

Recharge sédimentaire

Exemples de l'Artière à Clermont-Ferrand et du Furan à Saint-Etienne



Journée technique ARRA – Transport solide et recharge sédimentaire – 8 novembre 2022

Stéphane PETIT (Véodis-3D), Stéphane MANEVAL (Clermont Auvergne Métropole)



- 2 projets de réinjection sur de petits cours d'eau en contexte urbain
- 2 approches différentes pour calibrer la réinjection sédimentaire

Artière
Clermont Auvergne Métropole

Constat : - incision
- stock de matériaux disponibles
- caractéristiques morphologiques identiques

Transfert de matériaux, faible distance

Le Furan
Saint Etienne Métropole

Constat : - incision
- sur-débit liquide
- pas de stock de matériaux
- caractéristiques morphologiques variées

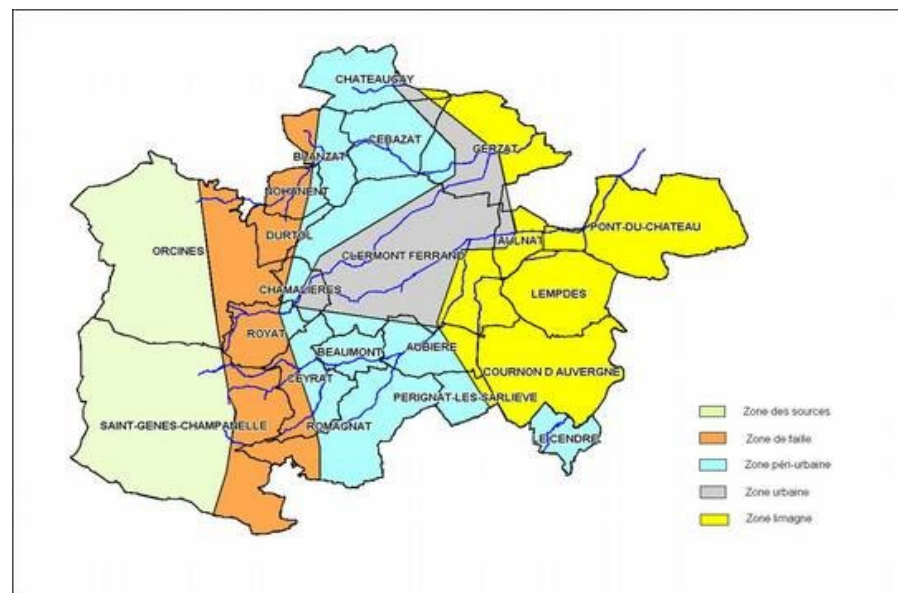
Projet d'injection sur large échelle

- des objectifs communs :
 - calibrer la réinjection (quantité et granulométrie des matériaux à injecter)
 - définir le rythme de la réinjection

Cas de l'Artière – Clermont Auvergne Métropole

Contexte

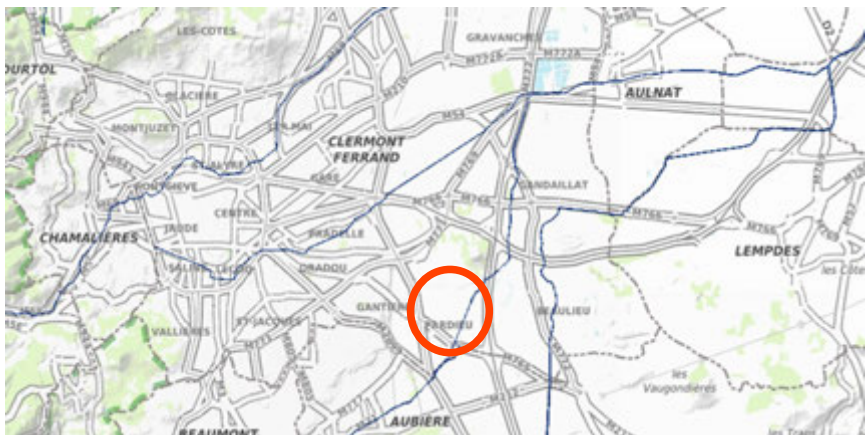
- Petites rivières écoulement Ouest/Est
- Artificialisation croissante au fur et à mesure que l'on descend le bassin versant
- Disparition des rivières dans les cadres bétons dans l'hypercentre de la métropole
- Aval de la métropole (aval zones urbaines), rivières recalibrées en trapèze avec déficit sédimentaire et incision



Cas de l'Artière – Clermont Auvergne Métropole

Constat

- La traversée urbaine induit des pièges sédimentaires volontaires ou involontaires
- Dans le cas de certains bassins d'orage comme celui de Crouël (12ha – 240 000m³), un piège à cailloux protège l'organe de vidange
- Le piège stoppe le transit sédimentaire
- Nécessité de curage pour maintenir la fonctionnalité du piège... jusqu'en 2006, les produits de curage étaient envoyés en décharge



Transport solide et recharge

Cas de l'Artière – Clermont Auvergne Métropole

Constat

A l'aval du bassin d'orage de Crouël :

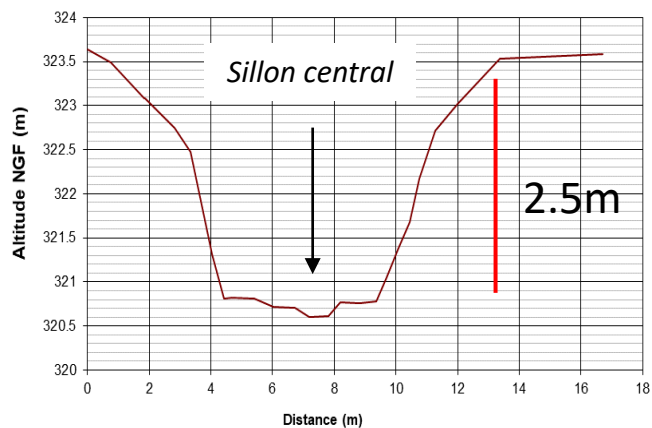
- Forte incision en aval de l'agglomération (accentuée par des recalibrages en trapèze)
- Affleurement du substrum marneux avec sillon central

Impact du bassin d'orage fort s'additionnant à d'autres paramètres plus globaux :

- Reboisement des têtes de bassin versant
- Artificialisation des berges et du BV
- Sur-débits à dominante liquide

Nécessité de changer les pratiques de gestion du bassin d'orage...

Comment faire ?

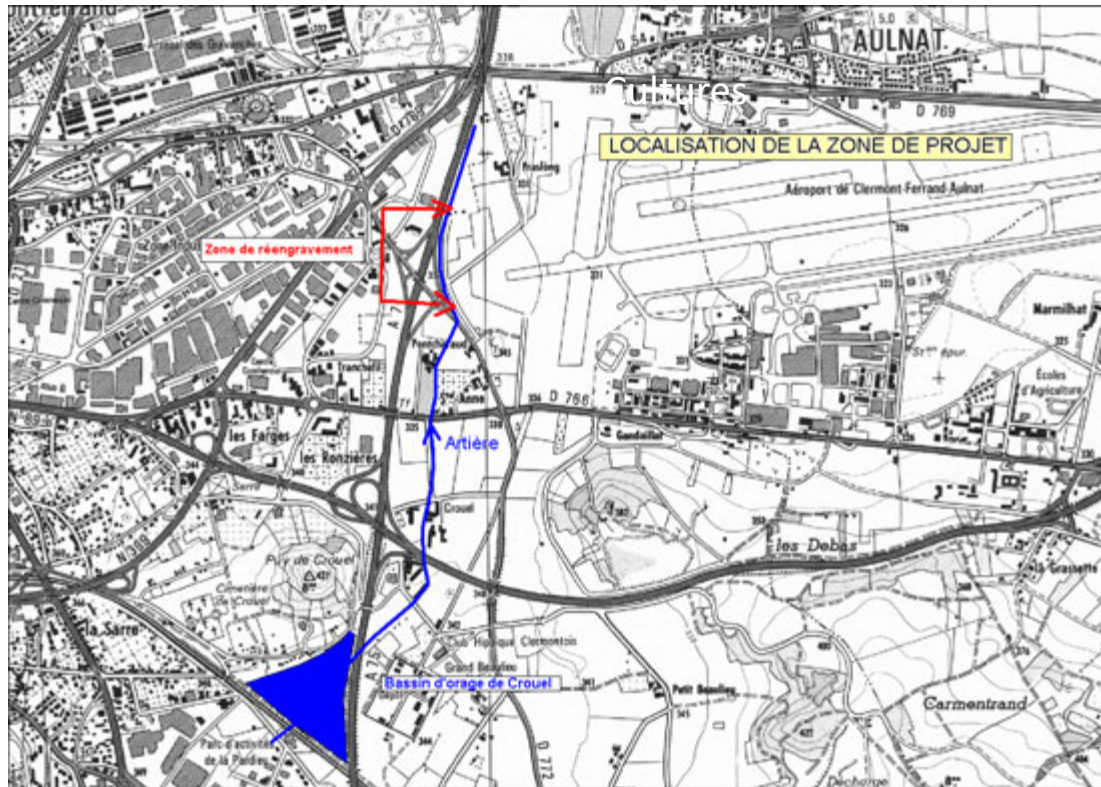


Transport solide et recharge sédimentaire

Cas de l'Artière – Clermont Auvergne Métropole

Lieu des injections

- En aval du bassin d'orage
- Pas trop loin (bilan économique et carbone)
- Sur le domaine public dans l'idéal
- Accès mécanique (que les camions puissent approcher et la pelle travailler)
- Zone déficitaire pour ne pas aggraver le risque inondation



