires ont constaté que le cours d'eau a plus facilement réussi à mobiliser les matériaux disposés sous forme de banc sédimentaire allongé et de faible hauteur plutôt que ceux du banc sédimentaire de hauteur et de largeur plus importante. Aussi, si l'objectif est de mobiliser rapidement les matériaux réinjectés dans le lit de la Têt, il faudrait dans un premier temps revoir leur disposition dans le cours d'eau (actuellement perchés sur la berge) afin de faciliter leur mobilisation.

4.1.2 Le cas du Drac

Source : Association Rivière Rhône Alpes Auvergne (2017)

Le Drac présente un phénomène d'incision important, conséquence notamment de plusieurs décennies d'extractions de matériaux à l'image de plusieurs cours d'eau français. Sur un linéaire de 4 km, il est prévu une réinjection massive de sédiments afin de restaurer progressivement un style fluvial en tresses ainsi qu'un élargissement de la bande active. Sur ce secteur, l'abaissement du niveau du lit est de 2 à 4 m par rapport au niveau historique de 1913. La restauration de la Têt s'apparentera à cette opération.

Les objectifs sont :

- La recharge du lit afin de rehausser le profil en long à hauteur de celui de 1913 (l'hypothèse a été revue à la baisse par manque de disponibilité des matériaux) et de rendre localement au cours d'eau une pente de 1% ;

- La restauration d'une bande active minimale de 80 m (situation non perturbée de 1952).

Les matériaux utilisés sont issus :

- Des déblais des terrasses alluviales (288 000 m³) ;
- D'apports externes transportés par camions (48 000 m³).

Le chantier a été suivi de deux crues morphogènes en 2014 et 2015 (Q2 et Q3) permettant de visualiser rapidement des ajustements conséquents.

Des bilans sédimentaires ont été réalisés en 2014-2015 et 2015-2016. La faible contribution des apports amont ne permet pas aux volumes déposés de compenser les volumes érodés (- 30 000 m³).

Les suivis mis en place, pour une durée de 10 ans, sont les suivants :

- Suivi hydrologique ;
- Suivi topographique et stock sédimentaire : levés LIDAR avant et après travaux suite à des crues morphogènes et MNT réalisé en 2014 après travaux ;
- Des survols aériens en ULM ;
- Suivi de la granulométrie, des faciès d'écoulement, des habitats aquatiques et des frayères, ainsi que l'injection de galets munis de puces RFID ;
- Suivi biologique de l'indice IBGN, des peuplements piscicoles et des inventaires faune/flore.



FIGURE 32 : RETOUR D'EXPERIENCE SUR LES REINJECTIONS DU DRAC

Plusieurs enseignements peuvent être tirés de ce projet :

- Les gestionnaires conseillent de ne pas trier les matériaux excavés, contrairement à ce qui est actuellement réalisés sur la Têt. Garder l'ensemble de la granulométrie disponible permet de consolider le lit et d'aider à la reconstitution de la nappe d'accompagnement (suivi piézométrique). Après la mise en eau, les matériaux les plus fins sont purgés en premier ce qui permet la formation naturelle d'une armure de surface ;
- Il est conseillé de bien expliquer et mettre en avant l'importante dégradation en cours de tout l'écosystème de la vallée causée par les dysfonctionnements géomorphologiques. Il est donc très important de bien qualifier l'état initial, avant réinjection. Même si l'impact immédiat des travaux prévus est loin d'être négligeable sur l'écologie des milieux, le résultat sera la restauration des conditions indispensables à la reconstitution d'une grande biodiversité à l'échéance de 5 à 10 ans. Des résultats

positifs apparaissent déjà à peine trois ans après travaux ce qui est plus rapide que ce qui a été prévu initialement ;

- L'intérêt d'adopter une philosophie de gestion adaptative : les cours d'eau sont tributaires de l'hydrologie. Il est donc nécessaire de s'adapter au cours d'eau et de corriger les mesures adoptées en fonction des observations post-travaux ;

- L'intérêt de considérer le déploiement d'un protocole de suivi scientifique afin d'évaluer l'impact des travaux.

4.1.3 Le cas du Rhin

Source : Chardon et. al (2021)

Cette étude analyse les réinjections ayant eu lieu sur un bras secondaire du vieux Rhin au droit du barrage de Kembs (Suisse). Le déficit sédimentaire sur cette section est d'environ 17 000 m³/an. Trois réinjections ont eu lieu sur cette zone :

- 23 000 m³ en 2010 ;
- 13 000 m³ en 2015 ;
- 30 000 m³ en 2016.

La réinjection de 2010 a été réalisée sur un banc dans un méandre concave séparé de la rive droite, les réinjections de 2015 et 2016 ont été réalisées dans un méandre convexe sur un banc connecté à la rive gauche et un banc séparé de 5 à 10m de la rive gauche. Les sédiments sont issus du lit majeur à proximité des sites de réinjections. La capacité de transport moyenne annuelle locale est d'environ 23 000 m³/an.

Les suivis ont été réalisés sur 7 ans avec :

- Suivis géomorphologique multi-compartiments :
 - o Traçage de la charge de fond (RFID – passifs) ;
 - o Suivi topo-bathymétrique ;
 - o Suivi granulométrique sur les bancs restants et sur les sections plus en aval (émergé et immergé) ;
- Suivis écologique (approche BACI) :
 - o Cartographie des habitats ;
 - o Relevés de végétation ;
 - o Suivis macro-invertébrés.

Les bancs ont été conçus pour être submersibles. Ils sont directement disposés dans le lit mouillé.

En conclusion, des traces d'érosion sont visibles dès la 1^{ère} crue ainsi que la diversification des habitats. Le taux de retour des Pit tag est d'environ 40%. Les bancs ont été érodés entre 6 et 55 %.

Les effets géomorphologiques sont tout de même limités et temporaires en absence d'apport sédimentaire local ou amont. En effet, le déficit en sédiments réapparaît après quelques années suite à l'absence d'apports amont.

Les protocoles d'utilisation des pit-tag sont très détaillés dans cette étude : nombre de traceurs par cluster, nombre de clusters, profils en travers, espacement, ..., et pourront servir de base de réflexion pour la mise en place de suivi sur la Têt.

4.1.4 Conclusion

En conclusion, les enseignements tirés de ces retours d'expérience sont les suivants :

- Réinjection d'un volume de matériaux proche de la capacité de transport moyenne annuelle du cours d'eau ;
- Réinjection de l'ensemble des classes granulométriques afin de reformer un matelas alluvial et de permettre le transport de gammes granulométriques différentes en fonction des crues (dès les crues communes). En effet, les matériaux fins seront transportés dès les premières crues et les matériaux grossiers auront pour vocation de protéger le lit ;
- Réinjection dans le fond du lit sous forme de bancs allongés, de hauteur relativement faible afin de permettre la submersion du banc dès les crues communes. En effet, la remobilisation sera facilitée si l'érosion a lieu par sapement en pied de banc et par charriage en surface de banc. Cela permet aussi de maximiser la reprise par des crues fréquentes et de limiter la fixation par la végétation ;
- Réinjection dans des zones favorables hydrauliquement afin de faciliter la remobilisation ;
- Privilégier si possible la création de plusieurs bancs en rive gauche et rive droite ;
- Privilégier si possible les réinjections en amont de portions de morphologies et de débits différents afin de favoriser la fragmentation du transport des matériaux et maximiser la diversification des habitats ;
- Envisager l'élargissement du chenal en aval des réinjections afin de diminuer les débits localement et favoriser les zones de dépôts ;
- Réaliser si possible un suivi RFID pour identifier la distance parcourue par les matériaux grossiers.

4.2 Analyse des sites de réinjections antérieurs et proposition de nouveaux sites

Des opérations de réinjection ont déjà été effectuées sur des sites identifiés par des études antérieures à la présente. Ces sites sont localisés sur la Figure 33 ci-dessous en fonction des sections homogènes. Suite aux conclusions résumées sur la Figure 30, il est possible de savoir si ces sites sont localisés dans une section propice à la réinjection (avec une capacité de transport solide permettant de remobiliser les matériaux injectés) ou dans une zone de dépôt (présentant une faible capacité de transport). Les sites localisés dans les zones de dépôt ont été éliminés pour la suite de l'étude car non propices aux réinjections : sites 2 et 5. Les sites dans les secteurs favorables aux réinjections (en rouge dans le Tableau 11 suivant) ont été analysés en termes d'intérêt et de facilité d'accès.

