

# Mise en sécurité d'un ancien puits minier par un bouchon autoportant en jet grouting : Puits Rivat à Genilac

## Securing an old mine shaft with a self-supporting jet grouting plug: Rivat shaft in Genilac

Meriam KHEMAKHEM<sup>1</sup>, Boris DELMAS<sup>2</sup>, Joao Victor MUSSI<sup>3</sup>, Stéphane BRÛLÉ<sup>4</sup>

*1 3 GEOS Ingénieurs Conseils, France*

*2 DPSM BRGM, France*

*4 MENARD, France*

*meriam.khemakhem@geos.fr*

### RESUME :

Le puits Rivat est un ancien puits minier exploitant la couche houillère de la Grande Masse, situé à Genilac (Loire), à proximité immédiate d'une habitation du XVIII<sup>e</sup> siècle. À la fin de l'exploitation, le puits a été remblayé. Des tassements ont été observés à partir de 2019, avec une accélération marquée en 2021 à l'aplomb de l'ouvrage. Le diagnostic a confirmé l'origine minière des désordres, liée à un effondrement localisé des remblais en tête de puits. Les études de conception ont été engagées afin de traiter le risque principal identifié : le débouillage des remblais. Les reconnaissances réalisées à l'intérieur du puits ont mis en évidence des remblais sablo-caillouteux de faible compacité, comportant des éléments anthropiques, sur une profondeur d'au moins 10 m. En dehors du puits, le substratum schisto-gréseux a été reconnu à environ 12 m de profondeur.

La solution de mise en sécurité devait répondre à plusieurs exigences : stopper le phénomène de débouillage, ne pas s'appuyer structurellement sur le cuvelage du puits dont les caractéristiques sont mal connues, éviter tout déblaiement susceptible d'affecter la stabilité de l'habitation, et limiter les infiltrations d'eaux météoriques. La solution retenue repose sur la réalisation d'un bouchon autoportant fonctionnant par frottement sur le substratum schisto-gréseux. Elle consiste à traiter les remblais historiques par la technique du jet grouting, afin de constituer un bouchon de colonnes sécantes réalisé depuis la tête du puits. Des colonnes d'essai ont été exécutées en début de chantier pour valider les paramètres d'exécution, notamment le diamètre des colonnes, à l'aide de la méthode des « tiges colorées ». Un suivi des déplacements en surface a été mis en place afin de contrôler les déformations pendant les travaux.

### ABSTRACT:

The Rivat shaft is a former mining shaft that exploited the Grande Masse coal seam located in Genilac (42) in the immediate vicinity of an 18th-century house. This shaft was backfilled at the end of mining operations. Settlement was detected in 2019 and accelerated in 2021 at the shaft top. The diagnosis confirmed the mining origin of the problem: localized collapse of the backfill at the shaft top. Design studies were then carried out to propose a solution to address the main risk, which is the collapse of the backfill. Surveys carried out inside the shaft revealed sandy-stony backfill with low compactness and containing anthropogenic elements to a depth of at least 10 m. Outside the shaft, the schistose-sandstone substrate was identified at a depth of 12 m. The securing shaft solution must meet several requirements: it must stop the collapse phenomenon, not rely structurally on the shaft lining, whose mechanical characteristics and depth are poorly understood, avoid any excavation that could cause instability in the dwelling above ground, and prevent rainwater infiltration. The solution of a self-supporting plug, using friction with the schistose sandstone substrate, has been chosen. This solution involves treating the historic backfill inside the shaft using the jet grouting technique. A plug of intersecting columns is created by drilling from the top of the shaft. Test columns are installed at the start of the work to confirm the diameter of the columns, using the "colored rods" method. Surface displacement monitoring is set up to track surface deformations during treatment.

**Mots-clés :** Ancien puits minier ; risque débouillage ; bouchon autoportant ; jet grouting ; mise en sécurité.

## 1 CONTEXTE DU PROJET

À Genilac, dans le département de la Loire, un ancien puits minier jouxte une maison du 18<sup>ème</sup> siècle. Ce puits, dénommé puits Rivat, qui est un vestige de l'exploitation de la houille, présentait des signes de désordres liés à un affaissement de terrain. L'origine minière a été confirmée dès les premiers diagnostics.

## 2 PRESENTATION DU Puits RIVAT

### 2.1 Historique du site

Le puits Rivat est localisé par l'atlas Beaunier (1813) qui dresse le relevé des anciens travaux miniers du secteur correspondant à la mine dite de Haute Cappe. D'après l'atlas de 1881 de Grûner, le puits Rivat avait atteint la couche Grand Masse à 35 m de profondeur.