Transport solide et recharge sédimentaire

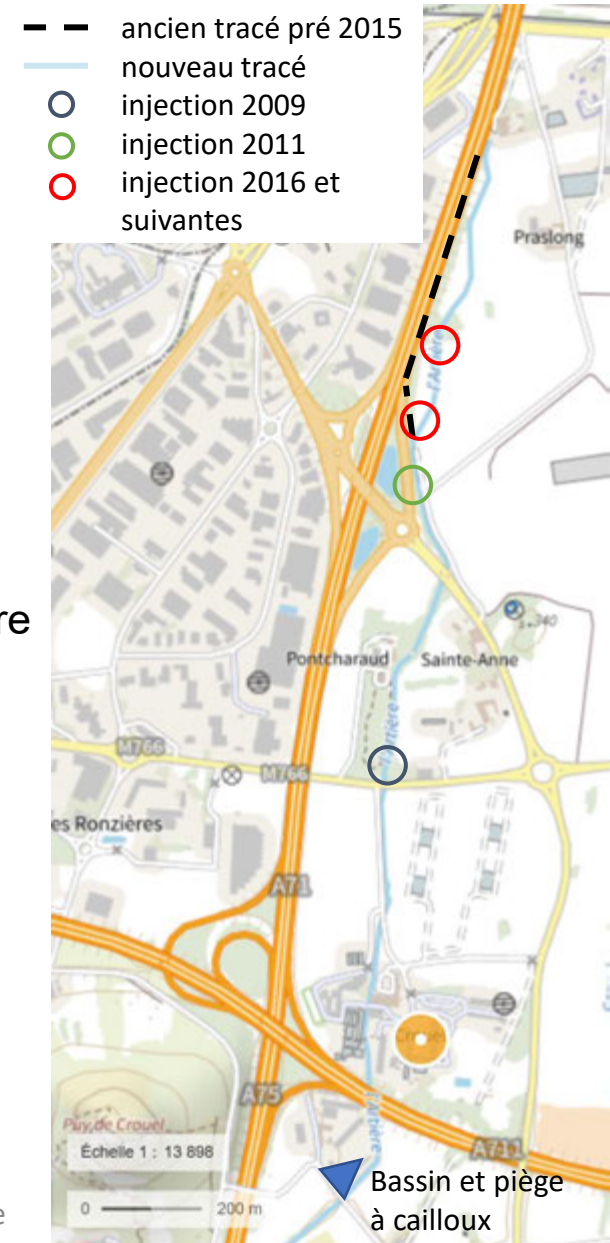
Cas de l'Artière – Clermont Auvergne Métropole

Chronique des injections

2009	premier test, 80 m ³ injectés, ~ une année hydrologique, aval immédiat de bassin d'orage
2010-2013	Second test, retour expérience de 2009 Etat des lieux sédimentaire du piège : apports annuels, granulométrie, tri Seconde injection avec suivi pré et post-injection
2015-2016	Mise en 2*3 voies A75, nouveau tracé Artière Injection avec suivi pré et post-injection
Depuis 2016	Mise en routine fréquence variable selon hydrologie

Demande de la Métropole :

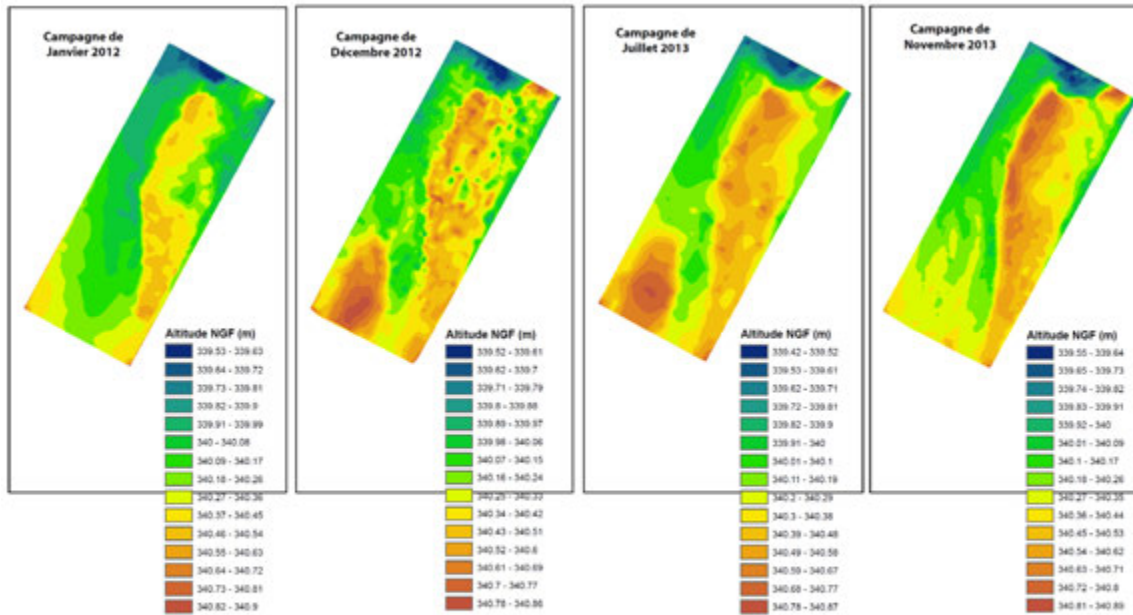
- Mieux comprendre le comportement du bassin d'orage (quels volumes ? Quelles granulométries ?)
- Suivre les réinjections pour connaître leurs impacts (enjeu inondation)



Cas de l'Artière – Clermont Auvergne Métropole

2010-2011 : dimensionnement, premier suivi

- Suivi topographique dans le piège = estimation des apports de matériaux
- Granulométrie des matériaux dans le piège et en aval



Bilan sédimentaire entre les campagnes de mesures

Comparaisons	Coteurs Surface 3D	Surfaces (m ²)		Volumes (m ³)	
		Apparts	Départs	Apparts	Départs
Janvier 2012 / Décembre 2012	868	788	190	123	10
Décembre 2012 / Juillet 2013	868	498	871	29	37
Juillet 2013 / Novembre 2013	868	881	301	84	44

Remarque
En août 2013, suite aux événements de crue du 6 et 8 août, un curage a été réalisé, 250m³ de sédiments ont été extraits

0 5 10 20
Mètres

Véodis-3D
© Véodis-3D - www.veodis-3d.com

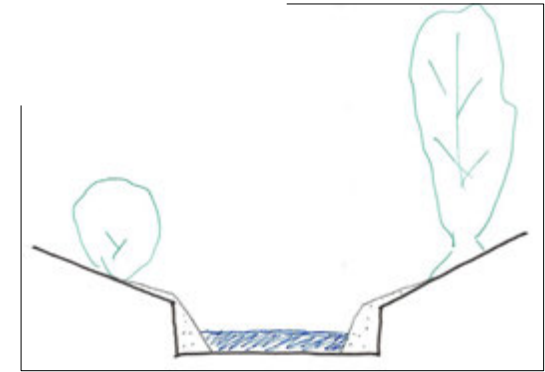
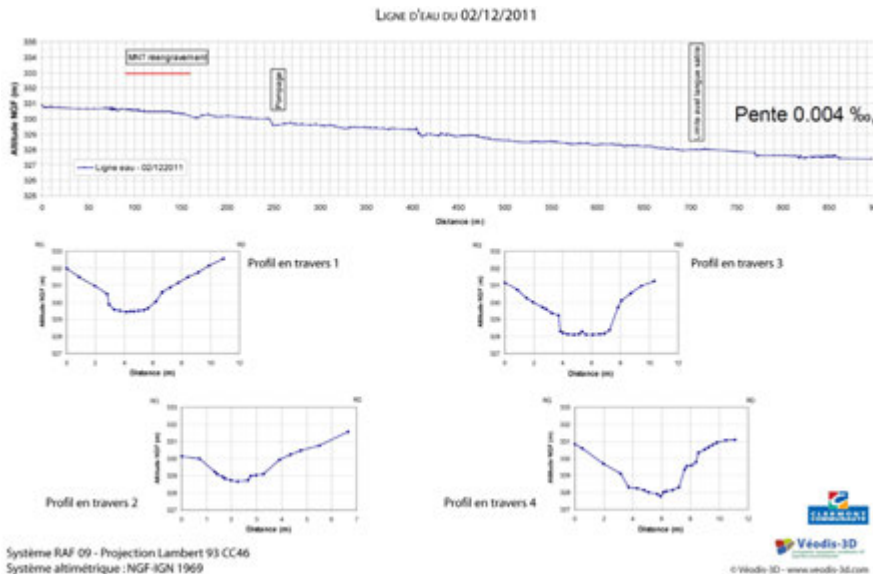
Nom de la classe granulométrique	Classes de taille (diamètre en mm perpendiculaire au plus grand axe)	Code utilisé	Croulé 2010		Croulé 2011	
			g	%	g	%
Dalles (dont dalles d'argile)	>1024	D				
Rochers	>1024	R				
Biocis	256 - 1024	B				
Pierres grossières	128 - 256	PG				
Pierres fines	64 - 128	PF	3098	5.32%	20129.5	22.26%
Cailloux grossiers	32 - 64	CG	7449	12.78%	10092	11.16%
Cailloux fins	16 - 32	CF	4808	8.25%	15405	17.03%
Graviers grossiers	8 - 16	GG	4041	6.94%	6581.5	7.28%
Graviers fins	2 - 8	GF	12056	20.69%	4438.5	4.91%
Sables	0.0625 - 2	S	26578	45.61%	12835	14.19%
Limons	0.0039 - 0.0625	L	131	0.22%	20750.5	22.94%
Argiles	< 0.0039	A	108	0.19%	119	0.13%
Vase	sédiments fins (< 0,1 mm) avec débris organiques fins	V			94.5	0.10%
Terre végétale	points hors d'eau très végétalisés	TV				

