

RETOUR D'EXPÉRIENCE DES ALÉAS LIÉS A LA PRÉSENCE DE CARRIÈRES SOUTERRAINES AU SEIN D'UNE ZONE URBAINE

FEEDBACK FROM HAZARDS LINKED TO THE PRESENCE OF UNDERGROUND QUARRIES IN AN URBAN AREA

Amélie LECOMTE¹

¹ Ineris, Verneuil-en-Halatte, France

RÉSUMÉ – Le site « de la carrière de l'Ouest » constitue un cas concret pour lequel les zonages des aléas mouvements de terrains peuvent être problématiques en termes de gestion du risque et d'aménagements du territoire. Cette étude, en retour d'expérience, a pour objectif d'identifier et d'expliquer les critères d'instabilité pertinents et de juger de l'importance des phénomènes susceptibles d'impacter les terrains en surface.

ABSTRACT – The "Carrière de l'Ouest" site is a specific case for which the zoning of ground movement hazards can be problematic in terms of risk management and land use planning. This study, in feedback, aims to explain the relevant instability criteria and to characterize the importance of phenomena that can impact surface land.

1. Introduction

Le site « de la carrière de l'Ouest » est une friche en partie sous-cavée par une ancienne carrière de gypse. Cette carrière, située au nord-ouest de la commune de Gagny (Seine-Saint-Denis, 93), a été exploitée pendant une centaine d'années pour l'industrie du plâtre, à la fois à ciel ouvert et en souterrain. L'activité extractive a cessé en 1956. Aujourd'hui, les terrains concernés sont la propriété d'une société privée de travaux publics.

En 1999, l'Inspection Générale des Carrières de la ville de Paris (IGC) signale un risque d'effondrement des talus nord de la carrière, en raison du mauvais état des galeries souterraines sous-jacentes (IGC, 1999). Ce secteur expose directement une vingtaine de pavillons situés sur les communes de Gagny et du Raincy.

Pour donner suite aux conclusions de risque d'effondrement, le propriétaire, qui porte la responsabilité des risques et des dommages potentiels, a fait réaliser, par le Bureau d'Études SEMOFI, un dossier de mise en sécurité des galeries (Semofi, 2017), validé en 2017 par l'IGC. Devant le coût élevé des travaux, elle s'associe à plusieurs promoteurs afin de porter un projet d'aménagement urbain du site. Cependant, en juin 2019, le PLU de Gagny est annulé, entraînant l'abandon du projet. Le propriétaire se voit alors dans l'obligation de réaliser les travaux de consolidation nécessaires à la mise en sécurité des secteurs de l'ancienne carrière de l'Ouest pouvant impacter les enjeux de surface.

L'étude réalisée par l'Ineris a consisté à examiner, par retour d'expérience, le cas du site de l'ancienne carrière de l'Ouest afin d'approfondir l'évaluation des aléas de type mouvements de terrains liés aux carrières souterraines abandonnées de gypse et juger de leur cartographie au sein de sites et territoires urbains exposés. Cette étude a nécessité dans un premier temps l'établissement d'un nouvel avis sur l'état des galeries de la frange nord de la carrière souterraine et la caractérisation de l'impact d'éventuels effondrements sur les enjeux concernés en surface.

2. Présentation du site

2.1. Contexte géologique

Le site de l'ancienne carrière de l'Ouest se situe sur le flanc sud de la butte témoin de l'Aulnay. Les trois horizons de gypse Ludien y ont été exploités : la première masse (environ 20 m d'épaisseur), la deuxième masse (environ 7 m d'épaisseur) et exceptionnellement la troisième masse (environ 3 m d'épaisseur). Ces bancs de gypse sont séparés par des ensembles marneux de 3 à 5 m d'épaisseur et surmontés par les marnes supragypseuses (épaisseur de l'ordre de 5 m pour les marnes de « Pantin » et de 11 à 12 m pour les marnes « d'Argenteuil »). Cet ensemble est surmonté par des glaises vertes et localement par des remblais (de l'ordre de 10 à 15 m d'épaisseur principalement mis en œuvre dans les années 1960, au nord-est du site). Considérant la présence de ces remblais, la frange nord de la carrière peut être topographiquement divisée en deux secteurs. Le premier, à l'ouest, penté (flanc sud de la butte) et le second, à l'est, relativement plat en lien avec la plateforme de remblais.

