

# RÉTRO-ANALYSE D'EFFONDEMENTS DE CARRIÈRES SOUTERRAINES ABANDONNÉES (FRANCE)

## **BACK-ANALYSIS OF ABANDONNED UNDERGROUND MINES (FRANCE)**

Nathalie Conil<sup>1</sup>, Thomas Hauquin<sup>2</sup>, Philippe Gombert<sup>1</sup>, Marwan Al Heib<sup>1</sup>, Clara Maghami<sup>3</sup>.

<sup>1</sup> *Ineris, Nancy, France*

<sup>2</sup> *EPRCF33 Bordeaux, France*

<sup>3</sup> *Total, Pau (auparavant à l'Ineris)*

**RÉSUMÉ** – Le territoire français est aujourd'hui largement exposé aux risques liés à la présence de cavités souterraines, de type mouvements de terrain, pouvant impacter les biens et les personnes. Des facteurs de prédisposition aux effondrements de grande ampleur ont été mis en évidence sur la base d'une analyse en retour d'expérience réalisée par l'Ineris et l'EPRCF33 sur un échantillon représentatif d'effondrements étudiés.

**ABSTRACT** – France is currently widely exposed to the risks associated with the presence of underground cavities, of the ground movement type, which can have an impact on property and people. The paper highlights some predisposing factors (geometric and geomorphological) of large-scale collapses, based on a back-analysis carried out by Ineris and EPRCF33 on a representative sample of cases.

### 1. Introduction

La France compte de nombreuses carrières souterraines aujourd'hui majoritairement abandonnées. Elles ont surtout été exploitées par la méthode des chambres et piliers, qui permet normalement d'assurer la stabilité de la surface du sol. Toutefois, certaines carrières sont sujettes à des mouvements de terrain – affaissements, effondrements localisés (fontis) ou/et généralisés (en masse) – qui peuvent avoir des conséquences graves : pertes de vie, dommages aux structures et infrastructures. C'est le cas des effondrements en masse des carrières de Clamart (Hauts-de-Seine) et de Château-Landon (Seine-et-Marne). La prédiction de ces effondrements est très difficile, compte tenu des multiples facteurs de prédisposition et de déclenchement qui interviennent dans les mécanismes d'instabilité. Plusieurs approches ont été tentées : rétro-analyse de cas particuliers d'effondrements (Al Heib et al., 2015 ; Conil et al., 2023), analyse de données multicritère (Didier et al., 2004 ; El Shayeb et al., 2001), etc. Il a été décidé de mutualiser les connaissances et compétences respectives de l'Ineris, qui étudie depuis longtemps les mines et carrières françaises, et du syndicat EPRCF33 (Études et Prévention des Risques Carrières et Falaises en Gironde) qui a constitué une base de données fiables sur des carrières de Gironde. Les deux établissements ont entamé une collaboration scientifique dont l'objectif est de proposer un modèle prédictif de l'aléa d'effondrement généralisé basé sur les caractéristiques géomécaniques et géomorphologiques des carrières. Les premiers résultats de ce travail collaboratif sont présentés ici.

### 2. Rétro-analyse de l'endommagement des anciennes carrières selon une approche géomécanique

#### 2.1. Grands principes de l'étude de la stabilité des piliers

*La stabilité d'une carrière souterraine repose principalement sur la stabilité de ses piliers. Pour cela, le principe de base est que la contrainte verticale moyenne  $\sigma_p$  qui leur est imposée sous l'effet du poids des terrains de recouvrement reste inférieure à la résistance*

à la compression du pilier  $R_p$ . La contrainte  $\sigma_p$  peut être estimée par la méthode de l'aire tributaire (

Figure 1). La résistance  $R_p$  dépend en grande partie de la nature de la roche qui constitue les piliers et de leur géométrie, en particulier de leur élancement vertical, défini comme le ratio hauteur/largeur  $h/l$ . Pour des raisons pratiques, on considèrera ici l'inverse de l'élancement  $l/h$ .