La couche charbonneuse de la Grande Masse avait été interceptée vers 45 m de profondeur d'après une coupe de 1834 (cf. Figure 1) et comprenait **3 recettes** selon cette même coupe. D'après cette figure, la première recette est située au toit de la couche de la Grande Masse (45 m de profondeur). Les profondeurs des deux autres recettes ne sont pas précisées.

Selon le dossier de la Déclaration d'Arrêt Définitif des Travaux de Charbonnages de France (CdF), le puits RIVAT, situé sur la concession de Collenon est défini avec une profondeur de 55 m et un diamètre intérieur de 2,45 m (Figure 2).

Selon la coupe de la Haute Cappe de 1834 (cf. Figure 1), si les galeries souterraines indiquées sous la couche de la Grande Masse représentée en noir sont en prolongation verticale du puits, la longueur du puits dépasserait 55 m (base de la profondeur de la Grande Masse par rapport au TN en 1834) en cohérence avec les données de CdF.

D'après les données disponibles, le puits était encore actif en 1855, mais aucune donnée sur la date d'abandon ni de son mode de fermeture n'a été retrouvée.



Figure 1 : Coupe des travaux d'exploitation de la Haute Cappe de 1834 (extrait sur plan d'exploitation du 15 mars 1835, source : Archives Départementales de la Loire)

## CONCESSION DE COLLENON

Liste des ouvrages miniers débouchant au jour. [2]

NOMS DES OUVRAGES	COMMUNES	* COORDONNEES X & Y (K.m) Z (m).	SECTIONS et n° de PARCELLES	DIMENSIONS Diamètre (m) Profondeur (m) Section (m <sup>2</sup> ) Longueur (m)
<b>Puits dans la concession</b>				
BRULE	GENILAC	X = 775,196 Y = 69,575 Z = 345	D 52	Ø = 2,80 P = 140
RIVAT	GENILAC	X = 775,38 Y = 60,73 Z = 275	D 428	Ø = 2,45 P = 55
SAINTE ETIENNE	GENILAC	X = 774,96 Y = 60,23 Z = 327	B 102	Ø = 2,80 P = 260
SAINTE HENNEE	GENILAC	X = 774,77 Y = 60,07 Z = 319	B 107	Ø = 2,75 P = 185
VELLERUT	GENILAC	X = 776,003 Y = 69,424 Z = 374	B 375	Ø = 2,45 P = 410

Figure 2 : Extrait du dossier de la DADT de CdF - Concession de Collenon (source : Archives Départementales de la Loire)

Une photographie aérienne datant de 1950 à 1960, montre que l'habitation est déjà présente. Le garage attenant à l'habitation est construit entre 2014 et 2015.

### 2.2 Désordres observés

Les premiers signes de mouvement signalés au droit du puits Rivat en 2019 sont des affaissements (cf. Figure 3 ci-dessous) :

- une dépression globalement circulaire de 2,5 m à 3 m de diamètre et de 0,5 m de profondeur au centre fût constatée à l'angle des façades nord-est du garage et sud-est de l'habitation ;
- les bords de la dépression présentaient une fracture située à environ 0,5 m du garage et 2 m de l'habitation (extrados présumé du puits).



Figure 3 : Vue du désordre et de la façade du garage en septembre 2019 (1) Zone de la dépression (2) Limite du garage sur radier (source GEODERIS)

Les tassements s'accroissent en 2021, après de fortes pluies. La DREAL mandate GEODERIS pour un diagnostic et l'origine minière du désordre est confirmée. Il s'agit d'un « effondrement localisé vraisemblablement dû à la mobilisation des remblais présents en tête du puits ». Cet effondrement localisé s'expliquerait par :

- un mauvais compactage des matériaux de remblaiement du puits,
- un entraînement de fines lié à l'infiltration des eaux météoriques.

Compte tenu de la taille du puits (diamètre interne de 2,5 m et profondeur de 55 m) et en l'absence de données quant à son mode fermeture, une mise en sécurité pérenne dans les meilleurs délais est préconisée par GEODERIS pour éviter un débouillage plus conséquent.

Les premiers signes de mouvement signalés au droit du puits Rivat sont des affaissements, ces mouvements pourraient se poursuivre lentement ou s'accroître brutalement en cas de non-traitement de l'origine du phénomène.

