

# Minage d'un compartiment rocheux instable, de la modélisation à l'exécution

## Technical blasting design of an instable rock compartment

Claude BLAD<sup>1\*</sup>, Thibault ADAM<sup>1</sup>, Clément BOIS<sup>1</sup>

*1 NGE FONDATIONS, Grenoble, France*

*\*cblad@ngefondations.fr*

**RESUME :** Une carrière de granulats est exploitée immédiatement à l'aplomb de la RN90 (Savoie) menant aux plus grandes stations de skis de Tarentaise. Un compartiment rocheux de 3000 m<sup>3</sup> instrumenté montre des signes d'évolutions traduisant une instabilité chronique et rendant nécessaire la sécurisation de cette masse par minage.

La solution technique par minage a été permise par une modélisation numérique des caractéristiques géométriques basée sur l'analyse structurale du massif rocheux d'une part et sur le relevé topographique 3D directement intégré au modèle d'autre part.

Pour assurer une maîtrise de la cinématique de minage et des amplitudes de vibrations générées au regard des avoisinants, un dimensionnement spécifique a été réalisé. L'écoulement et les projections des matériaux minés ont également été simulés sur un modèle numérique de terrain avec prise en compte des modifications inhérentes aux travaux d'accès difficiles sur site. Les travaux de forage, bourrage et minage ont été menés sur corde en falaise nécessitant au préalable de nombreuses opérations d'hélicoptage. Du fait de l'instabilité de la masse rocheuse, des dispositifs complémentaires ont été mis en place pour assurer une intervention en sécurité. Le tir ainsi que les opérations de sécurisation ont été réalisés entre Mai et Juillet 2025.

**ABSTRACT:** An aggregate quarry is operated immediately adjacent to the RN90 (Savoie), which leads to the largest ski resorts in Tarentaise. An instrumented rock compartment of 3,000 m<sup>3</sup> shows signs of chronic instability. It was necessary to secure this mass through blasting.

The technical blasting solution were made possible by numerical modeling of the geometrics characteristics based on the structural analysis of the rock mass, and on the 3D topographic survey directly integrated into the model.

To ensure control over the blasting kinematics and the vibration amplitudes generated with respect to nearby structures, a specific design was carried out. The flow and projections of the blasted materials were also simulated on a digital terrain model, taking into account the modifications inherent to difficult site access works.

Drilling, loading, and blasting operations were carried out on ropes along the cliff, requiring numerous helicopter operations beforehand. Due to the instability of the rock mass, additional measures were implemented to ensure safe intervention. The blast and securing operations were carried out between May and July 2025.

**Mots-clés :** Instabilité rocheuse ; Minage ; Dimensionnement tir ; Simulation écoulement rocheux ; Travaux d'Accès Difficiles

## 1 INTRODUCTION

La carrière Nexstone à Villette comporte une masse rocheuse et pour laquelle une surveillance a été mise en place au regard des instabilités qu'elle présentait.

Identifiée par le CETE en 1995, cette masse rocheuse appelée C4, a été surveillée en topographie par le CEREMA. Les mesures effectuées ont conduit à mettre en place une instrumentation automatique (capteurs) par ARIAS en 2017 puis SIXENSE en 2022.

Située à 80m de haut à flanc de falaise, cette masse rocheuse a une emprise de 50m de hauteur pour une largeur de l'ordre de 15m.

Au travers l'instrumentation mise en place et son suivi, cette masse montre des signes d'évolutions, qui sans pour autant indiquer un risque de chute imminent, traduisent une instabilité chronique.

Cette situation pose des problèmes de sécurité pour pouvoir évoluer dans l'environnement de la carrière. La suppression de cette masse est donc devenue un point clé pour la suite des opérations d'extraction des granulats en sécurité.

Ce marché a été confié au Groupement NGE FONDATIONS-CAN : NGE FONDATIONS a supervisé le minage de la masse rocheuse instable et CAN les autres travaux de sécurisation (pose de grillage, clouage, déplacement d'écrans ...)