2.2. Configuration de la carrière

Les anciennes extractions souterraines ont été menées principalement sur deux niveaux. Le premier concerne la première masse de gypse, exploitée le plus intensément sur des hauteurs pouvant atteindre 17 m. La masse suivante, moins importante, a également été exploitée sur une hauteur d'environ 6 m. L'exploitation a été réalisée par la méthode des chambres et piliers abandonnés avec un taux de défrètement, mesuré à l'origine à la base des piliers, compris entre 70 et 80 %. Toutefois, en vue de réduire la portée du ciel entre deux piliers, les carriers ont donné aux galeries une structure ogivale, large à la base et étroite au sommet. La carrière a été remblayée partiellement par le fond avec des blocs et/ou des déchets de tailles différentes.

L'état actuel de la carrière ne permet pas d'accéder à l'ensemble des zones exploitées. Aussi seule une partie du niveau supérieur de la frange Nord est accessible (Figure 1). Le niveau inférieur, visitable en 2017, n'est plus accessible actuellement en raison du glissement de remblais devant les anciennes entrées.

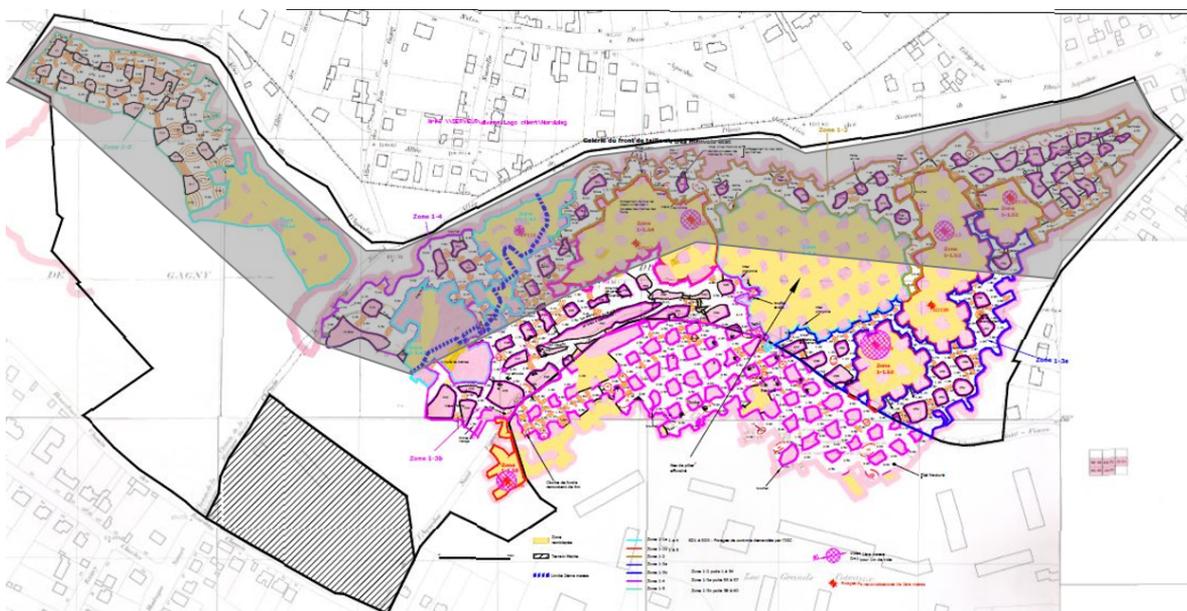


Figure 1 : Plan du niveau supérieur de la carrière de l'Ouest – En gris la frange nord étudiée

2.3. État géotechnique de la frange nord

Les observations visuelles faites en souterrain, sur les travaux du niveau supérieur accessible, mettent en évidence plusieurs familles de fractures naturelles. Ces discontinuités, préexistantes lors de l'exploitation de la carrière, souvent ouvertes sur quelques centimètres, constituent des plans de faiblesse préférentiels au sein du massif. Dans certains secteurs, la densité de fracturation apparaît très importante et découpe des couloirs affectant le toit et les parements des piliers.

Un faïençage prononcé du toit, avec des fractures ouvertes de plusieurs centimètres, et des bancs de toit, de plusieurs décimètres d'épaisseur, décollés, en équilibre instable, sont visibles à plusieurs endroits de la carrière. De nombreuses et étendues chutes de toit et cloches de fontis sont également visibles sur l'ensemble des secteurs inspectés. Elles témoignent de la fragilité du toit de cette carrière.