- Quantité de matériaux variable selon l'hydrologie : autour de 100 à 250 m³/an
- Matériaux à granulométrie hétérogène

Cas de l'Artière – Clermont Auvergne IV

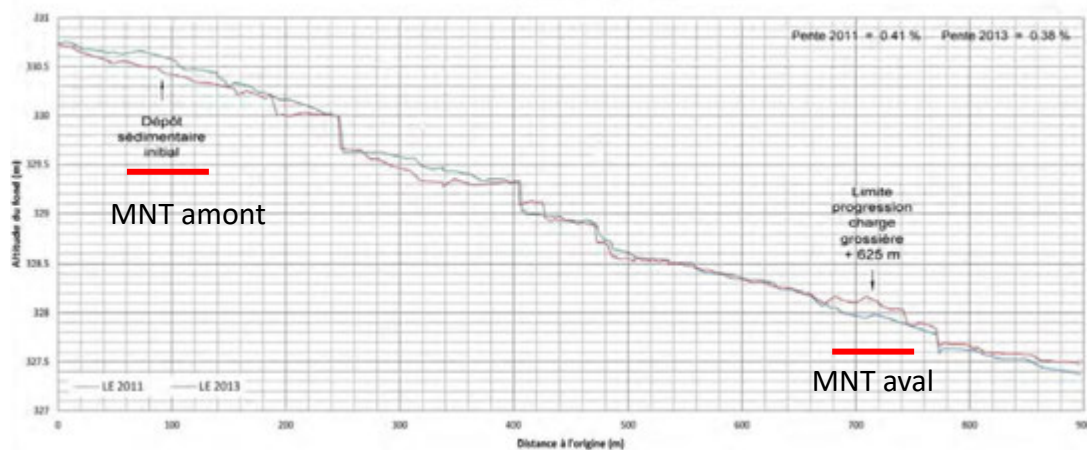
Modalités de l'injection 2011

- Eclaircie préalable des accès
- Topographie pré-travaux :
 - 4 profils en travers
 - Profil en long fond et LE
 - Modèle Numérique de Terrain amont (zone d'injection) et aval (témoin)
- Granulométrie identique à celle du piège à cailloux
 - Sables (2mm) : 25%
 - Gravier fins (2-8mm) : 40%
 - Cailloux grossiers (32-64mm) : 35%
- Volumes injectés 300 m³
- Dépôts de matériaux sur le fond du lit et en pied de berge (Rex 2009)



Cas de l'Artière – Clermont Auvergne Métropole

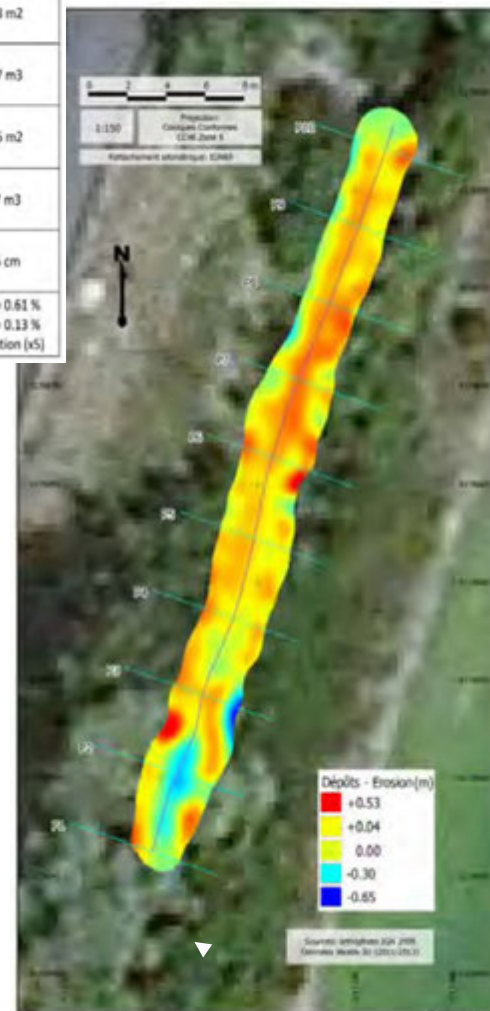
- Suivi visuel et topographique (2011-2013)



Evolutions morphologiques 2011 - 2013	
Zone de divagation du lit (lit+berges)	143 m ²
Evolution du volume total	+ 7 m ³
Zone de maintien du lit	135 m ²
Volume de sédiments déposés au fond du lit	+ 7 m ³
Dépôt moyen du lit	+ 5 cm
Pente moyenne du fond	2011 = 0.61 % 2013 = 0.13 % Diminution (x5)

MNT aval

+ 2 mois



Transport solide et recharge sédimentaire

Cas de l'Artière – Clermont Auvergne Métropole

Modalités de l'injection 2015 et mise en routine

- 200 m³ déversés sur 2 zones
- Suivi visuel et topographique 2015-2016

Comparaisons	Surface (m ²)	Volumes (m ³)	
		Apports	Départs
<i>Novembre 2015 / Mars 2016</i>	224	3.9	31.7

MNT amont :
départ

Vue du site vers l'aval



Prise de vue du 20 novembre 2015

Prise de vue du 10 mars 2016



Comparaisons	Surface (m ²)	Volumes (m ³)	
		Apports	Départs
<i>Novembre 2015 / Mars 2016</i>	104	0.8	16.9

MNT aval :
départ

Vue du site vers l'aval



Prise de vue du 20 novembre 2015

Prise de vue du 10 mars 2016

Comparaisons	Surface (m ²)	Volumes (m ³)	
		Apports	Départs
<i>Novembre 2015 / Mars 2016</i>	249	9.3	15

MNT nouveau
lit : transfert

Vue du site vers l'aval



Prise de vue du 20 novembre 2015

Prise de vue du 10 mars 2016

t solide et r

Cas de l'Artière – Clermont Auvergne Métropole

Bilan

- Cubature du piège réalisée systématiquement tous les 3-4 ans pré-curage
- Curage du piège tous les 4 ans
- Tri des matériaux
- Volumes d'injection autour de 200 m³, sur 2 zones
- Suivi visuel de la mobilisation des matériaux au droit des 2 sites d'injection et en aval



+ 2 mois





Qualité des matériaux hétérogènes
Répartition en plan et en strate
Besoin de garder le meilleur



Importance de travailler avec un pellicier
compétent qui comprend la commande et sais
travailler en rivière



Eclaircie préalable dans la ripisylve
Accès poids lourd
reprise par une pelle pour mise en place.



Transport solide e

Cas du Furan – Saint-Etienne Métropole

Contexte

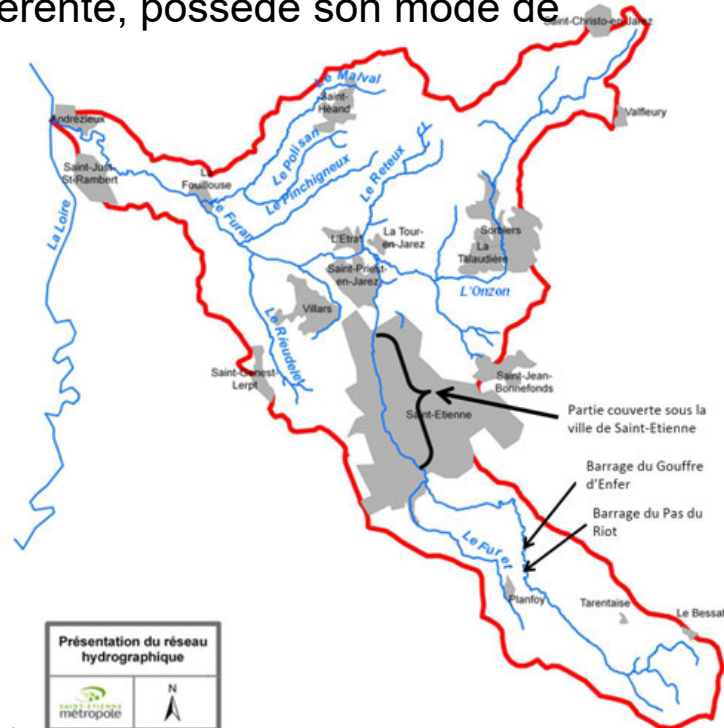
- BV amont encaissé et boisé
- Présence de 2 barrages, 10km en aval de la source (usage AEP et écrêteur de crue)
- De l'aval des barrages jusqu'à l'entrée de la couverture sous la ville : augmentation progressive des protection de berges
- Couverture du Furan sur 5km dans la zone urbaine
- En aval de la couverture : zone urbaine de plusieurs km : rectification du tracé et protections latérales
- Etude géomorphologique 2012 (Saint Etienne agglomération)



Cas du Furan – Saint-Etienne Métropole

Contexte

- Furan jusqu'à Saint-Etienne : transport solide résiduel en aval du Gouffre d'enfer
- Furan sous la couverture (5km) :
 - impact majeur de l'imperméabilisation sur l'hydrologie : réaction rapide et violente aux intensités de précipitations, types orages
 - forts débits liquides, temps de concentration très court (de l'ordre du ¼ d'heure, ex. crue du 07/2009 augmentation du débit de 60m³/s en 3 minutes)
 - fort déséquilibre sédimentaire
 - chaque section de la couverture, à géométrie différente, possède son mode de fonctionnement en termes de transport solide
- Furan aval jusqu'à la Fouillouse (10km) :
 - charge sédimentaire semble provenir exclusivement de l'amont
 - Transit vers l'aval à un rythme soutenu du fait des forts débits liquide
 - Présence de la roche mère
 - Incision du lit
 - Seuls les seuils maintiennent les matériaux, mais ils sont figés et colmatés ou peu mobiles