Figure 1 . Vue du site et de la masse rocheuse – Extrait G2 PRO d'ARIAS MONTAGNE

## 2 PHASE CONCEPTION

### 2.1 Contexte géotechnique

La stabilité de la face SUD du massif calcaire de Villette est largement conditionnée par la présence de plans de fracturation affectant le substratum rocheux.

Les relevés structuraux effectués montrent qu'il s'agit de plans inclinés entre 50 et 70° en direction de la route. Ces plans constituent donc des glisseurs importants. Ces plans de fractures, dont l'espacement est décamétrique, est couplé à une importante persistance dans le massif rocheux. Ils permettent l'individualisation de compartiments rocheux très volumineux.

La colonne C4, identifiée précédemment, repose sur un plan glisseur très marqué de ce type avec trois familles F1 (glisseur) et F2 / F3 s'entrecoupant (Figure 2).

### 2.2 Estimation du volume à miner

Pour déterminer le volume de la masse rocheuse à miner, il a été retenu la méthode par profils en travers depuis une vue en plan par SINTEGRA.

En utilisant le plan, on trace trois profils en travers qui recoupent la masse C4, on calcule la surface de C4 isolée sur chaque profil en reportant les plans arrière de décollement. On applique à ces surfaces une largeur moyenne estimée à 8 m sur la vue en plan. Si l'on applique la moyenne des trois surfaces sur une largeur de 8 m, le volume est de 3110 m<sup>3</sup>.

Cette valeur est sans doute exagérée, car la diminution d'épaisseur entre P2 et P3 est très rapide d'Ouest en Est. Or on effectue ici une moyenne, ce qui augmente artificiellement le volume.

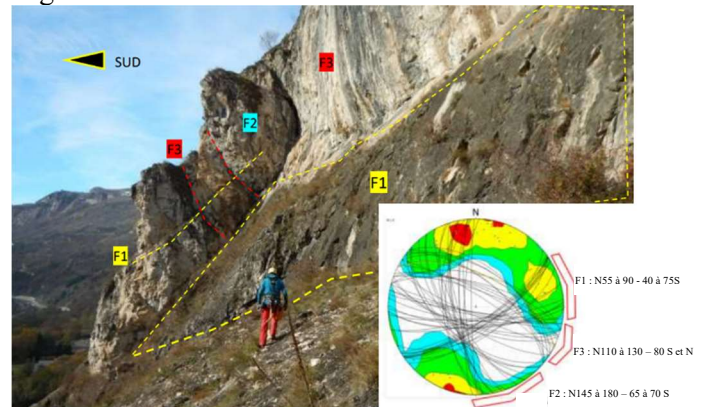


Figure 2 . Plans de fractures découpant le bloc instable C4 – extrait G2 PRO ARIAS

Au regard des enjeux liés au minage de cette masse, l'utilisation d'une méthode plus fine 3D a été nécessaire pour assurer un bon dimensionnement et une bonne maîtrise des risques tels que les vibrations générées.

La méthode 3D utilise le MNT disponible. La découpe du massif rocheux est effectuée avec le logiciel « RhinoTerrain 7 » qui permet l'extraction de volumes 3D à partir d'une surface topographique modélisée. La méthode consiste à disposer sur le modèle numérique les plans géologiques mesurés sur site et à extraire le volume ainsi découpé. Ce découpage permet d'isoler une forme en 3D dont on peut extraire toutes les données géométriques comme l'épaisseur dans n'importe quelle direction et quelles que soient les altitudes choisies.