Une des méthodes historiquement utilisées pour déterminer  $R_p$  consiste à en établir une relation empirique permettant d'obtenir un coefficient de sécurité moyen  $R_p/\sigma_p$  égal à 1 pour les piliers effondrés. Une autre méthode devenue classique consiste à réaliser un *graphique de stabilité* sous la forme d'un repère orthonormé avec  $l/h$  en abscisses et  $\sigma_p$  en ordonnées, en utilisant un figuré particulier pour symboliser les différents niveaux d'endommagement. Une fois le graphique construit, on cherche à établir une relation du type  $\sigma_p = f(l/h)$  qui permette de délimiter le domaine des piliers non-effondrés de celui des piliers effondrés, et qui puisse être interprétée comme une formulation empirique de la résistance des piliers  $R_p$ .

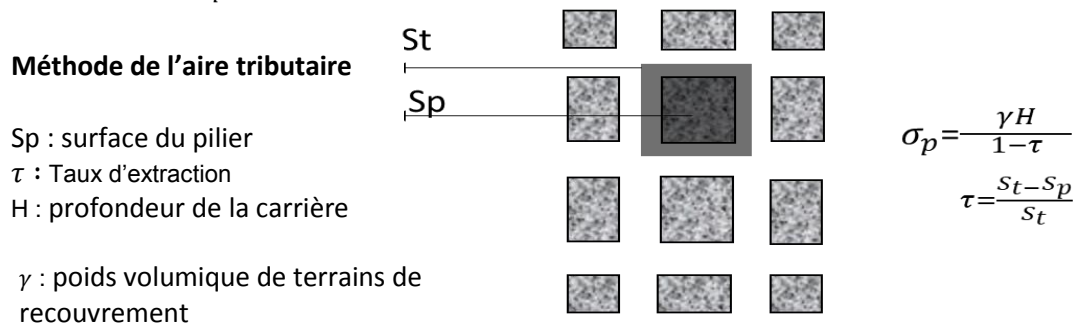


Figure 1. Méthode de calcul de l'aire tributaire d'un pilier

Diverses relations empiriques ont été développées pour estimer  $R_p$  mais la forme la plus courante est la suivante pour un pilier carré d'une largeur  $w$  ou  $l$  en tenant compte de  $R_c$ , la résistance à la compression simple d'un échantillon de roche testée en laboratoire :

$$R_p = \lambda * R_c \frac{w^\alpha}{h^\beta} \quad (1)$$

où la valeur des coefficients  $\alpha$  et  $\beta$  est déterminée empiriquement et où le coefficient  $\lambda$  permet de tenir compte de l'effet d'échelle et de l'hétérogénéité du massif.

## 2.2. Rétro-analyse de l'endommagement des anciennes carrières de calcaire de Gironde et nouvelle relation pour la résistance des piliers

### 2.2.1. Présentation du contexte et définition d'une échelle d'étude

Plus de 1 400 anciennes carrières souterraines ont été répertoriées en Gironde dans la formation des calcaires à Astéries (Oligocène). Il s'agit d'une roche tendre et très poreuse ( $n \approx 50\%$ , avec  $n$  la porosité) avec généralement une résistance à la compression simple de 1 à 5 MPa. Ces carrières ont été exploitées à une profondeur maximale de 60 m du fait de l'incapacité des piliers à supporter de fortes contraintes. Les carrières de grande extension (plusieurs dizaines d'hectares) ont été divisées en « salles d'exploitation », secteurs homogènes dont la largeur dépasse rarement une centaine de mètres, composées de quelques dizaines de piliers et séparées les unes des autres par des piliers ou des groupes de piliers de grande taille.