### 2.3 Reconnaissances in situ

En février 2022, une campagne de reconnaissances géotechniques et un relevé topographique du site sont réalisés (Figure 4). Le puits a été déblayé en surface pour réaliser les sondages et procéder à l'inspection de sa partie supérieure (Figure 4) :

- en tête, le puits a un diamètre extérieur 4,9 m environ et un diamètre intérieur de 3,4 m. Ses parois sont constituées de pierres maçonnées,
- le puits est encadré au sud-ouest par le garage, située en limite de tête de puits, et au nord-ouest par le corps historique de l'habitation (comportant un niveau de sous-sol),
- le garage est fondé sur radier reposant sur une substitution de 30 cm d'épaisseur en concassé rocheux.

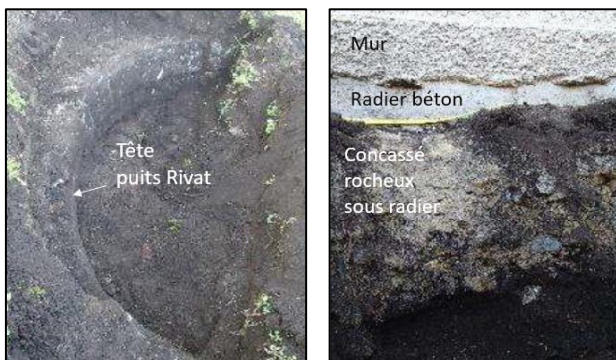


Figure 4 : Photos des reconnaissances du puits (source SIC INFRA)

## 3 CONTEXTE GEOLOGIQUE ET GEOTECHNIQUE

### 3.1 Contexte géologique

D'après la carte géologique au 1/50 000<sup>ème</sup> de Saint-Etienne (source BRGM), on distingue :

- une formation de sédimentation torrentielle en tête, appelée « schistes et grès, conglomérats, assise de Saint-Etienne » déposée pendant le Stéphanien inférieur (h5c). D'après la notice de cette carte, cette formation est polygénique (origine plurielle des sédiments), à galets de silex noirs, microgranites, roches effusives diverses (rhyolites et roches vertes), silex calcédoine, quartz et diverses roches silicifiées ;
- la formation sous-jacente du Stéphanien inférieur est schisto-gréseuse en tête où elle renferme 4 ou 5 couches de charbon dont la couche « Grande Masse de Rive de Gier » exploitée et recoupée par le puits Rivat.

### 3.2 Contexte hydrogéologique

Le site est localisé à environ 25 m du ruisseau La Durèze dont le lit est environ à la cote 268 m NGF au plus proche du puits, soit une dénivellée d'environ 7 m par rapport au niveau de la tête de puits.

### 3.3 Modèles de sol

Les reconnaissances géotechniques réalisés en février 2022 par SIC INFRA comprennent (cf. Figure 4 pour le plan d'implantation par rapport au puits) :

- des fouilles à l'intérieur et l'extérieur du puits (Sondages 21 et 22),
- un sondage destructif de 10 m de profondeur à l'intérieur du puits (Sondage 1),
- des sondage au pénétromètre dynamique de type B (Sondages 11 à l'intérieur et 12 et 13 à l'extérieur du puits),
- un sondage pressiométrique de 12,3 m de profondeur à l'extérieur du puits (Sondage 2).

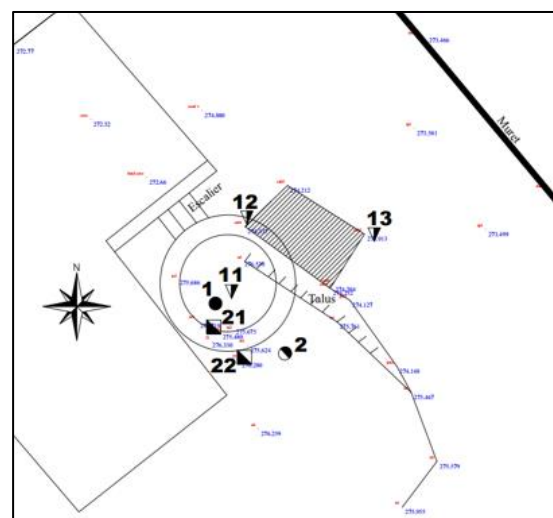


Figure 5 : Plan d'implantation du puits avec les investigations réalisées en février 2022 (source SIC INFRA)

Ces sondages ont été réalisés depuis une plateforme plane, un platelage a été mis en place au droit du puits.

Dans le puits, des remblais sablo-caillouteux de faible compacité et comportant des éléments anthropiques (débris de briques) ont été constatés. Ces remblais sont présents sur une profondeur d'au moins 10 m. En dehors du puits, des sables hétérogènes lâches sont identifiés jusqu'à 7,6 m reposant sur un substratum altéré schisto-gréseux, le substratum sain (schistes et grès) est identifié à 12,8 m de profondeur. Le modèle de sol retenu est présenté ci-dessous.

