

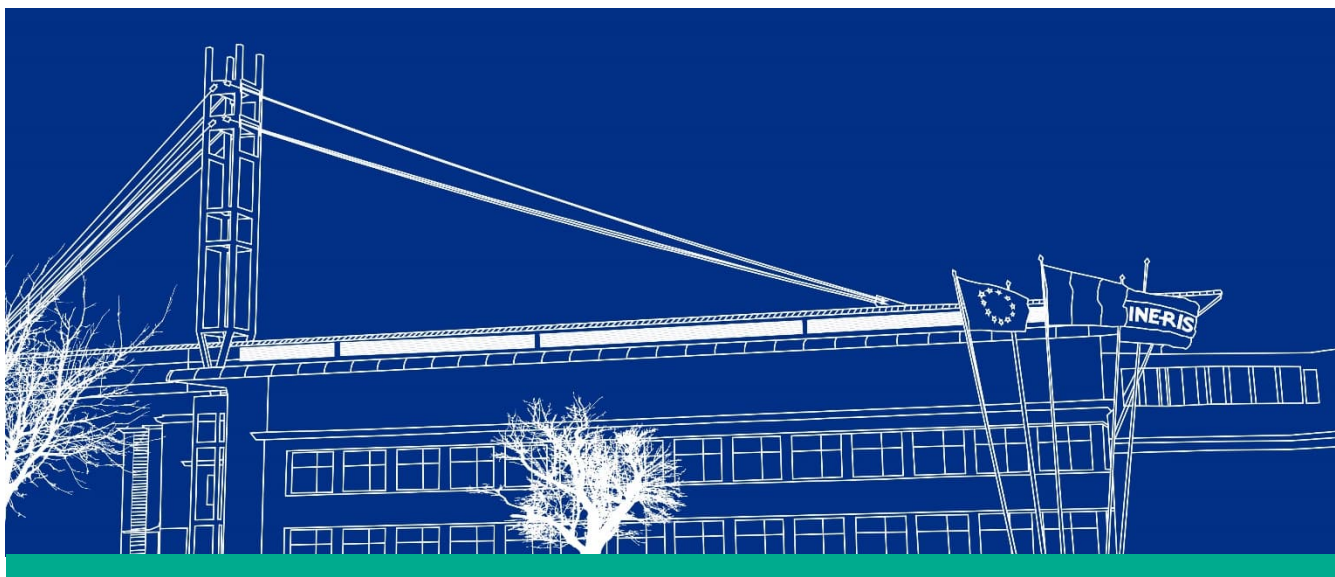


RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

*Liberté
Égalité
Fraternité*

INERIS

maîtriser le risque |
pour un développement durable |



(ID Modèle = 454913)

Ineris - 212824 - 2763492 - v1.0

28/05/2024

**Amélioration de la connaissance des
mécanismes d'instabilité et de l'impact du
changement climatique sur les carrières
souterraines abandonnées en France**

Premiers résultats

PRÉAMBULE

Le présent document a été réalisé au titre de la mission d'appui aux pouvoirs publics confiée à l'Ineris, en vertu des dispositions de l'article R131-36 du Code de l'environnement.

La responsabilité de l'Ineris ne peut pas être engagée, directement ou indirectement, du fait d'inexactitudes, d'omissions ou d'erreurs ou tous faits équivalents relatifs aux informations utilisées.

L'exactitude de ce document doit être appréciée en fonction des connaissances disponibles et objectives et, le cas échéant, de la réglementation en vigueur à la date d'établissement du document. Par conséquent, l'Ineris ne peut pas être tenu responsable en raison de l'évolution de ces éléments postérieurement à cette date. La mission ne comporte aucune obligation pour l'Ineris d'actualiser ce document après cette date.

Au vu de ses missions qui lui incombent, l'Ineris, n'est pas décideur. Les avis, recommandations, préconisations ou équivalents qui seraient proposés par l'Ineris dans le cadre des missions qui lui sont confiées, ont uniquement pour objectif de conseiller le décideur dans sa prise de décision. Par conséquent, la responsabilité de l'Ineris ne peut pas se substituer à celle du décideur qui est donc notamment seul responsable des interprétations qu'il pourrait réaliser sur la base de ce document. Tout destinataire du document utilisera les résultats qui y sont inclus intégralement ou sinon de manière objective. L'utilisation du document sous forme d'extraits ou de notes de synthèse s'effectuera également sous la seule et entière responsabilité de ce destinataire. Il en est de même pour toute autre modification qui y serait apportée. L'Ineris dégage également toute responsabilité pour chaque utilisation du document en dehors de l'objet de la mission.

Nom de la Direction en charge du rapport : DIRECTION SITES ET TERRITOIRES

Rédaction : CONIL Nathalie, GOMBERT PHILIPPE

Vérification : LECOMTE AMELIE; ALHEIB MARWAN

Approbation : Document approuvé le 28/05/2024 par DUPLANTIER STEPHANE
DUPLANTIER STEPHANE28/05/2024

Table des matières

1	CONTEXTE ET OBJECTIFS	7
<u>PARTIE 1 : LES CAVITES SOUTERRAINES EN FRANCE : STABILITE ET ROLE DE L'EAU</u>		8
1	LES CARRIÈRES SOUTERRAINES SUR LE TERRITOIRE NATIONAL	8
1.1	LES DIFFÉRENTS MODES D'EXPLOITATION	12
1.2	LES TYPES DE ROCHES EXPLOITÉES EN FRANCE	12
1.3	LE DIAGNOSTIC DE STABILITÉ	13
1.3.1	Les modèles analytiques	13
1.3.2	Les modèles numériques	14
1.4	SYNTHÈSE	16
2	L'EAU : FACTEUR AGGRAVANT ?	17
2.1	LE RÔLE DE L'EAU DANS LE VIEILLISSEMENT DES OUVRAGES	17
2.2	IMPACT DES VARIATIONS HYDROLOGIQUES ET HYDROGÉOLOGIQUES	18
2.3	ET LE CHANGEMENT CLIMATIQUE ?	18
2.3.1	Synthèse des impacts attendus	18
2.3.2	Impacts sur les cavités souterraines	18
2.4	SYNTHÈSE	19
<u>PARTIE 2 : INFLUENCE DES PARAMETRES GEOGRAPHIQUES ET GEOMORPHOLOGIQUES</u>		20
1	LES CONTEXTES GÉOMORPHOLOGIQUES DES CARRIÈRES SOUTERRAINES ABANDONNÉES EN FRANCES ET LEUR INFLUENCE POTENTIELLE	20
1.1	MÉCANISMES DE DÉCOMPRESSION DES TERRAINS	20
1.1.1	Détente mécanique en bord de versant	20
1.1.2	Décompression superficielle	21
1.2	TYPOLOGIE DE LA GÉOMORPHOLOGIE DES CARRIÈRES SOUTERRAINES EN FONCTION DE L'INTERACTION AVEC LES EAUX DE SURFACE OU SOUTERRAINES	22
1.3	EXEMPLES DE CONFIGURATIONS GÉOMORPHOLOGIQUES	24
1.3.1	Bas de versant	24
1.3.2	Haut de versant	25
1.3.3	Plateau	26
1.3.4	Éperon	26
1.3.5	Crête	27
1.4	SYNTHÈSE	28
2	CARRIÈRES SOUTERRAINES À PROXIMITÉ D'UN COURS D'EAU	29
2.1	MÉTHODOLOGIE DE L'ÉTUDE	29
2.2	CHOIX DU TYPE DE COURS D'EAU	29
2.3	CHOIX D'UNE DISTANCE AU COURS D'EAU	30
2.4	RÉSULTATS CARTOGRAPHIQUES	31
2.4.1	Localisation de l'ensemble des carrières souterraines	31
2.4.2	Cartographie des carrières de craie, de calcaire et de gypse hors Île-de-France	32
2.4.3	Cartographie des carrières de craie, de calcaire et de gypse en Île-de-France	35
2.4.4	Synthèse	38
<u>PARTIE 3 : RECENSEMENT DES CAS D'EFFONDREMENT ET ROLE DES FACTEURS DE PREDISPOSITION ET AGGRAVANTS</u>		39

1	INVENTAIRE DE CAS D'EFFONDREMENTS DE CARRIÈRES SOUTERRAINES ABANDONNÉES	39
1.1	MÉTHODOLOGIE ET PARAMÈTRES	39
1.2	PRÉSENTATION DE L'INVENTAIRE	40
2	LES PARAMÈTRES D'EXPLOITATION : DES FACTEURS DE PRÉDISPOSITION	44
2.1	PRÉSENTATION DE LA DÉMARCHE	44
2.2	APPLICATION SUR LES DONNÉES DE L'INVENTAIRE EN GIRONDE	46
2.3	COMPARAISON AVEC LES DONNÉES DE L'INDRE-ET-LOIRE ET DU NORD	47
2.4	DISCUSSION	50
3	LES PARAMÈTRES GÉOMORPHOLOGIQUES SONT-ILS DES FACTEURS AGGRAVANTS ?	53
3.1	ÉTUDE DES CARRIÈRES DE CALCAIRE DE GIRONDE	53
3.2	ÉTUDE DES CARRIÈRES DE CRAIE D'INDRE-ET-LOIRE	54
3.3	SYNTHÈSE	54
4	LES ÉVÈNEMENTS HYDROCLIMATIQUES SONT-ILS DES FACTEURS AGGRAVANTS ?	55
4.1	COMPARAISON DES DONNÉES DE L'INVENTAIRE AVEC LES ÉVÈNEMENTS EXCEPTIONNELS DE MÉTÉO FRANCE	55
4.2	RÉTRO-ANALYSE HYDROCLIMATIQUE	57
4.2.1	Objectifs et démarche	57
4.2.2	Effondrement de Château-Landon (77)	58
4.2.3	Effondrement de Clamart et Issy-les-Moulineaux (92)	60
4.2.4	Effondrement de Naujan et Postiac (33)	64
4.3	SYNTHÈSE	68
2	CONCLUSIONS	69
3	PERSPECTIVES	70
4	REMERCIEMENTS	71
5	RÉFÉRENCES	72

Résumé

Ce rapport aborde la question des carrières souterraines abandonnées en roches sensibles à l'eau (gypse, craie, calcaire) en France, et des risques qu'elles représentent en termes de mouvements de terrain. La stabilité de ces cavités est complexe à évaluer, car elle dépend de divers facteurs dont certains restent encore mal compris. L'eau, identifiée comme un élément clé, serait tantôt un facteur déclenchant et tantôt un facteur aggravant des instabilités. Dans ce cadre, le changement climatique est donc susceptible d'aggraver ces phénomènes en raison de l'augmentation prévisible de la fréquence et/ou de l'intensité des événements hydroclimatiques extrêmes (pluies/sécheresses, crues/étiages, battement des nappes). On synthétise ici les travaux réalisés pendant trois ans en s'appuyant sur le recensement de plusieurs centaines d'effondrements de grande ampleur (diamètre > 10 m) pour lesquels une quarantaine de paramètres ont été renseignés. Après avoir présenté les carrières souterraines abandonnées sur le territoire national, on aborde successivement les rôles potentiels de l'eau, du mode d'exploitation des carrières et de leur contexte géomorphologique (haut ou bas de versant, distance au cours d'eau) dans leur stabilité. La comparaison des dates d'effondrements avec celles des événements météorologiques montre que trois types d'évènements seraient susceptibles d'aggraver des instabilités et de mener à l'effondrement de tout ou partie d'une carrière souterraine en roche sensible : un évènement isolé d'intensité extrême, un évènement d'intensité importante mais non extrême survenant au cours d'une période anormalement longue et humide, ou une succession d'évènements susceptibles de générer une période particulièrement humide. Ces différents cas sont illustrés par la rétro-analyse hydroclimatique détaillée de trois effondrements importants : Château-Landon (77) en 1910, Clamart (92) en 1961 et Naujan-et-Postiac (33) en 2021. En ce qui concerne le contexte géomorphologique, il a été constaté que la distance d'une cavité à un cours d'eau ainsi que sa localisation par rapport au versant pouvaient jouer un rôle dans sa stabilité. L'inventaire qui a été réalisé dans le cadre de ce travail doit donc maintenant être étoffé pour inclure un plus grand nombre d'effondrements représentatifs de l'ensemble des régions françaises ainsi qu'un nombre équivalent de carrières non effondrées pour comparaison. Ces travaux doivent permettre, à terme, d'intégrer au mieux les facteurs aggravants dans l'élaboration des cartes d'aléas et de cibler les zones à risques, nécessitant des actions de prévention prioritaires.

Mots-clés :

Cavités souterraines, stabilité, effondrements, facteurs déclenchants, géomorphologie, effet de l'eau

Abstract

This report addresses the issue of abandoned underground quarries in water-sensitive rocks (gypsum, chalk, limestone) in France and the risks they represent in terms of ground movements. The stability of these cavities is complex to assess, as it depends on a variety of factors, some of which are still poorly understood. Water, identified as a key element, is both a trigger and an aggravating factor in instability. In this context, climate change is likely to exacerbate these phenomena due to increased frequency and/or intensity of extreme hydroclimatic events (rain/drought, flooding/drawdown, groundwater movement). This report summarises the work carried out over three years, based on a census of several hundred large-scale collapses (diameter > 10 m) for which around forty parameters were recorded. After presenting the abandoned underground quarries in France, the potential role of water, the method of quarrying, and the geomorphological context (upper or lower slope, distance from a watercourse) in their stability. A comparison of the dates of collapse with those of meteorological events shows that three types of events are likely to aggravate instabilities and lead to the collapse of all or part of an underground quarry in sensitive rock: an isolated event of extreme intensity, an event of significant but not extreme intensity occurring during an abnormally long and wet period, or a succession of events likely to generate a particularly wet period. These different cases are illustrated by a detailed hydroclimatic retro-analysis of three major collapses: Château-Landon (Seine-et-Marne) in 1910, Clamart (Hauts-de-Seine) in 1961, and Naujan-et-Postiac (Gironde) in 2021. The inventory drawn up as part of this work must now be expanded to include a larger number of collapses representative of all French regions and an equivalent number of non-collapsed quarries for comparison. Ultimately, this work should make it possible to better integrate the aggravating factors into the hazard maps and to target at-risk areas requiring priority preventive action.

Keywords:

Underground mines, stability, collapses, triggering factors, geomorphology, water impact

Pour citer ce document, utilisez le lien ci-après :

Institut national de l'environnement industriel et des risques, Amélioration de la connaissance des mécanismes d'instabilité et de l'impact du changement climatique sur les carrières souterraines abandonnées en France ; Ineris - 212824 - 2763492 - v1.0 ; 28/05/202428/05/2024.

1 Contexte et objectifs

Il existe sur le territoire français quelques centaines de milliers de cavités souterraines, la plupart étant des carrières souterraines abandonnées, peu profondes. Lorsque ces cavités sont situées au cœur de zones urbanisées ou potentiellement urbanisables, les risques associés, essentiellement de type mouvements de terrain (effondrement ou affaissement), peuvent concerner les personnes et les biens en surface, imposant ainsi de fortes contraintes d'aménagement aux propriétaires, aux collectivités territoriales et aux aménageurs. Il est donc important de comprendre le comportement de ces ouvrages et en particulier les processus de dégradations qui peuvent conduire à des instabilités.

Pour les anciennes carrières exploitées par la méthode des chambres et piliers, il s'agira de s'intéresser à la stabilité de l'ouvrage en étudiant notamment la contrainte appliquée sur les piliers (fonction du poids des terrain sus-jacents et du taux d'exploitation) comparativement à leur résistance. Cependant, étudier la stabilité d'une carrière souterraine s'avère plus complexe que de simple calcul théorique. En effet, il est régulièrement constaté que même si certains effondrements se sont produits dans des configurations qui présentaient des caractéristiques géotechniques favorables à l'effondrement, la temporalité de la survenue de ces effondrements reste inexpliquée. À contrario, certains effondrements, localisés dans des configurations géotechniques non favorables à un effondrement, se sont produits.

Aussi, ce constat sous-entend que d'autres facteurs interviennent dans l'occurrence des instabilités. Ces facteurs, dits aggravants ou déclenchants, peuvent être de différents types et tous n'ont pas encore été identifiés.

Plusieurs auteurs évoquent le rôle potentiel de l'eau dans certaines instabilités d'ouvrages souterrains. Josien (1995) le considère tantôt comme un mécanisme initiateur (mise en charge des nappes susjacentes dans la rupture de toit, modification des propriétés de la roche dans la rupture de mur), tantôt comme un facteur aggravant (variations d'humidité de la roche ou au battement de nappes, variations d'hygrométrie au sein des carrières, circulation ou condensation d'eau favorisant le gonflement et le fluage d'intercalaires marno-argileux). D'autres auteurs mentionnent clairement le lien entre conditions climatiques et effondrements (Vincent & Mathon, 1999, Léotot, 2016, Noury et al., 2019, Conil et al., 2023).

Considérant le rôle potentiel de l'eau dans les instabilités et l'augmentation d'évènements hydroclimatiques exceptionnels liés notamment au changement climatique (sécheresses intenses, fortes précipitations ou inondations pouvant générer de fortes variations du niveau des nappes ou des cours d'eau ou engendrer de fortes infiltrations d'eau), on peut s'attendre à une aggravation des phénomènes d'instabilité des carrières souterraines et notamment celles creusées dans des roches particulièrement sensibles à l'eau (gypse, craie, calcaire).

Aussi, l'Ineris conduit, depuis 2021, des travaux afin d'améliorer la connaissance des mécanismes d'instabilité des cavités souterraines et de l'impact du changement climatique sur ces mécanismes. Ces études se placent essentiellement dans le contexte de l'appui aux pouvoirs publics et notamment dans le cadre de la feuille de route « cavités » qui s'intéresse tout particulièrement à ce type d'impact.