Ces carrières ont subi au moins une quinzaine de mouvements de terrains généralisés, dont 11 ont été étudiés. Ils ont créé en surface des cratères ou des cuvettes d'affaissement de 45 à 85 m de diamètre, correspondant globalement aux dimensions des zones effondrées au fond. On a alors constaté que les effondrements généralisés impliquaient des salles d'exploitation relativement bien délimitées, ce qui laisse penser qu'il s'agit de l'échelle d'étude la plus pertinente.

### 2.2.2. Données *in situ*

Le syndicat EPRCF33 inspecte les carrières de Gironde et en produit des plans précis à partir desquels il a constitué une base de données (BDD) de 74 salles d'exploitation réparties sur 35 carrières. Ces salles d'exploitation ont été caractérisées d'un point de vue géométrique (largeur des galeries, élancement des piliers, taux de défrètement, épaisseur des terrains de recouvrement, etc.), et tous les piliers les composant ont été notés individuellement en fonction de leur état visuel de dégradation sur une échelle allant de 1 à 6 : 1 = pilier intact (absence de fissuration et de déformation), 2 = fissuration, 3 = écaillage, 4 = pilier en forme de sablier, 5 = pilier écrasé, 6 = pilier effondré. À partir de cela, chaque salle d'exploitation a reçu une notation moyenne définie sur une échelle d'endommagement synthétique à 3 catégories (Figure 2) :

- A) tous les piliers sont intacts (notés 1) ;
- B) les piliers sont endommagés (notés 2 à 4),
- C) les piliers sont écrasés ou effondrés (notés 5 ou 6).



Figure 2. Exemple de piliers illustrant les trois catégories d'endommagement (carrière de Saint-Germain-du-Puch).

### 2.2.3. Construction et interprétation du graphique de stabilité pour la Gironde

À partir des mesures *in situ*, les indicateurs  $l/h$  et  $\sigma_p$  ont été calculés pour toutes les salles d'exploitation de la BDD. Leur représentation sous forme de graphique de stabilité (Figure 3) permet de constater que la répartition des catégories d'endommagement est en grande partie non aléatoire. Trois zones distinctes apparaissent : au bas du graphique, une zone qui comprend très majoritairement des groupes de piliers intacts, en haut à gauche une zone où tous les piliers sont écrasés ou effondrés et, entre les deux, une zone qui comprend très majoritairement des groupes de piliers endommagés. Deux limites apparaissent sur le graphique : l'enveloppe extérieure du nuage de points qui forme une courbe le long de laquelle tous les groupes de piliers sont écrasés ou effondrés (courbe rouge), et l'individualisation d'une zone où tous les groupes de piliers sont intacts (tiretés bleus).