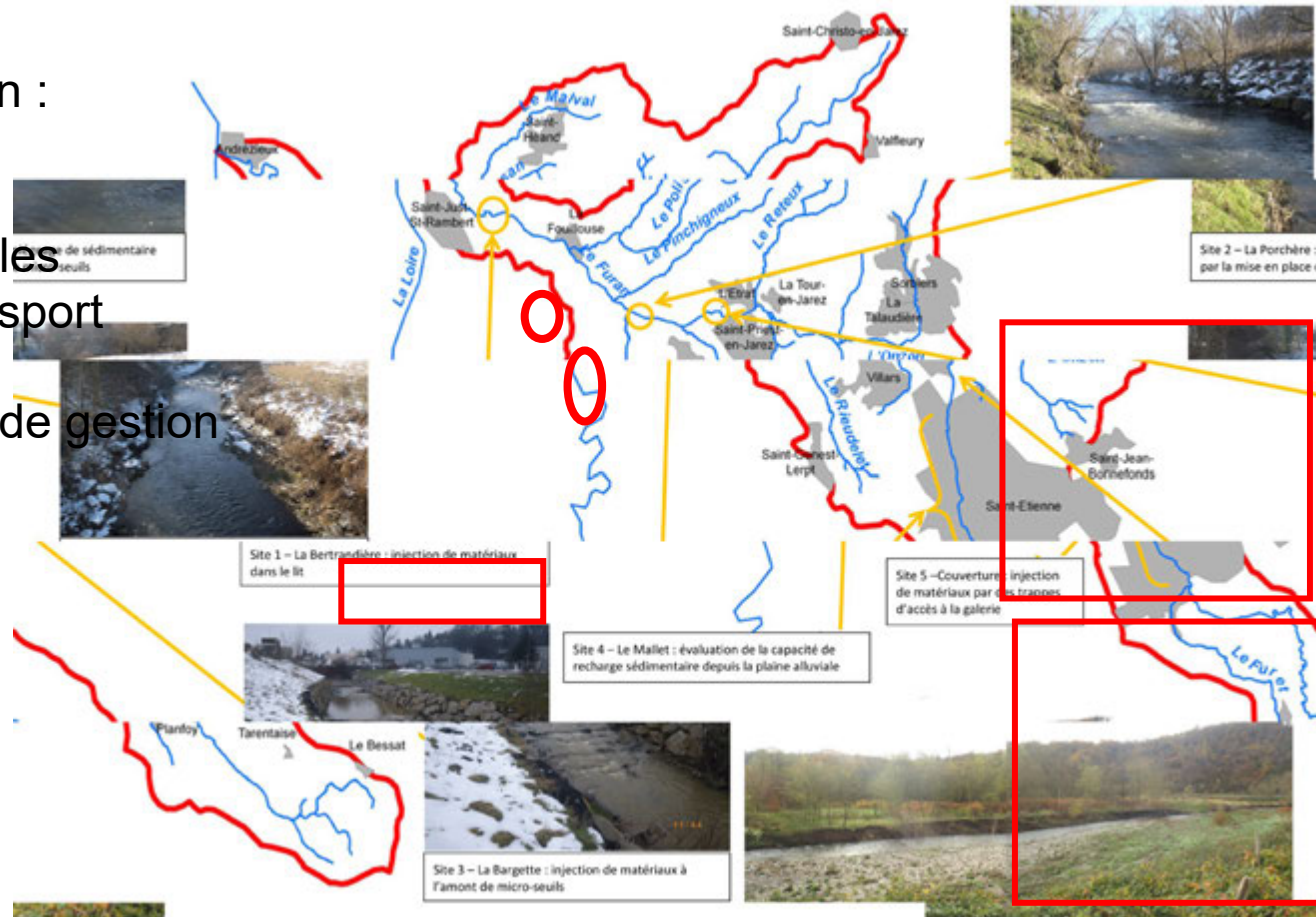
Cas du Furan – Saint-Etienne Métropole

- Propositions de l'étude de 2012 :
 - Réinjection de matériaux dans le lit : sous la couverture (reconstituer un matelas sédimentaire pour protéger le radier) et en aval (incision)
 - Mise en place d'indicateurs de suivi
 - Identification de sites expérimentaux

- Objectifs de la mission :

- définir,
- mettre en œuvre
- suivre des protocoles d'évaluation du transport solide
- élaborer un plan de gestion

Durée : 4 ans



Cas du Furan – Saint-Etienne Métropole

Approche globale mise en œuvre et dimensionnement des réinjections

Quelle granulométrie est charriée par les crues courantes ?



1 an de suivi, après crue Q1 à Q5

- Etat des lieux granulométrique (Wolman)
- Détermination du débit de mise en mouvement des particules
 - > placettes colorimétriques
 - > galets peints
 - > galets équipés de traceurs RFID
 - > calculs théoriques
- Carto. bancs, faciès

Où et comment injecter ?



- Contraintes fortes d'accès

Quelle quantité de sédiments à injecter ?



- Etude de l'impact de l'injection par modélisation hydraulique (ligne d'eau, vitesse)

Quels matériaux injecter ?



- Pas de stock de matériaux disponibles
- Recherche des « sources »
- Choix du criblage pour calibrer et tester les protocoles

Quels impacts, efficacité ?



- Suivi topo, RFID

Cas du Furan – Saint-Etienne Métropole

Approche globale mise en œuvre et dimensionnement des réinjections



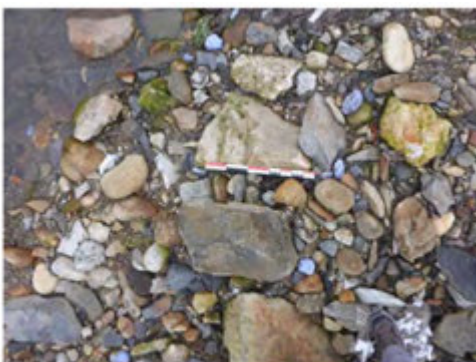
Placette originale, le 19/11/2015



Première lecture, le 08/03/2016

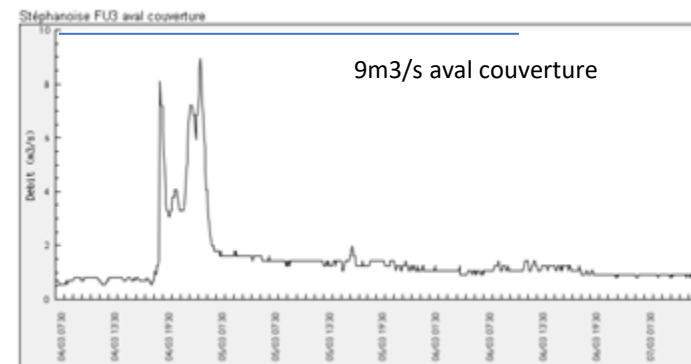


Lecture de placette, le 13/05/2016 : aucune modification



Exemple de galets retrouvés lors de la première lecture du 08/03/2016

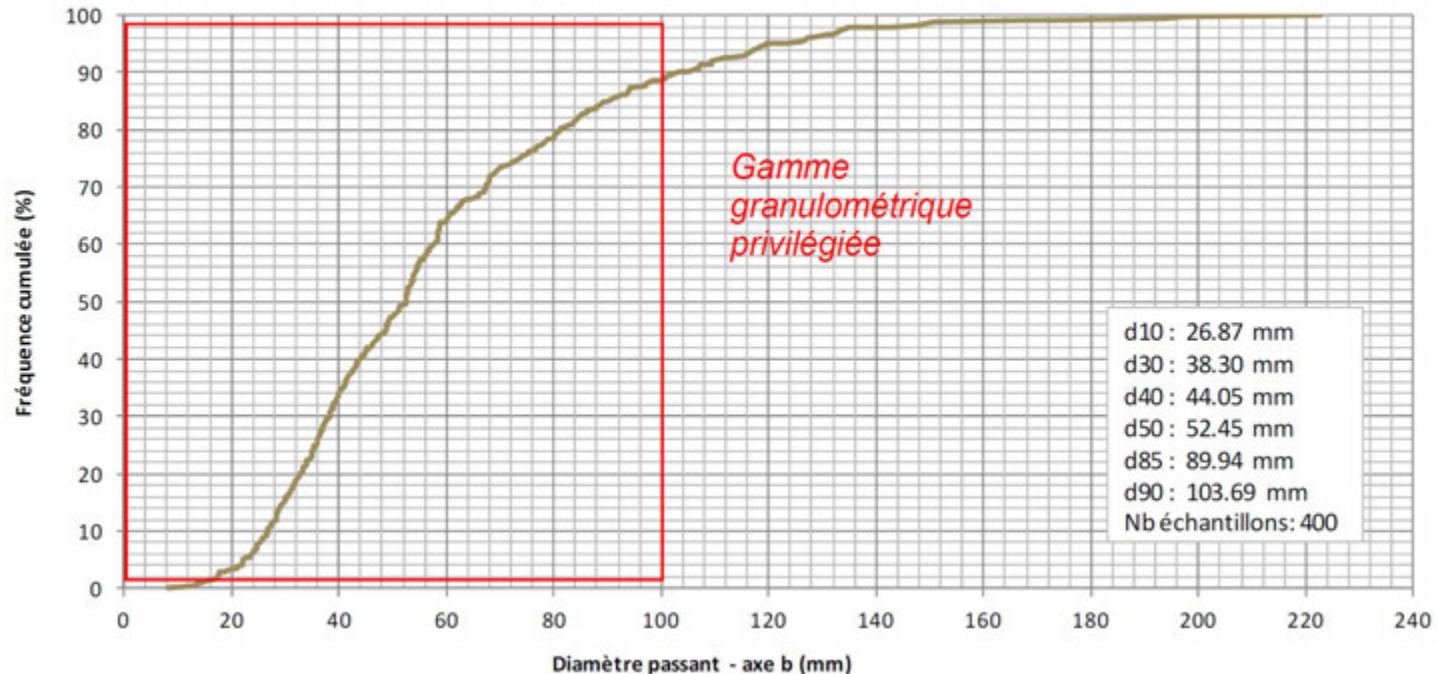
Taille des particules mobilisées (mm)	Distance de déplacement (m)
45, 62, 76	1.30 m
26, 38, 45, 70, 78	1.70 m
14, 45, 77	2.70 m
25	3
31, 39, 71	3.80 m
17, 21, 38, 62	4.20 m