Ce rapport synthétise des travaux menés depuis plus de 3 ans sur le sujet. Il décrit dans un premier temps la situation du territoire français vis-à-vis de la présence des carrières souterraines abandonnées et présente les différents modes d'exploitation et les méthodes de diagnostic de la stabilité de ces ouvrages souterrains. Les mécanismes d'effondrement et de vieillissement des ouvrages sont également décrits ainsi que de premiers éléments de l'impact potentiel du changement climatique sur l'instabilité des carrières souterraines. Puis, les résultats de travaux de recherche menés sur l'impact du contexte géomorphologique et de la localisation des cavités par rapport aux cours d'eau sont présentés. L'objectif étant de mettre en évidence des facteurs pouvant aggraver l'état de stabilité des cavités. Enfin, les études, et leurs premiers résultats, menées autour de l'analyse de cas d'effondrements de carrières souterraines abandonnées en France sont présentés. Ainsi, la démarche de recensement des effondrements passés est détaillée et l'analyse de ces cas est discutée au travers de trois facteurs : les paramètres d'exploitation, le contexte géomorphologique des cavités et les évènements hydroclimatiques.

PARTIE 1 : LES CAVITES SOUTERRAINES EN FRANCE : STABILITE ET ROLE DE L'EAU

La France, en raison de sa géologie, mais également de son histoire ancienne et de son développement industriel, renferme de très nombreuses cavités dans son sous-sol qui est riche de divers matériaux (calcaires, marbres, gypses, argiles, marnes...). Ils ont été exploités notamment dans des carrières souterraines situées à l'origine à l'extérieur des villes. Aujourd'hui abandonnées pour la plupart, elles se retrouvent dans l'espace urbain du fait de l'expansion de ce dernier (Comentale, 2019).

Le creusement de cavités, perturbe inéluctablement, et de façon définitive, les conditions régnant préalablement au sein du massif. Ces perturbations sont alors susceptibles de donner naissance à des instabilités en surface. L'analyse de la stabilité des cavités souterraines abandonnées exige une connaissance approfondie des contextes géologiques et des caractéristiques des vides. En outre, les effets de multiples facteurs aggravants peuvent accélérer l'évolution de ces cavités.

Après un état des lieux des carrières souterraines abandonnées sur le territoire français, cette première partie, s'intéresse plus particulièrement au diagnostic de stabilité des cavités et aux facteurs de prédispositions mis en jeu (géométrie et natures des matériaux exploités, nature et épaisseur des terrains de recouvrement...). L'impact de l'eau sur la stabilité des cavités sensibles à l'eau est également abordé, notamment au regard des perturbations associées au changement climatique.

1 Les carrières souterraines sur le territoire national

174 500 cavités souterraines sont inventoriées par le BRGM en France dans la base de données cavités (BD cavités¹). En revanche ce chiffre ne reflète pas complètement la réalité car on estime que beaucoup n'ont pas encore été découvertes (de l'ordre du double ou du triple). Ces cavités souterraines sont soit d'origine naturelle (54%), soit d'origine anthropique (46 %). Les cavités naturelles concernent principalement des cavités karstiques. Les cavités anthropiques représentent, pour moitié d'anciennes carrières d'exploitation (calcaire, craie, grès, schistes, sable, gypse, marne...) et pour moitié des ouvrages civils et militaires.

¹ <https://www.georisques.gouv.fr/risques/cavites-souterraines/donnees#/>

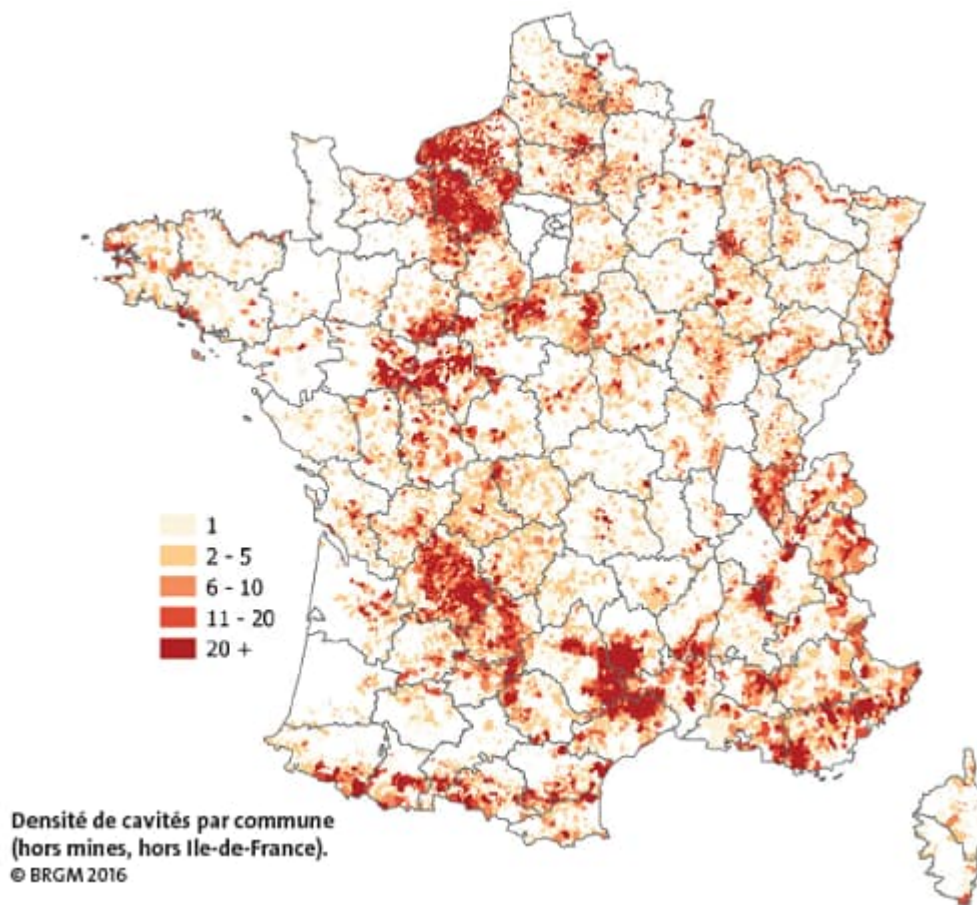


Figure 1. Densité des cavités souterraines en France métropolitaine (source : Géorisques)

L'extraction des données depuis la BD cavités permet de montrer que les carrières ne sont pas réparties de manière homogène sur l'ensemble du territoire (Figure 1). Elles sont concentrées dans certains départements dans lesquels la nature du sous-sol, les conditions d'exploitation ou la qualité du matériau y étaient les plus favorables. D'après le recensement du BRGM, environ 4370 communes réparties dans 92 départements français ont des carrières souterraines sur leur territoire. Notons cependant que cette base de données ne comprend pas les carrières d'Ile-de-France qui sont gérées par l'IGC² Paris, pour Paris et sa petite couronne (92, 93, 94), et par l'IGC Versailles³ pour la grande couronne (78, 95, 91).

Les données de l'IGC ne sont pas publiques. Néanmoins on estime la superficie des terrains sous-cavés à plus de 3 000 hectares, répartis sur 70 communes pour Paris et de sa petite couronne (Source : <https://www.paris.fr/pages/tout-savoir-sur-les-sous-sols-2317>) et 10 500 ha répartis sur 242 communes (Source : <https://iqc-versailles.fr/>), pour la grande couronne, la grande majorité d'entre elles étant située dans le département de l'Essonne.

En 2023, la BD cavités recense près de 40 000 carrières souterraines abandonnées, réparties sur l'ensemble des communes de France métropolitaine (hors Ile-de-France). Le Tableau 1 présente la répartition de ces carrières abandonnées par région et le Tableau 2 par département.

La région Normandie concentre à elle seule la majorité des carrières souterraines (près de 70 %), suivie par la Nouvelle-Aquitaine (7,7 %), les Hauts-de-France (7,31 %), les Pays de la Loire (4,79 %) et le Centre-Val de Loire (4,69 %). La liste par département montre qu'au sein d'une région la répartition peut également être hétérogène : ainsi en Normandie la plupart des carrières sont référencées en Seine-

² Inspection Générale des Carrières de Paris, créée en 1777 par Louis XIV, actuellement rattachée à la Ville de Paris et qui assure des missions sur les autres territoires concernés.

³ Inspection Générale des Carrières de Versailles, créée en 1967 par le Préfet de Seine et Oise, actuellement rattachée au Conseil départemental des Yvelines et qui assure également des missions sur les autres territoires concernés.

Maritime où des milliers de marnières ont été creusées afin d'en extraire la « marne » (craie altérée) utilisée pour amender les champs.

Tableau 1. Répartition, en 2023, des carrières souterraines abandonnées en France, par région (d'après la BD cavités¹)

Région	Nombre	Ratio (%)
Auvergne-Rhône-Alpes	544	1,5
Bourgogne-France-Comté	287	0,8
Bretagne	316	0,9
Centre-Val de Loire	1700	4,7
Corse Sud/Nord	0	0,0
DROM	N.C.	N.C.
Grand Est	709	2,0
Hauts-de-France	2649	7,3
Normandie	24339	67,1
Nouvelle-Aquitaine	2790	7,7
Occitanie	624	1,7
Pays de la Loire	1735	4,8
Provence-Alpes Côte d'Azur	139	0,4
Seine et Marne (le reste de l'IdF n'est pas communiqué dans GeoRisque)	415	1,1
Total	36247	100

Tableau 2. Répartition, en 2023, des carrières souterraines abandonnées par départements du territoire métropolitain français (d'après les données de la BD cavités¹)

N°	Département	Région	Nombre de carrières	Ratio (%)	N°	Département	Région	Nombre de carrières	Ratio (%)	N°	Département	Région	Nombre de carrières	Ratio (%)	N°	Département	Région	Nombre de carrières	Ratio (%)
01	Ain	Auvergne-Rhône-Alpes	17	0,05	27	Eure	Normandie	9638	27	52	Haute-Marne	Grand Est	60	0,17	77	Seine-et-Marne	Île-de-France	415	1,14
02	Aisne	Hauts-de-France	592	1,6	28	Eure-et-Loir	Centre-Val de Loire	393	1,1	53	Mayenne	Pays de la Loire	60	0,17	78	Yvelines	Île-de-France		0,00
03	Allier	Auvergne-Rhône-Alpes	18	0,05	29	Finistère	Bretagne	87	0,24	54	Meurthe-et-Moselle	Grand Est	8	0,02	79	Deux-Sèvres	Nouvelle-Aquitaine	61	0,17
04	Alpes-de-Haute-Provence	Provence-Aples-Côte d'Azur	4	0,01	30	Gard	Occitanie	321	0,9	55	Meuse	Grand Est	52	0,14	80	Somme	Hauts-de-France	132	0,36
05	Hautes-Alpes	Provence-Aples-Côte d'Azur	18	0,05	31	Haute-Garonne	Occitanie	14	0,04	56	Morbihan	Bretagne	58	0,16	81	Tarn	Occitanie	28	0,08
06	Alpes-Maritimes	Provence-Aples-Côte d'Azur	35	0,1	32	Gers	Occitanie	1	0,003	57	Moselle	Grand Est	52	0,14	82	Tarn-et-Garonne	Occitanie	2	0,01
07	Ardèche	Auvergne-Rhône-Alpes	11	0,03	33	Gironde	Nouvelle-Aquitaine	1228	3,4	58	Nièvre	Bourgogne-France-Comté	19	0,05	83	Var	Provence-Aples-Côte d'Azur	9	0,02
08	Ardennes	Grand Est	122	0,3	34	Hérault	Occitanie	60	0,2	59	Nord	Hauts-de-France	448	1,24	84	Vaucluse	Provence-Aples-Côte d'Azur	11	0,03
09	Ariège	Occitanie	28	0,1	35	Ille-et-Vilaine	Bretagne	105	0,3	60	Oise	Hauts-de-France	1047	2,89	85	Vendée	Pays de la Loire	31	0,09
10	Aube	Grand Est	69	0,2	36	Indre	Centre-Val de Loire	63	0,2	61	Orne	Normandie	678	1,87	86	Vienne	Nouvelle-Aquitaine	659	1,82
11	Aude	Occitanie	46	0,1	37	Indre-et-Loire	Centre-Val de Loire	179	0,5	62	Pas-de-Calais	Hauts-de-France	430	1,19	87	Haute-Vienne	Nouvelle-Aquitaine	3	0,01
12	Aveyron	Occitanie	12	0,03	38	Isère	Auvergne-Rhône-Alpes	59	0,2	63	Puy-de-Dôme	Auvergne-Rhône-Alpes	74	0,20	88	Vosges	Grand Est	7	0,02
13	Bouches-du-Rhône	Provence-Aples-Côte d'Azur	62	0,2	39	Jura	Bourgogne-France-Comté	18	0,05	64	Pyrénées-Atlantiques	Nouvelle-Aquitaine	40	0,11	89	Yonne	Bourgogne-France-Comté	94	0,26
14	Calvados	Normandie	1322	3,6	40	Landes	Nouvelle-Aquitaine	7	0,02	65	Hautes-Pyrénées	Occitanie	3	0,01	90	Territoire de Belfort	Bourgogne-France-Comté		N.C.
15	Cantal	Auvergne-Rhône-Alpes	17	0,05	41	Loir-et-Cher	Centre-Val de Loire	57	0,2	66	Pyrénées-Orientales	Occitanie	18	0,05	91	Essonne	Île-de-France		N.C.
16	Charente	Nouvelle-Aquitaine	165	0,5	42	Loire	Auvergne-Rhône-Alpes			67	Bas-Rhin	Grand Est	31	0,09	92	Hauts-de-Seine	Île-de-France		N.C.
17	Charente-Maritime	Nouvelle-Aquitaine	251	0,7	43	Haute-Loire	Auvergne-Rhône-Alpes	76	0,2	68	Haut-Rhin	Grand Est	15	0,04	93	Seine-St-Denis	Île-de-France		N.C.
18	Cher	Centre-Val de Loire	58	0,2	44	Loire-Atlantique	Pays de la Loire	9	0,02	69	Rhône	Auvergne-Rhône-Alpes	34	0,09	94	Val-de-Marne	Île-de-France		N.C.
19	Corrèze	Nouvelle-Aquitaine	82	0,2	45	Loiret	Centre-Val de Loire	950	2,6	70	Haute-Saône	Bourgogne-France-Comté	18	0,05	95	Val-D'Oise	Île-de-France		N.C.
21	Côte-d'Or	Bourgogne-France-Comté	29	0,1	46	Lot	Occitanie	10	0,03	71	Saône-et-Loire	Bourgogne-France-Comté	107	0,30					
22	Côtes d'Armor	Bretagne	66	0,2	47	Lot-et-Garonne	Nouvelle-Aquitaine	17	0,05	72	Sarthe	Pays de la Loire	955	2,63					
23	Creuse	Nouvelle-Aquitaine	51	0,1	48	Lozère	Occitanie	81	0,2	73	Savoie	Auvergne-Rhône-Alpes	159	0,44					
24	Dordogne	Nouvelle-Aquitaine	226	0,6	49	Maine-et-Loire	Pays de la Loire	680	1,9	74	Haute-Savoie	Auvergne-Rhône-Alpes	41	0,11					
25	Doubs	Bourgogne-France-Comté	2	0,006	50	Manche	Normandie	16	0,04	75	Paris	Île-de-France		N.C.					
26	Drôme	Auvergne-Rhône-Alpes	38	0,1	51	Marne	Grand Est	293	0,8	76	Seine-Maritime	Normandie	12685	35,00					
																Total		36247	100

1.1 Les différents modes d'exploitation

Les carrières souterraines sont accessibles, soit par un puits ou une descenderie dans le cas des carrières implantées sur un plateau, soit par une entrée à flanc de coteau, appelée entrée en « cavage » (Rapport INERIS-DRS-07-86042-02484A). La profondeur habituelle des exploitations est comprise entre 5 et 50 m. Elle peut être parfois inférieure à 5 m, comme en Gironde et plus rarement, atteindre 60 à 70 m comme dans certaines exploitations de craie dans les Hauts-de-Seine ou encore de gypse dans le Bassin parisien, en Provence ou dans le Jura.

Les méthodes d'exploitation et les géométries de découpage sont très diversifiées. Elles dépendent des conditions topographiques et géologiques du site, ainsi que des propriétés de résistance de la roche. Ces conditions permettent d'exploiter le sous-sol jusqu'à un certain taux de vide, appelé « taux d'exploitation » ou « taux de défruitement ». Ce taux est généralement compris entre 60 et 80 % avec des valeurs plus exceptionnelles de 90 à 95 %, voire de près de 100 % dans les exploitations par hagues et bourrages⁴.

La hauteur exploitée, comme la largeur des galeries ou des chambres, est très variable et dépend de la résistance du matériau (qui conditionne notamment la tenue des piliers), de la qualité du toit de la cavité et des terrains de recouvrement. La hauteur des vides, généralement de l'ordre de 2 à 3 m, peut atteindre 15 à 20 m dans les anciennes carrières de gypse de l'ouest du bassin de Paris (Dejean, 1981) ; la largeur des galeries, est généralement comprise entre 3 et 15 m.

La géométrie de ces exploitations n'est devenue régulière qu'à partir de la fin du XIX^{ème} siècle avec la mécanisation. Avant cette date, la plupart des travaux d'extraction étaient réalisés de manière désordonnée, en fonction de la qualité du gisement ou de la contrainte imposée par les droits de « fortage » (autorisation d'exploiter ou possession des terrains de surface). La typologie des carrières souterraines repose sur la diversité des méthodes d'exploitation (Moiriat, 2001), à savoir par :

- galeries ;
- chambres et piliers abandonnés,
- hagues et bourrages,
- foudroyage ou affaissement dirigé,
- puits et chambres de type « catiches ou bouteilles ».

Ce rapport traite exclusivement de la méthode d'exploitation la plus fréquemment utilisée à savoir par chambres et piliers abandonnés. Elle se caractérise par une répartition plus ou moins bien ordonnée des chambres et par des sections variables de piliers laissés en place pour assurer une stabilité suffisante de l'exploitation. La forme et l'alignement des piliers sont d'autant plus réguliers que les exploitations sont récentes. Les piliers réguliers sont souvent de section carrée et répartis de façon orthogonale. Ils sont parfois décalés en quinconce pour assurer une meilleure stabilité du toit en présence de fractures. Le découpage du gisement laisse le plus souvent des galeries de section carrée, comme dans les exploitations de calcaire grossier, mais aussi trapézoïdales, comme dans les exploitations de gypse de la région parisienne. Ce mode d'exploitation a souvent été pratiqué sur plusieurs niveaux.