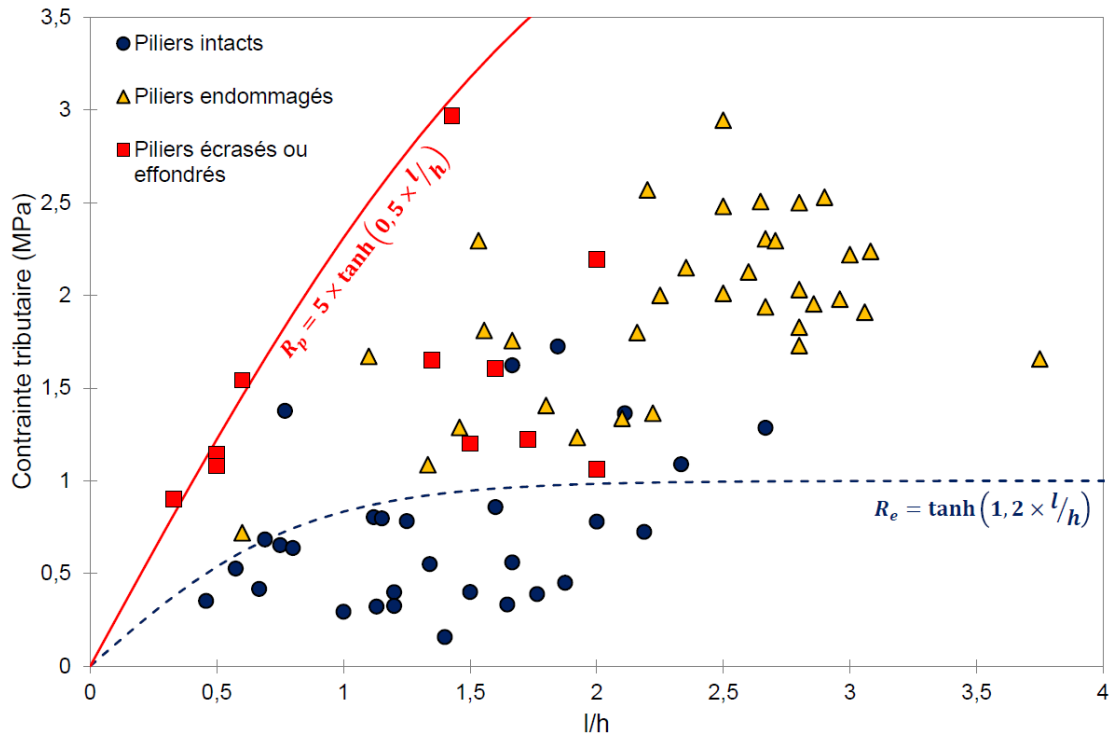


Figure 3. Graphique de stabilité des carrières de la base de données EPRCF33.

Il est alors possible de proposer une relation pour  $R_p$  (résistance des piliers) qui représente la limite supérieure et  $R_e$  (résistance élastique des piliers) qui représente la limite inférieure comme indiqué sur la Figure 3. La forme la plus souvent employée correspond à l'Eq. (1) mais, pour mieux s'ajuster aux données, il a semblé pertinent de trouver une nouvelle forme relation compatible avec les conditions aux limites suivantes :

- $R_p = R_e = 0$  lorsque  $l/h = 0$  ; la résistance des piliers doit en effet théoriquement tendre vers 0 lorsqu'ils sont infiniment élancés ;
- ces équations doivent être des fonctions croissantes de  $l/h$  et admettre des valeurs de contrainte asymptotiques lorsque  $l/h$  est suffisamment élevé.

La forme d'équation générale qui obéit à ces deux conditions est la tangente hyperbolique  $\tanh$ , qui peut être ajustée à partir de paramètres empiriques  $\alpha$  et  $\beta$  tels que :

$$R_e = \alpha_1 \cdot \tanh(\beta_1 \cdot l/h) ; \quad R_p = \alpha_2 \cdot \tanh(\beta_2 \cdot l/h) \quad (2)$$

Les valeurs de  $\alpha$  et  $\beta$  permettant un ajustement optimal aux données sont les suivantes :

$$\alpha_1 = 1 \text{ MPa} ; \beta_1 = 1,2 ; \quad \alpha_2 = 5 \text{ MPa} ; \beta_2 = 0,5 \quad (3)$$

Les courbes correspondantes sont représentées sur la Figure 3.