Aucun niveau d'eau n'a été rencontré (niveau stabilisé ou arrivée d'eau) sur les profondeurs investiguées.

Tableau 1 lithologie et paramètres de sol retenus à l'extérieur du puits

Lithologie	Base de la couche m / TA	$E_M$ (MPa)	$p_i^*$ (MPa)
Remblais sableux à graviers gris	1,3	1	0,1
Sables hétérogènes caillouteux, argileux à graveleux beige à grisâtres	7,6	3	0,4
Substratum altéré caillouto-sableux et schisto-gréseux	11,8	8	0,7
Substratum sain (schistes et grès)	>12,3	50	4

Un sondage destructif complémentaire de 20 m de profondeur a été réalisé durant la période de préparation des travaux pour confirmer le toit du substratum sain et son étendue.

## 4 ETUDE DES SOLUTIONS DE MISE EN SECURITE

### 4.1 Analyse multicritère

Aucune mise en sécurité du puits n'a été recensée, néanmoins le puits est remblayé par des sables caillouteux et le désordre constaté a été attribué au coulisage gravitaire des remblais présents en tête du puits.

Le scénario de risque prépondérant identifié pour le puits Rivat est le débouillage du remblai interne. Le risque de rupture du revêtement en tête de puits est considéré comme résiduel, cette défaillance pouvant toutefois survenir de manière consécutive à un phénomène de débouillage du remblai.

La solution de mise en sécurité doit :

- permettre de stopper le phénomène de débouillage dont les désordres constatés semblent être des indices récents,
- assurer une protection des biens et personnes en surface et à proximité,
- ne pas s'appuyer structurellement sur le revêtement du puits (car ses caractéristiques sont mal connues, notamment sa qualité mécanique et sa profondeur),
- empêcher les infiltrations d'eaux météoriques par la tête de puits,
- intégrer l'environnement du site, très contraint par la présence de l'habitation et du garage.

Une analyse multicritère a été réalisée pour sélectionner la solution de mise en sécurité la plus adaptée, sept critères ont été considérés :

- Critère 1 : Traitement pérenne du risque de débouillage,
- Critère 2 : Déblaiement du puits,
- Critère 3 : Sollicitation du revêtement du puits,
- Critère 4 : Interface garage,
- Critère 5 : Interface maison,
- Critère 6 : Coût,
- Critère 7 : Maintenance.

La solution retenue est celle d'un bouchon autoportant constitué de colonnes jet grouting sécantes et réalisées depuis la surface (cf. Figure 6), cette solution présente les avantages suivants :

- absence de déblaiement (hormis les spoils de jet-grouting), donc moins de matériaux à évacuer ;
- traitement pérenne du risque principal (débouillage du puits) et des risques résiduels, sans nécessiter de suivi ou de maintenance particulière.

Elle présente toutefois les incertitudes suivantes qui nécessitent un contrôle lors de l'exécution :

- dans les sols constitués de sables grossiers et graviers, caractérisant les remblais historiques à l'intérieur du puits, l'instabilité du mélange peut entraîner une baisse rapide du coulis avant prise, nécessitant compensation et induisant une forte surconsommation du coulis injecté ;
- lors de la phase de traitement, l'évacuation libre des excédents de mélange sol-ciment (« spoil ») en tête de forage doit être assurée. Tout blocage dans l'espace annulaire tiges/forage peut générer une surpression, provoquer une rupture du terrain et induire un soulèvement brutal. Une surveillance continue est donc requise, avec arrêt immédiat du jet en cas d'anomalie constatée.

LEGENDE STRATIGRAPHIE

	Remblais sableux très lâches
	Remblais en place
	Sable hétérogènes lâches
	Substratum altéré caillouto-sableux et schisto-gréseux
	Substratum sain