1.2 Les types de roches exploitées en France

Comme vu précédemment, les anciennes exploitations souterraines sont le plus souvent d'anciennes carrières de craie, de calcaire ou de gypse. Notons cependant que d'autres matériaux ont pu être exploités mais ne sont pas pris en compte dans ce document qui ne traite que des roches sensibles à l'eau (cf. chapitre 2.2).

La craie se définit comme une roche calcaire (composée de carbonate de calcium CaCO_3 ou calcite), de type biomicrite (bio pour débris fossiles, micrite pour boue calcaire), de texture mudstone (fine) à packstone (grossière), poreuse (30 à 40 %), et à grains généralement très fins. La craie ne montre pas de stratification nette, sauf lorsque cette dernière est soulignée par des nodules de silex. Elle est le plus souvent pure, avec plus de 95 % de CaCO_3 , mais elle peut contenir d'autres minéraux (argile, silice...). C'est un matériau sensible à la dissolution avec une solubilité de l'ordre de 10 à 20 mg/l.

⁴ Mur en pierres sèches retenant les remblais

Le gypse est un sulfate de calcium hydraté de formule $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. C'est le sulfate minéral le plus courant, de couleur habituellement blanche ou incolore mais qui peut également avoir d'autres nuances de couleur comme le gris, le rouge ou le jaune. C'est un matériau très sensible à la dissolution avec une solubilité comprise entre 2150 à 2500 mg/l.

Le calcaire est également formé de carbonate de calcium qui peut avoir une origine organique prédominante (calcaires à foraminifères, calcaires coquilliers) ou éventuellement chimique (calcaire oolithique, pisolitique, lithographique...). Le calcaire pur n'est formé que de cristaux de calcite, mais il peut souvent contenir des impuretés (argile, sable...). Par définition, on parle de calcaire pour une roche sédimentaire contenant plus de 50 % de carbonate de calcium sous forme de calcite.

1.3 Le diagnostic de stabilité

L'évaluation de la stabilité des cavités souterraines est basée prioritairement, lorsque celles-ci sont accessibles, sur la qualification de leur état géotechnique, qui se traduit par un examen visuel détaillé des indices de dégradation et d'évolution. Lorsqu'elle nécessite un diagnostic plus approfondi ou lorsque la cavité n'est plus accessible, l'étude de stabilité se traduit par l'estimation du coefficient de sécurité considérant chacun des mécanismes de rupture redoutés.

Cette évaluation tient compte, principalement, des caractéristiques géométriques et géomécaniques de la carrière et de son environnement. Ainsi les critères tels que le taux de défrètement de la zone exploitée, la hauteur du recouvrement, la hauteur et la largeur des galeries, l'élanement des piliers (rapport entre la hauteur et la largeur du pilier), l'épaisseur du premier banc au toit, la résistance du matériau exploité et des terrains encaissants sont utilisés.

Ainsi le diagnostic de stabilité d'une carrière souterraine repose sur une évaluation des contraintes et des déformations dans l'ouvrage, par exemple au toit ou dans les piliers, et sur une comparaison de ces valeurs avec celles considérées comme admissibles (Tritsch et *al.*, 2002).

En pratique, ce diagnostic se heurte à plusieurs difficultés :

- les caractéristiques mécaniques de résistance sont souvent des valeurs issues des essais de laboratoire. Or plusieurs auteurs montrent que ces valeurs ne sont pas représentatives de la résistance in situ (dispersion des résultats, effet du temps, effet d'échelle) ;
- la répartition des contraintes dans le massif excavé est difficile à estimer : géométrie tridimensionnelle, rôle des discontinuités, hétérogénéité de la géométrie, etc.

Aussi, pour être crédible et autoriser une prévision objective, il est nécessaire :

- de réaliser un grand nombre de mesures pour avoir une bonne connaissance de la répartition des sollicitations ;
- choisir une valeur représentative de la résistance du matériau en s'appuyant sur les retours d'expérience.

D'un point de vue théorique, la quantification des contraintes comporte une analyse globale des efforts qui peut être résolue analytiquement ou numériquement.

1.3.1 Les modèles analytiques

Dans le cas d'une exploitation de type tabulaire (ou en plateure) signifiant que les couches exploitées ont un pendage très faible, on fait l'hypothèse que les piliers sont sollicités principalement dans le sens vertical et en compression. L'évaluation de la stabilité locale de chaque pilier est estimée par une approche analytique qui consiste à calculer un coefficient de sécurité (ou facteur de sécurité).

$$F_s = \frac{\text{résistance du matériau}}{\text{sollicitation du pilier}}$$

Le principe est de comparer la charge du pilier à la contrainte verticale par rapport à la résistance du matériau exploité. Ainsi des piliers sont considérés stables si la charge appliquée, liée au poids des terrains σ_v et au taux de défrètement τ , est inférieure à la résistance du pilier. Classiquement on détermine la charge σ_p exercée sur le pilier à l'aide de la méthode de l'aire tributaire, dont le principe est d'admettre que chaque pilier reprend individuellement les contraintes générées par les terrains situés au-dessus de la partie « tributaire » qui entoure le pilier (Figure 2) :

$$\sigma_p = \frac{\sigma_v}{1 - \tau}$$

où σ_v est égal au poids du recouvrement des terrains :

$$\sigma_v = \rho g H$$

avec ρ la masse volumique des terrains de recouvrement, H leur épaisseur et g l'accélération de la gravité.

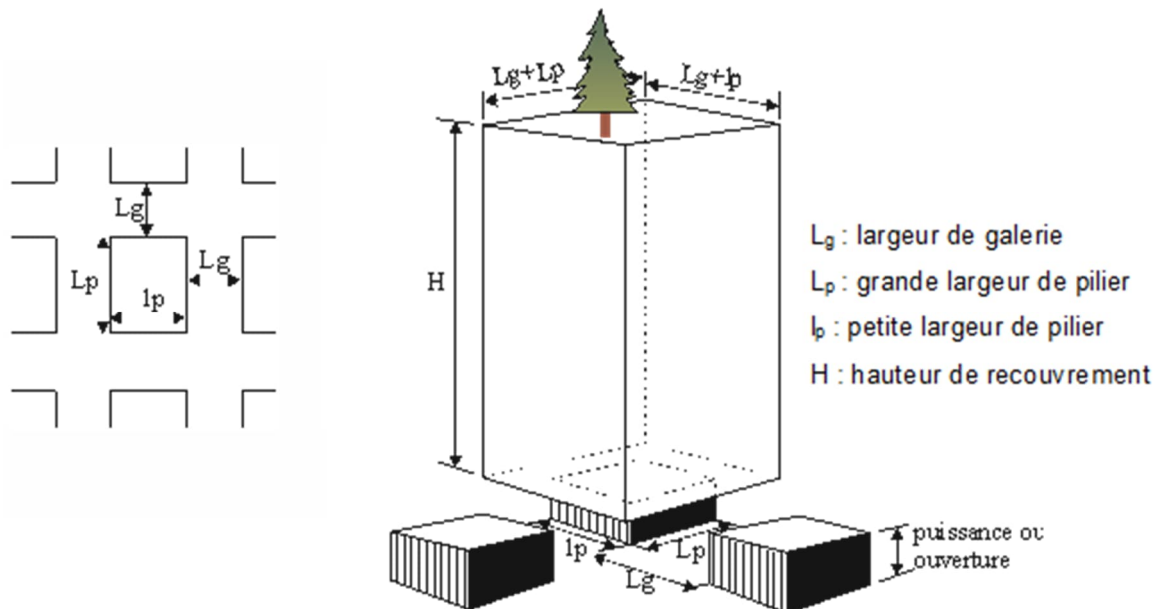


Figure 2 : Calcul de contraintes verticales moyennes par la méthode analytique de l'aire tributaire

La contrainte calculée est une contrainte verticale moyenne. Comparée à la résistance ultime à la compression du pilier (R_u), elle permet de calculer ainsi le facteur de sécurité (F_s).

Cette méthode est utilisée sous certaines conditions géométriques et géomécaniques. Elle ne tient pas compte du comportement des matériaux. Elle n'est pas applicable lorsqu'il s'agit d'estimer avec précision la contrainte d'un seul pilier ou d'un nombre limité de piliers, de piliers situés en bordure de carrière ou de piliers fracturés ou endommagés. L'intérêt de ce modèle est qu'il est facile à mettre en œuvre et qu'il ne nécessite que la connaissance de la résistance à la compression des piliers pour établir un diagnostic de leur stabilité. Néanmoins, on voit que des paramètres essentiels, comme les dimensions de l'exploitation ou des piliers (notamment leur hauteur) ainsi que leurs positions respectives par rapport aux bordures, ne sont pas pris en compte.

Des développements supplémentaires ont été réalisés afin d'améliorer la méthode de l'aire tributaire et l'estimation de la résistance du pilier en prenant en compte sa géométrie (largeur et hauteur). Des approches probabilistes ont également été développées afin de prendre en compte la distribution spatiale des caractéristiques des terrains et la géométrie de la carrière. Ces développements seront détaillés dans la suite de ce rapport.

1.3.2 Les modèles numériques

Les méthodes numériques sont depuis longtemps utilisées pour étudier, dimensionner et comprendre le comportements des ouvrages, notamment souterrains, grâce à la puissance de calcul des ordinateurs et à des codes de plus en plus performants. Il existe plusieurs méthodes de modélisations numériques : les méthodes des éléments finis, des différences finies et des éléments distincts. Les calculs numériques peuvent être réalisés en deux dimensions ou en trois dimensions. Ils permettent de calculer les contraintes et les déformations en tout point du modèle représentant la carrière. Grâce aux calculs on peut aussi estimer l'état de stabilité d'un ouvrage en calculant un coefficient de sécurité local. Avec la modélisation numérique, le mécanisme d'effondrement peut être analysé en prenant en compte à la fois les facteurs de prédisposition et les facteurs aggravants.

La réalisation du modèle numérique d'une carrière souterraine passe par la prise en compte d'un modèle géométrique qui peut être obtenu à partir de relevés *in situ* ou déduits à partir de plans détaillés.

Elle nécessite également de connaître la localisation des données géologiques (sondage et coupe géologique de terrain) et géomécaniques à partir d'essais réalisés sur les matériaux concernés et pris en compte dans le modèle.

À partir d'un certain niveau de complexité géométrique (changement fréquent de pente, toits non plans, grand nombre de piliers, puissance exploitée variable, galeries non linéaires ou piliers non rectangulaires), l'acquisition de la géométrie par scanner laser terrestres ou monté sur drone peut être envisagée.

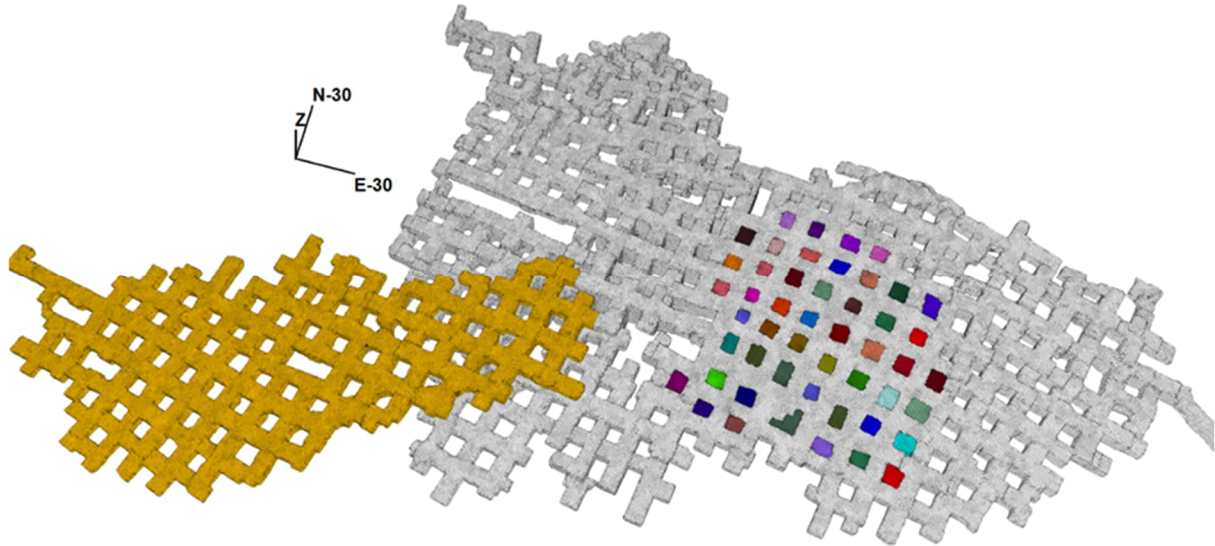


Figure 3. Modélisation 3D de la zone effondrée et des galeries des niveaux inférieur et supérieur par la méthode des différences finies de l'effondrement de la carrière souterraine de Naujan-et-Postiac (Gironde, Renaud, 2023). Les piliers de la zone effondrée sont en couleur.

L'un des résultats de la modélisation numérique est l'identification des zones plastifiées (Figure 3). Par opposition à l'élasticité, cet état correspond à des déformations irréversibles subies par un objet (par extension : une maille du modèle numérique). Dans le modèle numérique, l'état de contrainte est calculé et comparé à un critère de plasticité, ce qui permet de savoir si la zone correspondante est entrée en plastification ou non. Sur la Figure 3, les piliers effondrés apparaissent en couleur. La distribution des valeurs du coefficient de sécurité F_s dans les piliers (Figure 4) ainsi que l'analyse visuelle de la distribution de la plasticité permettent de conclure sur la stabilité des piliers analysés. Une étape importante de la modélisation numérique est la validation du résultat par rapport aux observations et aux mesures de contraintes ou de déformations disponibles.

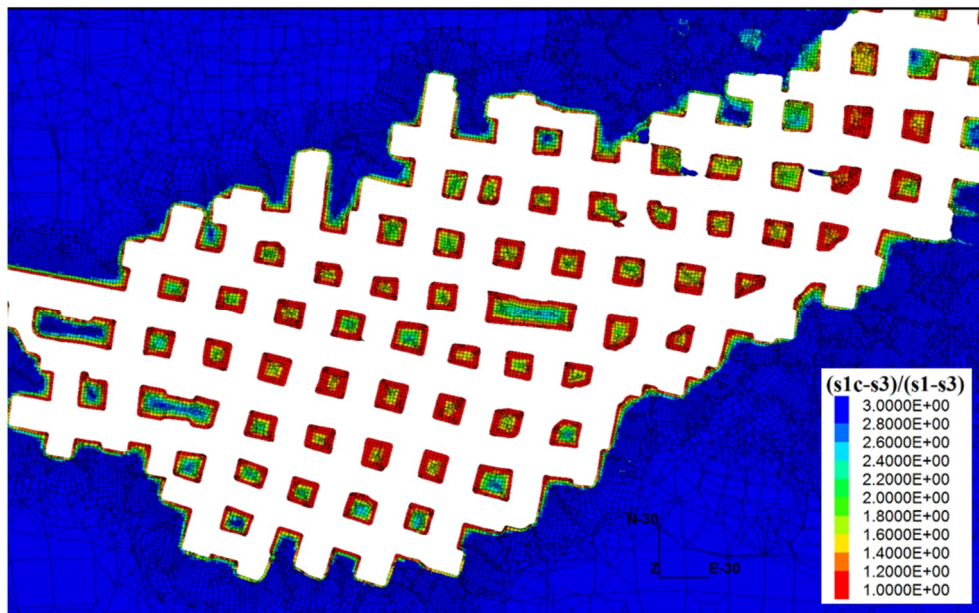


Figure 4. Visualisation du coefficient de sécurité à partir des contraintes principales calculées numériquement (Renaud, 2023) – plus le coefficient est proche de 1 (rouge) plus la zone est instable.

Notons qu'avec la méthode éléments distincts il est possible de modéliser la fracturation et de prendre en compte les failles. Ces discontinuités peuvent en effet modifier la distribution des contraintes dans les terrains.

1.4 Synthèse

Dans ce chapitre un état des lieux succinct des connaissances sur les carrières souterraines abandonnées a été présenté. Il met en évidence que la géométrie et la nature des matériaux exploités sont des facteurs importants à prendre en compte dans les diagnostics de stabilité de ces ouvrages. Ainsi on a vu que la quantification du degré de stabilité d'un vide souterrain, par exemple sous la forme d'un coefficient de sécurité, ne peut être qu'approchée, compte tenu de la complexité du problème (Bonvallet et Chambon, 1980 ; Tritsch et al., 2014) et car cette formulation peut négliger la prise en compte de certains facteurs de prédisposition et de facteurs aggravants tels que le temps et l'eau, comme cela sera vu dans la suite du document.

Contrairement à la modélisation analytique, facile à mettre en œuvre mais très empirique, la modélisation numérique peut permettre de mieux comprendre les différents mécanismes de rupture et leurs conditions d'apparition. Néanmoins elle nécessite un état des connaissances le plus précis possible de l'ouvrage et de bien comprendre et de bien maîtriser les phénomènes pouvant favoriser les instabilités qui sont souvent dépendantes de la situation de l'ouvrage (géologique, géographique, voire hydroclimatique). Dans la suite de ce rapport, sont présentés les résultats de travaux en cours à l'Ineris qui ont vocation à terme de dresser une liste la plus exhaustive possible des paramètres en jeu dans le processus d'instabilité de ces carrières souterraines abandonnées.

2 L'eau : facteur aggravant ?

2.1 Le rôle de l'eau dans le vieillissement des ouvrages

Les roches subissent des modifications et dégradations dans le temps sous la combinaison de plusieurs processus : physiques, mécaniques, chimiques et biologiques.