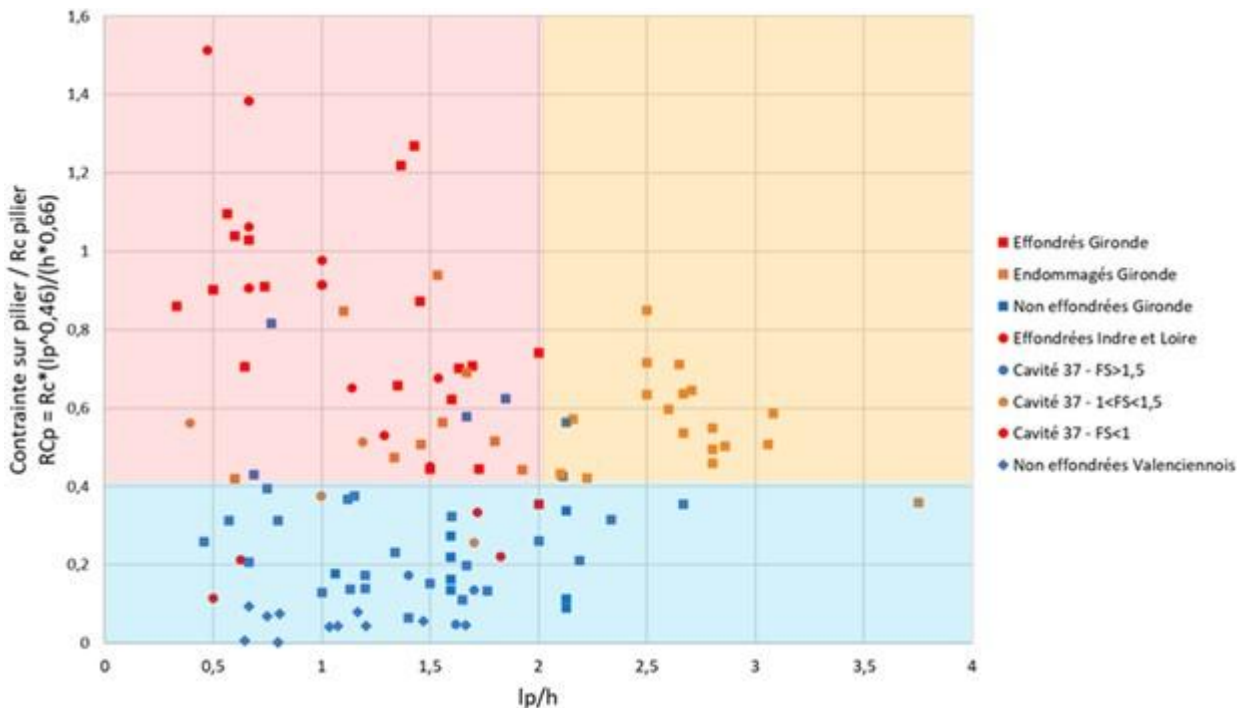
### 2.3. Construction et analyse d'un graphique de stabilité global pour les carrières d'Indre-et-Loire, du Nord et de Gironde

Nous avons appliqué la même démarche à des carrières exploitées dans un autre type de matériau (la craie) et dans deux autres départements : l'Indre-et-Loire avec des données fournies par le syndicat intercommunal Cavités 37, et le Nord avec des données issues d'inspections réalisées par l'Ineris. Pour chaque région, on dispose du rapport  $l/h$  moyen

des piliers, d'une estimation de leur contrainte  $\sigma_p$  et de la résistance à la compression simple de la roche  $R_c$ , et d'informations sur l'état d'endommagement des piliers de chaque carrière. Notons que, pour caractériser l'état de dégradation des carrières d'Indre-et-Loire, Cavités 37 se base sur le calcul de leur facteur de sécurité  $F_s$  associées aux observations de terrain, rapport de la résistance du matériau exploité ( $R_c$ ) à la contrainte du pilier ( $\sigma_p$ ) avec la convention suivante : les piliers de la carrière sont intacts si  $F_s > 1,5$ , susceptibles d'évoluer localement vers un effondrement si  $F_s < 1$ , et avec un niveau de sécurité moyen entre ces deux seuils.

A partir de ces données et de celles issues du département du Nord et de l'inventaire de l'EPRCF33, un graphique de stabilité global a été construit avec, en ordonnées, la contrainte adimensionnelle définie comme le rapport  $\sigma_p/R_c$ , plutôt que  $\sigma_p$  seule, afin que

les piliers de toutes les carrières apparaissent sur une même échelle de valeurs (Figure 4).