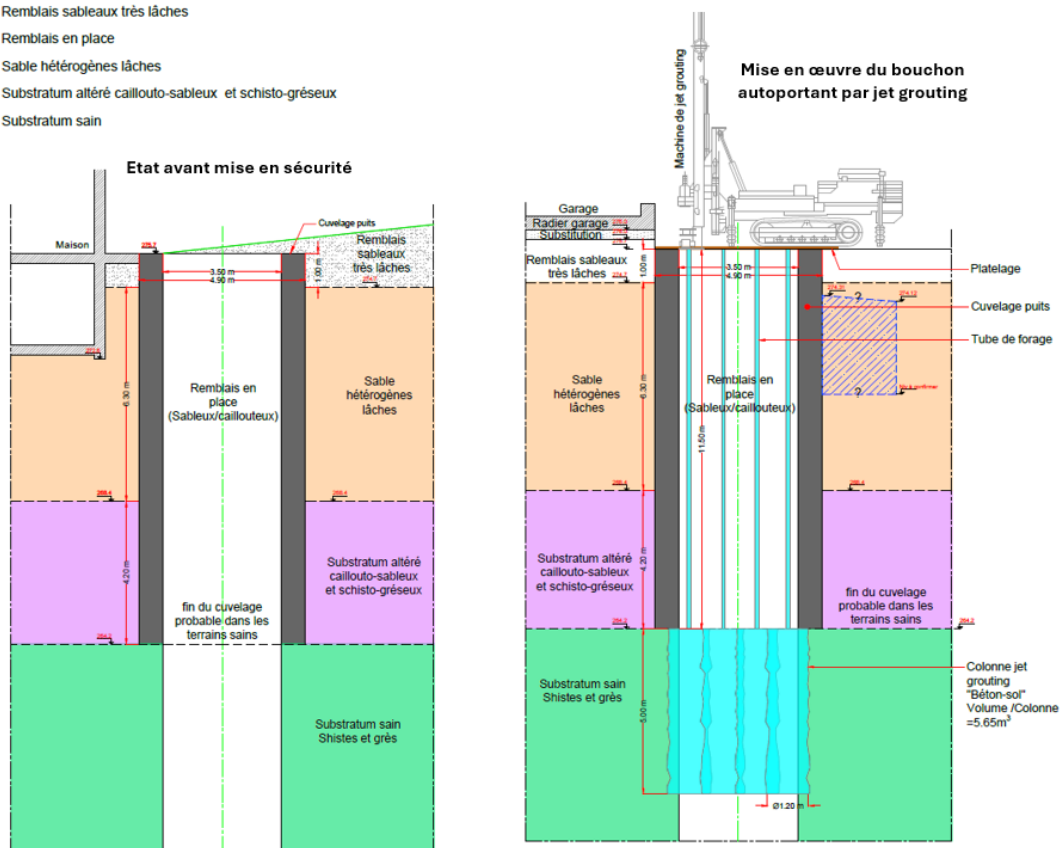


Figure 6 : Etat initial du puits Rivat (à gauche) et solution retenue de bouchon autoportant en jet grouting (à droite)

## 4.2 Technique de jet grouting

La technique du « jet grouting » est un procédé de construction qui consiste à utiliser un jet de fluide à haute énergie cinétique pour déstructurer un terrain et le mélanger avec un coulis liquide, formant ainsi des colonnes de mélange « béton-sol » appelées aussi « jetmix » réalisées à une profondeur et sur une hauteur donnée. La norme d'exécution pour les travaux de jet grouting est référencée NF P94-3310.

Ce process est mis en œuvre à partir de forages de petit diamètre ce qui confère à cette méthode une grande souplesse d'utilisation (cf. Figure 7)

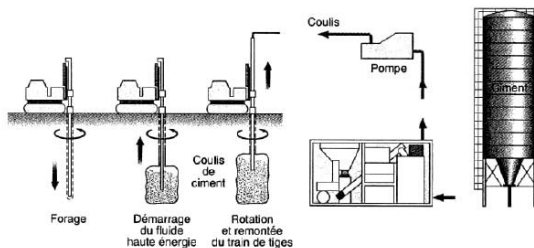


Figure 7 : Schéma de principe pour la réalisation des colonnes de jet-grouting (Source Moray, 1992)

Le rayon d'action ou le diamètre des colonnes réalisées dépend des caractéristiques suivantes des sols en place :

- la granulométrie du sol : plus le terrain est fin plus le diamètre des colonnes est plus petit (i.e. terrain plus difficile à déstructurer) ;
- la compacité du sol : plus le terrain est cohérent ou dense moins le traitement par jet est efficace.

Le traitement de jet grouting est considéré comme un procédé expérimental qui nécessite des essais de convenance en nombre suffisant et adaptés au contexte. Il faut un engagement du titulaire des travaux pour garantir une précision suffisante du diamètre des colonnes réalisées. Pour une énergie donnée, le choix des paramètres d'exécution (pression et débit des fluides injectés, vitesse de remontée et de rotation de l'outil) doit être adapté en fonction du matériel utilisé et du terrain traité.

## 4.3 Dimensionnement du bouchon

L'essai de pénétration dynamique, réalisé dans les puits, indique une résistance dynamique unitaire  $q_d$  entre 1 et 2 MPa jusqu'à 17 m de profondeur, caractérisant des remblais globalement très lâches malgré ponctuellement quelques pics de résistance.