Cas du Furan – Saint-Etienne Métropole

Approche globale mise en œuvre et dimensionnement des réinjections

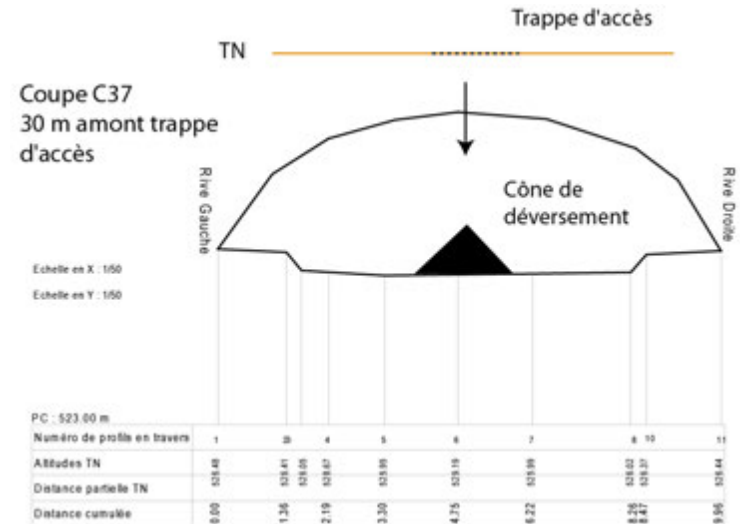
- Choix de la courbe granulométrique cible
- Criblage de matériaux provenant de la gravière de Mons, composition :
 - 25% de 20/40
 - 75% de 40/160
- suppression des diamètres > au D90



Cas du Furan – Saint-Etienne Métropole

Couverture du Furan : approche mise en œuvre et dimensionnement de la réinjection

- Injection ponctuelle par tas de 4 m³



Localisation
Centre ville, rue Voltaire

Coordonnées
Plan dwg Levés topo couverture 2015
-2812.8674 / -751.5774 (planche 4
profil en long)

Lambert 93
808683.43 / 6482155.27
WGS84
43.43021667 / 4.38998611

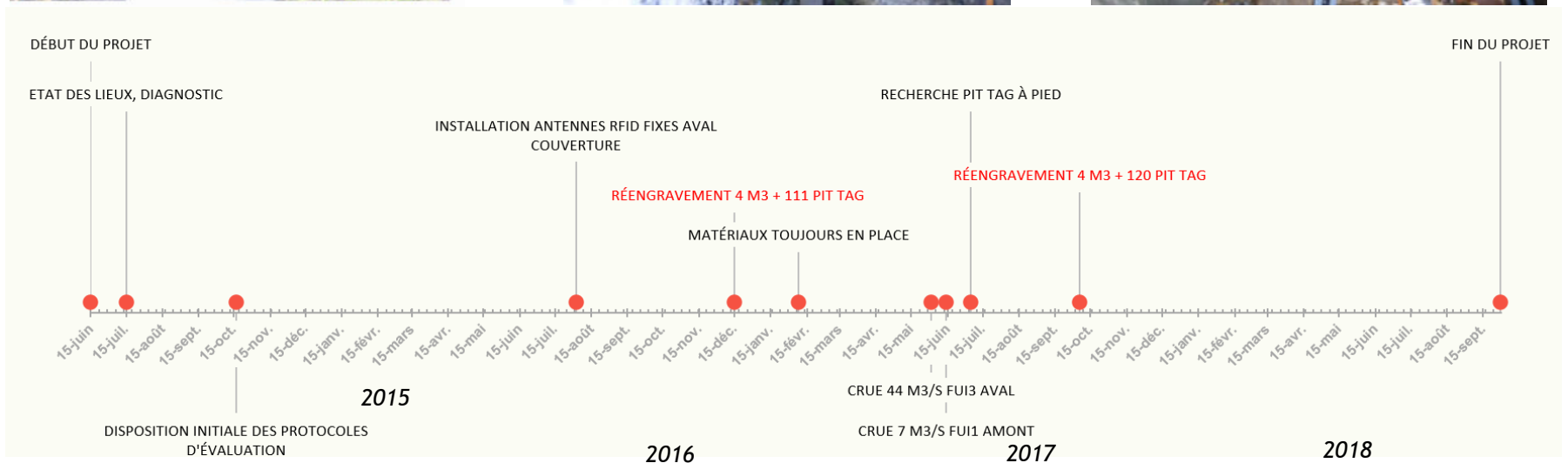
Banque LCL Rue côté gauche



Cas du Furan – Saint-Etienne Métropole

Couverture du Furan : suivi des injections

- Par observations visuelles à la suite de crues depuis la trappe d'accès,
- Grâce à l'instrumentation de galets équipés de traceurs RFID dans les matériaux déversés :
 - > mise en place d'une antenne RFID fixe en sortie de cadre, 3000 m en aval du lieu d'injection
 - > recherche de tag dans la couverture

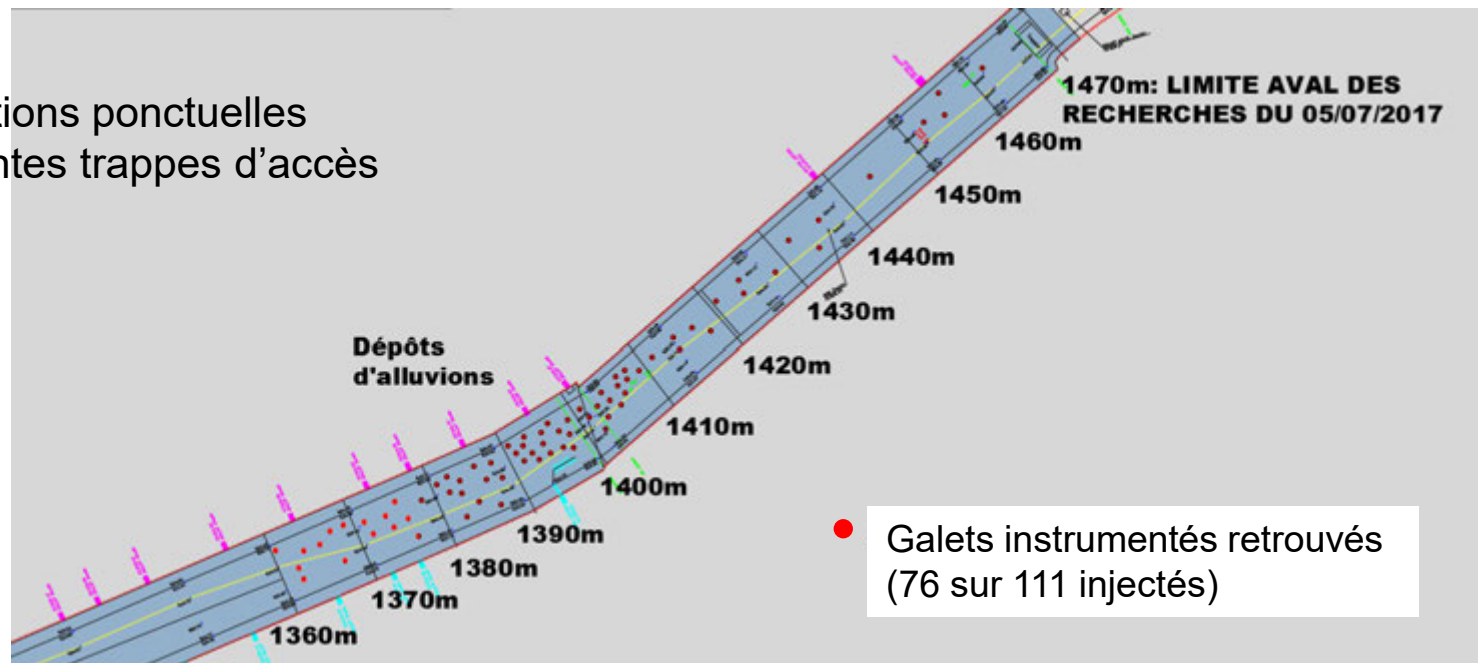


Cas du Furan – Saint-Etienne Métropole

Couverture du Furan : suivi des injections

- Remobilisation totale des matériaux injectés (crue de fréquence 2 ans $7.5\text{m}^3/\text{s}$ en amont de la couverture, $43\text{m}^3/\text{s}$ en aval de la couverture 14/06/2017)
- Blocage des matériaux dans la galerie : pas d'enregistrement des traceurs par les antennes RFID
- Recherche traceurs à pied dans la galerie
 - > taux de retour de 68%
 - > distance de déplacement de 150 à 260 m quelque soit le diamètre de la particule
- Galets retrouvés sur un banc d'alluvionnement existants (de toutes tailles)
- Galets vraisemblablement présents dans les fosses aval