Le graphique permet d'identifier 3 secteurs représentés par des couleurs différentes :

- en bleu lorsque  $\sigma_p/R_p < 0,4$  ; les carrières sont en bon état et la majorité des piliers étudiés sont intacts ou faiblement endommagés ;
- en rouge lorsque  $\sigma_p/R_p \geq 0,4$  mais avec  $lp/h < 2$  ; on y trouve des carrières ou des secteurs exploités majoritairement dégradés voire effondrés ;
- en orange lorsque les secteurs exploités ne répondent pas aux critères précédents mais avec des carrières majoritairement endommagées.

On remarque qu'il existe certains cas qui ne correspondent pas aux zones de prédiction. Ces cas feront l'objet d'une analyse plus détaillée dans la suite de ce travail. Néanmoins il est possible, en positionnant une carrière souterraine sur un graphique de ce type, d'estimer son état de dégradation et de prévoir son comportement futur : stabilité en secteur bleu ou évolution vers une instabilité en secteur rouge.

### 3. Rétro-analyse de la base de données nationale Cavités selon une approche géométrique et hydrogéomorphologique

La France dispose d'une base de données nationale des cavités (BD cavités), actuellement hébergée par le site GéoRisques du Ministère de la Transition écologique. Elle regroupe toutes les cavités naturelles et anthropiques connues, dont près de 40 000 carrières souterraines abandonnées. Cette base de données est la plus exhaustive, bien qu'on considère qu'elle ne renferme qu'environ un dixième des carrières souterraines abandonnées qui sont, pour la plupart, non localisées. Toutefois, elle ne fournit que des informations géographiques (coordonnées) ou administratives (commune, département, région), et ne peut donc être utilisée pour une analyse de stabilité. La base de données « Mouvements de terrain », hébergée sur le même site, fournit des informations intéressantes sur près de 26 000 effondrements (localisés et généralisés) recensés à ce jour : la date de l'évènement et sa précision (jour, mois, année...), quelques données géométriques (diamètre, profondeur, superficie...), ainsi que les dégâts observés.

Afin de réunir au sein d'un même fichier des informations sur les effondrements et sur les carrières concernées – et d'y adjoindre des données sur leur contexte géologique, hydrogéologique et géomorphologique – l'Ineris a construit un inventaire d'effondrements de « grande ampleur », c'est-à-dire qui ont atteint la surface avec un diamètre d'au moins 10 m (soit les plus grands effondrements localisés et l'ensemble des effondrements généralisés). Les informations proviennent de ces deux bases de données mais surtout de recherches dans divers rapports d'étude (notamment du BRGM), articles de journaux et sites web. L'objectif est de disposer d'un effectif de plusieurs centaines de cas concernant trois types de roches dites sensibles à l'eau (gypse, craie, calcaire) et renfermant des données de différente nature :

- sur l'environnement de la carrière (géologie, hydrogéologie, géomorphologie) ;
- sur la carrière elle-même (localisation, taux de défrètement, date d'exploitation et d'abandon, profondeur...) ;
- sur les effondrements survenus (localisation, date, diamètre profondeur, dégâts...).

Dans son état d'avancement actuel, cet inventaire renferme 552 effondrements de grande ampleur pour lesquels 45 paramètres ont été renseignés en tout ou partie, ce qui représente plus de 15 000 données. Des premières tendances de cette analyse préliminaire de l'inventaire, se dessinent :

- le taux de défrètement des carrières qui ont subi au moins un effondrement de grande ampleur est systématiquement supérieur à 50% dans l'échantillon de carrières analysé, avec une plus forte tendance à l'effondrement au-delà de 75% ;
- la position géomorphologique de la carrière avec, sur un échantillon de plus de 200 carrières de Gironde et d'Indre-et-Loire, 82% d'effondrements dans la configuration en éperon qui correspond à la présence de deux versants sub-orthogonaux à proximité des carrières souterraines ; cette sur-représentation d'effondrements pourrait résulter d'une fragilité accrue du massif liée à la conjugaison des différentes familles de fractures de détente mécanique induites par chaque versant ;
- la distance d'un effondrement au cours d'eau le plus proche est d'environ 400 m en moyenne mais 55% des effondrements sont concentrés dans la classe 0-300 m et seulement 10% au-delà de 800 m dans l'échantillon de carrières analysé (Figure 6) ; On note cependant que ce sont les carrières de craie et de calcaire qui sont majoritairement situées à quelques centaines de mètres d'un cours d'eau, alors que les carrières de gypse se trouvent principalement au-delà de 1000 m.