Le terme « vieillissement » exprime l'ensemble des modifications et transformations minéralogiques, et des dégradations mécaniques survenues sur les matériaux en fonction du temps. Le vieillissement des roches est donc le résultat de la combinaison de causes multiples qui engendrent à long terme plusieurs transformations, altérations et dégradations. Ces causes peuvent être classées en deux catégories : les causes internes dépendant de la structure du matériau, de sa composition chimique ou minéralogique et de ses propriétés physiques, et les causes externes traduisant les effets multiples de l'environnement et du climat.

L'eau joue un rôle fondamental dans toutes les réactions chimiques. La composition minéralogique des roches, qui joue sur leur solubilité, détermine la nature des actions chimiques produites. La présence de fractures et de dégradations facilite l'action de ces réactions chimiques. Selon Loughnan (1969), le vieillissement chimique est le résultat de trois processus qui peuvent intervenir simultanément :

1. la rupture de structure et la libération des éléments constitutants, comme les ions ou les molécules ;
2. la mise en solution et le transport d'une partie de ces éléments ;
3. la réaction de la roche altérée avec les composants de l'atmosphère, puis formation de nouveaux minéraux qui peuvent alors être en équilibre stable avec l'environnement.

Le vieillissement chimique est donc le résultat d'une série de réactions de surface entre la roche, l'atmosphère et l'eau. Toutes ces réactions sont liées aux variations de la température ambiante et du pH de l'eau, et sont donc dépendantes des apports d'eau fraîche au système.

Du fait de la diversité de leur structure minéralogique, les roches présentent une sensibilité différente face aux différents processus de vieillissement.

Tableau 3. Hiérarchisation de la sensibilité de différentes roches aux processus de vieillissement d'après Sorgi et Auvray (2015)

Légende : +++ = très sensible, ++ = moyennement sensible, + = peu sensible, - = non sensible

	Processus Physiques			Processus Chimiques		Processus Biologiques
	Processus Thermiques	Processus Hydriques	Processus Mécaniques	Cristallisation/Dissolution	Oxydation	
Gypse	++	+++	+++	+++	++	++
Craie	+	+++	+++	+++	++	+++
Calcaire	+	+++	++	+++	++	+++
Grès	+	+++	+++	++	++	++
Marne	+	+++	+++	+	+++	++
Argiles	+	+++	++	-	+++	++
Charbon	+++	++	+++	-	+	++
Gneiss	+++	+	++	-	+	-
Granite	+++	+	++	-	+	-
Basalte	+++	+	++	-	+	-
Marbre	++	+	++	-	+	-

Du Tableau 3, il ressort que les roches sédimentaires sont particulièrement sensibles aux processus hydriques (tant sur le plan physique que chimique) notamment dans le cas où la roche présente un réseau interconnecté de vides (karst, fissures). Dans ce cas, les agents du vieillissement (en particulier l'eau) pourront plus facilement atteindre des parties profondes de la roche, entraînant des dégradations importantes. La faible sensibilité des roches sédimentaires au processus thermique est expliquée par leur faible conductivité thermique, contrairement aux roches volcaniques et métamorphiques. Celles-ci présentent une texture minéralogique très stable, caractérisée par une infime microporosité. Ainsi, seuls les processus hydriques impliquant un effet mécanique sur la macroporosité produisent des réelles conséquences sur leur vieillissement.

2.2 Impact des variations hydrologiques et hydrogéologiques

Au-delà de l'œuvre du temps (vieillessement), les variations hydrologiques et hydrogéologiques peuvent jouer un rôle déterminant dans la dégradation des carrières abandonnées. Cette dégradation affecte aussi bien les piliers que les terrains de recouvrement. La plupart des exploitations ont été conduites hors nappe pour des raisons techniques et économiques (facilité d'accès, éviter le pompage permanent...). Néanmoins, des inondations des points les plus bas sont fréquemment observées en période de hautes eaux. La saturation des roches sensibles à l'eau, par immersion ou remontée capillaire dans les piliers, provoque une altération de leurs propriétés mécaniques : plus de 70 % de perte de résistance à la compression simple par rapport à l'état sec pour certains calcaires argileux ou craies (Ghoreychi, 1983 ; Lafrance 2016). L'action lubrifiante de l'eau sur les joints de stratification et plans de fissuration contribue également à l'abaissement du coefficient de frottement des discontinuités et à une moindre résistance du massif rocheux (Al Heib, 2023 ; Paquette 2014). Maury (1979) invoque, comme possible facteur déclenchant d'effondrements généralisés, les mécanismes de mise en charge hydraulique des terrains de couverture, par élévation de la charge hydrostatique à la suite d'une forte pluviométrie par exemple. Pour les exploitations développées sous le niveau piézométrique, l'effet du remplissage des excavations avec la remontée des eaux est complexe. Il peut s'avérer négatif, avec :

- la diminution des propriétés mécaniques liées à l'hydratation des roches sensibles ;
- la chute de la résistance au cisaillement des discontinuités immergées ;
- le rôle de la pression interstitielle sur le comportement des roches tendres.

Il peut cependant s'avérer positif avec le confinement des piliers par la pression hydrostatique et le déjaugage des terrains surincombants (poussée d'Archimède).

Les circulations d'eau peuvent par ailleurs provoquer des phénomènes de karstification d'autant plus importants que les roches sont plus solubles (gypse, anhydrite).

On peut donc supposer que l'eau peut jouer un rôle négatif dans la stabilité des carrières souterraines abandonnées lorsque celles-ci, creusées hors nappe, ne sont pas ennoyées en permanence.

2.3 Et le changement climatique ?

2.3.1 Synthèse des impacts attendus

Depuis 1988, le Groupe intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) évalue l'état des connaissances sur l'évolution du climat mondial, ses impacts et les moyens de les atténuer et de s'y adapter (<https://www.ecologie.gouv.fr/changement-climatique-causes-effets-et-enjeux>).

Dans son 6^{ème} rapport (IPCC, 2023) sorti en mars 2023, le GIEC confirme que le changement climatique est déjà engagé. Il atteste d'une augmentation des risques (vagues de chaleur, précipitations extrêmes, sécheresses, fonte de la cryosphère, changement du comportement de nombreuses espèces...) pour un même niveau de réchauffement par rapport au 5^e rapport d'évaluation de 2014. Le GIEC rappelle que les émissions de gaz à effet de serre dues aux activités humaines ont réchauffé le climat à un rythme sans précédent : la température de la surface du globe s'est élevée de 1,1°C par rapport à la période pré-industrielle et, quels que soient les scénarios d'émission, le réchauffement de la planète devrait atteindre 1,5°C dès le début des années 2030 et 4°C en France à la fin du siècle. Le GIEC évalue également comment le changement climatique se traduira à moyen et long terme. Il prévoit entre autre des phénomènes climatiques aggravés : l'évolution du climat modifie la fréquence, l'intensité, la répartition géographique et la durée des événements météorologiques extrêmes (tempêtes, inondations, sécheresses) et l'acidification des eaux : l'augmentation de la teneur en CO₂ de l'atmosphère entraîne une plus forte concentration dans l'océan ; en conséquence, l'eau de mer s'acidifie car au contact de l'eau, le CO₂ se transforme en acide carbonique ; de 1751 à 2004, le pH moyen des eaux superficielles des océans est passé de 8,25 à 8,14 ; cela représente un risque majeur pour les récifs coralliens et certains types de plancton, menaçant l'équilibre de nombreux écosystèmes.

Les impacts du changement climatique peuvent être très différents d'une région à une autre, mais ils concerneront toute la planète.

2.3.2 Impacts sur les cavités souterraines

Comme évoqué précédemment, l'eau peut être un facteur aggravant dans l'instabilité des carrières souterraines abandonnées (Didier et al., 2010). Les périodes de sécheresse, souvent suivies de précipitations intenses et brutales, sont des contextes particulièrement favorables mais les périodes

d'inondation estivale pourraient aussi représenter des conditions propices au déclenchement d'effondrement, comme cela s'est produit dans le nord de la France en juin 2016 (Noury et al., 2018). Vincent et Mathon (1999) citent plusieurs effondrements qui se sont produits en mars 1897 à St-Emilion (Gironde), après un hiver fortement pluvieux. Léotot (2016) signale le rôle des remontées de nappe ou des infiltrations en voûte autour de Châtelleraut (Vienne) dans plusieurs effondrements. Noury et al. (2019) ont analysé l'impact des périodes exceptionnellement pluvieuses de 1994-1995 et de 2000-2001 sur les débousses de puits de « marnières » en Normandie. En avril 2015, en Belgique, la ruine quasi-instantanée de plus de 130 piliers de la carrière souterraine de craie de la Malogne a conduit à un effondrement généralisé sur une superficie d'un peu plus d'un hectare, générant un affaissement jusqu'à 3 m de profondeur en surface (Georgieva et al., 2020).

La question qui se pose est donc de connaître l'impact de cette variabilité climatique attendue sur les nappes phréatiques susceptible d'envoyer certaines carrières souterraines. Pour Didier et al. (2010), il se traduira différemment selon leur étendue (inertie), leur relation avec la surface (nappes libres ou captives) et le type de roche-réservoir qui les héberge (milieu poreux à circulation lente, milieu karstique ou fissuré à circulation rapide). La majorité des modèles climatiques prévoit globalement une baisse de la piézométrie moyenne annuelle, mais l'inconnue réside dans l'importance des fluctuations saisonnières, notamment en période hivernale. En effet sur le plan quantitatif, les nappes phréatiques sont particulièrement sensibles aux conditions météorologiques. Essentiellement alimentées par les précipitations, elles devraient subir une remontée importante de leur niveau piézométrique en période de forte pluie et, à l'inverse, se tarir fortement en période de sécheresse sous l'effet du déficit de précipitations. Celui-ci pourrait en outre être aggravé par des prélèvements anthropiques de plus en plus intenses dans les nappes, notamment pour l'irrigation lorsque les ressources en eau de surface seront tarées. Le changement climatique attendu risque donc de se répercuter sous la forme d'une amplification du battements des nappes phréatiques. Gombert et Cherkaoui (2013) prévoient déjà en 2013 que dans le cas des carrières creusées à « fleur de nappe », cela pourrait se traduire par des fluctuations plus fortes du niveau d'envoyage ou par envoies de plus en plus fréquents. Cette fluctuation pourrait accentuer la dégradation de la roche et l'instabilité de la carrière (cf paragraphe 2.1).

Enfin l'augmentation de la température de l'atmosphère, et donc de celle de l'eau d'infiltration, peut accroître son potentiel de dissolution des roches solubles comme le gypse. En ce qui concerne les roches carbonatées (calcaire, craie), c'est plutôt l'augmentation de la concentration en CO_2 dissous dans l'eau qui jouera ce rôle, du fait de l'augmentation consécutive de l'agressivité de l'eau liée à la perturbation de son équilibre calco-carbonique⁵. Cela risque d'être amplifié par l'augmentation de production de CO_2 pédogénétique en raison des températures plus élevées et d'un degré d'humidité potentiellement plus élevé, CO_2 qui serait ensuite dissous dans les eaux d'infiltration (Gombert, 1997). Toutefois, contrairement au gypse, la cinétique de ces dissolutions est plus lente en milieu carbonaté (de l'ordre du siècle voire plus).

2.4 Synthèse

Les roches sédimentaires sont particulièrement sensibles aux processus hydriques. Même si l'eau peut avoir un effet bénéfique sur la stabilité des carrières souterraines abandonnées (confinement des piliers par la pression hydrostatique notamment), les variations répétées des apports en eau peuvent considérablement dégrader les propriétés mécaniques de la roche.

Peu d'études ont été menées pour démontrer et quantifier l'impact de l'eau sur les cavités. Aussi, l'Ineris travaille depuis plusieurs années afin d'inventorier l'ensemble des facteurs susceptibles pouvant favoriser l'instabilité des carrières souterraines abandonnées dans l'objectif d'analyser leurs impacts. Ces travaux portent aussi bien sur facteurs de prédisposition (liés principalement aux contextes géologiques et géomécaniques) que sur les facteurs aggravants ou déclenchants (principalement le rôle de l'eau). Les résultats de ces premiers travaux sont synthétisés dans les chapitres suivants.

⁵ État d'équilibre chimique entre les concentrations en CO_2 , HCO_3^- et CO_3^{2-} dissous, en présence d'un excès de CaCO_3 .

PARTIE 2 : INFLUENCE DES PARAMETRES GEOGRAPHIQUES ET GEOMORPHOLOGIQUES

Le changement climatique en cours se traduit par une fréquence accrue d'évènements climatiques exceptionnels (sécheresses, précipitations ou inondations) jointe à une augmentation globale des températures. Ceci peut avoir un impact sur le battement piézométrique des nappes et des cours d'eau, le niveau des cours d'eau, le volume et la chimie des eaux d'infiltrations, etc. Cette situation est susceptible d'aggraver le risque d'instabilité des carrières souterraines, notamment si elles possèdent des facteurs de prédisposition (Didier et al., 2010 ; Thoraval et al., 2017). Aussi, l'Ineris s'est posé la question de savoir si la proximité d'un cours d'eau ou d'une vallée pouvait, par inondation, par débordement de cours d'eau ou par remontée de nappe, aggraver le processus d'effondrement d'une carrière souterraine. Cela a fait l'objet de plusieurs travaux présentés entre autres dans ce rapport (Didier et al., 2010 ; Gombert et Cherkaoui, 2011a ; Gombert et Cherkaoui, 2011b ; Gombert et al., 2013, 2018 ; Gourdier et al., 2017 ; Noury et al., 2018, 2020). La question autour du rôle de la position géomorphologique de l'ouvrage s'est également posée notamment si elle pouvait favoriser l'infiltration des eaux de précipitations et/ou leur circulation souterraine.

Cette partie présente les travaux réalisés afin d'étudier l'influence des paramètres géographiques (distance au cours d'eau) et géomorphologiques dans la stabilité des cavités souterraines abandonnées.

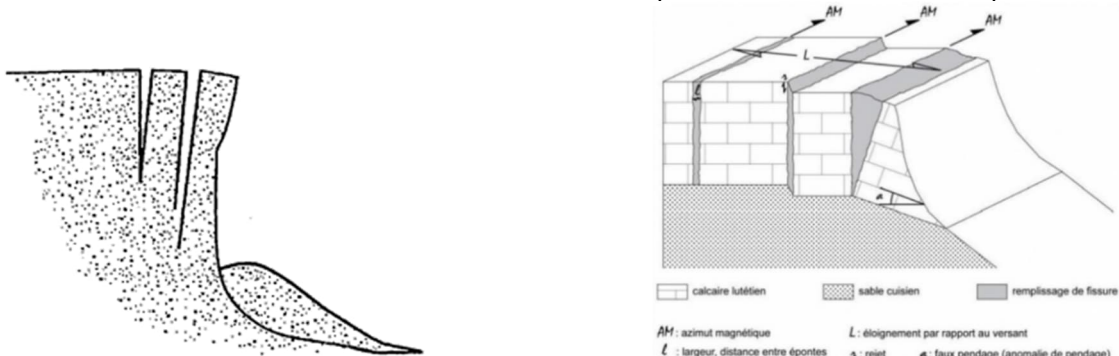
1 Les contextes géomorphologiques des carrières souterraines abandonnées en France et leur influence potentielle

Le contexte géomorphologique d'une carrière, ou de tout autre objet, correspond ici à sa localisation par rapport aux formes du relief (plateau, talus, vallée...) tant dans le plan vertical qu'horizontal. Le positionnement d'une cavité souterraine, par rapport à une vallée ou à la surface se traduit par la présence plus ou moins importante de fissures de décompression superficielle ou liées à la détente mécanique.

1.1 Mécanismes de décompression des terrains

1.1.1 Détente mécanique en bord de versant

L'influence de la présence d'une vallée sur la fracturation ou la fissuration d'un massif rocheux a été étudiée par de nombreux auteurs (Letourneur et Dayre, 1981 ; Nédellec et Cruchet, 2003 ; Moirat et al., 2005 ; Devos et al., 2012 ; Bollot et al., 2014 ; etc.). Le principal impact résulte de la détente mécanique des roches en bordure de versant qui induit une décompression du massif et crée des fissures subparallèles au versant (Figure 5). Toutefois, pour Letourneur et Dayre (1981), la décompression ne fait que rendre des fissures pré-existantes plus apparentes en les ouvrant : elle serait donc plus révélatrice de l'état antérieur de discontinuité du massif que créatrice de nouvelles ruptures.



a) Selon Nédellec et Cruchet (2003)

b) Selon Devos et al. (2012)

Figure 5. Fissures de détente mécanique d'un massif rocheux en bordure de vallée

La diminution de la densité de fissures de détente depuis le versant vers le centre du plateau témoigne de l'existence d'une fracturation de détente (Devos et al., 2012 ; Bollot et al., 2014). La Figure 6 montre que, dans des carrières souterraines de calcaire des Hauts-de-France et du Grand-est, les indices de

fracturation⁶ (If) atteignent jusqu'à 0,55 fissure/m dans les 30 à 50 premiers mètres d'éloignement au versant pour rejoindre un bruit de fond inférieur ou égal à 0,10 fissure/m à partir de 100-150 m.

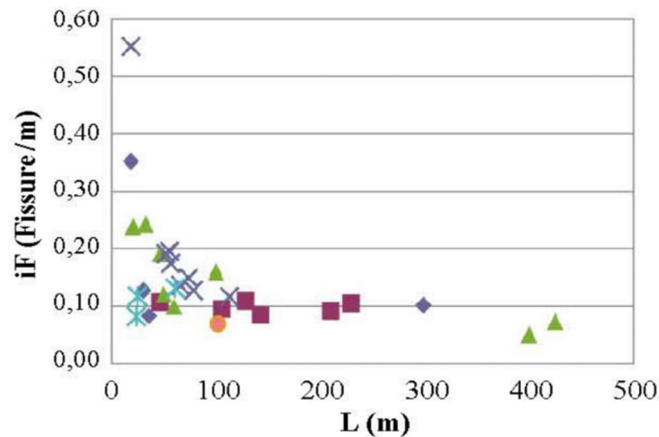


Figure 6. Évolution de l'indice de fracturation (If) des carrières souterraines de calcaire des Hauts-de-France et du Grand-Est en fonction de l'éloignement au versant L(m) (Devos et al., 2012)

Moirat et al. (2005) confirment cette tendance sur la base d'observations effectuées dans une carrière de craie creusée à flanc de coteau, qui mettent en évidence un ensemble de fractures résultant de l'adaptation du massif à la modification de son état de contrainte, consécutive à l'incision de la vallée (Figure 7). Les principales caractéristiques de cette « néo-fracturation » sont les suivantes : une extension horizontale supérieure à une centaine de mètres, des fractures plus abondantes à proximité du versant, et des mouvements d'amplitude centimétrique indiquant un déplacement des compartiments supérieurs du versant vers la vallée.