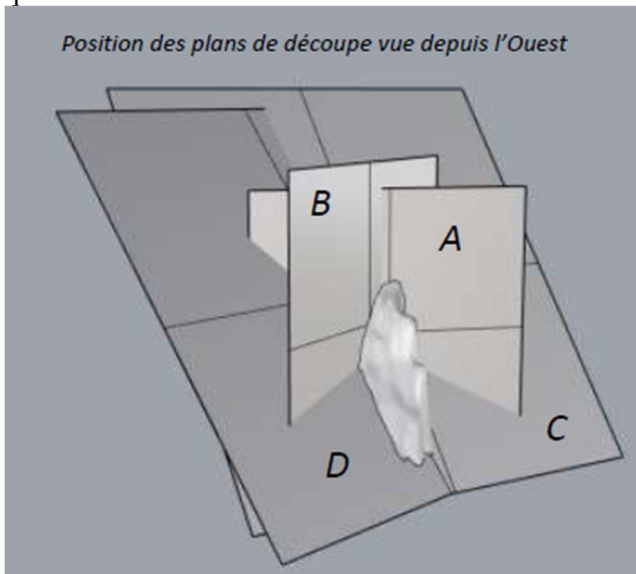


Figure 3 : méthode 3D de détermination du volume (extrait G2PRO d'ARIAS)

Le volume extrait avec cette technique est moindre puisque estimé à **2400 m<sup>3</sup>**.

## 2.3 Étude du minage

### 2.3.1 Faisabilité

Étant donné la sensibilité de l'opération, NGE FONDATIONS s'est fait accompagner par la société DCI (spécialisée en Ingénierie Explosive) pour l'étude spécifique de faisabilité du minage.

Étant donné la stabilité précaire de la masse, l'impératif est de miner la masse en une seule fois.

Du fait de sa position en hauteur, la réalisation du minage imposait des interventions sur cordes directement sur la masse rocheuse au regard de sa dimension pour réaliser les forages et mettre en œuvre les explosifs.

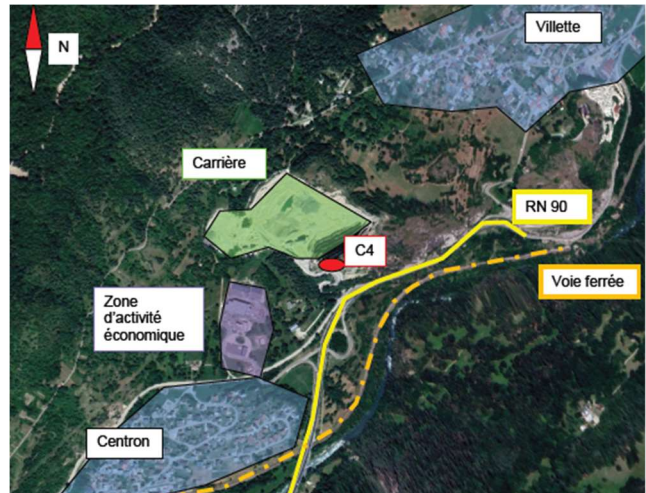


Figure 4 : Aperçu des enjeux autour de la masse C4

Il a été nécessaire de réaliser une structure permettant au personnel travaillant sur la masse d'être indépendant de celle-ci en cas d'effondrement précoce. Cette structure a été mise en place en amont de la masse instable et les travaux sur cordes ont été réalisés en rappel depuis celle-ci.

Pour prévenir de la propagation des blocs rocheux lors du minage, il a également été décidé de mettre en place une nappe de filets de type ELITE® permettant de rabattre les trajectoires de petits blocs.

Enfin, pour fiabiliser la séquence du tir, le choix a été porté sur un tir électronique. La réalisation d'un dimensionnement spécifique avec variabilité des mailles et utilisation de détonateurs électroniques dont la dispersion temporelle est quasi nulle, assure une maîtrise de la cinématique de minage et de réduction des charges unitaires instantanées. Ainsi, la quantité de charge explosive détonant à un instant  $t$  est réduite impliquant une amplitude des vibrations limitée.