Les résultats de cette première analyse doivent être confortés par la prise en compte d'un nombre plus important de carrières souterraines qui ont subi – ou pas – au moins un

effondrement de grande ampleur. Néanmoins, ils tendent à mettre en évidence la pluralité des conditions d'apparition de ce type d'effondrement, qui sont en lien avec des facteurs de prédisposition dont certains sont connus (géométrie des exploitations, influence du facteur eau, contexte géomorphologique) et d'autres restent encore à identifier.

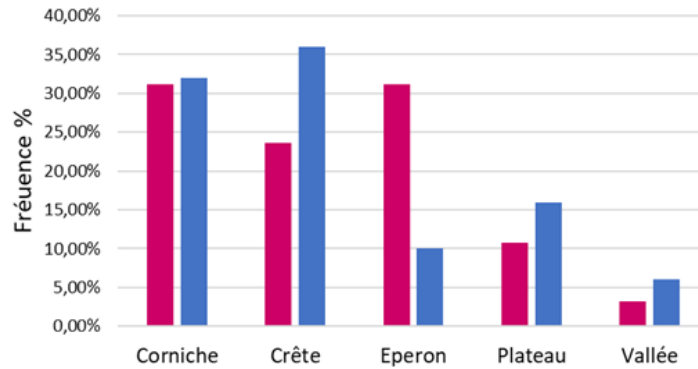


Figure 5. Répartition du taux d'effondrement des carrières souterraines de Gironde et d'Indre-et-Loire selon la configuration géomorphologique (carrières ayant subi un effondrement en rouge, sans effondrement en bleu) – Inventaire Ineris

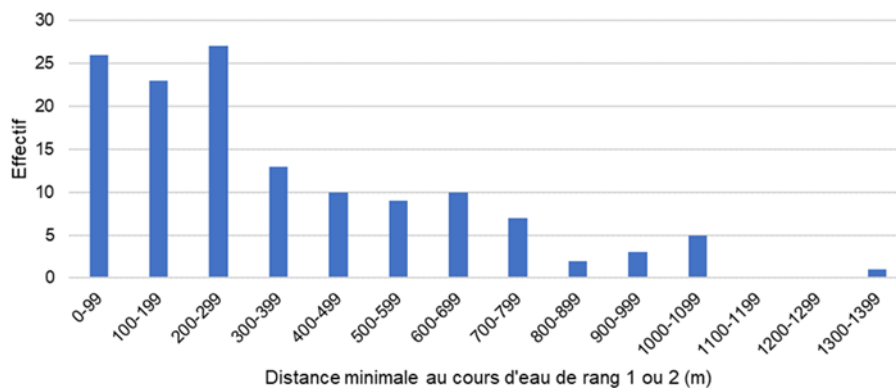


Figure 6. Fréquence d'effondrements en fonction de leur distance à un cours d'eau pérenne dans l'inventaire Ineris