Plusieurs piliers présentent des angles ou des parements affectés par des dégradations liées à la fracturation d'origine naturelle mais également mécanique. Certains sont dégradés et fissurés de bas en haut et présentent ainsi une surface portante réduite.

Un écaillage des parements a également été mis en évidence. La présence d'écailles et de blocs de calcaire détachés des parements est signe d'une sollicitation élevée et d'une évolution significative de cette partie de la carrière (Figure 2).



Figure 2 : Exemple d'écaillage d'un pilier

Enfin, certains piliers situés principalement en périphérie de la zone de superposition avec la seconde masse exploitée, présentent des décollements en partie supérieure au contact du toit de la cavité. Les indications concernant l'état du niveau inférieur, permettent de confirmer les observations faites sur des piliers du niveau supérieur. En effet, il semblerait que les piliers, en seconde masse dans ce secteur, poinçonnent dans les marnes infragypseuses sous-jacentes. Ces phénomènes peuvent potentiellement venir déstabiliser un ou plusieurs piliers dans le niveau supérieur.

Concernant les secteurs non accessibles, les données d'archives disponibles montrent que les galeries du front de taille du niveau supérieur sont fortement dégradées et que l'état du niveau inférieur est relativement bon à l'exception de quelques secteurs, décrits comme fortement dégradés (existence de poinçonnement sur certains piliers dans les marnes infragypseuses).

2.4. Mécanismes et phénomènes observés

Deux galeries montrent des signes d'évolution récents. Dans les deux cas, ces zones accessibles lors des précédentes campagnes de reconnaissances sont aujourd'hui obstruées par la présence de cônes d'éboulis.

Deux effondrements localisés ont été recensés ces dernières années sur le site. Le premier durant l'été 2016. Ce fontis, situé à l'est de la frange Nord, correspondrait à l'effondrement d'un carrefour de galerie d'environ 10 m de largeur. De l'ordre de 10 m de diamètre et 5 m de profondeur, il présentait en surface des bords verticaux. Le second, situé au centre du site, en limite de la frange nord, correspond à l'un des éboulements observés en souterrain. Localisé dans une zone boisée, ce fontis, d'environ 5 à 6 m de mètres de diamètre, présente également des bords francs verticaux sans signe d'évolution. Ces deux fontis constituent un retour d'expérience documentés d'une rupture de toit ou carrefour d'une galerie en 1^{ère} masse ayant conduit à l'apparition en surface, en quelques années (moins de 5 ans), d'un fontis de 5 à 10 m de diamètre.

Plusieurs zones, d'emprise relativement importante (de 2000 à 5000 m²) sont non visitables et considérées comme effondrées. Aucun fontis récent n'a été observé en surface à l'aplomb de ces zones. Néanmoins, l'analyse d'anciennes photographies aériennes datant respectivement de 1933, 1951, 1962 et 1983 permettent d'en visualiser près d'une dizaine. En rétro-analyse, et bien que les mécanismes à l'origine de ces désordres observés ne soient pas identifiés avec précision (cloche de fontis, effondrement d'un ou plusieurs piliers, rupture du niveau inférieur s'il est présent), ces observations donnent des indications sur les dimensions attendues en surface. Aussi, les extensions mesurées varient entre 10 et 25 m de diamètre.

À noter que les deux fontis, observés en 1933 (Figure 3), présentent un diamètre d'ouverture en surface de l'ordre de 45 m avec un talutage visible des terrains en amont de la pente de l'ordre de 20 m. Ce secteur, situé à cette époque dans la pente (aujourd'hui situé au droit de la plateforme remblayée), permet de disposer d'un retour d'expérience de fontis se produisant dans une topographie pentée. On observe notamment que le fontis progresse préférentiellement vers le haut de la pente.