Le calcul des vitesses particulières sur les bâtiments du village en utilisant la loi de Chapot permet de définir la charge unitaire instantanée maximale (CUImax) admissible vis-à-vis des seuils (définis dans l'arrêté préfectoral à une valeur de  $V = 2$  mm/s maximum) et de s'assurer du non-dépassement de ceux-ci..

$$\text{Loi de Chapot : } V = K \cdot \left( \frac{D}{\sqrt{Q}} \right)^\alpha \quad (1)$$

Avec  $K=2500$  et  $\alpha=-1,8$

Selon une première approximation, et bien que cette valeur puisse être sujet à variation selon le plan de tir final, il a été considéré une CUImax d'environ 63 kg (Q), d'où une vitesse brute estimée à  $V = 1.07$  mm/s au niveau du village de la Villette ( $D=585$ m).

### 2.3.2 Plan de tir initial

Le bloc a été modélisé en 3D à l'aide du modèle numérique de terrain (MNT) réalisé en 2020 par

SINTEGRA et découpé en 3 zones en fonction des plans de failles délimitant le bloc.

Un total de 36 trous de découpage (en rouge sur la figure 4) a été implanté, d'une longueur de 1.6 à 20m en périmétrie de la masse à miner.

La zone supérieure la plus épaisse fait l'objet de 7 trous d'abattage d'une profondeur de 12 à 17m. La zone centrale comprend 8 trous en 7 et 15m. La zone inférieure comprend 35 trous entre 2 et 12m.

Il est retenu une ouverture du V vers l'EST.

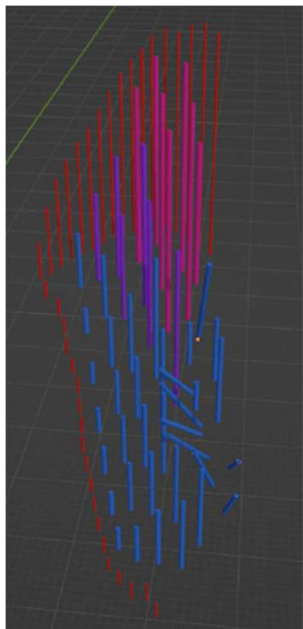


Figure 5 : Vue éclatée des trous de mines

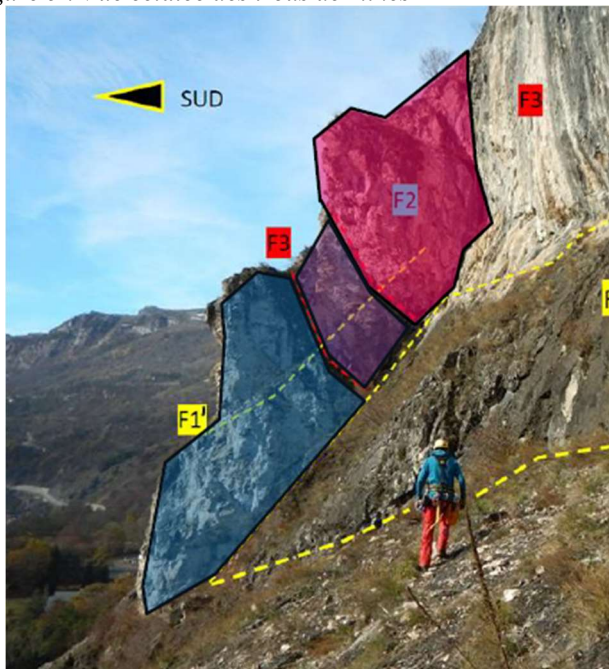


Figure 6 : Identification des trois zones du plan de tir : supérieures en magenta, médiane en violet et inférieure en bleu

### 2.3.3 Simulation numérique

Un logiciel permet de simuler en dynamique l'écoulement et les projections des matériaux minés sur le modèle numérique de terrain.