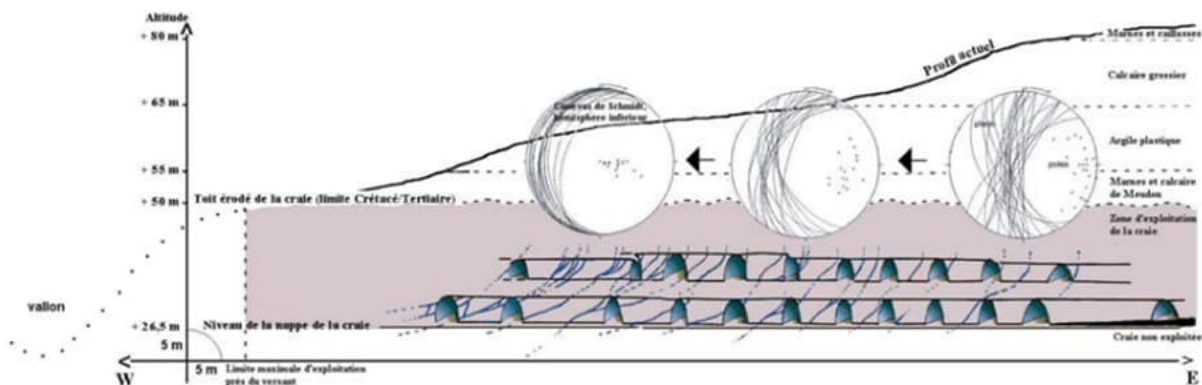


Figure 7. Coupe à travers une carrière de craie des Hauts-de-Seine montrant l'évolution de la fréquence et du pendage des fissures de détente mécanique liées à l'incision d'une vallée (d'après Moirat et al, 2005)

1.1.2 Décompression superficielle

Bollot et al. (2014) a constaté que c'est à l'approche du haut de versant que la densité de fissures est la plus élevée dans les cavités souterraines. Il faut donc considérer un autre mécanisme de décompression lié à la proximité de la surface, appelé "décompression superficielle". Il résulte d'une décharge et d'une minoration des contraintes lithostatiques, laquelle peut survenir en réponse à la modification du relief à la suite de l'érosion. Ainsi, l'ouverture d'une carrière dans un massif granitique a montré que celui-ci était découpé par un ensemble de fissures parallèles à la surface topographique, d'autant plus fréquentes et ouvertes que l'on se rapproche davantage de celle-ci (Letourneur et Dayre, 1981 ; Figure 8). L'ouverture des discontinuités induites par la décompression superficielle diminuerait de façon relativement régulière avec la profondeur, jusqu'à une zone limite qui va de quelques dizaines

⁶ L'indice de fracturation correspond au rapport du nombre de fissures Nf recoupées par un segment de droite perpendiculaire au versant à la longueur L de ce segment : $If = Nf / L$ (exprimé en nombre de fissures/m).

à plusieurs centaines de mètres, en fonction de multiples paramètres (nature de la roche, état de contrainte, type de recouvrement...).

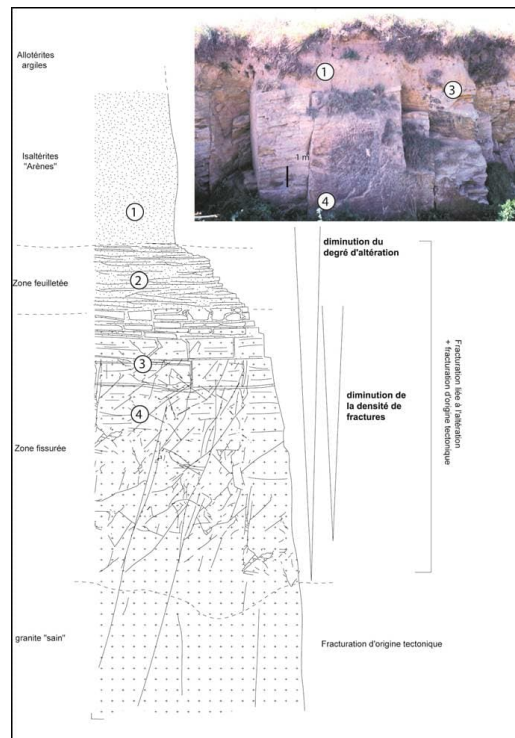


Figure 8. Exemple de fissures de décompression superficielle en milieu granitique
<https://sigesbre.brgm.fr/Les-alterites-du-socle.html>

1.2 Typologie de la géomorphologie des carrières souterraines en fonction de l'interaction avec les eaux de surface ou souterraines

Concernant les cavités souterraines, il existe quatre principales configurations géomorphologiques pouvant avoir des interactions différentes avec l'eau, à savoir (Figure 9) :

- le « bas de versant » (configuration ❶) qui correspond à des carrières souterraines dont l'altitude est proche de celle du cours d'eau et de sa nappe d'accompagnement ; il existe ici une épaisseur significative de recouvrement qui ne permet pas aux précipitations de s'infiltrer directement dans la cavité ; ces cavités sont potentiellement soumises à un risque d'infiltration d'eau *per ascensum*, c'est-à-dire d'inondation en cas de crue du cours d'eau ou d'envoyage par remontée du niveau piézométrique ; ce risque hydrique peut également entrer en synergie avec celui lié à la détente mécanique des terrains sur une certaine distance par rapport au versant (de l'ordre de 100 à 200 m) ;
- le « haut de versant » (configuration ❷) qui correspond aux carrières souterraines creusées peu profondément sous la surface d'un plateau mais situées à une altitude suffisante au-dessus d'un cours d'eau et de sa nappe d'accompagnement pour ne pas risquer d'être inondées ou envoyées ; du fait de la proximité du versant, la nappe phréatique du plateau est généralement drainée et ne risque pas de venir envoyer la cavité ; ces cavités sont potentiellement soumises à un risque d'infiltration d'eau *per descensum* à la suite d'un fort épisode pluvieux ; comme précédemment, ce risque hydrique peut entrer en synergie avec celui lié à la décompression des terrains sur une certaine distance par rapport au versant (détente mécanique) mais également à la surface du sol (décompression superficielle) ;
- le « plateau » qui correspond au même cas que précédemment mais hors d'emprise de la zone de détente mécanique liée à la proximité d'un versant (soit au-delà de 100 à 150 m en général) ; on peut en distinguer deux sous-types :
 - si tout ou partie de la carrière (par exemple, un niveau supérieur) a été creusé peu profondément, elle peut se trouver dans la zone de décompression superficielle où les fissures sont plus fréquentes et plus ouvertes ; cela peut faciliter l'infiltration d'eau de précipitations *per descensum* (configuration ❸) ;
 - si tout ou partie de la carrière (par exemple, un niveau inférieur) a été creusé jusqu'à proximité du niveau de la nappe phréatique du plateau, on ne peut négliger le risque

d'envoyage des points bas par remontée de nappe en période de hautes eaux piézométriques ou en cas de précipitations exceptionnelles ; ces cavités sont donc potentiellement soumises à un risque d'infiltration d'eau *per ascensum* (configuration ④).

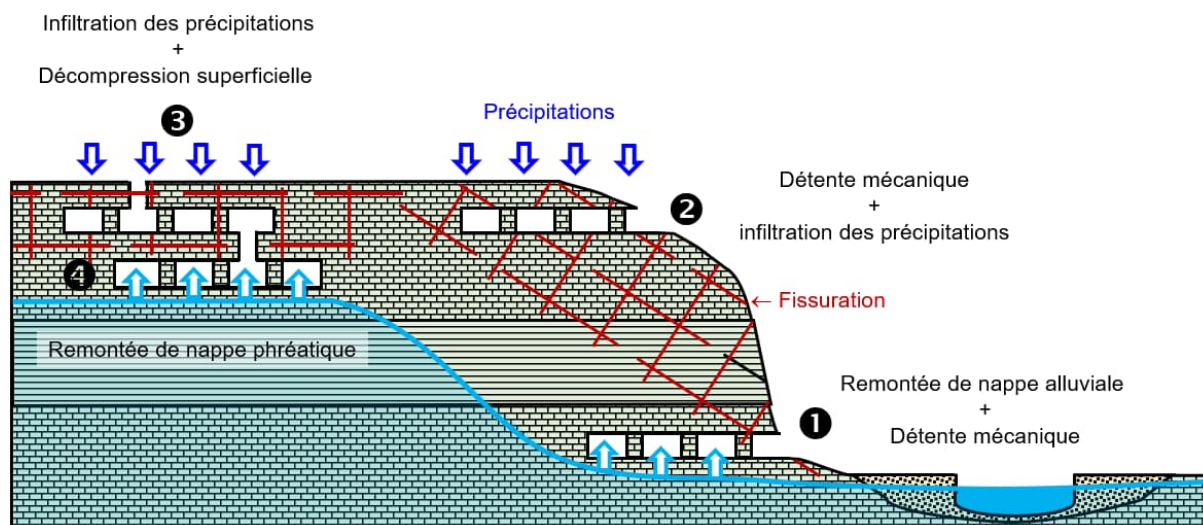


Figure 9. Principales configurations géomorphologiques de carrières souterraines et interactions possibles avec les eaux de surface et souterraines

En outre, à la confluence de deux cours d'eau, le plateau peut être découpé selon deux directions subperpendiculaires et former un éperon, qui sera soumis aux deux directions de détente mécanique imposées par chacune des vallées. On retrouve, sur la Figure 10, les quatre configurations-types précédentes ainsi que les deux nouvelles liées à des carrières situées sur ou à proximité d'un éperon, que ce soit en bas de versant (configuration ⑤) ou en haut de versant (configuration ⑥).

Note : ces deux configurations ressemblent aux configurations ① et ② mais avec un rôle probablement accru de la détente mécanique dû à la présence de deux vallées.

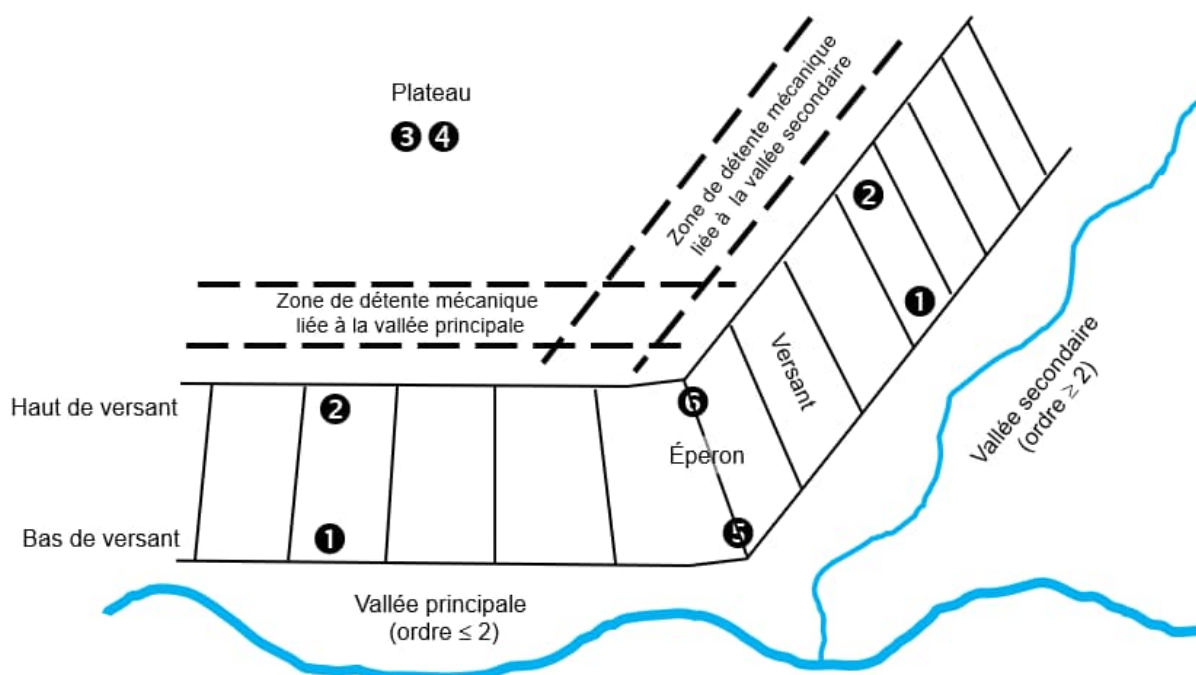


Figure 10. Bloc-diagramme des configurations types de carrières souterraines – la classification des cours d'eau (ordre 1, 2 et 3) est présentée au chapitre 2.

Enfin, la configuration en éperon peut évoluer en configuration géomorphologique de crête lorsque les deux versants de l'éperon forment un angle aigu, voire deviennent subparallèles (Figure 11). Dans ce cas, les zones de détente mécanique liées aux deux vallées deviennent subparallèles et la totalité de la crête est alors potentiellement soumise aux deux types de fracturation.

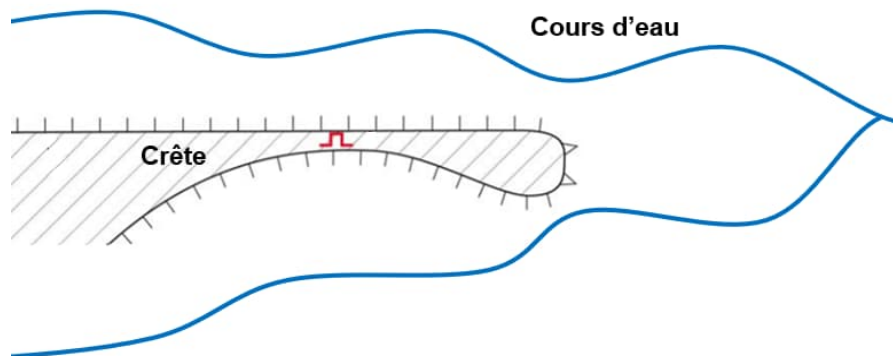


Figure 11. Configuration géomorphologique d'un plateau de type « crête » - vue de dessus - L'emplacement de la carrière est schématisé par le symbole rouge (d'après Devos et al., 2012)

1.3 Exemples de configurations géomorphologiques

1.3.1 Bas de versant

La configuration de bas de versant peut être illustrée par le cas des carrières de Château-Landon en Seine-et-Marne (Figure 12). Il s'agit d'exploitations de craie qui, après avoir commencé à ciel ouvert, se sont poursuivies en souterrain au milieu du 19^e siècle jusqu'au début du 20^e siècle (Conil et al., 2022). Cinq des six carrières souterraines creusées à la base du versant se sont effondrées à diverses périodes comprises entre avant 1878 et 1910, la dernière étant intacte à ce jour. Ces carrières se trouvent toutes à la base d'un versant à environ 40 m sous la surface du plateau et environ 5 m au-dessus des cours d'eau situés entre 100 et 170 m de distance (Fusain à Lorroy, Loing aux Grands Moulins).

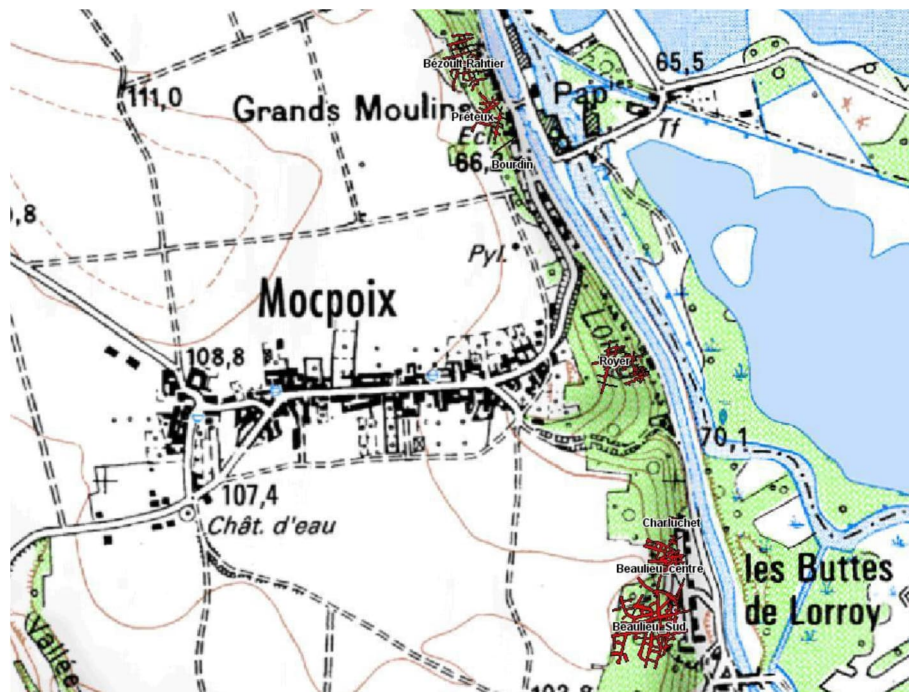
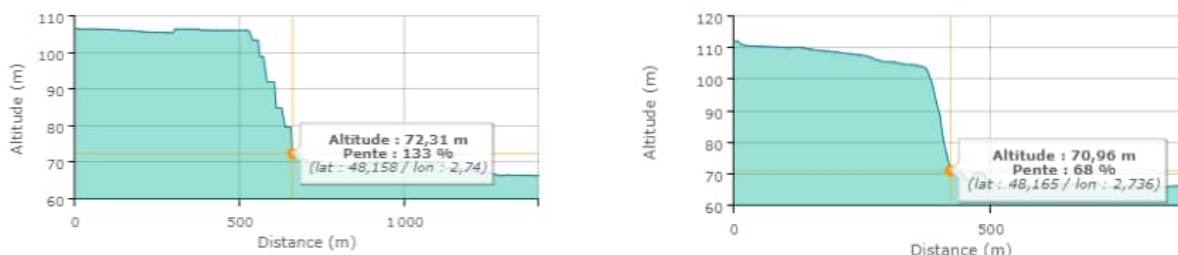


Figure 12. Localisation des carrières souterraines (traits rouges) effondrées des Buttes de Lorroy et des Grands Moulins à Château-Landon (Kréziak et Watelet, 2016)

Les profils topographiques passant par l'entrée de ces carrières montrent bien qu'on se trouve ici en bas de versant (Figure 13).



a) Profil Ouest-Est des Buttes de Lorroy

b) Profil SW-NE des Grands Moulins

Figure 13. Profils topographiques passant par les entrées des carrières souterraines effondrées de Château-Landon (points orange) (Source : Géoportail)

1.3.2 Haut de versant

La configuration de haut de versant est illustrée par le cas de la carrière souterraine de La Manière à Saint-Germain-du-Puch en Gironde (Figure 14). Il s'agit d'une exploitation de calcaire qui s'est terminée en 1960. Un effondrement généralisé de 5000 m² s'y est produit en 2011 (Thomaïdis et Peragallo, 2011).