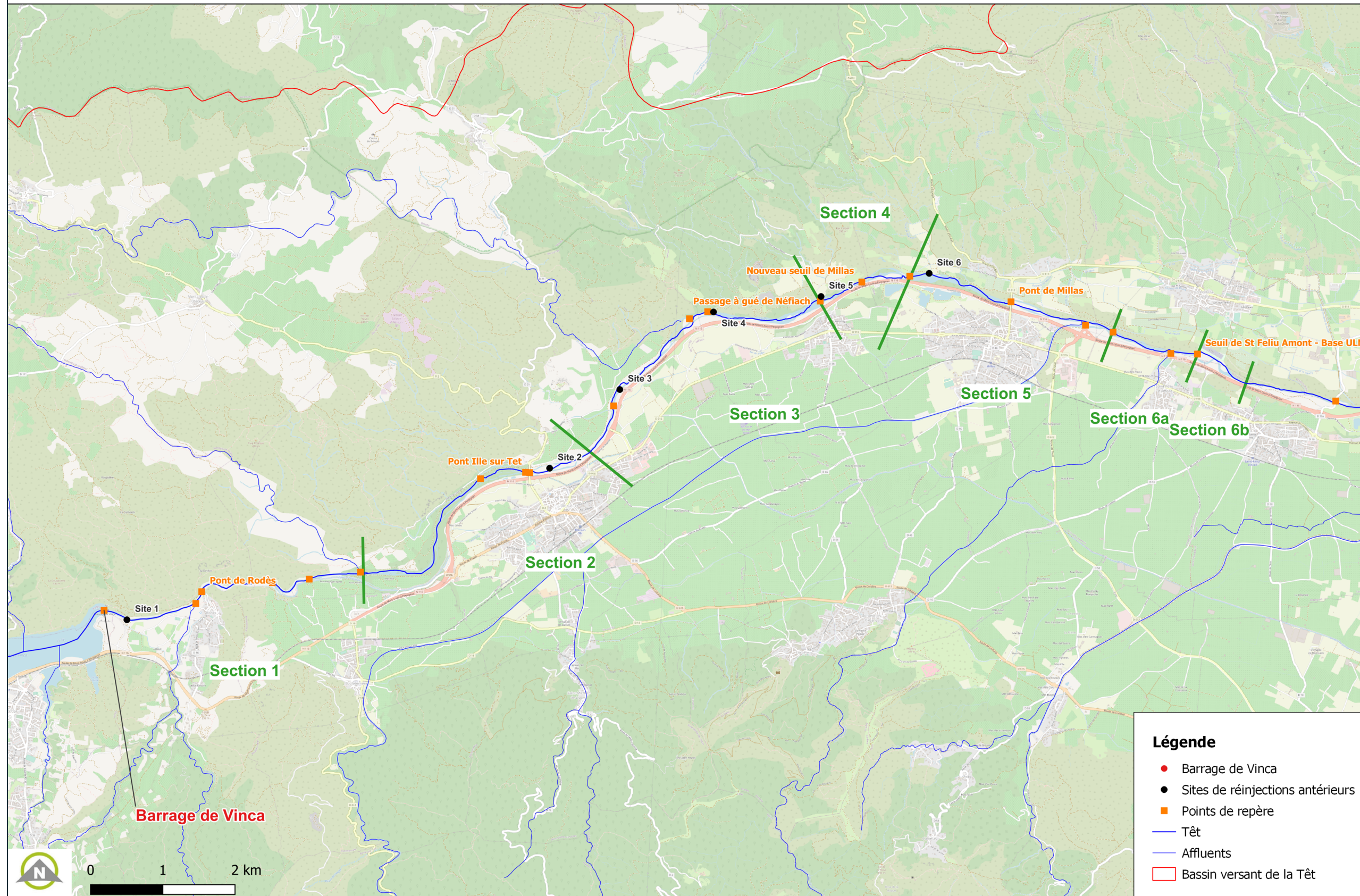


FIGURE 33 : LOCALISATION DES SITES DE REINJECTIONS ANTERIEURS

TABEAU 11 : RAPPEL DES VOLUMES REINJECTES PRECEDEMMENT

Réinjections	Site 1	Site 2 (Ille sur Têt)	Site 3	Site 4	Site 5 (aval Néfiach)	Site 6
2014					1 700 t	
2015					2 800 t	
2016					3 200 t	
2017		1 000 t		1 000 t		
2018				1 000 t	2 000 t	
2019						
2020						
2021						
2022	1 800 t					

Section 1
Section 2
Section 3
Section 4
Section 5

L'accès au lit pour des camions et engins de chantier semble relativement facile pour les sites 3, 4 et 6 (flèches rouges sur la Figure 34). De nombreux bancs de sédiments sont déjà présents au droit du site 3.

Le site 6 est situé très en aval. Réinjecter sur ce secteur impliquerait un bilan carbone plus élevé avec des trajets de camions plus longs et l'impact de l'opération sur le cours d'eau serait localisé déjà très en aval par rapport aux secteurs d'incisions majeurs localisés principalement en sections 2 et 3.

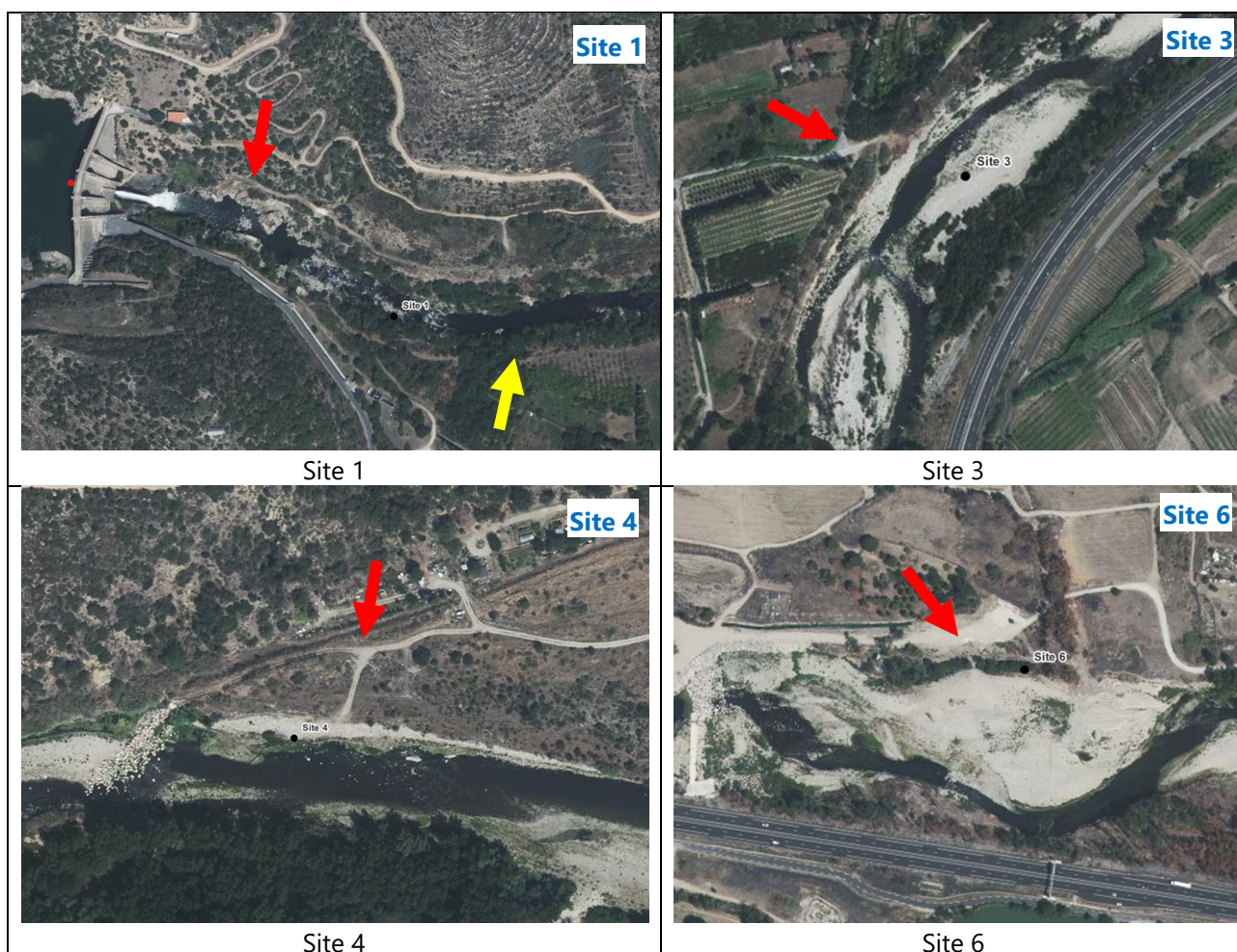


FIGURE 34 : PRESENTATION DES SITES DE REINJECTIONS ANTERIEURS

Le site 1 a été utilisé pour des réinjections en mai 2022. Lors de cette opération il a été choisi de réaliser les réinjections en berges (Figure 35). Cette disposition ne semble pas idéale pour une reprise des matériaux par