Figure 3 : photo aérienne de 1933 (IGN®)

3. Avis sur la stabilité

3.1. Phénomènes redoutés

Si les phénomènes d'effondrement en masse¹ peuvent être écartés dans cette partie de la carrière, des phénomènes d'effondrement localisé sont à craindre sur tous les secteurs de la frange nord de la carrière. Ces effondrements localisés peuvent avoir pour origines (unique ou combinée) :

1. la rupture du toit des galeries de la carrière ;
2. la rupture d'un pilier de carrière ;
3. dans les zones où les deux niveaux d'exploitation sont superposés :
 - a. la rupture d'un carrefour en deuxième masse. Compte tenu de la mauvaise superposition des piliers entre les deux niveaux, il est probable que cet effondrement débouche sous un pilier en première masse, déstabilisant ainsi le niveau supérieur ;
 - b. la rupture d'un ou plusieurs piliers en première masse en lien avec le poinçonnement d'un ou plusieurs piliers de deuxième masse qui entrainerait le fléchissement de l'intercalaire marneux et la déstabilisation localisée du niveau supérieur.

Pour déterminer la hauteur limite d'ouverture de galerie à partir de laquelle le phénomène d'effondrement localisé, induit par la rupture du toit des galeries, peut remonter jusqu'en surface, un calcul volumétrique probabiliste de montée de cloche d'éboulement a été mis en œuvre. Les simulations réalisées en faisant varier les paramètres déterminants de ce mécanisme (géométrie, recouvrement, coefficient de foisonnement, angle de talus naturel), représentatifs du contexte d'exploitation et géologique du secteur, conduisent à considérer qu'une hauteur de galerie d'au moins à 4 m est suffisante pour qu'un effondrement puisse atteindre la surface dans la partie nord où l'épaisseur du recouvrement est de l'ordre de 30-35 m. Par conséquent les phénomènes d'effondrement localisé ont été considérés comme possibles au droit des galeries dont la hauteur est supérieure à 4 m (considérant la présence de remblais dans certaines d'entre elles).

3.2. Configurations type

En fonction des différentes géométries observées et des possibilités de développement des phénomènes attendus, plusieurs configurations ont été définies sur l'ensemble de la frange nord. Elles sont présentées dans le tableau 1.

Tableau 1. Configurations retenues et phénomènes associés

Configuration	Niveau supérieur	Niveau inférieur	Phénomène
1	Peu dégradé	X	Chute de toit
2	Dégradations importantes	X	Rupture pilier(s)
3	Non accessible	X	Chute de toit
4	Non accessible	Semble peu dégradé	Chute de toit
5	Non accessible	Dégradations importantes	Rupture pilier(s)
6	Dégradations importantes	Dégradations importantes	Rupture pilier(s)

¹ Les critères classiques relatifs à un effondrement en masse ne sont pas (ou plus) présents dans ces zones (banc raide et continu, schéma d'exploitation hétérogène, pas d'extension critique en tous sens des secteurs non effondrés, comblement partiel). Il n'y a donc pas de risque d'effondrement en masse de ces anciennes exploitations souterraines (rupture soudaine et concomitante de plusieurs piliers et de terrains de recouvrement)

3.3. Intensité des phénomènes attendus en surface

L'intensité du phénomène d'effondrement localisé est définie à partir des dimensions du cratère pouvant apparaître au jour. Dans le cas présent, la présence d'effondrements localisés en surface permet de bénéficier d'une base de référence quant aux diamètres possibles des effondrements localisés attendus.

Sur le site de la carrière de l'Ouest, les diamètres observés sont généralement compris entre 10 et 25 m. Néanmoins, il est difficile en l'état, même en superposant la localisation des fontis avec les travaux souterrains, de définir de façon certaine l'origine du fontis (rupture du toit ou d'un ou plusieurs piliers).

Néanmoins, l'observation des fontis les plus récents en surface et dont la localisation au fond est connue, montre que dans le cas de la rupture d'une galerie ou d'un carrefour de galerie, la dimension des effondrements en surface est de l'ordre de 5 à 10 m. On peut donc s'attendre à des dimensions analogues dans le cas où des désordres de ce type sont retenus au fond.

Dans le cas de la rupture d'un ou plusieurs piliers, les effondrements sont probablement de taille plus importante que celle résultant de la rupture du toit de la cavité. Aussi, compte tenu des dimensions observées en surface, on peut s'attendre à des effondrements pouvant atteindre jusqu'à 25 m de diamètre. Cette valeur forfaitaire est retenue pour les effondrements liés à la rupture d'un ou plusieurs piliers.