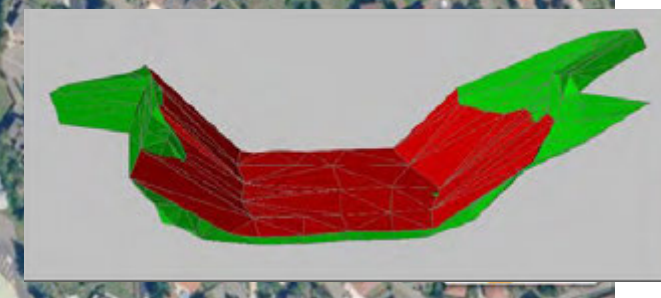
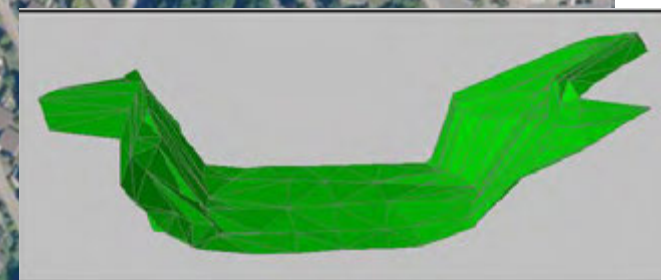
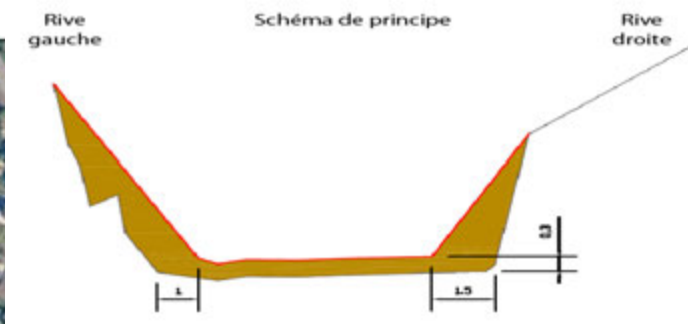
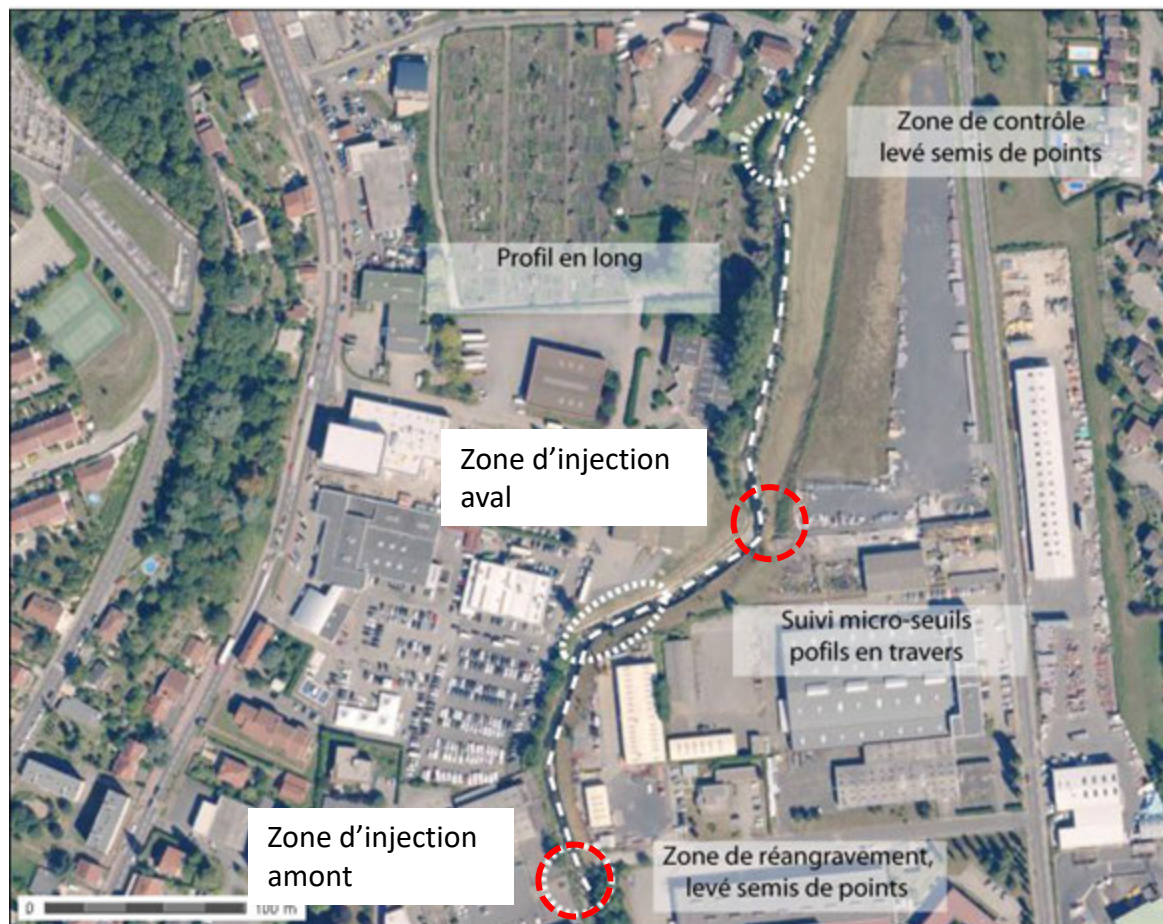
Perspective : injections ponctuelles
à partir des différentes trappes d'accès



Cas du Furan – Saint-Etienne Métropole

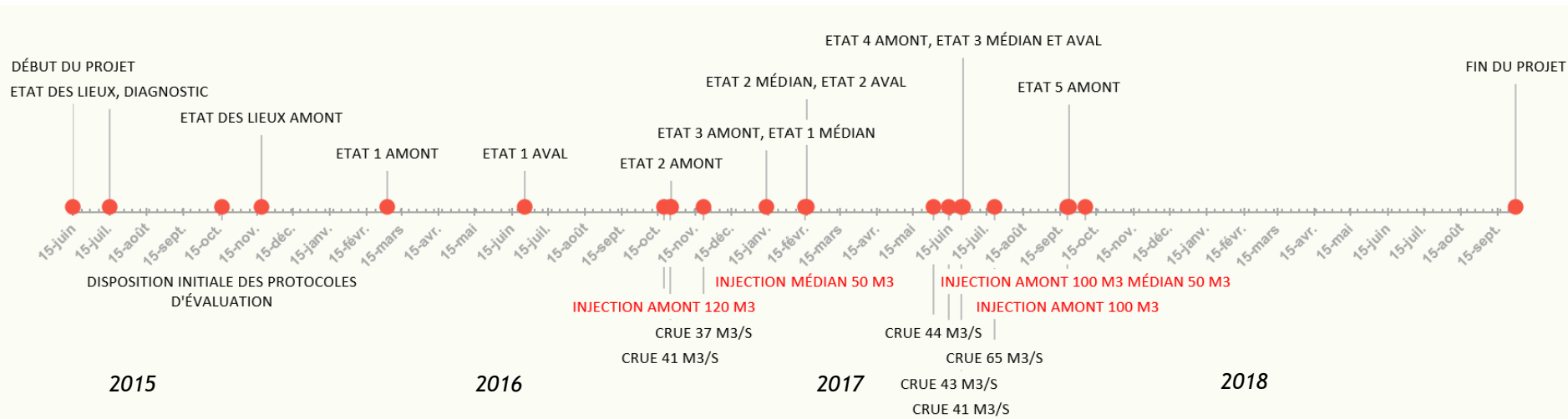
Aval de la couverture : approche mise en œuvre et dimensionnement de la réinjection

- 2 zones d'injection, 2 modalités
- Suivi topographique



Cas du Furan – Saint-Etienne Métropole

Aval de la couverture : approche mise en œuvre et dimensionnement de la réinjection



- 4 injections amont, volumes de 100 et 120 m³
- 2 injections aval 50 m³

Cas du Furan – Saint-Etienne Métropole

Aval de la couverture : suivi des injections

Crue du 25/10/2016 (occurrence 2 ans)