le cours d'eau. En effet, les matériaux sont placés très hauts en berge et le pied de berge est protégé par des blocs et des arbres. Cela limite les effets de sapement par le pied pour des crues communes. Une crue de forte ampleur sera nécessaire pour venir remobiliser ces matériaux. Dans l'attente d'un tel débit, les matériaux sont susceptibles de se fixer par l'effet de la végétation s'installant. De plus, les retours d'expériences (4.1) indiquent tous que les réinjections sont plus efficaces lorsque les sédiments sont submergés pour les crues ciblées. Il est donc préférable de déposer les matériaux en fond de lit. Cependant, sur l'ensemble de la section 1, les berges sont relativement hautes par rapport au fond de lit sans accès au lit pour des camions ou des engins de chantier et le chemin visible en rive gauche (Figure 34 – site 1 : flèche rouge) est à moitié éboulé suite à la tempête Gloria et inaccessible avec des engins lourds (source : conseil départemental). Plusieurs solutions sont envisagées en concertation avec le SMTBV et le conseil départemental :

- L'utilisation de la réinjection de 2022 comme « toboggan » pour les réinjections futures. Cette méthode présente l'inconvénient de ne pas contrôler la disposition des matériaux dans le lit qui pourrait atterrir en « tas » plus haut que long et ne pas être submergés lors de crues courantes. Il est préférable de privilégier la dépose en banc allongé de faible hauteur ;
- La **création d'une rampe de réinjection légèrement en aval du site 1** permettant aux camions d'accéder au lit du cours d'eau (flèche jaune sur la Figure 34). Cette opération, coûteuse à l'installation, présente tout de même l'avantage d'accéder directement au lit de pouvoir modeler correctement les bancs de réinjection. De plus, cette rampe permettrait de pérenniser la facilité de réinjection sur le site le plus proche de la queue du barrage. Le SMTBV mentionne cependant que cette rampe serait installée dans une zone Natura 2000. Il faudra donc bien identifier les enjeux présents sur le secteur avant intervention.

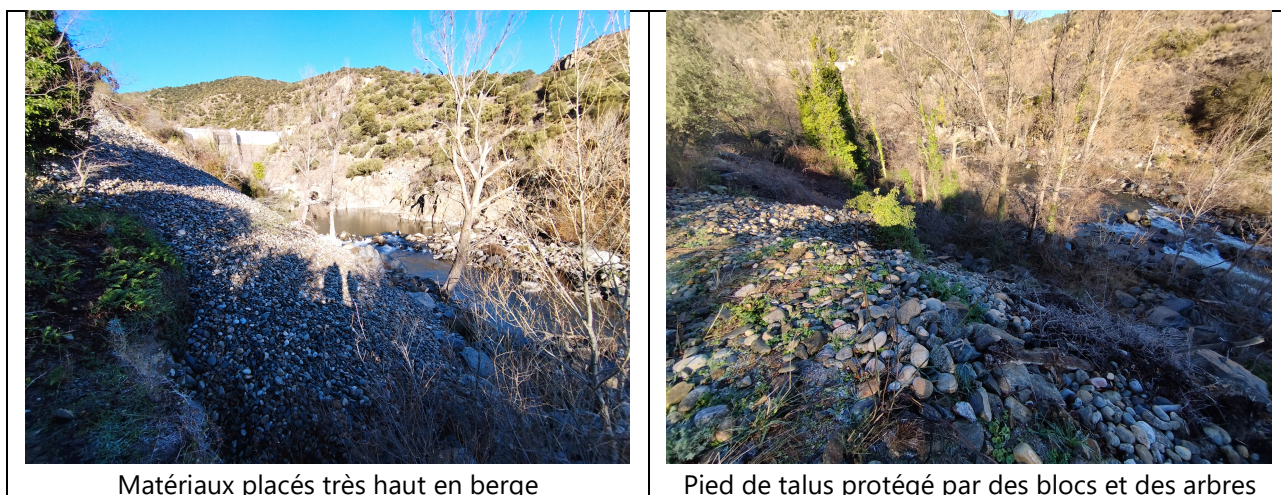


FIGURE 35 : REINJECTIONS DE MAI 2022 SUR LE SITE 1 LORS DE LA VISITE D'EGIS EN 2023

Pour une meilleure action sur les poches d'incision du cours d'eau, il est envisagé de privilégier si possible les actions dans le lit du cours d'eau sur les tronçons homogènes 1 et 3. Sur le secteur 1 il s'agira de trouver un accès au lit pour les camions et les engins de chantier, potentiellement via l'installation d'une rampe de réinjection en aval du site 1. Sur le secteur 3, plusieurs sites sont envisageables : le site 3 mais qui comprend déjà de nombreux bancs de sédiments, le site 4 ainsi que plusieurs secteurs entre les sites 3 et 4. En effet, les berges étant relativement basses sur ce secteur et un chemin étant présent en rive gauche sur la quasi-totalité du linéaire entre ces deux sites, les options sont multiples.

La réinjection des matériaux dans le lit de la Têt sur des sections présentant des capacités de transport notables est préférable à la réutilisation de ces derniers dans des poches d'érosion du lit. L'analyse cout bénéfique d'une telle réutilisation serait faible voire négatif. Ces volumes seraient certainement trop peu suffisants en volume à résoudre l'incision sur du moyen/long terme. En

revanche, la Têt, rechargée en matériaux sur un secteur où elle pourra facilement les remobiliser, travaillera seule pour retrouver l'équilibre.

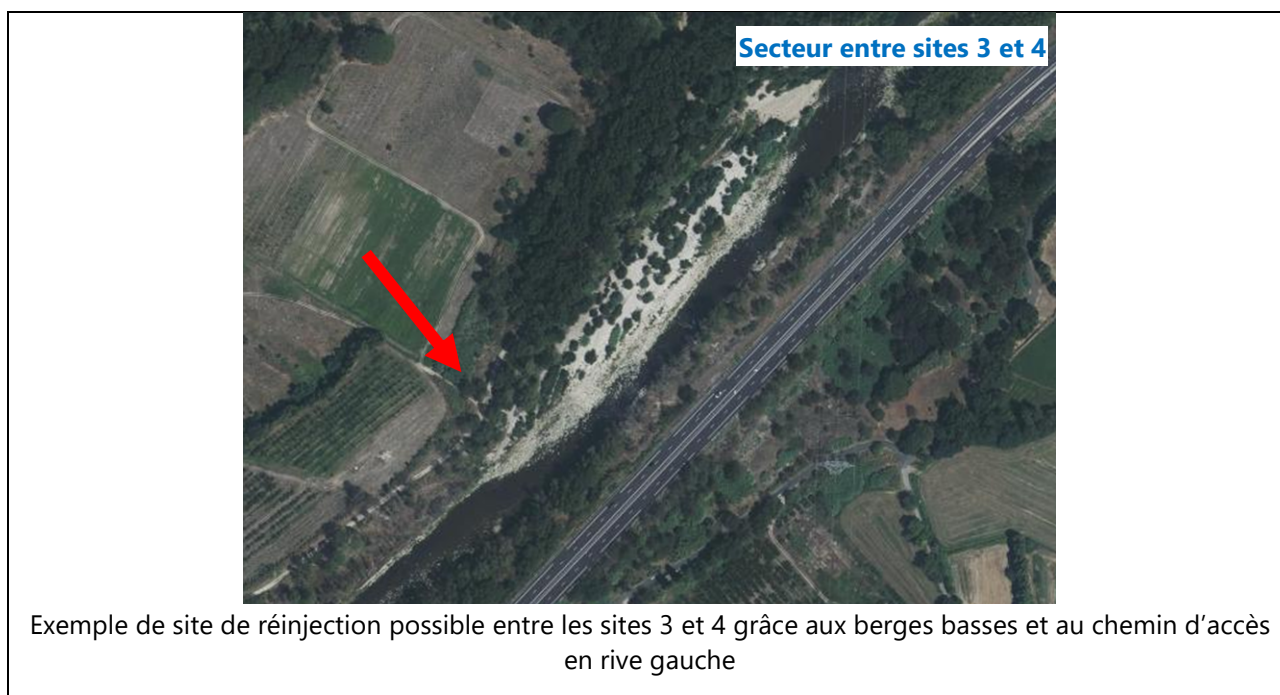


FIGURE 36 : EXEMPLE DE SITE DE REINJECTION POSSIBLE ENTRE LES SITES 3 ET 4

4.3 Approximation des volumes disponibles au niveau des bancs déconnectés (perchés)

Avant d'envisager de déplacer des sédiments du barrage vers les secteurs les plus en aval du cours d'eau, il s'agit d'estimer les volumes de sédiments déjà présents sur la zone d'étude et déconnectés de la dynamique du cours d'eau. En effet, le transport sédimentaire et les incisions/dépôts successifs peuvent entraîner la création de bancs sédimentaires dans le cours d'eau. Si ces bancs ne sont pas repris par le cours d'eau, ils peuvent se végétaliser et se fixer. L'incision généralisée de la Têt entraîne la création de plusieurs bancs de ce type, qui peuvent se retrouver très en hauteur par rapport au fond du cours d'eau incisé, ils sont alors dits « perchés ». **Ces bancs sont alors déconnectés de la dynamique du cours d'eau et leur potentiel en matériaux n'est pas exploité par le cours d'eau.** La Figure 37 ci-dessous illustre la création au cours du temps d'un banc végétalisé et déconnecté du lit du cours d'eau. Le lit mineur originel est détourné et est presque amené à disparaître.