3.4. Cartographie

Afin de cartographier, en surface, l'emprise des phénomènes d'effondrement susceptibles de se produire à l'aplomb des anciennes exploitations de la frange nord de la carrière de l'Ouest, une marge de sécurité doit être définie. Elle tient compte de la marge d'incertitude (inhérente au repositionnement des plans par rapport à la surface) et de la marge de reculement (extension latérale possible des désordres en surface par rapport à l'aplomb des bords francs de cavité).

Concernant la frange nord de la carrière de l'Ouest, la rétro-analyse des effondrements en surface montre que les désordres observés à l'aplomb de la plateforme de remblais dont la topographie est plane, sont de forme quasi-cylindrique avec des bords relativement subverticaux. Le maintien de ces formes est toutefois certainement limité dans le temps (quelques mois, voire années). Laisseries en l'état, elles finiront par s'évaser, au moins dans les parties supérieures. En l'absence de retour d'expérience du comportement à long terme de ces désordres, notamment en raison du remblayage systématique de ces fontis, la nature des terrains de recouvrement a été retenue afin de définir leur évolution à plus long terme. L'analyse des sondages réalisés au cours des études de ce site permet de constater que les colluvions et remblais présents, composés d'argiles sableuses, sont relativement compétents et jouent un rôle d'entablement au niveau de cette plateforme. Les premiers mètres (de 1 à 5 m d'épaisseur selon les sondages), semblent plus hétérogènes, et composés de sables et de blocs de béton probablement compactés par les engins de chantier. En tenant compte d'un angle de talutage « forfaitairement conservatif » de l'ordre de 45° au niveau de ces terrains, une marge de reculement maximale de 5 m peut être considérée à long terme pour les travaux situés à l'aplomb de la plateforme.

Concernant les autres secteurs où les terrains naturels sont affleurants et pour lesquels la topographie est plus marquée, l'analyse des anciens désordres montrent l'occurrence d'un glissement en surface (par appel au vide) affectant les terrains vers l'amont pendage sur une distance de l'ordre de 20 m en complément de l'ouverture du fontis. Ce phénomène a notamment été observé en 1933, avant que la plateforme de remblais ne soit mise en place, dans des terrains pentés similaires à ceux existant actuellement en partie centrale et

ouest. Comme dans la situation précédente, il est difficile de définir avec certitude l'extension maximale du désordre sur le long terme. Cependant les observations issues des photos aériennes en donnent une valeur approchée probablement assez fiable. Tenant compte des observations réalisées et de l'expérience de l'Ineris sur le développement de ce type de désordre, l'analyse conduit à considérer sur le long terme le cumul de deux effets, celui du talutage naturel de l'effondrement qui se développe dans les terrains peu cohérents de surface et celui lié au glissement des terrains à l'amont pendage.

S'agissant du premier effet, il est estimé que le talutage prendrait un angle de 45° à long terme sur l'épaisseur des terrains de surface estimée à 10 m dans ce secteur. Le déport est donc de l'ordre de 10 m par rapport à l'aplomb du bord des travaux. À cette valeur s'ajoute forfaitairement une distance de 20 m vers l'amont pendage pour tenir compte du glissement des terrains. Les diamètres totaux des effondrements visibles sur la photographie aérienne de 1933 (de l'ordre de 45 m) sont compatibles avec cette analyse.

4. Retour d'expérience et conclusions

4.1. Cas d'application

L'étude menée sur le site de l'ancienne exploitation de gypse de la carrière de l'Ouest avait pour objectifs de donner un nouvel avis sur l'état des galeries visitables situées spécifiquement dans la frange nord de cette carrière et de juger de l'extension des désordres potentiels en surface par rapport aux enjeux concernés.

L'inspection géotechnique visuelle réalisée en 2020 a permis de constater que l'état de la carrière est très dégradé (chutes de toit, décollements du toit et des parements, écaillages et fracturation des piliers...) et que certains secteurs présentent des évolutions significatives par rapport aux précédentes inspections. Ces évolutions très rapides, à l'échelle du cycle de vie d'un ouvrage souterrain abandonné, sont pour certaines inférieures à 5 ans et permettent de juger de la dynamique de dégradation de la carrière.

En fonction des caractéristiques d'exploitation observées ainsi que de la présence ou non d'un second niveau exploité, plusieurs configurations ont été définies afin d'identifier les mécanismes étant susceptibles de se produire. Aussi, seul le phénomène d'effondrement localisé a été retenu, par rupture du toit et/ou d'un ou plusieurs piliers, l'effondrement en masse étant exclu dans les configurations actuelles de cette carrière.