Avant



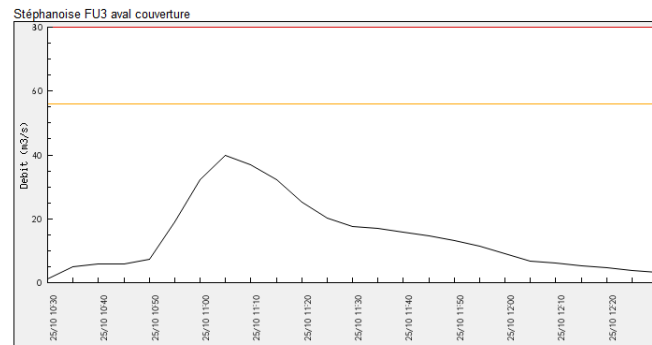
Pendant



Après 26/10/2016



Courbes des stations : Stéphanoise FU3 aval couverture



Cas du Furan – Saint-Etienne Métropole

Aval de la couverture : suivi des injections

26/10/2016



13/01/2017



26/06/2017



Cas du Furan – Saint-Etienne Métropole

Aval de la couverture : suivi des injections

29/09/2017 à la suite nouvelle injection

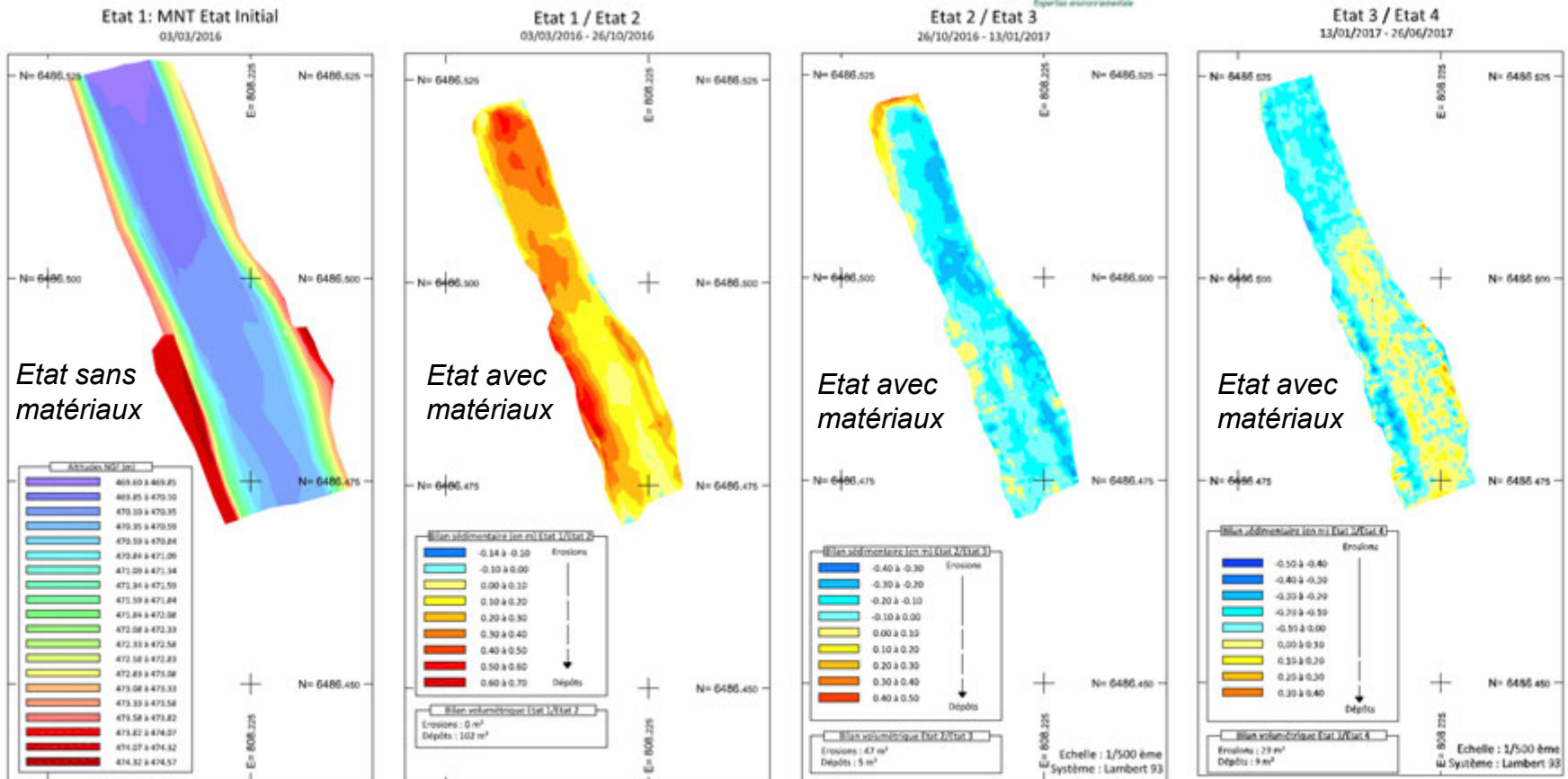


Cas du Furan – Saint-Etienne Métropole

Aval de la couverture : suivi des injections

- profil en long fond et ligne d'eau
- profils en travers
- Modèle Numérique de Terrain (MNT) amont et aval éloigné
- Délimitation de la langue de progradation sédimentaire

Exemple MNT
amont

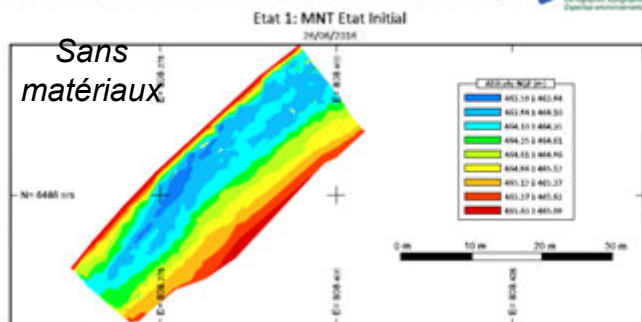


Cas du Furan – Saint-Etienne Métropole

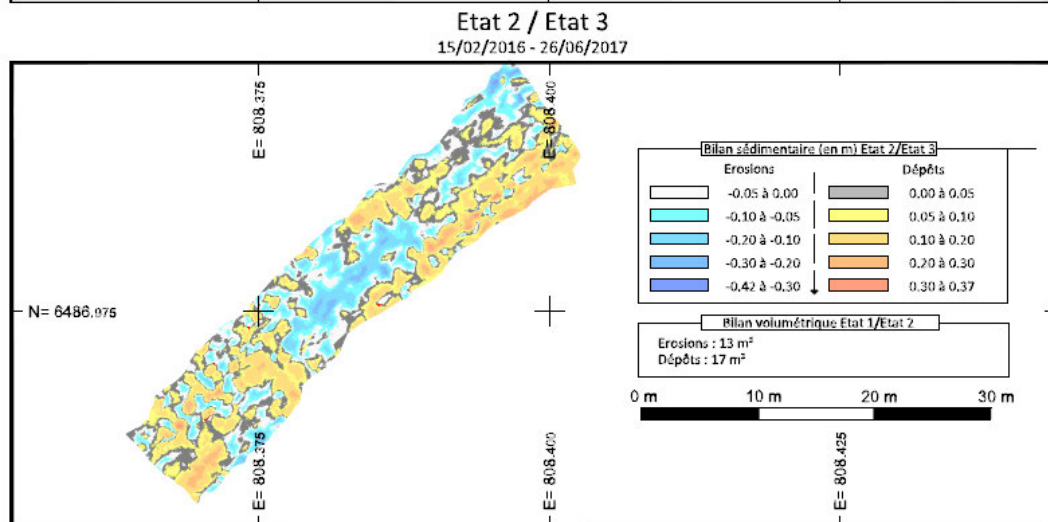
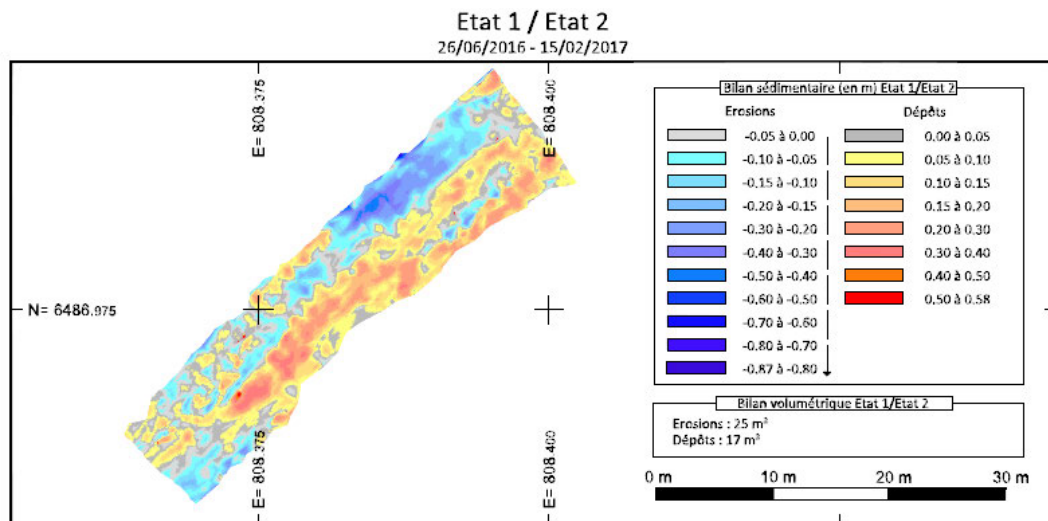
Aval de la couverture : suivi des injections