La modélisation effectue une discrétisation du bloc C4 et des blocs avoisinants. Un calcul de vitesse d'éjection est effectué en fonction de la dynamique des gaz et l'épaisseur et caractéristiques des roches. Ce calcul est couplé au calcul de balistique. Cette simulation permet d'apprécier une direction d'éjection et d'écoulement des matériaux minés.

La simulation est actualisée à chaque modification significative du plan de forage.

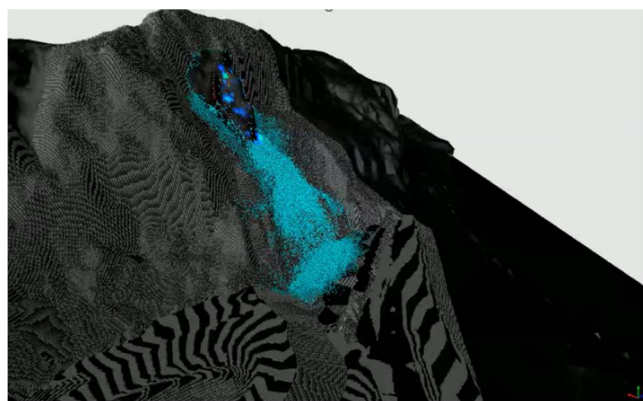
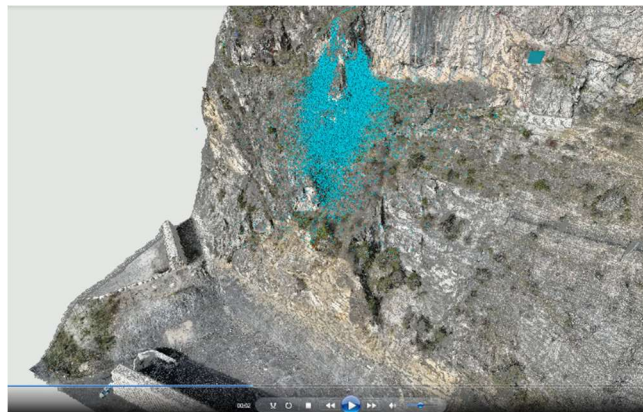


Figure 7 : Extraits vidéo de la simulation numérique du minage (DCI)

## 3 ADAPTATIONS TECHNIQUES DE LA SOLUTION DE MINAGE EN PHASE TRAVAUX

### 3.1 Mise en œuvre du portique de sécurité

Pour sécuriser le personnel, un portique a été conçu et mis en place au-dessus du compartiment instable.

Pour des raisons de sécurité du personnel, les amarrages des machines ont été séparés. Celles-ci ont été amarrées directement sur la masse, en acceptant de les perdre en cas de départ intempestif de l'ensemble du compartiment.

Le positionnement du portique avec des points déportés en hauteur offrait également une meilleure position de travail aux opérateurs.

Enfin et à l'issue des forages, le portique a été équipé de filets ELITE® pour former un déflecteur limitant le risque de propagation de blocs lors du minage.



Figure 8 . Vue du portique positionné au-dessus de la masse rocheuse instable

### 3.2 Forage en conditions d'accès difficiles

Les forages ont été réalisés sur cordes, à l'aide d'ateliers de forage développés par NGE FONDATIONS.

Pour chaque point de forage défini sur le plan de tir, une implantation est effectuée à l'aide d'une canne GPS au droit du point de forage après mise en place de l'atelier. La glissière est alors réglée dans les 3 directions afin de respecter les inclinaisons et azimuts prévus.

Après chaque forage, un contrôle est effectué avec passage caméra afin de vérifier la profondeur et la nature du terrain (absence de failles pouvant dissiper l'énergie du tir).

Un chemisage des trous est effectué pour prévenir d'éboulements dans l'attente de la phase de chargement.

Au regard des contraintes du site et des conditions de forages, certains points doivent être modifiés. Plusieurs actualisations du plan de tir ont été effectuées pour intégrer ces modifications.