Au regard de la nature des matériaux présents à l'intérieur du puits, décrits comme des remblais sableux plus ou moins caillouteux, le diamètre prévisionnel des colonnes de jet grouting est estimé entre 1,0 m et 1,4 m, en fonction de la technique mise en œuvre et de l'énergie de jet mobilisée.

Cette hypothèse correspond à une valeur moyenne issue des retours d'expérience relatifs aux diamètres obtenus dans des sols courants, pour différentes configurations de traitement. Le diamètre effectif des colonnes est confirmé en phase de démarrage des travaux par la réalisation d'essais de convenance de type « tiges colorées » qui sera décrite ci-dessous.

Un exemple de maillage des colonnes avec 1,2 m de diamètre est illustré sur la Figure 8, ce qui correspond au total à 15 colonnes.

Le bouchon, constitué de colonnes sécantes, est autoportant par frottement des colonnes avec le substratum. Le dimensionnement prévoit une profondeur de réalisation des colonnes de jet grouting à partir de 12 m : cette profondeur permet d'atteindre le niveau du substratum et d'avoir un frottement coulis-roche très favorable à l'auto-portance du bouchon.

La hauteur du bouchon est dimensionnée pour assurer l'équilibre entre la force résistante par frottement et la force opposée avec une marge de sécurité suffisante. D'après les études de INERIS, un coefficient de sécurité minimum de 3 doit être visé :

$$FS = \frac{\text{Force résistante par frottement}}{\text{Force opposée}} \geq 3 \quad (1)$$

où

- Force résistante par frottement égale à la surface du contact entre le bouchon et le fût du puits multipliée par le frottement unitaire mobilisable de 300 kPa. Compte tenu de l'incertitude sur le revêtement du puits, une hypothèse conservatrice sur le fût est retenue, soit  $\varnothing_{\text{int}} = 3,5 \text{ m}$ .
- Force opposée qui est la somme des :
  - poids du bouchon avec un poids volumique béton-sol de  $25 \text{ kN/m}^3$  et estimé avec le volume prévisionnel de la zone injectée ;
  - poids des remblais sus-jacents (supposés saturés) avec un poids volumique de  $20 \text{ kN/m}^3$ ,
  - charge de service conventionnelle de 10 kPa (surcharge dans le jardin),
  - pression de succion en cas de déboufrage brutal des remblais présents sous le bouchon (égale à 100 kPa hypothèse conservatrice) D'après le rapport INERIS, la valeur de 100 kPa en succion correspond à une pression de 1 bar équivalent à la dépression entre le

sommet et la base du bouchon dans le cas d'un déboufrage dynamique de la colonne de remblais générant un effet de vide au niveau de la base du bouchon.

Cette vérification a permis de dimensionner une hauteur du bouchon en jet-grouting égale à 5 m ce qui permet de respecter le facteur de sécurité fixé de 3. Le bouchon est donc dimensionné avec une quinzaine de colonnes sécantes de jet-grouting, de diamètre 1,20 m, réalisées entre 12 et 17 m de profondeur par rapport à la tête de puits.

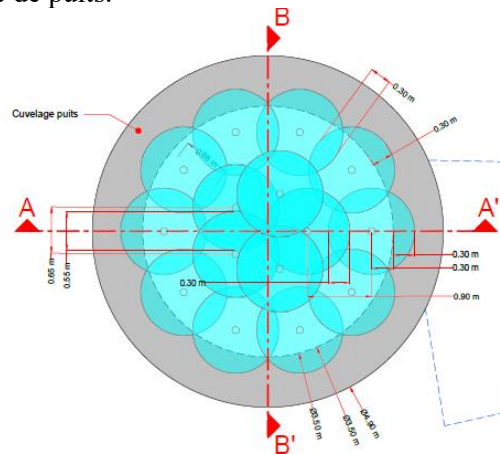


Figure 8. Vue en plan du bouchon en colonnes sécantes de jet grouting – Hypothèse colonne sécante de diamètre 1,2 m

## 5 PHASE D'EXECUTION

### 5.1 Organisation du chantier

Les travaux d'injection ont été réalisés en juillet 2025. L'étude d'exécution de l'entreprise a confirmé le prédimensionnement effectué par le maître d'œuvre.

L'atelier de jet grouting (de confection et d'injection du coulis) a été installé à l'entrée de la propriété, le coulis étant acheminé via des tuyaux jusqu'à l'atelier de forage situé au droit du puits. Durant la phase de préparation des travaux, le terrain a été mis à plat.