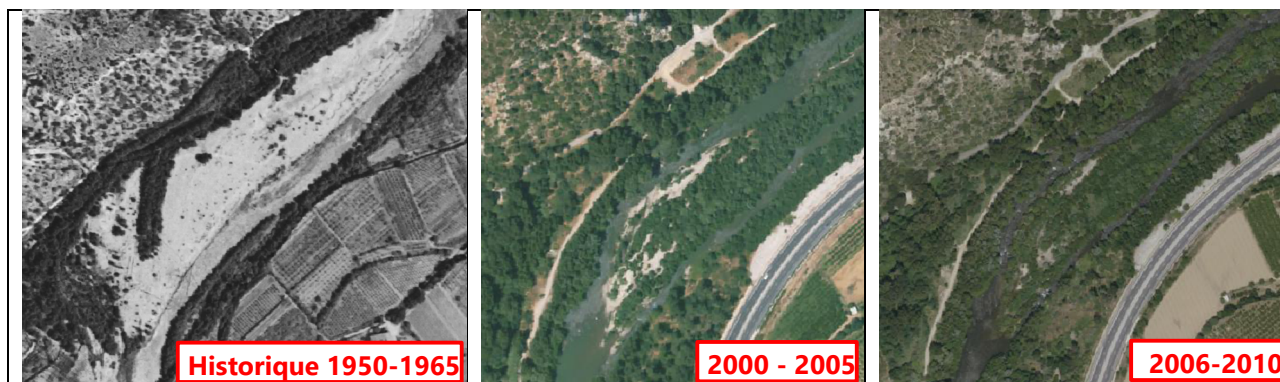


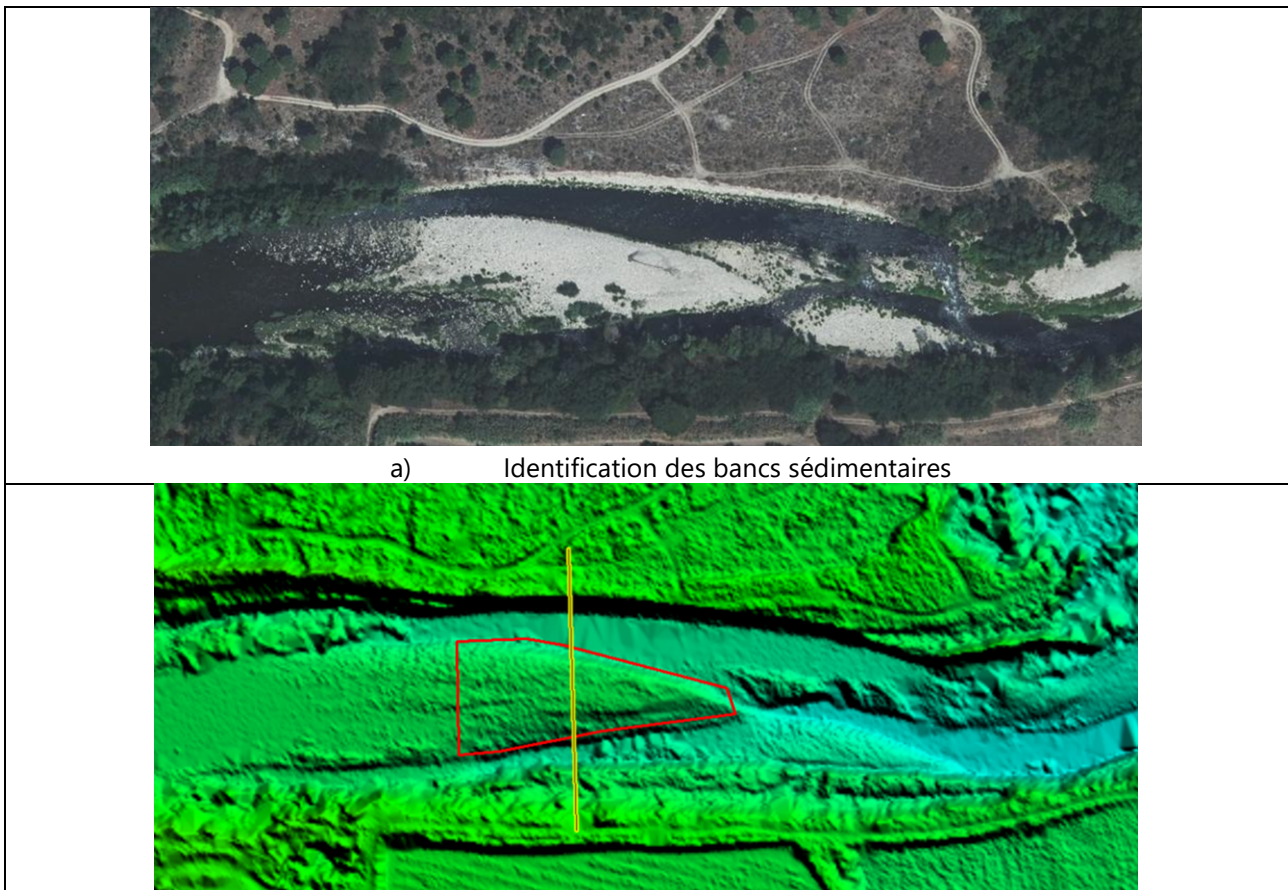


FIGURE 37 : EXEMPLE DE BANC S'ETANT FIXE ET VEGETALISE AU COURS DU TEMPS

Afin de déterminer les quantités de sédiments non exploités par le cours d'eau qui pourraient être remobilisables et réintégrés dans la dynamique du cours et venir en complément de sédiments curés dans la retenue de Vinça, nous avons procédé à la **localisation et à une analyse volumétrique approximative des bancs perchés**.

La méthodologie est la suivante :

- Identification des bancs sédimentaires en rive et dans le lit mineur sur photo aérienne récente (Figure 38 - a) ;
- Analyse de la hauteur de ces bancs sur le MNT disponible (Morph'eau Conseil 2021) (Figure 38 – b et c) ;
- Délimitation sur le MNT des zones de bancs dont la hauteur est conséquente (environ 1.5m - 2m) (Figure 38 - c) ;
- Approche du volume par multiplication simple : Surface perchée * hauteur moyenne (Figure 38 - b) ;
- Analyse spatiale : volumes de sédiments disponibles par sections homogènes (Tableau 12).