Exemple MNT aval

SITE DE LA BARGETTE AVAL : EVOLUTION TOPOGRAPHIQUE 



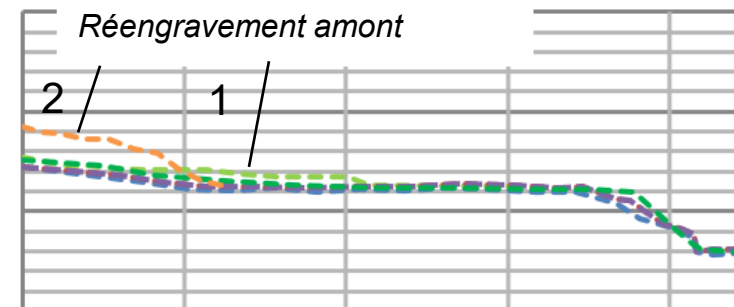
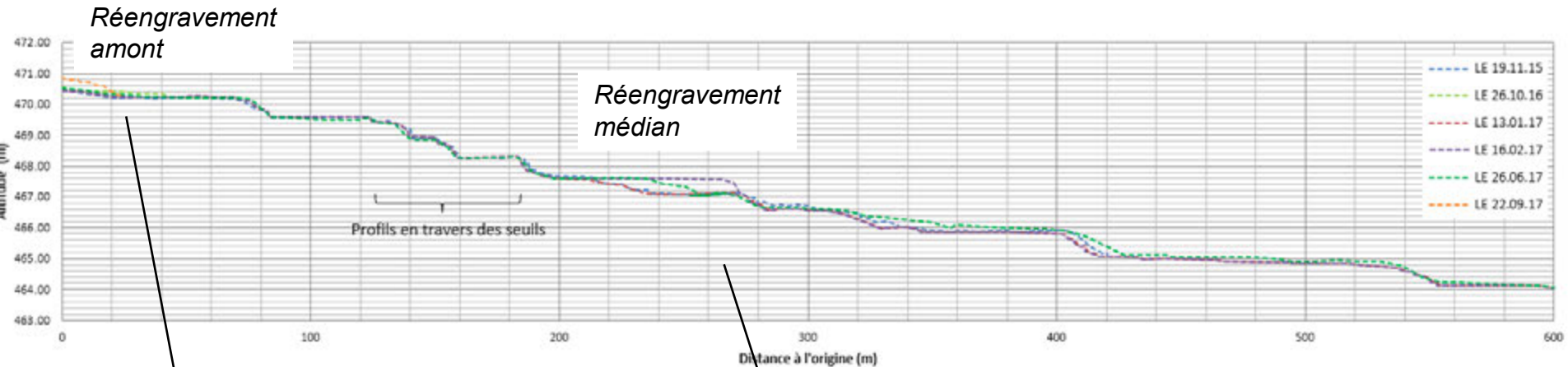
Apports amont



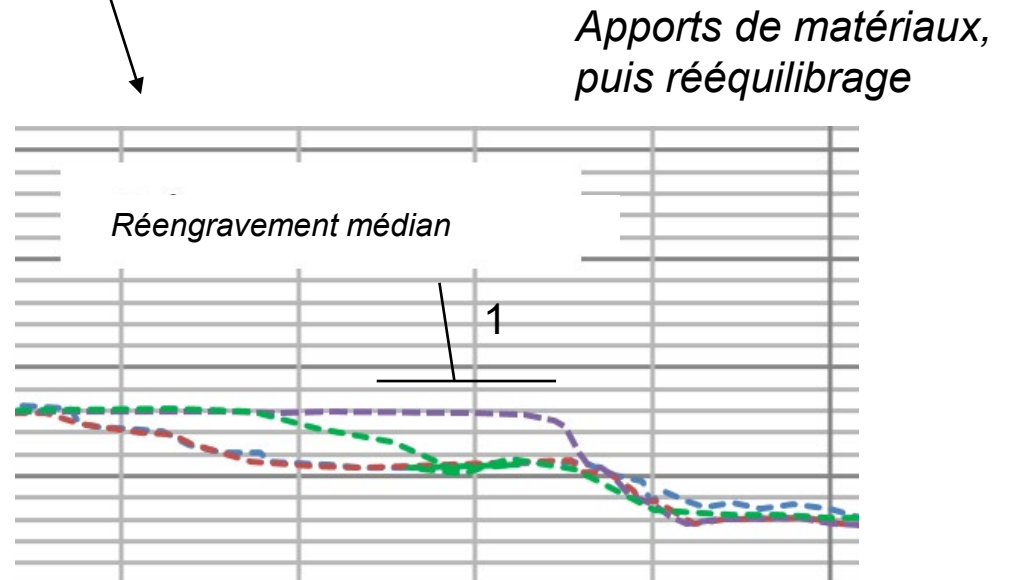
La topo ne montre pas d'évolution particulière = équilibre entre les départs et les arrivés de matériaux

Cas du Furan – Saint-Etienne Métropole

Evolution du profil de la ligne d'eau



Arrivée des matériaux
provenant de l'amont



Cas du Furan – Saint-Etienne Métropole

Aval de la couverture : bilan

Points positifs

- 6 crues morphogènes en 2017, 6 injections de matériaux
- Recharge sédimentaire progressive et déplacement des sédiments = transport solide effectif et équilibré (pas d'accumulation), distance de déplacement 1500m
- Diversification des faciès d'écoulements
- Hétérogénéité granulométrique

- Validation des résultats des débits de mise en mouvement des particules sédimentaires, de l'ordre de 20 m³/s pour des particules de classe D50 (< crue biennale)
- Validation des différentes approches : suivi terrain, experte et calculatoire
- Validation de la gamme granulométrique injectée (modèle reconstitué par criblage)

Points négatifs

- Pas de suivi biologique
- Pas ou peu de matériaux disponibles sur place
- Criblage et transfert de matériaux non cohérents en dehors de ces expérimentations
- Difficultés dans le choix des sites (accès)

Déficit sédimentaire constaté -> projet d'injection sédimentaire

Artière Clermont Auvergne Métropole

Matériaux disponibles
Site de réinjection proche, faible distance de transport
Pente identique
Forte incision au droit de la zone d'injection
Faible enjeu



Injection par REX envisageable pour ajuster le rythme d'injection et les volumes

Le Furan Saint Etienne Métropole

Matériaux non disponible
Sites d'injection à morphologie différente
Forts enjeux



Connaissance fine du fonctionnement sédimentaire, couplage terrain et calculatoire morpho-approche

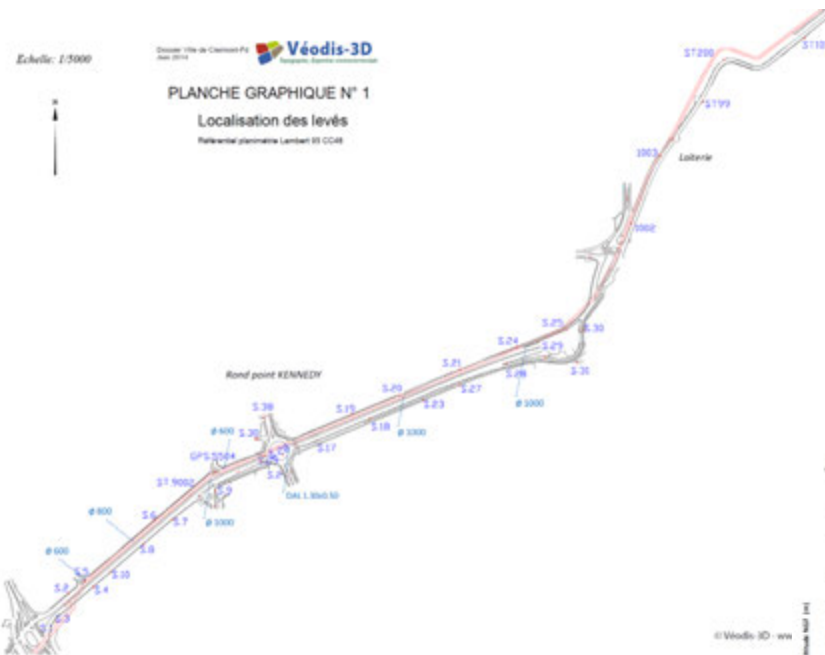
Suivi : Topographique, RFID, colorimétrique, biologique, etc.

- Validation des objectifs
- Validation des volumes, de la granulométrie
- Donne le rythme des injections
- Donne les bornes hautes des volumes d'injection
- Changement des lieux d'injection
- Evaluer les impacts

Bilan / retour d'expérience des deux approches

- Pas un modèle unique de réinjection mais des modèles d'injection à adapter au contexte morphologique et sédimentaire
- Besoin d'un bilan global : étude morphologique et sédimentaire
- Besoin de communiquer

La recharge sédimentaire n'est pas automatique : exemple Tiretaine souterraine



Constat : dépôts de matériaux sur tout le linéaire

Questionnement :

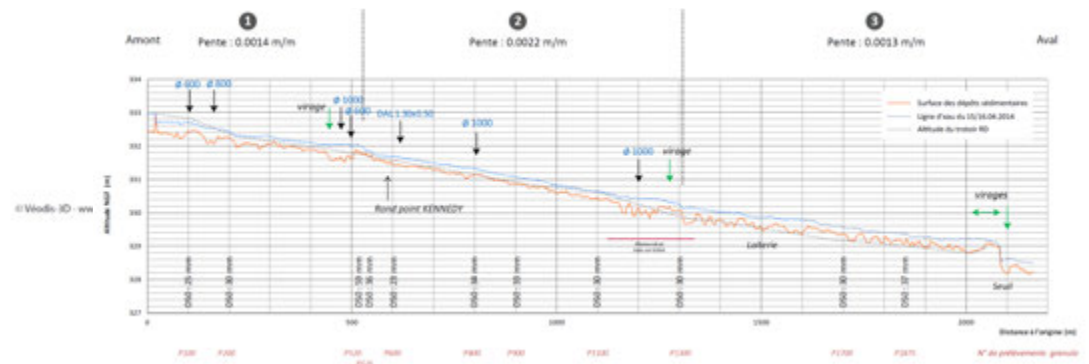
Est-ce que les matériaux sont mobiles ou pas ?

Exhaussement qui justifie un curage ou atterrissements lisé à un flash dans le profil en long ?

Enjeux : ne pas accentuer l'exhaussement par des injections en amont

Profils en long du fond et de la ligne d'eau sur la Tiretaine souterraine (DAL 5.3x2.5)

Pente générale : 0.0019 m/m



Suivi topo, granulométrie, instrumentation de traceurs RFID