Figure 9: Atelier de jet grouting et base vie à l'entrée de la propriété

## 5.2 Planche d'essais

Le calibrage des paramètres d'injection est réalisé au démarrage du chantier sur 1 colonne dédiée à l'axe du puits.

La méthode des « tiges colorées » a été mise en œuvre pour valider les paramètres d'injections nécessaires à l'atteinte du diamètre prescrit par le calcul. Cette méthode consiste à positionner, préalablement au jet grouting, des tiges métalliques peintes à différentes distances radiales de l'axe de la colonne, selon le diamètre visé, puis à les extraire après réalisation du traitement. La disparition de la peinture atteste que le jet de coulis a atteint la tige, validant ainsi le diamètre obtenu.

La colonne test de jet-grouting a été réalisée entre 4 et 6 m de profondeur au sein des sols aux caractéristiques semblables à celles reconnues dans le puits entre 12 et 17 m de profondeur. Le diamètre d'une inclusion de 1,2 m est validé.

## 5.3 Exécution du bouchon et contrôles

Les colonnes de jet grouting sont exécutées suivant un phasage spécifique pour respecter l'absence de deux colonnes conjointes réalisées dans la même journée. Le phasage est adapté sur site en fonction du comportement du terrain. Un extrait du plan de récolement des colonnes est présenté sur la Figure 10.

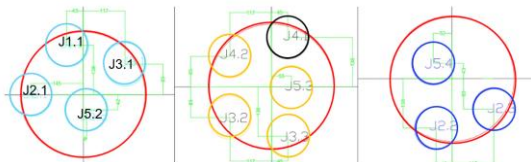


Figure 10: Extrait du plan de récolement des inclusions (Source Menard)



Figure 11: Repérage en tête du puits de la position des inclusions en jet grouting réalisées

La verticalité de la foreuse est contrôlée avec un niveau à bulle avant le début du forage, et confirmée par le niveau électronique installé sur la foreuse.

Les phases de forage et d'injection sont suivies pour chaque colonne par l'utilisation d'un système d'enregistrement de paramètres.

Un exemple d'enregistrement des paramètres d'injection pour la colonne C1-1 est présenté Figure 12 avec :

- vitesse instantanée d'avancement (mesurée en m/h),
- pression du coulis (mesurée en bar) pour contrôler l'injection.

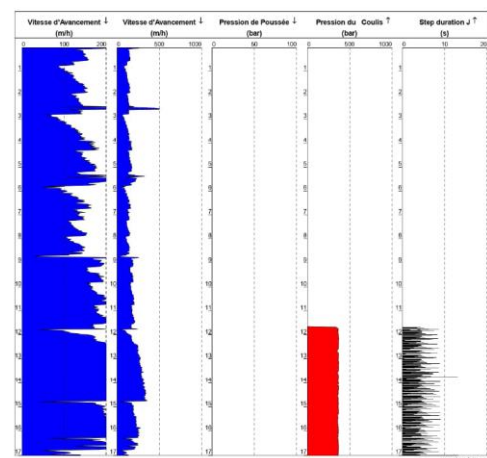


Figure 12: Enregistrement des paramètres type d'injection pour la colonne C1-1 (Source Ménard)

Le coulis a été contrôlé quotidiennement : la masse volumique a été mesurée avec une balance Baroïd et la viscosité évaluée au cône de Marsh. Le ressuage a été vérifié une fois par semaine à l'aide d'une éprouvette graduée.

La vérification des objectifs de résistance du coulis sol/ciment a été assurée avec la réalisation de 2 prélèvements réalisés sur la colonne d'essai de façon à constituer 2 échantillons cylindriques :

- 1er échantillon écrasé à 7 jours en vue de vérifier une résistance à 7 jours de 2 à 3 MPa,
- 2ème échantillon écrasé en laboratoire à 28 jours en vue de vérifier l'atteinte de l'objectif de résistance à 28 jours de 5 MPa.

## 5.4 Suivi topographique

Un suivi topographique automatique 3D est installé sur la maison et le garage pour suivre les déplacements. Le système Cyclops™ est installé avec une précision inférieure à 1 mm. Au total, 7 cibles d'auscultation ont été positionnées sur les structures de la zone à surveiller, et 5 cibles de référence réparties aux alentours, dans des zones supposées stables.