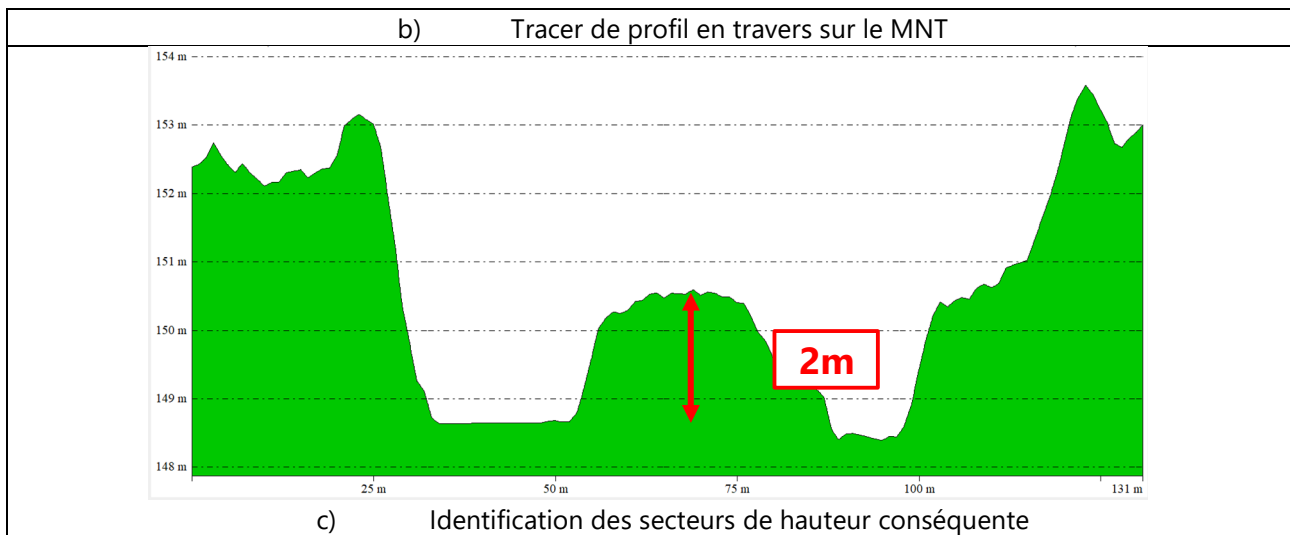


FIGURE 38 : METHODOLOGIE DE DETERMINATION DES VOLUMES DE BANCS PERCHES

Les bancs perchés identifiés ont été représentés sur la Figure 39 ci-dessous.

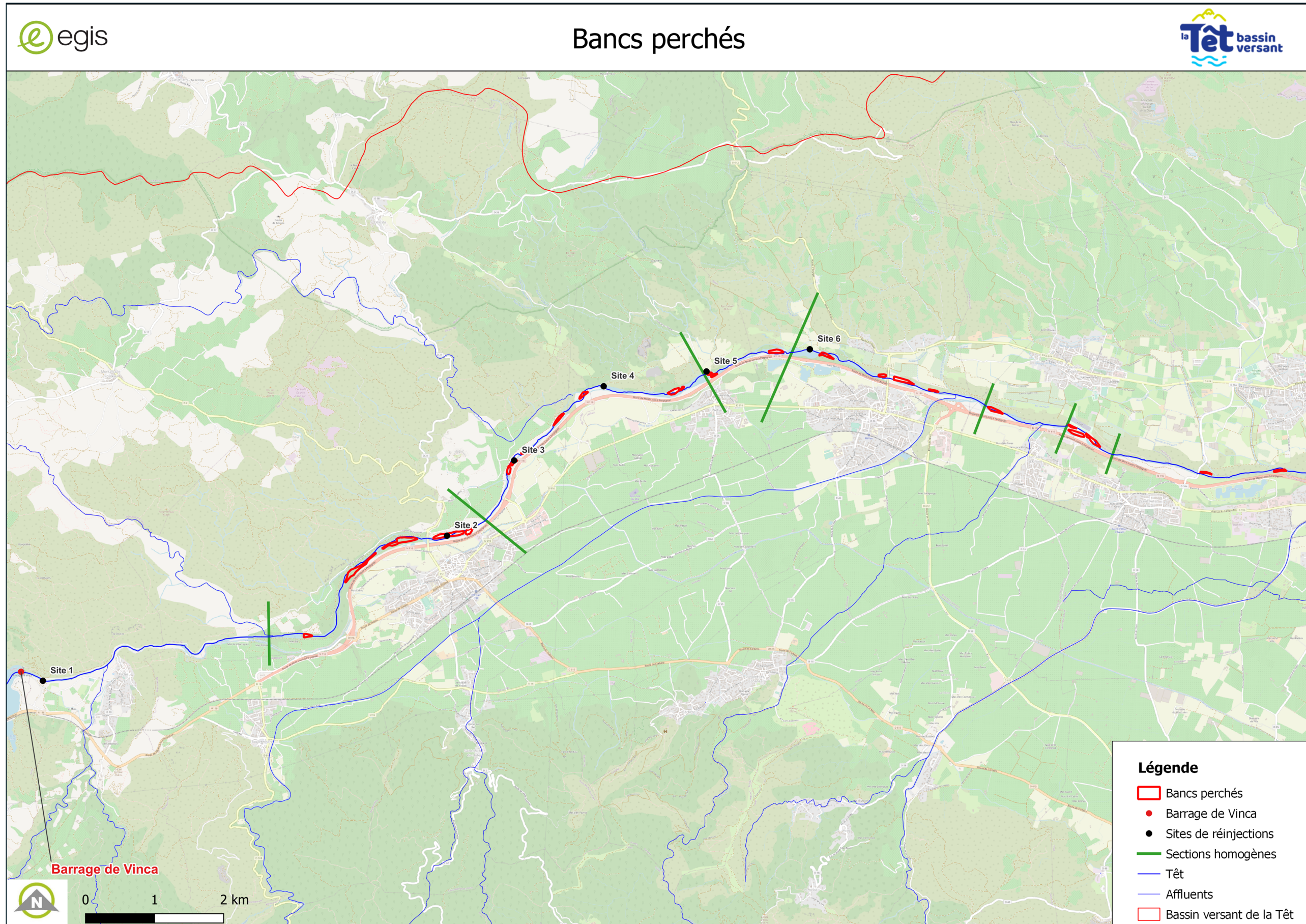


FIGURE 39 : LOCALISATION DES BANCs PERCHES

Les volumes ainsi approchés par section sont résumés dans le Tableau 12 et la Figure 40 ci-dessous.

La section 1 ne comporte pas de bancs perchés. En effet, sur cette section, la roche mère est présente directement et il y a peu ou pas de matelas alluvial. Sur les sections suivantes, plusieurs bancs perchés sont identifiés et peuvent être envisagés pour une éventuelle remobilisation sédimentaire, notamment sur les sections 2 et 3.

TABLEAU 12 : APPROCHE VOLUMETRIQUE DES BANCs PERCHES PAR SECTION

Section	Surface des bancs perchés identifiés (m ²)	Volume estimé de sédiments sur les bancs perchés (m ³)
1	0	0
2	72 600	109 000
3	29 000	43 500
4	11 200	16 800
5	22 400	33 500
6a	7 200	10 800
6b	21 000	31 500
7	5 500	8 300

NB : le calcul des volumes estimés a été réalisé avec une hauteur moyenne de 1.5m.

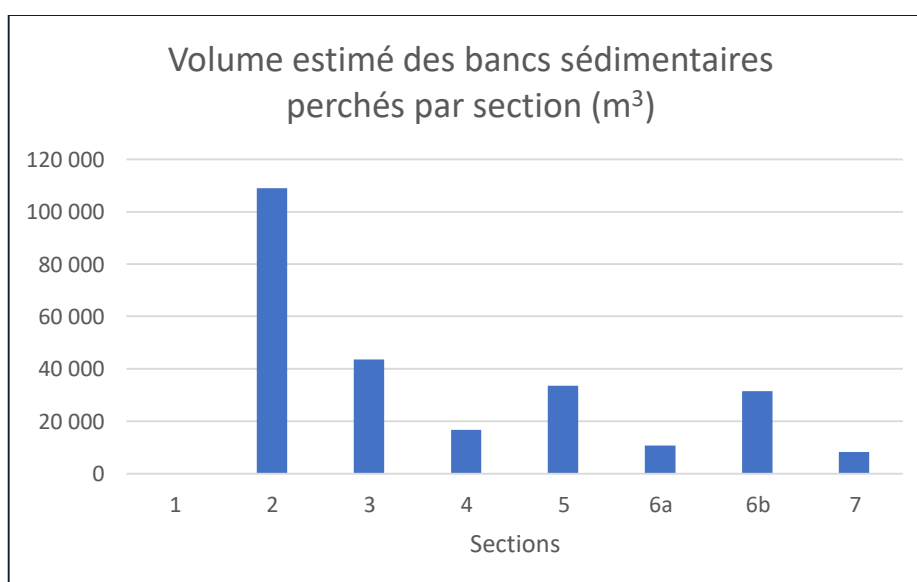


FIGURE 40 : APPROCHE VOLUMETRIQUE DES BANCs PERCHES PAR SECTION

Suite à cette analyse, une première réunion de travail pour l'identification des bancs perchés avec le SMTBV et le conseil départemental a permis de discuter des enjeux, possibilités et contraintes de chaque banc. Les points discutés sont :

- Les possibilités d'accès : berge pentue, manque de voies d'accès, ... ;
- Les enjeux à proximité : secteurs d'incision principaux, présence de prises d'eau ou d'ouvrages transversaux à protéger, ... ;
- Les enjeux écologiques faune et flore : présence d'espèces intéressantes et/ou protégées : Desman des Pyrénées, Emyde lépreuse, ...