In fine, 31 trous de découpages et 44 trous d'abattage ont été réalisés.



Figure 9 . Atelier de forage NGE FONDATIONS

### 3.3 Chargement et minage en conditions d'accès difficiles

Étant donné les difficultés d'accès, la technicité du chargement et le créneau horaire disponible pour effectuer le minage (fermeture de la RN90 entre 10h30 et 12h00), il a été décidé de d'effectuer le chargement sur une journée et le minage le lendemain.

Des travaux préparatoires ont été nécessaires pour pouvoir réaliser les opérations de chargements. En effet, ces opérations ont nécessité des travaux d'héliportage pour approvisionner les matériaux à proximité du bloc.

Il a donc été nécessaire dans un premier temps de réaliser des plateformes temporaires pour l'accueil des explosifs et de la gravette de bourrage (Figure 12 et 13).

Les colis sont préparés au préalable avant les opérations d'héliportage pour répartir les explosifs en fonction des zones de chargement en falaise.



Figure 10 . Répartition des explosifs avant héliportage

Un total de 560kg d'explosif (émulsion encartouchée) a été approvisionné sur site et 390m de cordeaux détonants, ainsi que 4 tonnes de gravette.

Toujours via des travaux sur cordes, les explosifs et les détonateurs sont mis en œuvre (Figure 12) dans chaque forage selon le plan de tir arrêté (Figure 11). La charge maximale unitaire instantanée est de 33,6kg ; la charge spécifique est de ~200 g/m<sup>3</sup>.

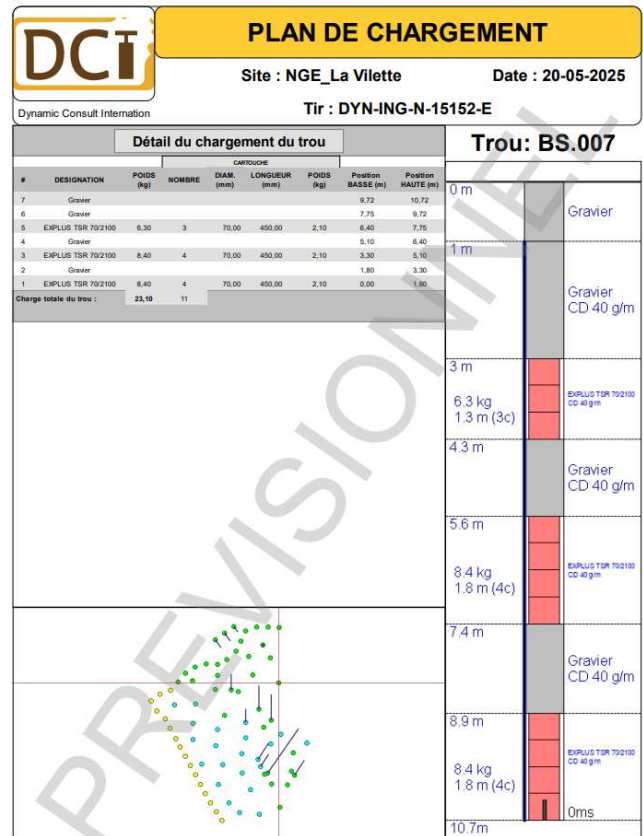


Figure 11 . Exemple de plan de chargement



Figure 12 . Chargement des explosifs en falaise

Pour la mise en œuvre de la gravette en tête de forage, un système de guidage gravitaire depuis la tête de falaise est retenu. Constitué de 2 flexibles comme visibles sur les Figure 13, la gravette descend gravitairement jusqu'au forage à remplir.



Figure 13 . Mise en œuvre du bourrage depuis la tête de falaise, 50 m plus haut

Enfin, un gardiennage du chargement durant la nuit a également été mis en place.

### 3.4 Minage

Préalablement au minage, une mise en sécurité du site est effectuée. Pour cela, un périmètre de tir est défini au regard des ouvrages avoisinants et des simulations effectuées.