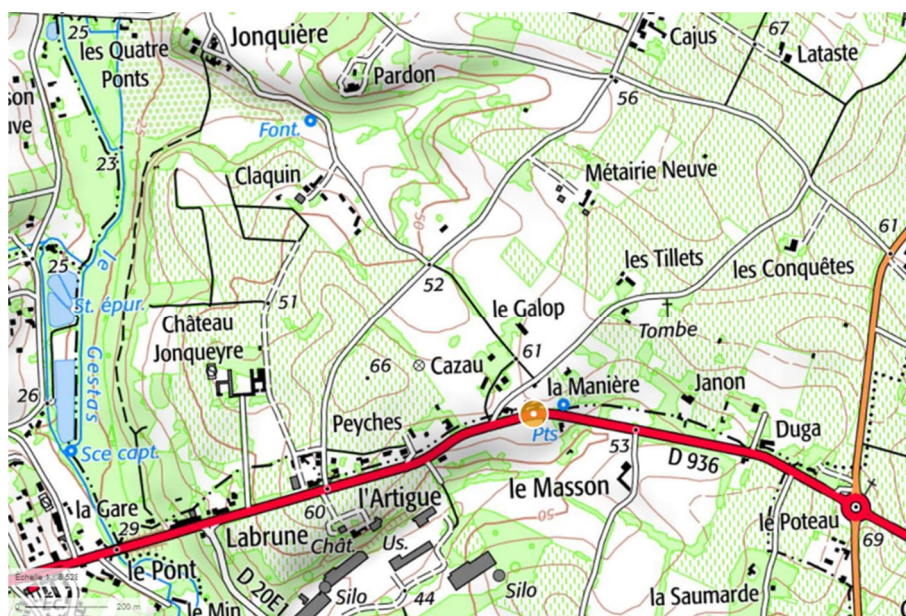


Figure 14. Localisation de la carrière souterraine de La Manière à Saint-Germain-du-Puch (point orange) (Source Géoportail)

Le profil topographique passant par cette carrière montre qu'elle se trouve en bordure d'un plateau, en haut de versant, à environ 13 m au-dessus du thalweg secondaire situé à 120 m au sud (Figure 15).



Figure 15. Profil topographique Nord-Sud passant par la carrière souterraine de La Manière à Saint-Germain-du-Puch (point orange) (Source : Géoportail)

1.3.3 Plateau

La configuration de plateau est illustrée par le cas de la carrière souterraine de Cruzilles et Indre-et-Loire (Figure 16). Il s'agit d'une exploitation de craie qui s'est déroulée de 1901 à 1992. Deux effondrements généralisés de plusieurs hectares chacun (Lucbereilh, 2015) se sont produits en 1990. On notera également l'occurrence d'un fontis en 2003.

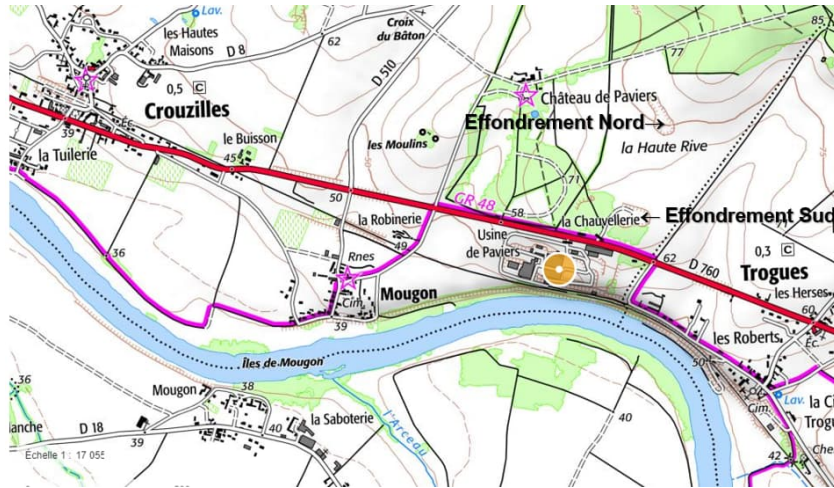
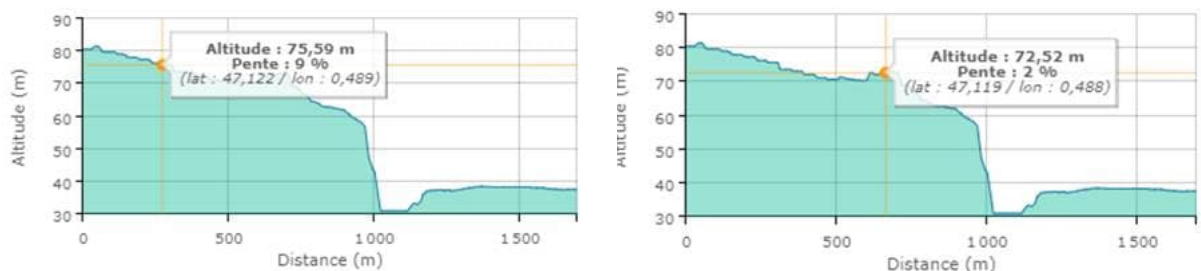


Figure 16. Localisation des deux effondrements généralisés de la carrière Paviers à Cruzilles (entrée sous le point orange) (Source Géoportail)

Les profils topographiques passant par ces deux effondrements généralisés montrent qu'ils se trouvent sur le plateau, à environ 40 m au-dessus de la Vienne. En outre, ils sont distants de 300 m à 720 m de cette rivière et sont donc théoriquement hors de la zone d'influence de la détente mécanique induite par le creusement de la vallée (Figure 17).



a) Profil NE-SW avec effondrement Nord Sud

b) Profil NE-SW avec effondrement

Figure 17. Profils topographiques passant par les zones effondrées de la carrière souterraine Paviers de Cruzilles (points orange) (Source : Géoportail)

1.3.4 Éperon

La configuration en éperon est illustrée par le cas de la carrière Méquelines, également appelée « caves Méclines », située sur la commune d'Azay-le-Rideau (Indre-et-Loire). Il s'agit d'une exploitation de craie tuffeau qui a débuté au 16^e siècle et s'est terminée au début du 20^e siècle, avec des galeries très larges et des piliers de faible section dont la hauteur a atteint 6 m (Delaunay, 1977). Des mouvements de terrain successifs s'y sont produits en 1862 (affaissement), 1879 (effondrement) et 1964 (deux effondrements dont un de 1500 m²). La carrière se trouve en bordure d'un éperon découpé au sud par l'Indre (à 530 m mais dont un bras mort passe à seulement 140 m) et à l'ouest par une vallée sèche située à 370 m (Figure 18). Par ailleurs, une amorce de vallée sèche se marque à 480 m à l'est, découpant ainsi sur trois cotés la face sud de l'éperon où se trouvent les entrées de la carrière. Le banc de tuffeau exploité se développe entre 30 et 40 m au-dessus de la vallée alluviale de l'Indre.

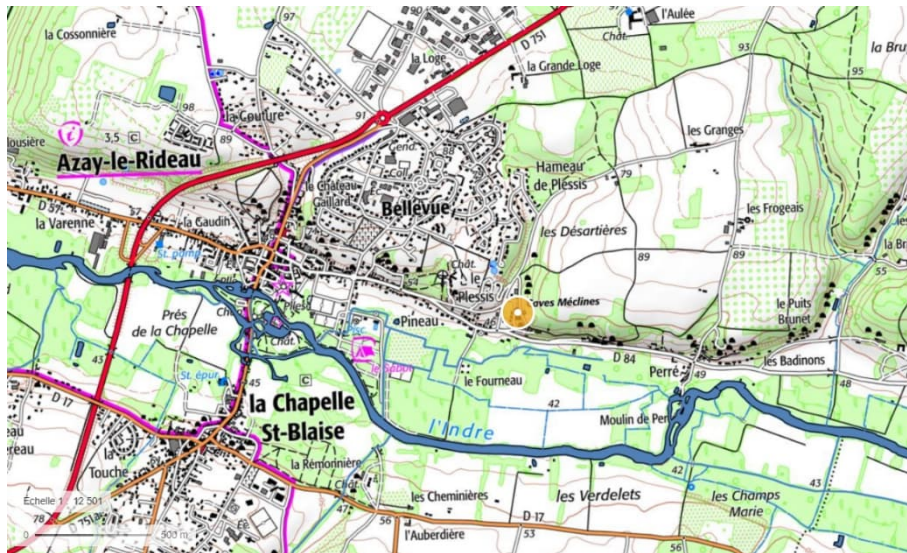
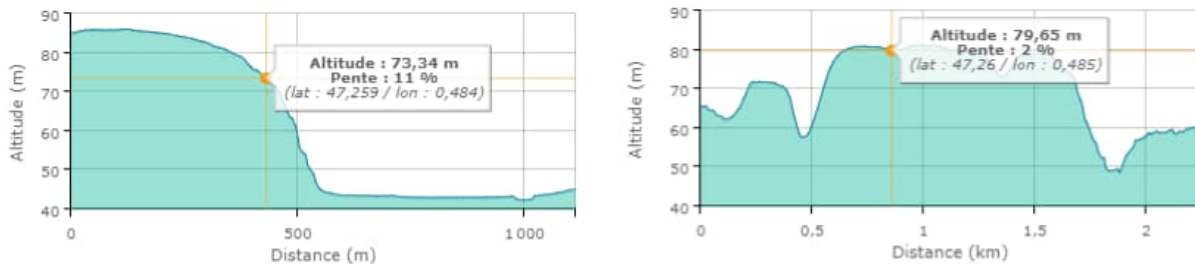


Figure 18. Localisation de la carrière Méquelines (point orange) à Azay le Rideau (Géoportail)

Les deux profils topographiques Nord-Sud et Est-Ouest passant par l'entrée principale de cette carrière matérialisent bien l'éperon et montrent qu'on se trouve ici en haut de versant (Figure 19).



a) Profil Nord-Sud

b) Profil Est-Ouest

Figure 19. Profils topographiques passant par les entrées de la carrière Méquelines à Azay-le-Rideau (points orange) (Source : Géoportail)

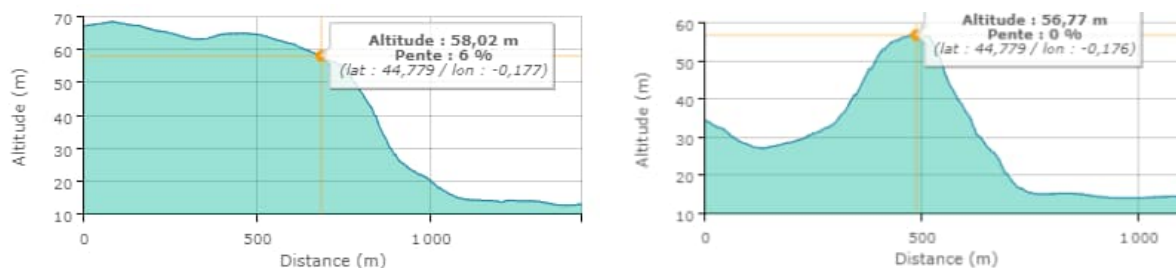
1.3.5 Crête

La configuration en crête correspond au cas de la carrière souterraine de calcaire de Bellegarde à Naujan-et-Postiac, en Gironde (Figure 20). La zone effondrée est bordée par deux vallées subparallèles qu'elle domine de 30 à 42 m.



Figure 20. Localisation de la carrière Bellegarde à Naujan-et-Postiac (point orange) (Géoportail)

Cette configuration se marque bien sur le profil topographique réalisé perpendiculairement à l'axe de la crête (Figure 21b).



a) Profil longitudinal SW-NE

b) Profil transversal NW-SE

Figure 21. Profils topographiques passant par l'effondrement de la carrière Bellegarde à Naujan-et-Postiac (points orange) (Source : Géoportail)

1.4 Synthèse

La prise en compte du contexte géomorphologique est importante, notamment pour mieux comprendre les circulations d'eau au sein des cavités souterraines (infiltrations d'eau météorique sur les plateaux, remontées de nappe dans les vallées...). Dans le cas de carrières souterraines situées non loin d'un versant, le mécanisme de détente mécanique est à l'origine d'une augmentation de la densité des fractures subverticales. Celles-ci sont en effet subparallèles au versant et peuvent avoir une ouverture centimétrique liée à l'appel au vide. Les valeurs citées à titre informatif font état d'une intensité de fracturation environ 5 fois plus forte jusqu'à 30 à 50 m de distance d'un versant par rapport à la zone où se retrouve le bruit de fond tectonique local (au-delà de 100 à 200 m de distance).

Les carrières souterraines peu profondes creusées sous un plateau sont également soumises à une augmentation de la densité de fissures subhorizontales. Cela résulte d'un mécanisme de décompression superficielle dû à la minoration des contraintes lithostatiques à l'approche de la surface. L'ordre de grandeur de la profondeur de cette zone d'influence varie de quelques dizaines à plusieurs centaines de mètres.

Enfin, dans les situations mixtes où une carrière souterraine se trouve en bordure d'un plateau, donc en haut d'un versant, il est probable que les influences de ces deux mécanismes de décompression se cumulent et que la densité de fracturation augmente. Ce phénomène pourrait même être exacerbé dans le cas de carrières creusées à la confluence de deux vallées (éperon ou crête) où peuvent coexister deux directions de fissurations parallèles à chacun des deux versants.

La localisation des carrières souterraines peut donc être classée, sur le plan géomorphologique en 6 principaux groupes reportés dans le Tableau 4.

Tableau 4. Synthèse des localisations géomorphologiques et de l'influence des phénomènes hydroclimatiques

Localisation	Haut de versant	Bas de versant
Plateau	Détente mécanique + Décompression superficielle + Infiltration d'eau de pluie (ex. : Saint-Germain-du-Puch)	Détente mécanique + Remontée de nappe (ex. : carrières Prêteux, Bourdin, Bézoult-Rathier à Château-Landon)
Éperon	Détente mécanique x 2* + Décompression superficielle + Infiltration d'eau de pluie (ex. : Azay-le-Rideau)	Détente mécanique x 2* + Remontée de nappe (ex. : carrière Beaulieu à Château-Landon)
Crête	Détente mécanique x 2** + Décompression superficielle + Infiltration d'eau de pluie (ex. : Naujan-et-Postiac)	Détente mécanique x 2** + Remontée de nappe (pas d'exemple référencé)

* selon deux réseaux de fractures subperpendiculaires ; ** selon deux réseaux de fractures subparallèles et proches (effet de renforcement)

2 Carrières souterraines à proximité d'un cours d'eau

En 2021, un recensement des carrières souterraines de craie, de calcaire et de gypse proches d'un cours d'eau en France a été réalisé par l'Ineris sur la base des localisations disponibles dans la BD cavités. Une cartographie de ces carrières a été réalisée afin d'évaluer le nombre d'ouvrages pouvant être potentiellement ennoyés par un débordement de cours d'eau ou une remontée de nappe du fait de leur proximité avec un cours d'eau. Toutefois, il est important de préciser, comme on le verra par la suite, que cette proximité bien qu'elle favorise les phénomènes d'inondation des ouvrages n'implique pas systématiquement une instabilité de ces derniers qui relève de bien d'autres paramètres.

Dans ce chapitre la restitution de l'étude est faite en deux parties, la représentation cartographique des résultats obtenus à l'échelle de la France (à l'exception de l'Île de France et des collectivités territoriales et départements d'Outre-Mer et de la Collectivité de Corse), et une représentation cartographique plus qualitative à l'échelle de l'Île-de-France.

2.1 Méthodologie de l'étude

Comme discuté dans le chapitre 1, l'impact d'un cours d'eau sur la stabilité d'une carrière souterraine peut résulter de deux mécanismes distincts :

- si la carrière se trouve en bas de versant, à proximité du niveau piézométrique de la nappe alluviale, elle peut être inondée directement par la crue du cours d'eau ou indirectement par la remontée de la nappe consécutive à cette crue ;
- si la carrière se trouve en haut de versant, c'est ce dernier qui aura un impact potentiel sur sa stabilité car la carrière risque d'être affectée par la zone de détente mécanique induite par le creusement de la vallée ; ce contexte peut alors favoriser l'infiltration d'eau météorique ; dans ce cas, la distance de la carrière au cours d'eau, plus facile à calculer, a été considérée comme un indicateur de sa distance au versant.