Cette discussion a permis d'envisager un programme pluriannuel d'intervention sur ces bancs en privilégiant dans un premier temps les secteurs 3 puis 2. Certains bancs ont récemment été dévégétalisés par l'ASCO de la Têt à Ille sur Têt, ils peuvent donc être prioritaires.

Cette action sur les atterrissements est complémentaire et peut être concomitante, à la réinjection des matériaux de Vinça et à la réalisation de projets de restauration du lit de la Têt aval (DIRSO, SMTBV). L'intervention sur ces atterrissements permettrait de :

- Valoriser les stocks disponibles aujourd'hui déconnectés de la dynamique sédimentaire du cours d'eau ;
- Contribuer à la redynamisation du transport sédimentaire dans la Têt aval et à la préservation du bon fonctionnement hydromorphologique ;
- Conforter la connaissance sur la dynamique sédimentaire théorique par l'expérimentation avec la mise en place de secteurs test ;
- Lutter contre l'expansion des « poches » d'incision (Ille-sur-Têt en l'aval de la déchetterie, Néfiach aval site 4 réinjection, Néfiach-Millas) ;
- Ne pas aggraver l'érosion régressive et limiter l'arrivée de matériaux dans le toboggan argileux que constitue le secteur incisé totalement entre l'aérodrome de Corneilla et l'A9 (tronçons 7, 8a et 8b).

4.4 Estimation des bilans carbone des opérations envisagées

Le calcul du bilan carbone de l'opération de réinjection de mai 2022 a été effectué. Ce calcul pourra être appliqué aux différentes propositions de scénarios de réinjection afin de pouvoir les comparer.

Les informations utilisées pour la réinjection de mai 2022 sont les suivantes :

- Distance Plateforme de Vinça – site 1 : 8km aller-retour (4km plein, 4km vide) ;
- 137 rotations : soit une distance totale de $4 \times 137 = 548$ km, les trajets vides étant pris en compte dans le facteur d'émission choisi ;
- Volume de matériaux : 1 800 tonnes (890 m³).

Les hypothèses de calcul sont les suivantes :

- Prise en compte du transport des matériaux uniquement de la plateforme jusqu'au site de réinjection (pas de l'excavation, transport sur la plateforme depuis le lit, tri, ...) ;
- Type de camion considéré : camion rigide Diesel 12 à 20t ;
- Choix du facteur d'émission = 0.00016 (source ADEME base carbone MAJ janvier 2022).

Le calcul se présente par la formule suivante :

Calcul Emission Carbone = Distance d'un trajet x Tonnage x FE (Facteur d'Emission)

Ces hypothèses permettent de calculer une émission carbone pour l'opération de réinjection de mai 2022 à hauteur de 1.05 tCO₂eq, soit 6 mois de chauffage au gaz pour un appartement ou encore un vol Paris-Dakar

Les résultats des calculs sont présentés pour chaque scénario proposé dans le Tableau 15.

4.5 Estimation des coûts des opérations

Les retours d'expériences permettent d'obtenir quelques informations financières pouvant aider à estimer les coûts des opérations envisagées sur la Têt. Ces coûts devront bien évidemment être actualisés (évolution des coûts des opérations entre 2013-2014 et 2022) et adaptés au contexte local.

TABLEAU 13 : APPROCHE FINANCIERE : RETOUR D'EXPERIENCES

	Têt mai 2022	Buëch 2016	Drac 2013-2014
Volume réinjecté (m³)	890	43 500	Environ 355 000
Distance parcourue (km)	4	Environ 2km entre la zone de curage et la zone de redépose	NC
Prix € HT (travaux)	9 500	441 747 (8 semaines)	4.3 millions (recharge sédimentaire, fourniture de matériaux supplémentaires, travaux de génie écologique)
Prix € HT (suivi)	Non réalisé	204 000 (Protocole sophistiqué 5 ans : 2017-2021)	530 000 Protocole sophistiqué sur 10 ans
Financements Travaux	100% autofinancement CD66	50% Agence de l'eau 50% Autofinancement	47% Agence de l'eau RMC 14% Région PACA 10% Département des Hautes-Alpes 8.5% FEDER
Compléments	137 rotations de camion-	-	60 engins de chantier mobilisés (6 mois) Défrichement 27 ha
Source	Conseil départemental 66	EDF/Agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse/SMIGIBA (2018) + G.Brousse (2022)	Association Rivière Rhône Alpes Auvergne (2017)

En complément des cas concrets présentés ci-dessus, une étude de l'Agence de l'eau (Ecodecision, EMA Conseil, Eau et territoires) a été effectuée en 2014 afin de déterminer les coûts de référence de certaines actions de restauration : « Détermination des coûts de référence des travaux de restauration hydromorphologique des cours d'eau et conception d'une base de données de projets et d'un outil d'estimation du coût du volet hydromorphologie des programmes de mesures 2016-2021 ». (Source : AERMC - Coûts hydromorphologie 2014)

Parmi les actions étudiées, sont notamment identifiés :

- La réinjection de matériaux avec pour indicateurs : volumes apportés et distance d'importation des matériaux ;
- Le traitement d'atterrissements avec pour indicateurs : surface d'atterrissement et simple scarification : oui ou non.

Cette étude s'est basée sur l'analyse de tous les projets pertinents de l'agence de 2007 à 2011 ainsi que sur un complément de recherche bibliographique sur d'autres projets pertinents.

Lorsque les éléments disponibles le permettaient, le coût des actions a été chiffré à partir du montant total du projet, en excluant les coûts qui ne concernaient pas directement les actions : étude et maîtrise d'œuvre, installation de chantier, suivi et valorisation. L'acquisition foncière n'est pas incluse dans le coût de l'action, puisqu'elle fait appel à une autre subvention de l'agence. Une analyse statistique par type d'actions a ensuite été effectuée. Finalement, un coût de référence ou une formule d'estimation ont été proposés pour 16 des 20 types d'actions étudiés, avec parfois 2 à 3 ratios déclinés selon les contextes ou selon les données disponibles, et complétés par une fourchette. Le Tableau 14 récapitule ces propositions pour les actions réinjection de matériaux et traitement d'atterrissements, tout en précisant le nombre d'actions prises en compte et le niveau de fiabilité. Des propositions de fiabilité ont pu être faites pour chaque types d'actions : de très faible à bonne.

TABLEAU 14 : APPROCHE FINANCIERE PAR TYPE D' ACTIONS

Fiche	Type d'actions	Echantillon	Coût de référence	Fourchette	Commentaires	Fiabilité
Fiche 16	Réinjection de matériaux	10 actions	10 €/m³ pour cas simples et/ou gros volume	2 à 18 €HT/m³	Moyenne des observations et des dires d'experts, manque de données pour cerner les causes des écarts constatés	Faible à moyenne
			50 €/m³ pour cas plus complexe	30 à 70 €HT/m³		
Fiche 13	Traitement d'atterrissement	8 actions	1,0 €/m² pour une simple scarification	0,5 à 1,5 €HT/m²	Moyenne observée et dires d'experts	Bonne

NB : Les fiches 13 et 16 sont fournies en annexes 4 et 5.

4.6 Proposition de scénarios et de protocoles de réinjection

Suite aux conclusions présentées dans le chapitre 3.4 et à l'analyse des tronçons géomorphologiquement homogènes (alternance des zones de transport et zones de dépôts) et en prenant aussi en compte l'aspect financier et l'aspect écologique, plusieurs scénarios d'intervention peuvent être envisagés sur les matériaux, dont ceux de Vinça, pour rétablir la dynamique sédimentaire de la Têt. Ces scénarios, ainsi que leurs avantages et inconvénients, sont présentés dans le Tableau 15 ci-dessous.