#### 4. Discussion et conclusions

Aussi bien dans les carrières souterraines de Gironde que d'Indre-et-Loire ou du Nord, on montre qu'un effondrement de grande ampleur (généralisé) pourrait être favorisé par plusieurs facteurs géométriques comme un taux de défruitement élevé ou un élancement important des piliers. Cet élancement contribue en effet à réduire la résistance des piliers, laquelle pourrait devenir insuffisante pour compenser la contrainte verticale moyenne qui leur est imposée sous l'effet du poids des terrains de recouvrement. Une relation empirique de type tangente hyperbolique du rapport  $l/h$  est proposée pour modéliser la limite élastique des piliers au-delà de laquelle de tels effondrements pourraient se produire. Au-delà de cette limite, d'autres facteurs interviennent pour évaluer l'état de la carrière (stable ou effondrée). Notons également que les graphiques de stabilité ne permettent pas directement de prédire l'évolution dans le temps de l'état de conservation des carrières. Il s'agit simplement d'un bilan établi et valable à un instant donné. Néanmoins, les piliers sont susceptibles de se déformer et de s'endommager progressivement à charge constante, par effet de fluage, ce qui ne doit pas être négligé. Il serait intéressant, pour la suite, de comparer des cas de carrières intactes avec des cas de carrières très dégradées dans des configurations géomécaniques similaires, pour tenter de comprendre leurs différences de comportement. L'évolution des carrières dans le temps dépend probablement d'autres facteurs aggravants déclencheurs de l'effondrement, comme l'eau ou le contexte géomorphologique. Ainsi dans ces étude l'effet de l'eau et de la position géomorphologique apparaissent comme éléments

intéressants à prendre en compte dans l'évaluation de risque des effondrements. C'est le cas par exemple de la ville de Château Landon (Seine et Marne) où 4 carrières se sont effondrées entre 1978 et 1910, de part et d'autre d'une carrière restée stable malgré un schéma d'exploitation très proche de celui de ses voisines (Conil et al., 2023). Une rétro-analyse de la catastrophe de 1910, qui a fait 7 morts, survenue sur l'une de ces carrières a été réalisée par Al Heib et al. (2023) : elle montre que la présence d'une fracture traversante, associée à de fortes précipitations et à une soudaine remontée de nappe, pourrait expliquer l'ampleur de l'effondrement. Ce type d'étude basée sur la connaissance de la situation des ouvrages au moment de l'effondrement doit être appliqué à d'autres cas afin d'établir une liste exhaustive de facteurs de prédisposition et déclenchants pour améliorer notre connaissance et produire des documents d'aide à la décision.

En conclusion, cette contribution constitue une avancée pour l'identification des facteurs de prédisposition des carrières vis-à-vis de l'aléa effondrement généralisé. Néanmoins des analyses supplémentaires doivent être entreprises avant de généraliser les critères de prédisposition et proposer à terme un modèle prédictif.

## **5. Remerciements**

Les auteurs remercient l'ensemble des collaborateurs de Cavité 37 pour avoir pris le temps de sélectionner les cas traités dans cet article. Une partie des travaux a été réalisé dans le cadre d'un programme d'appui au Ministère de la Transition Écologique et de la Cohésion des Territoires.

## **6. Références**

Al Heib M, Duval C, Theoleyre F, Watelet JM, Gombert P, 2015. Analysis of the historical collapse of an abandoned underground chalk mine in 1961 in Clamart (Paris, France). *Bull Eng Geol Environ* (2015) 74:1001–1018, DOI 10.1007/s10064-014-0677-6.

Conil N, Gombert P, Al Heib M, Spitzensteder N, Muller R et al., 2023. An underground research laboratory at Château-Landon (France) to study the impact of climate change on the stability of abandoned mines. *Bull. Eng. Geol. Environ.*, DOI 10.1007/s10064-022-03028-9ff

Didier C, Salmon R, 2004. Evaluation du risque d'apparition d'un fontis en surface : un modèle volumétrique probabiliste. *JNGG*, Juin 2004, Lille, France, 451-461.

El Shayeb Y. Kounaiali S., Josien J-P, 2001. Towards the determination of surface collapse type over abandoned mines in the Lorraine iron basin. *International symposium of the international society for rock mechanics (EUROCK 2001)*, Jun 2001, Espoo, Finland. ffineris-00972216f

Salamon, M.D.G. and Munro, A.H. 1967. A study of the strength of coal pillars. *J. S. Afr. Inst. Min. Metall.*