La mise en regard de ces deux informations a donc permis d'extraire le nombre de carrières susceptibles d'être affectées par un événement hydroclimatique exceptionnel, que ce soit par un phénomène ascendant d'inondation (en bas de versant) ou par un phénomène descendant d'infiltration d'eau (en haut de versant).

2.2 Choix du type de cours d'eau

La France métropolitaine compte environ 710 fleuves et rivières⁷, plus d'innombrables ruisseaux, qui totalisent un linéaire d'environ 430 000 km⁽⁸⁾. Pour les classer par ordre d'importance, la classification ascendante de Hack (1957) a été utilisée : elle attribue l'ordre 1 aux fleuves, c'est-à-dire aux cours d'eau dont l'embouchure est la mer, puis l'ordre 2 à leurs affluents directs, l'ordre 3 aux affluents secondaires qui se jettent dans les affluents directs, etc. (Figure 22). Parmi ces cours d'eau, les cours d'eau pérennes et susceptibles d'être à l'origine du creusement d'une vallée d'importance significative ont ensuite été sélectionnés. Pour cela, il a été arbitrairement décidé de ne retenir que les cours d'eau d'ordre 1 à 3.

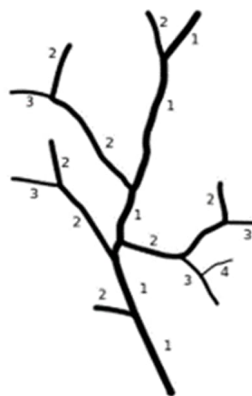


Figure 22. Ordination des cours d'eau (1, 2, 3 et 4) selon la classification ascendante de Hack
(Source : Wikipedia)

⁷ <https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/liste-des-cours-deau-en-france/> (consulté le 26/05/2021)

⁸ <https://www.eaufrance.fr/les-rivieres> (consulté le 26/05/2021)

2.3 Choix d'une distance au cours d'eau

La distance entre la carrière et le cours d'eau permet de caractériser cette interaction, entre la carrière et le cours d'eau. Une fois la localisation de l'ensemble des carrières réalisée, un premier tri a été mené en fonction de leur proximité à un cours d'eau.

En ce qui concerne les carrières situées en bas de versant (Figure 9), les distances d'effet potentiel d'un cours d'eau sur les effondrements proviennent d'une étude de distribution des fontis d'origine karstique, réalisée dans le Val d'Orléans de part et d'autre de la Loire (Gombert et al., 2014) : dans ce travail, il est montré que les fontis karstiques en relation plus ou moins directe avec la Loire ont une densité significativement plus forte pour une distance de comprise entre 500 m et 1000 de l'axe du fleuve. Une hypothèse a donc été faite sur l'impact d'un cours d'eau sur les nappes, il a été défini comme :

- faible si le cours d'eau est situé à une distance > 1000 m,
- moyen si le cours d'eau est situé à une distance < 1000 m et > 500 m
- fort pour si le cours d'eau est situé à une distance < 500 m.

Ce choix a été confirmé par l'analyse succincte d'une quinzaine de carrières souterraines ayant subi des effondrements en Île-de-France (Tableau 5) : elle a permis de constater que ces carrières se situaient tout au plus à 1 000 m de la Seine.

Tableau 5. Localisation de quelques effondrements de cavités souterraines en Île-de-France par rapport à la Seine

Effondrement	Année	Département	Distance Carrière/Seine
Paris (14 ^{ème})	1774	75	1000 m
Château Landon	1878, 1897, 1910	77	300 m
Louveciennes	1943	78	1000 m
Port-Marly	1927	78	750 m
Bougival	1871, 1877, 1883, 1891, 1902,	78	500 m
Celle st. Cloud	1892	78	500 m
Meudon (Montalets)	1868	92	350 m
Meudon (Les Brillants)	1872	92	1000 m
Issy les Moulineaux	1843, 1876	92	1000 m
Clamart	1961	92	1000 m

En ce qui concerne les carrières situées en haut de versant (Figure 9), on s'est appuyé sur l'étude de Devos et al. (2012) qui traite de l'évolution spatiale de la densité de fracturation en fonction de l'éloignement au versant. Ces auteurs ont montré que la densité de fracturation augmente du centre des plateaux vers les versants, témoignant de la détente mécanique. Leur étude a porté sur des carrières situées entre 20 m et 450 m d'un versant.

Compte tenu de ces résultats nous avons retenu deux classes de carrières souterraines afin de pouvoir facilement les extraire d'un SIG à l'aide de filtres successifs :

- Filtre 1, les carrières situées à moins de 1 000 m de part et d'autre d'un cours d'eau qui seront considérées comme « potentiellement sensibles à l'eau », qu'elles soient situées en bas ou en haut de versant ;
- Filtre 2, les carrières situées à moins de 500 m de part et d'autre d'un cours d'eau qui seront considérées comme « potentiellement submersibles » car généralement situées en bas de versant.

Nous avons regardé la répartition des effondrements selon la distance aux cours d'eau ou aux thalwegs⁹ à partir d'un inventaire de cas d'effondrement en cours d'élaboration à l'Ineris qui comprend dans l'état actuel quelques 500 cas d'effondrement (chapitre 1). Sur l'histogramme de la Figure 23 il apparaît que,

⁹ Un talweg, ou thalweg est la ligne formée par les points ayant la plus basse altitude, soit dans une vallée, soit dans le lit d'un cours d'eau.

sur une population de 310 cas d'effondrements pour lesquels l'information est disponible, plus de 180 sont localisés à moins de 500 m d'un cours d'eau, environ 50 sont situés entre 500 m et 1000 m de distance, le reste se situant au-delà des 1000 m.

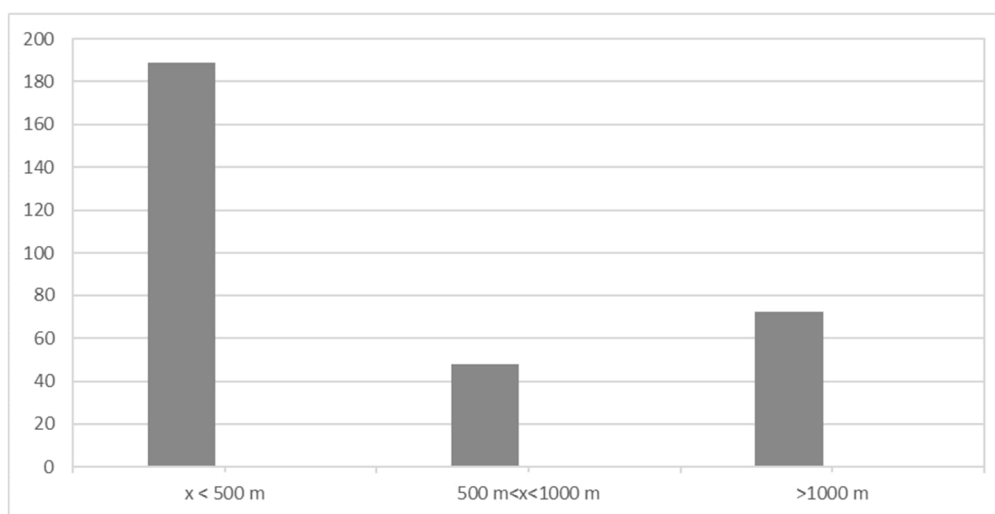


Figure 23. Répartition des effondrements de carrières souterraines selon leur distance au thalweg le plus proche pour 310 cas d'effondrements dont l'information est disponible

Cette représentation montre que les effondrements étudiés sont plus nombreux à mesure que l'on se rapproche d'un thalweg, sans toutefois que se marque un seuil précis. Notons que l'ensemble des matériaux, craie calcaire et gypse est représenté dans cet échantillon bien qu'en proportions inégales.

Sur la Figure 24 la répartition des carrières effondrées par matériaux exploités localisées à moins de 1000 m d'un cours d'eau (a) ou à plus de 1000 m (b) permet d'illustrer cette hétérogénéité. On constate en effet que les carrières de calcaire sont majoritairement situées à moins de 1 km d'un cours d'eau et celles de gypse à plus de 1000 m.

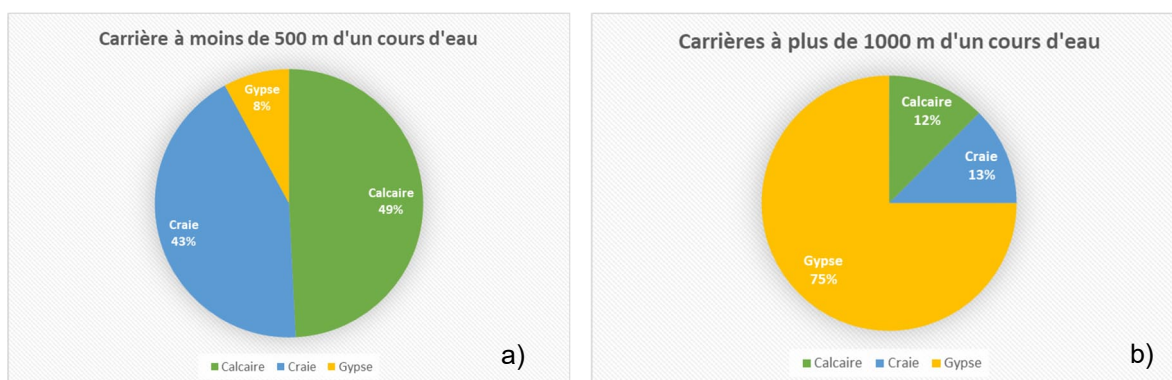


Figure 24. Proportion de carrières effondrées par plage de distance (a) carrières situées à moins de 500m b) carrières situées à plus de 1000 m et par nature des matériaux exploités pour les 310 cas dont l'information est disponible

2.4 Résultats cartographiques

2.4.1 Localisation de l'ensemble des carrières souterraines

Sur la carte de la Figure 25 est représenté en orange et en rouge l'ensemble des carrières souterraines abandonnées respectivement situées à moins de 1000 m et à moins de 500 m d'un cours d'eau. À l'issue de ces deux filtres, on recense 6 169 carrières souterraines dans le premier cas (soit environ 20 % de l'effectif total recensé en France hors départements d'Île France, ce chiffre inclut les carrières situées à moins de 500 m) et 3 439 dans le second cas.

Note : cette carte, éditée au moyen d'un outil SIG, peut facilement être exploitée par commune ou par département.

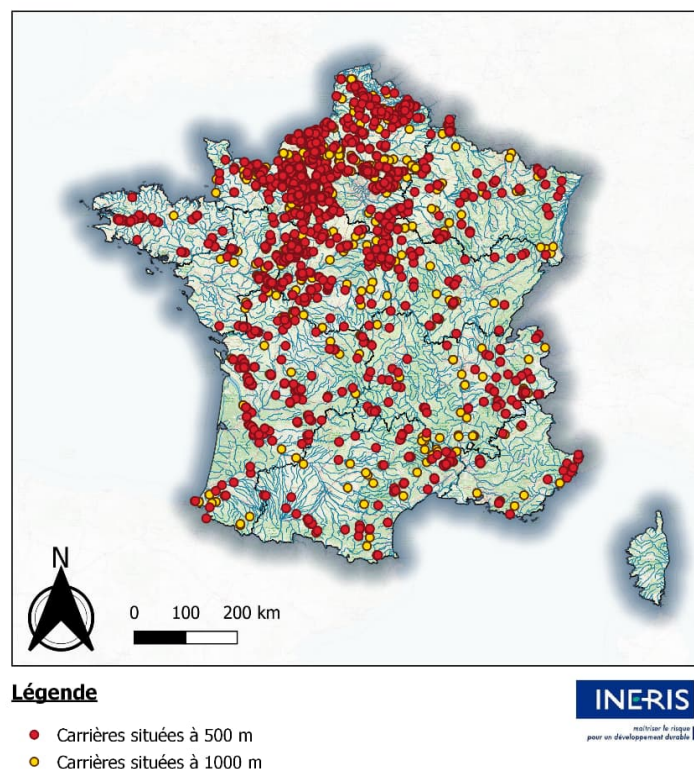


Figure 25. Carrières souterraines abandonnées situées à moins de 500 m (en rouge) et à moins de 1000 m (en orange, ce chiffre inclut les carrières situées à moins de 500 m) d'un cours d'eau d'ordre 1 à 3 selon la classification de Hack

2.4.2 Cartographie des carrières de craie, de calcaire et de gypse hors Île-de-France

L'étape d'après a consisté à ne conserver que les carrières situées dans la craie, le calcaire ou le gypse, à proximité d'un cours d'eau.

Deux démarches différentes ont été mises en œuvre pour trier d'une part les carrières de craie et de calcaire et d'autre part les carrières de gypse.

Dans le premier cas, une carte lithologique du BRGM a été utilisée (Figure 26) : elle représente les différents faciès de roches réservoir aquifères (craie, calcaire, argile, sable...). En effet, une carte géologique traditionnelle ne comporte, pour les terrains sédimentaires, que la mention de leur âge stratigraphique. Dans le cas de la craie, ce n'est pas cette roche qui est représentée mais toutes les formations sédimentaires du même âge (Crétacé) : on trouve ainsi sous une même représentation cartographique, à la fois la craie mais aussi des sables, des calcaires, des argiles, etc. En utilisant une carte lithologique, il est possible d'extraire, à l'aide d'un filtre, les carrières souterraines situées au droit des zones cartographiées comme étant de la craie et du calcaire.

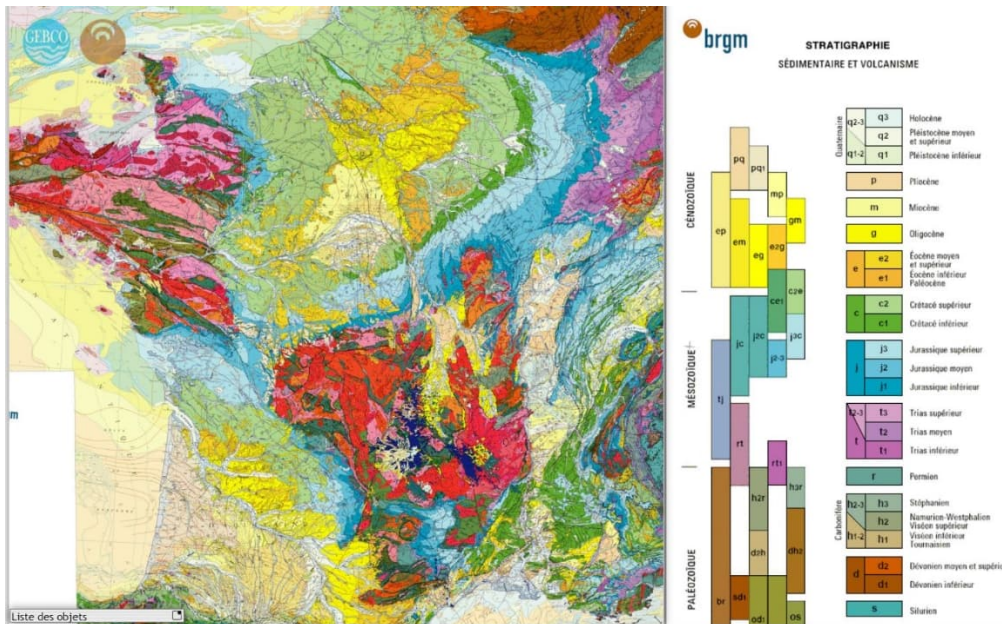
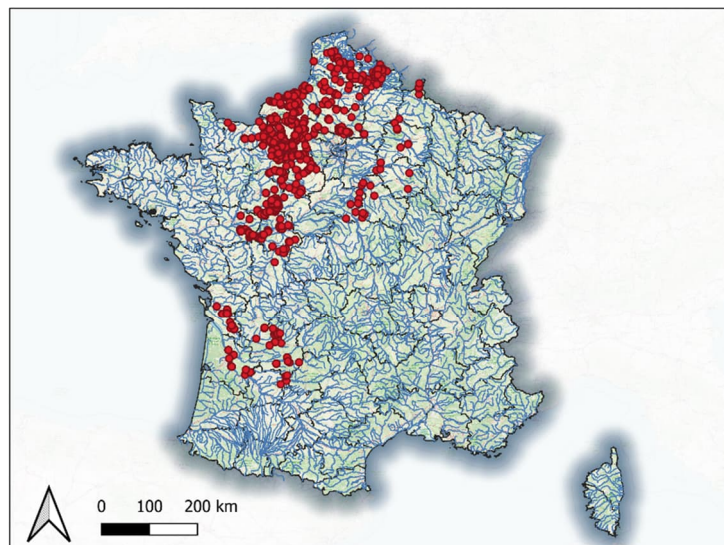


Figure 26. Carte lithologique simplifiée de la France. Source : BRGM

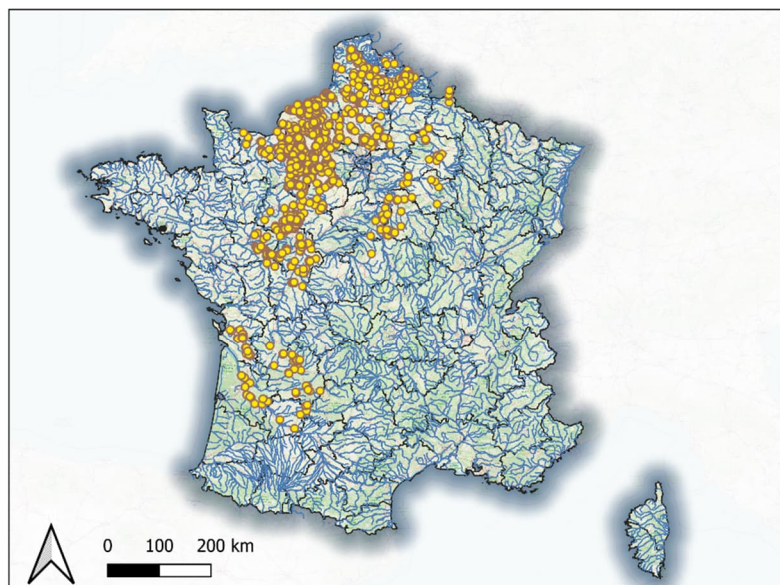
Sur les cartes ci-après, seules les carrières de craie ou de calcaire situées à proximité d'un cours d'eau sont conservées. Un total de 2 115 d'entre elles se trouvent à moins de 500 m d'un cours d'eau (Figure 27), et 3 930 à moins de 1 km (Figure 28).