Afin de définir l'impact possible de ces effondrements localisés en surface, une rétro-analyse des anciens désordres observés, notamment grâce aux anciennes photographies aériennes, a été réalisée. Cette analyse donne une base de référence des phénomènes attendus et de leur intensité. Elle a permis de constater que les effondrements apparus en surface à l'aplomb de la plateforme de remblais, constituée dans la partie est du site dans les années 60, sont généralement verticaux en phase « primaire » contrairement à ceux pouvant se développer dans une topographie plus marquée pour lesquels un glissement (par appel au vide) vers l'amont pendage est redouté.

La marge de reculement a été définie en tenant compte de la nature des terrains de recouvrement et des observations sur site (désordres récents et anciens) afin de définir l'évolution à long terme des effondrements. Cette marge de reculement, dans le cas présent, impacte une dizaine d'habitation.

4.2. Approche générale

Dans le cadre de la caractérisation de l'état de stabilité d'une ancienne carrière souterraine, ce retour d'expérience montre qu'il est possible de définir des configurations types pour lesquelles les caractéristiques d'exploitation (méthodes, superposition de

niveaux...) sont homogènes et qui de fait peuvent générer des désordres spécifiques. Ces configurations tiennent compte de l'état des vides existants et notamment de leur état actuel de dégradation (fracturation, effondrement...) et de comblement (remblayage total ou partiel) qui permettent d'affiner les potentialités de survenue de mouvement de terrain en surface. Néanmoins, cette approche par configurations détaillées et inspections souterraines, ne peut se justifier que dans le cadre d'une étude spécifique et reste plus difficilement transposable dans le cadre de l'élaboration d'un PPR Cavités (mise en œuvre sur de plus vastes périmètres).

Afin de définir les désordres attendus en surface et notamment leur extension, deux approches, complémentaires, doivent être considérées : la retro-analyse des effondrements observés en surface (base de référence) et l'analyse de la nature de terrains de recouvrement et de la topographie de la surface (extension à long terme).

Ce retour d'expérience montre également que plusieurs méthodes de caractérisation de cette marge d'influence existent (études précédentes) et diffèrent par rapport à la méthodologie proposée dans le guide PPRN cavités souterraines abandonnées (Ministère de l'écologie, 2012). Aussi, à la lumière de ces éléments, il semble nécessaire que des travaux d'harmonisation soient mis en œuvre, intégrant les mécanismes réels mis en jeu.

D'autre part, l'étude de stabilité de la carrière de l'Ouest constitue un retour d'expérience représentatif d'une carrière souterraine abandonnée dite « évolutive ». En effet, les nombreuses dégradations observées au fond (au toit, sur les parements et les piliers) ainsi que les désordres apparus en surface, et notamment les plus récents, montrent que des effondrements restent à craindre à court terme. Néanmoins, la notion d'imminence est difficile à caractériser. En effet, l'hétérogénéité des configurations d'exploitation et la nature des dégradations sont autant de critères qui peuvent influencer la dynamique de rupture de l'ouvrage souterrain, localement ou dans son ensemble. Aussi, la notion d'imminence du phénomène n'a pas de réponse généralisée et doit être étudiée au cas par cas selon le contexte. La caractérisation de secteurs critiques en termes de stabilité lorsque ceux-ci présentent des signes de dégradations importants et d'évolution visible sont autant de signaux défavorables quant aux conditions de stabilité à court terme de la carrière.

Enfin, ce site et cette étude, sont représentatives de cas type et courants où les contraintes urbaines font que les projets d'aménagement doivent nécessairement intégrer la présence des cavités souterraines et composer avec les aléas potentiellement présents.

5. Références bibliographiques

IGC (1999). Carrière de l'Ouest (dite carrière « Marto ») à Gagny (93). Mission d'assistance technique à l'État pour la réalisation d'un plan de mise en sécurité du site relativement aux risques dus à la carrière.

Ministère de l'écologie (2012). Guide méthodologique. Plan de prévention des risques naturels. Cavités souterraines abandonnées.

Semofi (2017). Expertise G5. Carrière de l'Ouest, phase 1, Mise en sécurité du site.