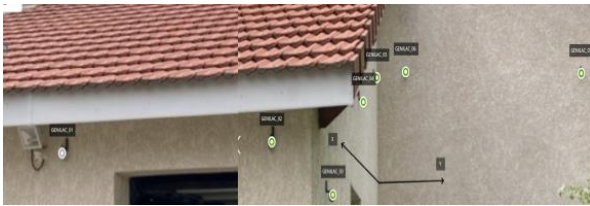


Figure 13 : Implantation des cibles du système d'auscultation Cyclops<sup>TM</sup>

L'auscultation est réalisée avant, pendant et après les travaux, sur une durée totale de 2,5 mois. La période de 1,5 mois précédant les travaux a permis d'établir l'empreinte des mouvements naturels afin de définir le seuil d'alerte de 1 mm. Les mouvements relatifs sont exprimés selon les axes X, Y et Z. Un exemple de suivi selon l'axe X est présenté ci-dessous :

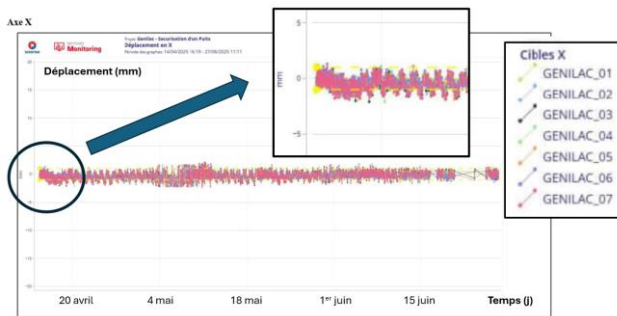


Figure 14 : Mesures des cibles selon l'axe X (Source Sixense)

Les mesures ont montré que les déplacements selon les axes Y et Z ont globalement évolué dans un intervalle de  $\pm 1$  mm. L'axe X, en revanche, a ponctuellement présenté des variations plus importantes, pouvant atteindre au maximum  $\pm 2$  mm. Ces écarts ont été observés lors de conditions météorologiques défavorables (pluie et vent), susceptibles soit de déstabiliser la station de mesure, soit de perturber les relevés, notamment par obstruction de la visibilité des cibles due à la végétation. À la suite des alertes déclenchées, Sixense s'est assuré que ces variations n'étaient ni imputables au puits ni aux travaux en cours.

Les variations observées, y compris les plus marquées (i.e. de l'ordre de 2 mm), demeurent faibles et sans impact sur les structures pendant et après les travaux d'injection.

## 6 CONCLUSIONS

Ce cas de mise en sécurité vis-à-vis d'un aléa minier a d'abord été rendu faisable grâce à une base documentaire et à la pertinence du suivi des installations par les services de la DREAL. Cette

documentation, les investigations complémentaires et le retour d'expérience de l'INERIS, ont rendu possible une orientation vers une technique de travaux.

Un bouchon autoportant constitué de colonnes sécantes en jet grouting a été exécuté afin de résister à terme à un éventuel débouillage des remblais historiques présents dans la colonne du puits. Un suivi de déplacements des avoisinants a été assuré avant et pendant toute la durée des travaux de mise en sécurité, pour s'assurer du bon déroulement des travaux d'injection. Les contrôles effectués après les travaux montrent une réalisation conforme.

Le risque d'effondrement des terrains proches de la surface, lié à la présence de l'ancien puits minier, a été ramené à un niveau acceptable compte tenu des enjeux en surface. La solution de sécurisation choisie constitue une option pérenne et permet de se passer d'un suivi à long terme ainsi que de la réalisation de toute maintenance.

## REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient le Maître d'Ouvrage représenté localement par la DREAL Auvergne Rhône Alpes, et l'ensemble des collaborateurs ayant contribué à la mise en sécurité du puits Rivat.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Avis concernant le désordre signalé en septembre 2021 au 153 rue des Acacias, rapport 2021/158DE – 21ARA35100 de Geoderis en date du 11/10/2021.
- Guide de bonnes pratiques pour la mise en sécurité d'ouvrages miniers débouchant au jour, rapport d'étude INERIS n°DRS-12-126117-07379A, en date du 29/06/2012
- Méthode de mise en sécurité de puits miniers – Principe de calculs, rapport INERIS-DRS-OO-23222/R04, en date du 23/02/2000
- Principes de mise en sécurité de puits de mine, Godoy S. Metz M., Saunier M. (2009), rapport final BRGM/RP-57576-FR. 39 p.
- Evaluation de l'aléa « Gaz de mine » - Guide méthodologique, rapport INERIS DRS-15-149493-10366B
- NF EN 12716 P 94-331 Exécution des travaux géotechniques spéciaux —Jet-grouting
- Moray J. (1992) Les domaines d'application du Jet grouting – Revue Française de Géotechnique 30 pages.