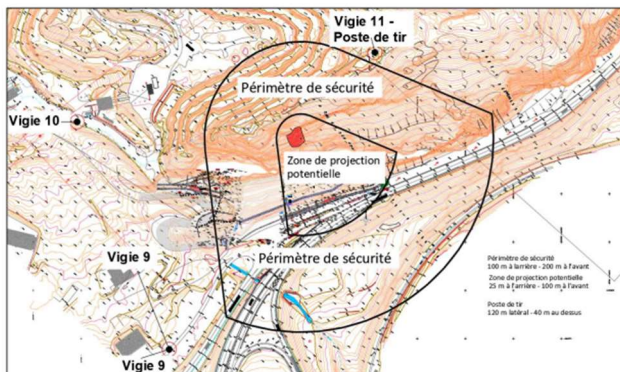


Figure 14 . Périmètre de sécurité du tir

Pour assurer la coupure de la RN90 et des routes avoisinantes, 8 vigies ont été réparties, soutenues par la gendarmerie.

Par ailleurs, la sécurisation du périmètre du tir est assurée par la mise en place d'autres vigies en amont et en aval de la zone de tir et le blocage des voies de circulations avec des engins.

Moins exposée, la voie ferrée n'est pas strictement fermée mais le minage est néanmoins réalisé sous un blanc de circulation pour des vérifications après tir.

Pour permettre le recueil d'un maximum d'informations durant le minage, 2 drones sont déployés ; Un premier pour capter le tir afin d'identifier rapidement d'éventuels incidents de tir, le second pour apprécier les projections dans la vallée, notamment au niveau de la voie ferrée.

La centralisation des échanges avec les différents intervenants (Préfecture, SDIS, Gendarmerie, DIR-CE, Département) est assurée via un PC sécurité.

Conformément à la procédure de tir, une fois le périmètre sécurisé, la mise à feu est effectuée depuis le poste de tir en tête de la falaise. L'amorçage est de type

électronique en mono-détonation ; la durée de la séquence est de 310ms avec un espacement temporel entre charges de 5ms minimum.

Les vibrations mesurées (Maximum : 1.65 mm/s à 215 m) sont conformes aux seuils fixés par arrêté préfectoral.

À la suite du tir, une reconnaissance par drone permet de vérifier l'état général du site afin d'autoriser l'approche pour un premier contrôle pyrotechnique. Une inspection du front arrière sur corde est ensuite effectuée, puis le contrôle de la fosse de réception et de l'état de la chaussée.

A l'issue de ces contrôles, l'autorisation est donnée pour le balayage de la chaussée en vue de la réouverture de la RN 90.

Des travaux de purges résiduelles ainsi que quelque confortement rocheux ont été ensuite réalisés sur la cicatrice du minage les semaines suivantes.



Figure 15 . Extrait vidéo du tir

## 4 CONCLUSION

Pour permettre le minage de la masse rocheuse instable, des simulations numériques en phase conception ont permis de vérifier la faisabilité du tir au regard des contraintes du site de la présence d'avoisinants.

À la suite de l'établissement du plan de tir, les travaux de forage ont été réalisés par les équipes spécialisées de NGE FONDATIONS avec des moyens acrobatiques en falaise. Les modifications inhérentes aux conditions du site ont conduit à la mise à jour des plans de tirs.

L'exécution du tir s'est déroulée sans anomalie particulière et les vibrations mesurées sont conformes.

Comme attendu, des purges et sécurisations après tir ont été nécessaires, mobilisation les équipes NGE FONDATIONS encore plusieurs semaines.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Rapport ARIAS - Carrière de Vilette Définition des conditions de minage de la colonne C4 Rapport de PROJET du 15/03/2024 ind D

Rapport DCI - Minage Bloc C4 Carrière de La Vilette  
– Rapport du 20/05/2025 - DYN-ING-N-15270-A