TABLEAU 15 : BILAN DES SCENARIOS DE REINJECTION

	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3
Opération	Réinjection uniquement en aval de Vinça	- Réinjection en aval de Vinça - Réinjection en secteur 3	- Réinjection aval de Vinça - Scarification de bancs perchés secteur 3
Avantages	Moins de transport par camions Bilan carbone et économique ? plus faible	Fourniture de sédiments aussi en aval de la section 2 qui bloquerait la charge solide amont	Moins de transport par camions Réutilisation de bancs perchés déconnectés du cours d'eau (« bancs stabilisés »)
Inconvénients	Section 2 étant zone de dépôt => peu d'impact de la réinjection en aval (blocage charge solide)	Transport de camions sur 2 sites dont 1 plus en aval	Accès aux bancs pouvant être compliqué à certains endroits Espèces écologiques présentes sur les bancs à vérifier
Distance sites – plateforme Vinça	Site 1 : 4km (aller simple)	Site 1 : 4km (aller simple) Site 3 : 12km (aller simple)	Site 1 : 4km (aller simple)
Volume réinjecté	Site 1 : 12 943 m ³ (26 180 tonnes) En respectant la capacité de transport moyenne annuelle, ce volume pourrait éventuellement être réinjecté en 2 fois.	Afin de respecter les capacités de transport moyennes annuelles de chaque section (Figure 17), le découpage suivant est proposé : Site 1 : 9 000 m ³ (18 000 t) Site à définir : 4 000 m ³ (8 000 t)	Site 1 : 12 943 m ³ Remobilisation de bancs section 3 puis 2 : 150 000 m ³ disponibles estimés
Surface de bancs à scarifier	<i>Non concerné</i>	<i>Non concerné</i>	Scarification pluriannuelle des bancs section 3 puis 2 : 100 000 m ² estimés
Nombre de trajets nécessaire	1 308 pour un camion de 20t	1 308 pour un camion de 20t Site 1 : 785 trajets - Site 3 : 523 trajets	1 308 pour un camion de 20t + action locale sur les bancs
Bilan carbone	16.76 tCO _{2eq}	26.88 tCO _{2eq}	16.76 tCO _{2eq} (réinjection site 1) + 90 tCO _{2eq} : action locale sur tous les bancs Total : 106.76 tCO_{2eq}
Estimation financière	[25 886 – 906 010] €HT pour 12 943 m ³ (AERMC) 140 000 €HT – référence de coût du CD66 (10 €/m ³) 647 150 €HT – coût moyen des cas complexes (AERMC)	[25 886 – 906 010] €HT pour 12 943 m ³ (AERMC) 140 000 €HT – référence de coût du CD66 (10 €/m ³) 647 150 €HT – coût moyen des cas complexes (AERMC)	[25 886 – 906 010] €HT pour 12 943 m ³ (AERMC) 140 000 €HT – référence de coût du CD66 (10 €/m ³) 647 150 €HT – coût moyen des cas complexes (AERMC) + Environ 100 000€HT pour la remobilisation de l'ensemble des bancs sur les secteurs 2 et 3 Total ~ 747 150 €HT

NB1 :

La fourchette de prix de réinjection est basée sur les données AERMC - Coûts hydromorphologie 2014 (Tableau 14) avec 2€/m³ en fourchette basse et 70€/m³ en fourchette haute, selon un cas simple ou plus complexe. Cette source de données ne prend pas en considération la distance parcourue par les matériaux, lissant donc les différences entre les scénarios. **Le scénario 2, impliquant de plus gros déplacements, sera nécessairement plus onéreux que le scénario 1.**

La valeur de prix de référence du CD66 est basée sur la réinjection de mai 2022, soit 10 €/m³. Si on considère une réinjection légèrement plus complexe avec dépose des matériaux dans le lit du cours d'eau sous forme de bancs étalés, cette valeur est probablement un peu faible.

La fourchette 1€/m² (Source : AERMC - Coûts hydromorphologie 2014) a été utilisée pour les calculs de traitement des atterrissements.

NB2 : Le bilan CO_{2eq} a été calculé pour une pelle hydraulique standard avec un facteur d'émission de 0.6 kgCO_{2eq}/m³ (source ADEME base carbone MAJ janvier 2022).

NB3 : Ces 3 scénarii impliquent une réinjection à l'aval du barrage et donc de trouver un moyen de venir déposer les matériaux dans le lit et de les régaler en bancs submersibles pour des crues fréquentes.

5 PROPOSITION DE PROTOCOLES DE SUIVI

A partir des retours d'expériences mentionnées au chapitre 4.1 ainsi que des informations collectées auprès du Pays de Lourdes et des Vallées des Gaves (PLVG) et leur observatoire de suivi de la mobilité des Gaves, plusieurs protocoles de suivi des réinjections sont envisageables.

Sur le Buëch, le Drac et le Rhin les protocoles mis en place sont des protocoles scientifiques, qui peuvent être lourds à déployer et coûteux en termes de suivi sur plusieurs années, respectivement sur 5, 10 et 7 ans. Ces protocoles peuvent inclure :

- Suivis morphologiques :
 - o Topographie Lidar et photogrammétrie aérienne avant et après crues morphogènes ;
 - o Granulométrie, pavage, affleurement, distance de transport, seuil de mise en mouvement, taux d'érosion des remblais, accumulation de déblais ;
 - o Des survols aériens en ULM ;
- Pit-Tags actifs et/ou passifs : distance de migration des matériaux ;
- Suivis hydro-biologiques :
 - o Pêches inventaires, frayères barbeau et truite, écrevisses, invertébrés, faune/flore terrestre, indices IBGN, macro-invertébrés, ...
 - o Analyse de la reprise de végétation du lit ;
 - o Évolution des habitats aquatiques ;
- Suivi hydrologique ;
- ...

Le PLVG a réalisé des essais sur le lac des Gaves de plusieurs systèmes de suivi. La Figure 41 ci-dessous résume le projet.

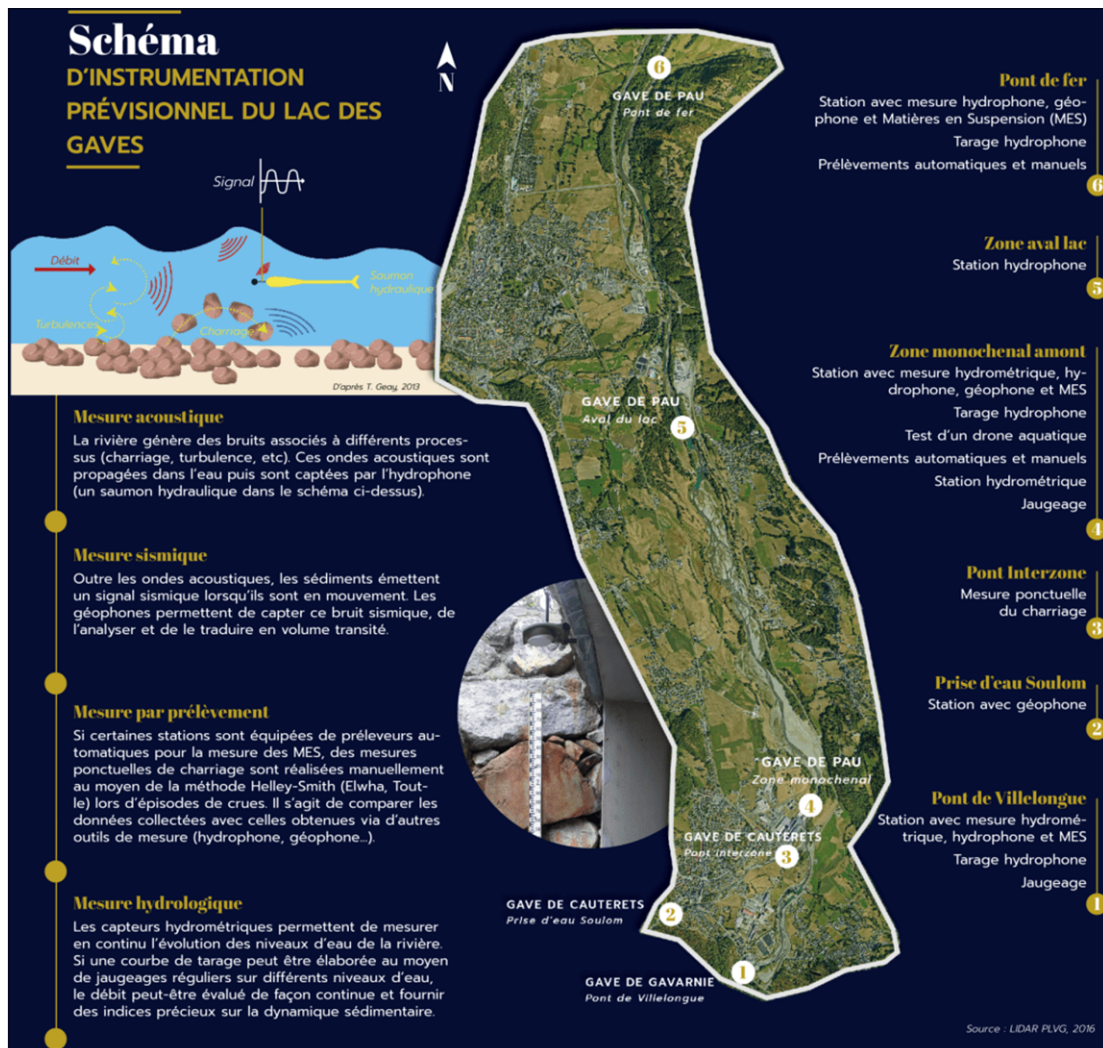


FIGURE 41 : SCHEMA D'INSTRUMENTATION PREVISIONNEL DU LAC DES GAVES (SOURCE : PLVG)

Certaines mesures envisagées par le PLVG se sont avérées complexes à suivre et ont finalement fourni des informations difficiles à analyser. Certaines techniques de suivi ne sont pas forcément adaptées aux faibles crues qui sont justement celles ciblées par les opérations de restauration envisagées.

Finalement, ce qui a le mieux fonctionné et qui sera pérennisé est un protocole simplifié avec la réalisation de plusieurs opérations en interne. Ce dernier est complété par un suivi RFID afin d'évaluer la distance parcourue par des matériaux grossiers. L'important est de choisir des actions pouvant être répétées à plusieurs reprises afin d'obtenir un suivi sur une échelle de temps relativement longue.

Le protocole simplifié / allégé peut être découpé comme suit :

- Grille d'indicateurs à définir en concertation avec les acteurs locaux à travers de simples observations visuelles par un opérateur en interne. Cela peut se traduire par une fiche terrain avec les éléments suivants à visualiser : modification visuelle de l'aspect du lit, érosion identifiée, dépôts identifiés, présence de végétation (indicateur d'une activité hydrologique faible), etc.;
- Echantillonnages granulométriques réguliers selon le protocole de Wolman ;
- Mesures topographiques simples : si possible achat d'un GPS en interne et suivi ponctuel à plusieurs reprises sur des sections en travers définies aux alentours des secteurs d'intervention ;
- Suivi drone si possible également avec toutefois la nécessité de passer une habilitation à manipuler cet outil (technicien rivière). Géoréférencement des photographies aériennes et analyse des évolutions éventuelles identifiées : élargissement de la bande active, modification des surfaces des bancs sédimentaires, développement de la végétation ;

- Réalisation de modèles numériques de surface (en fonction de la densité de la végétation) à partir des photographies aériennes relevées par drone → prestation à envisager avec géomaticien ;
- Suivi RFID (Radio Frequency Identification) – il s’agit d’un outil complémentaire permettant d'affiner, qualitativement et quantitativement, les diagnostics de transit sédimentaire pour le suivi des actions de restaurations de la dynamique fluviale et sédimentaire. Elle consiste à instrumenter dans les sédiments (cailloux, pierres, blocs) des transpondeurs ou PIT Tag afin de suivre leur déplacement (trajectoire, vitesse) aux grès des crues ou des opérations de gestions des ouvrages. Le retour d’expérience suivant nous a été communiqué par le PLVG :
 - o Temps humain en interne : 30 – 40 jours (mise en place du protocole, suivi des ouvrages, exploitation du réseau, etc.) ;
 - o Achat des puces RFID (100 actifs + 800 passifs) et instrumentation : **40 000 € (HT)** ;
 - o Diamètre des matériaux équipés : 22 – 256 mm ;
 - o Suivi : Brigade Verte en interne après chaque petite crue.

En fonction des ressources disponibles au sein du syndicat, il est également possible d’externaliser complètement cette opération. Plusieurs entreprises sont aujourd’hui en mesure de les réaliser : VEODIS-3D, GeoPeka (fournisseur du PLVG), STYX4D. Les coûts seraient par contre bien plus élevés étant donné que les prestataires devront se déplacer à plusieurs reprises pour effectuer le suivi post-crues.

Il est également conseillé de réaliser des échantillonnages granulométriques sur l’ensemble des fractions extraites du barrage, directement sur les bancs ou après extraction mais sans séparer les fractions par taille.

6 CONCLUSION

Pour conclure sur la meilleure utilisation des matériaux actuellement stockés sur la plateforme de Vinça ainsi que sur les matériaux issus des futures extractions dans la retenue du barrage, cette étude a permis de :

- Calculer les capacités de transport des sections géomorphologiquement homogènes en aval de l'ouvrage avec des formules de transport adaptées au contexte (style fluvial du cours d'eau, granulométrie, largeur, pente, etc.) ;
- Montrer que le volume actuellement stocké correspond à la capacité de transport moyenne annuelle de la section 1, volume qui serait a priori entièrement remobilisable par une crue de période de retour 2 ans à Rodés, crue sur laquelle le barrage n'a pas d'influence ;
- Montrer que le cours d'eau peut être découpé en zones favorables à la réinjection des sédiments (sections 1 et 3) ou zones de dépôt (section 2) selon leur capacité de transport ;
- D'analyser les diamètres maximaux pouvant être transportés par section pour chaque gamme de débit et occurrence de crue ;
- D'étudier les sites de réinjection possibles, leurs avantages et leurs inconvénients. A partir de cette analyse plusieurs scénarios de réinjection ont été proposés combinant réinjections et remobilisation des bancs perchés/déconnectés de cours d'eau afin de recréer une dynamique sédimentaire locale ;
- Proposer des protocoles de suivi simples et complexes mêlant approches topographiques, écologiques et RFID.

Il en ressort que la réinjection en section 1 uniquement limiterait les impacts positifs de cette opération à moyen terme sur les poches d'incision de la section 2 et 3 car la section 2 fait office de zone de dépôt/régulation du transport solide. Il est donc conseillé d'envisager une action combinée sur les sections 1 et 3. Selon les scénarios retenus il peut s'agir de diviser le stock de matériaux en deux sites de réinjection, en respectant les capacités de transport de chaque section, ou de réinjecter l'ensemble des matériaux de Vinça sur la section 1 et de compléter par une remobilisation des bancs perchés en section 3 puis en section 2. Ce dernier scénario permet de rendre à la rivière ses sédiments qui sont actuellement déconnectés afin de recréer une dynamique sédimentaire locale. L'accès à la section 1 sera à étudier plus spécifiquement à cause de la hauteur des berges et du manque d'accès au fond de lit. La possibilité de la création d'une rampe de réinjection en section 1 a été évoquée et devra être approfondie.

Plusieurs points ont été mis en avant afin de favoriser la reprise des matériaux réinjectés :

- Réinjection d'un volume de matériaux proche de la capacité de transport moyenne annuelle de la section sur laquelle a lieu la réinjection ;
- Réinjection de l'ensemble des classes granulométriques afin de reformer un matelas alluvial et de permettre le transport de gammes granulométriques différentes en fonction des crues (dès les crues courantes) ;
- Réinjection dans le fond du lit sous forme de bancs allongés, de hauteur relativement faible afin de permettre la submersion du banc dès les crues communes. En effet, la remobilisation sera facilitée si l'érosion a lieu par sapement en pied de banc et par charriage en surface de banc. Cela permet aussi de maximiser la reprise par des crues fréquentes et de limiter la fixation par la végétation ;
- Réinjection dans des zones favorables hydrauliquement (extrados de méandre, pente permettant d'assurer le transport, etc.) afin de faciliter le transit sédimentaire ;
- Injecter l'ensemble des matériaux extraits, sans criblage préalable ;
- Privilégier si possible la création de plusieurs bancs en rive gauche et rive droite ;
- Privilégier si possible les réinjections en amont de portions de morphologies et de débits différents afin de favoriser la fragmentation du transport des matériaux et maximiser la diversification des habitats ;
- Envisager l'élargissement du chenal en aval des réinjections afin de diminuer les débits localement et favoriser les zones de dépôts ;
- Réaliser si possible un suivi RFID.

REFERENCES

DRAC :

Travaux de restauration du lit du Drac - retour d'expérience trois ans après travaux – Association Rivière Rhône Alpes Auvergne (2017)

Buëch :

Réinjection sédimentaire à l'aval immédiat du barrage de Saint-Sauveur – restauration du cours d'eau et suivi sédimentaire – EDF/Agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse/SMIGIBA (2018)

Etude des réinjections sédimentaires dans les rivières à graviers par modélisation numérique morphodynamique 2D – G. Brousse (2022)

Channel response to sediment replenishment in a large gravel-bed river: The case of the Saint-Sauveur dam in the Buëch River (Southern Alps, France) – G. Brousse (2019)

Rhin :

Efficiency and sustainability of gravel augmentation to restore large regulated rivers : Insights from three experiments on the Rhine River (France/Germany) – Chardon, Arnaud, Schmitt, Piégay (2021)

Analyse financière :

Détermination des coûts de référence des travaux de restauration hydromorphologique des cours d'eau et conception d'une base de données de projets et d'un outil d'estimation du coût du volet hydromorphologie des programmes de mesures 2016-2021 - Agence de l'eau, Ecodecision, EMA Conseil, Eau et territoires

communication.egis@egis.fr

www.egis-group.com