Légende

- Carrières situées dans la craie ou le calcaire et à moins de 500m d'un cours d'eau

Figure 27. Localisation des carrières souterraines de craie ou de calcaire en France (hors Ile de France et Corse) situées à moins de 500 m d'un cours d'eau



Légende

- Carrières situées dans la craie ou le calcaire et à moins de 1000m d'un cours d'eau

Figure 28. Localisation des carrières souterraines de craie ou de calcaire en France (hors Ile de France et Corse) situées à moins de 1000 m d'un cours d'eau (ce chiffre inclu les carrières situées à moins de 500 m)

La démarche employée pour les carrières de gypse a été différente car il ne s'agit généralement pas d'une roche réservoir aquifère déposée en vastes strates continues, à l'instar des autres formations sédimentaires précédemment citées. Les gisements de gypse, qui se trouvent le plus souvent en intercalations au sein d'autres terrains, ont été peu cartographiés sur le plan national, si ce n'est dans une carte ancienne établie par le BRGM (Bougeard, 1946). Cette carte, présentée en Figure 29 (à gauche) a donc été utilisée de la même manière que précédemment, en localisant l'ensemble des carrières extraites de la BD cavités¹ par le biais d'un logiciel de SIG (Figure 29 à droite).

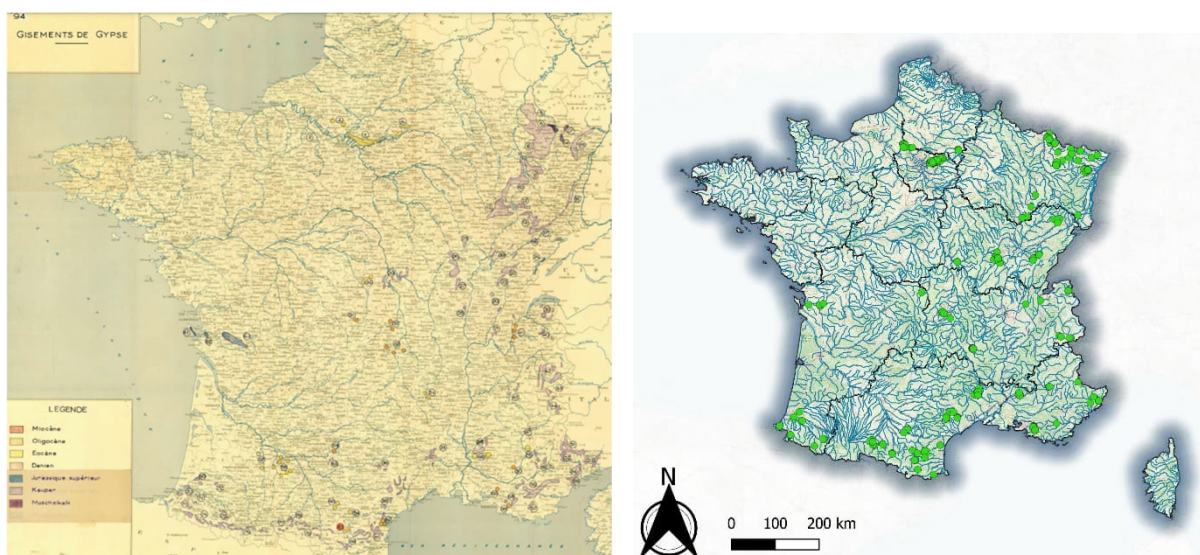


Figure 29. Carte des gisements de gypse en France (à gauche, d'après Bougeard, 1946) et des carrières souterraines associées hors Île-de-France (à droite)

Compte tenu de la faible précision de cette carte et des localisations de carrières, une zone tampon de 1000 m a été appliquée autour de chaque gisement de gypse. On a ainsi considéré comme des carrières de gypse toutes celles qui se trouvaient dans l'emprise d'un gisement mais également celles situées dans ces zones tampon. Cela représente un total de 451 carrières dont 198 localisées directement dans un gisement de gypse et 253 situées dans ces zones tampon. En ce qui concerne ces dernières, il a fallu effectuer un tri supplémentaire afin de s'assurer qu'il s'agissait bien de carrières de gypse : elles ont donc été analysées une à une par leur nom qui mentionne souvent le matériau exploité. Ainsi, les termes comme « ancienne carrière d'ocre » ou « ardoisière » ont été retirés de la liste des carrières de gypse. À l'issue de cette seconde phase de tri, on compte 390 carrières de gypse en France (hors départements d'Île-de-France), dont toutefois seulement une centaine mentionne explicitement le terme « gypse » dans leur appellation.

Sur la carte représentée en Figure 29, seules les carrières de gypse situées à proximité d'un cours d'eau sont conservées. Environ 40 carrières souterraines sont situées à moins de 500 m d'un cours d'eau et 68 à moins de 1 km (Figure 30).

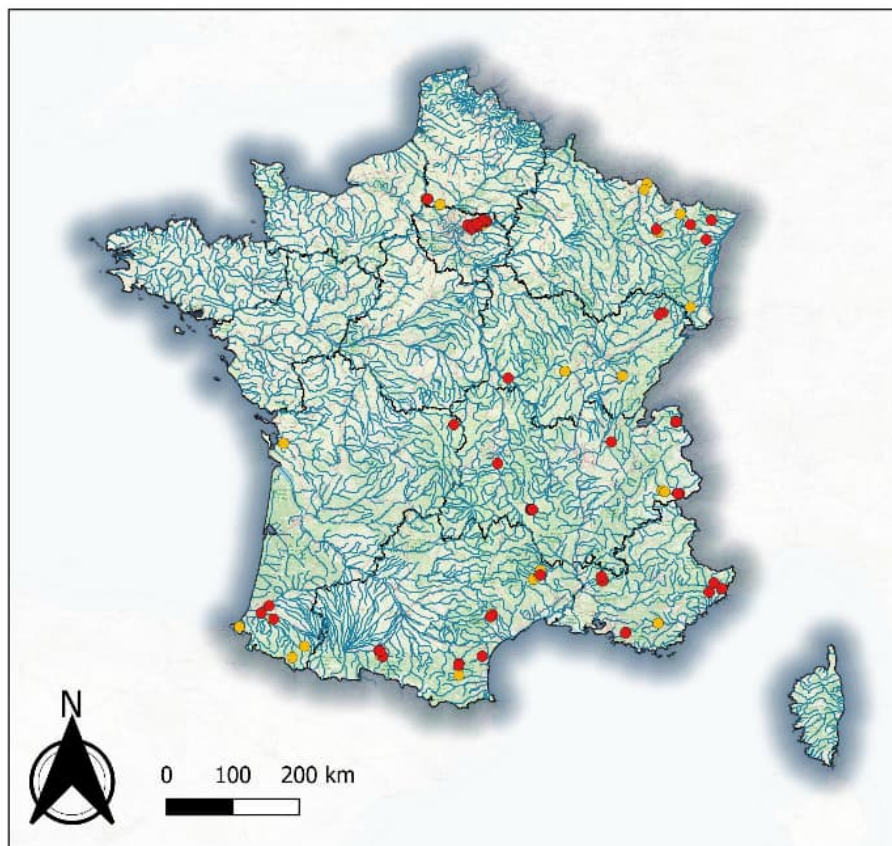
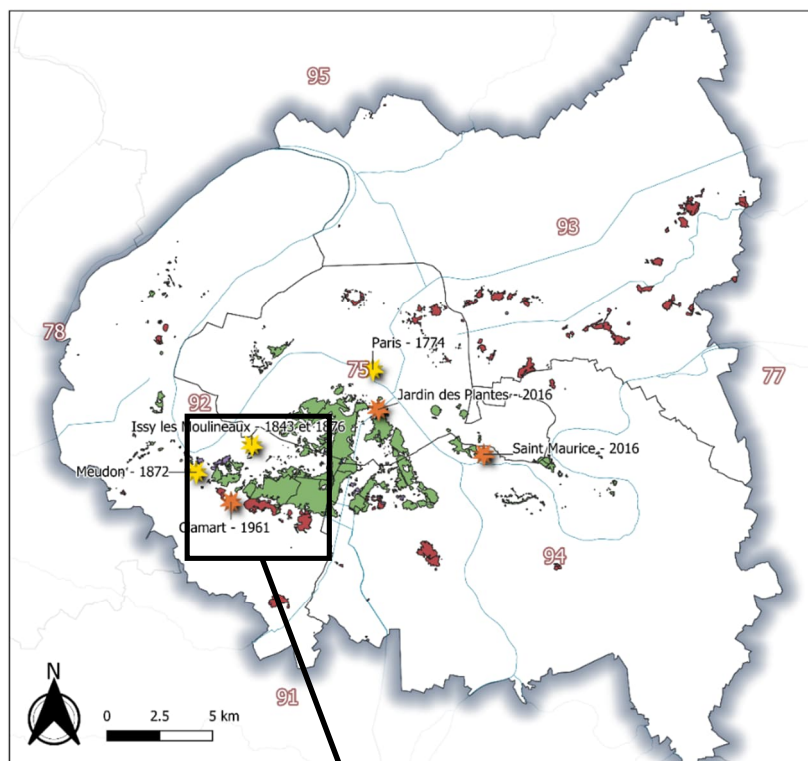


Figure 30. Carrières souterraines de gypse situées à moins de 500 m (en rouge) et 1000 m (en orange) d'un cours d'eau (hors Île-de-France)

2.4.3 Cartographie des carrières de craie, de calcaire et de gypse en Île-de-France

Comme précisé précédemment, les carrières souterraines abandonnées d'Île-de-France ne figurent pas dans la BD cavités. En ce qui concerne Paris et sa petite couronne, l'IGC Paris nous a toutefois fourni une carte schématique des zones où des carrières ont été recensées. Les cartes présentées dans ce paragraphe donnent un aperçu de ces zones, tous matériaux confondus (Figure 31).



Légende

- | | |
|----------------------|----------------------|
| Exploitations | Désordres |
| Calcaire grossier | Carrières effondrées |
| Gypse | Carrières ennoyées |
| Autres matériaux | |

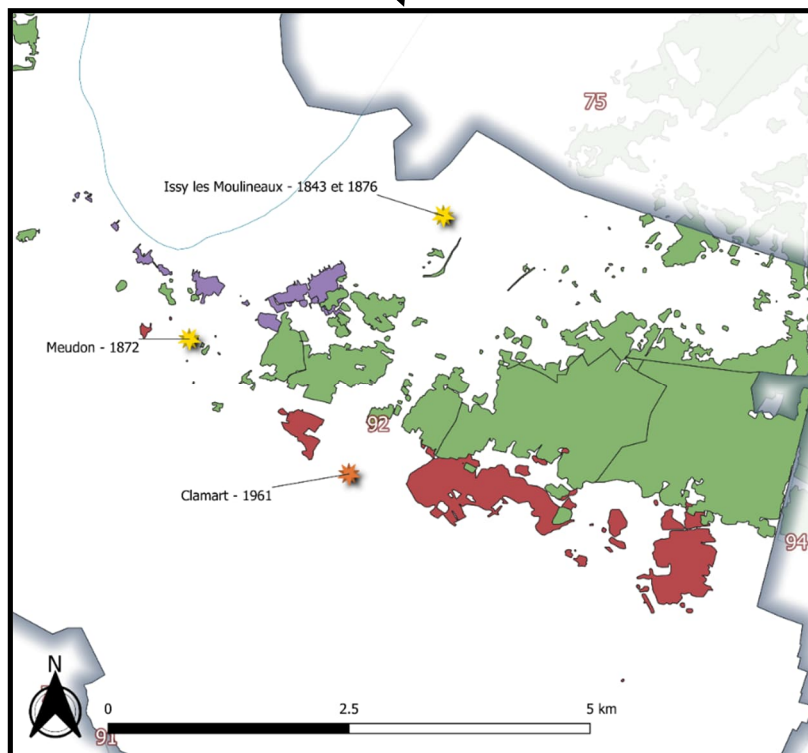


Figure 31. Localisation des carrières souterraines en Île-de-France, dans les départements du 75, 92, 94 et 93 (en haut) et détail de la zone Sud entre Clamart et Issy-les-Moulineaux (en bas). La terminologie « autres matériaux » concerne principalement les carrières de craie.

Concernant les départements 78, 95 et 91, le site de l'IGC Versailles (<https://www.igc-versailles.fr/>) liste les communes dans lesquelles on recense des carrières souterraines (Figure 33). Dans ce cas, nous ne disposons pas d'information quant à la nature des matériaux extraits de chaque carrière.

Une recherche d'information devra donc être réalisée dans un second temps pour pouvoir ensuite ne retenir que les carrières proches d'un cours d'eau. Notons aussi que l'Ile-de-France est irriguée par un réseau dense de rivières, dont la longueur cumulée est d'environ 4 000 km, soit 330 mètres linéaires de rivière par Km² de territoire (chiffres IAU-IDF) (Figure 32), auquel on peut ajouter les cours d'eau temporaires et les fossés (environ 2651 km).

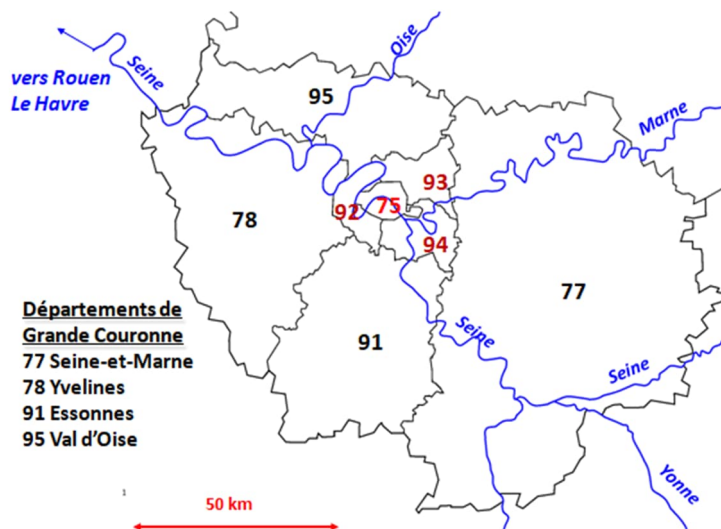


Figure 32. La Seine et ses principaux affluents (Source : <https://amnistiegenerale.wordpress.com/>)

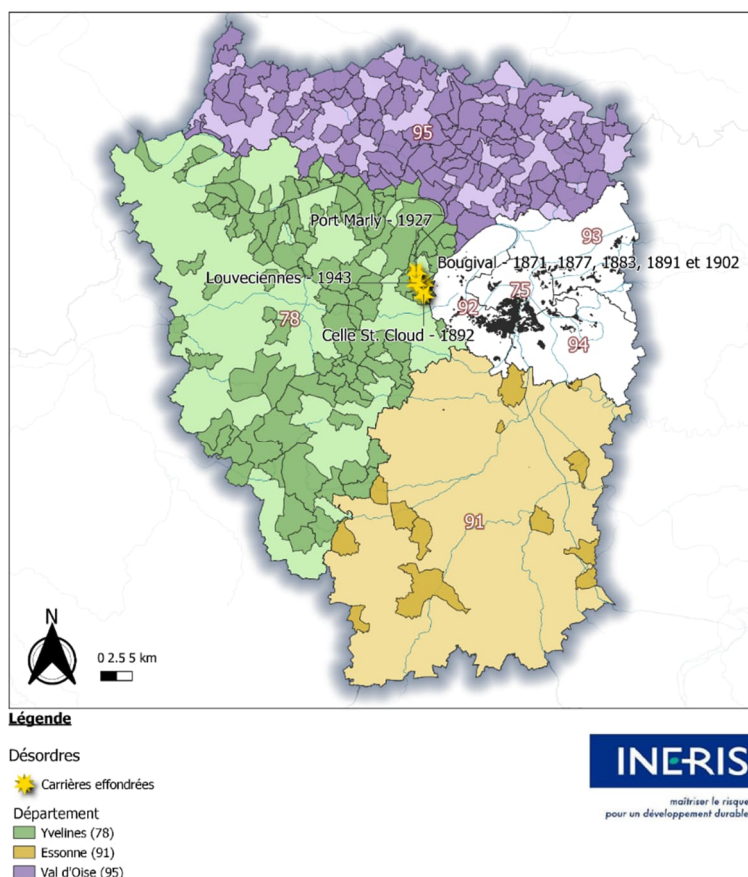


Figure 33. Communes concernées par le risque « effondrement » des carrières souterraines ou cavités abandonnées dans les départements des Yvelines (en vert), de l'Essonne (en jaune) et du Val d'Oise (en violet). Les étoiles représentent quelques carrières effondrées.

2.4.4 Synthèse

L'ensemble des carrières souterraines abandonnées de craie, de calcaire et de gypse ont été extraites de la BD cavités en raison de leur sensibilité à l'eau à l'exception des carrières situées en Ile de France. En ce qui concerne Paris et sa petite couronne, une carte schématique des zones où des carrières ont été recensées par l'IGC Paris.

Cette première analyse, qui ne concerne que les carrières souterraines connues, montre que le nombre de carrières situées à proximité des cours d'eau est loin d'être négligeable. Si on considère qu'il s'agit là de carrières plus sensibles car potentiellement plus soumises aux effets de l'eau, il est important de réaliser un travail plus approfondi pour identifier parmi ces carrières, celles réellement concernées par un risque d'effondrement.

PARTIE 3 : RECENSEMENT DES CAS D'EFFONDREMENT ET ROLE DES FACTEURS DE PREDISPOSITION ET AGGRAVANTS

Le caractère aléatoire et non prévisible de certains effondrements montre que le comportement des ouvrages souterrains face au vieillissement est encore source d'incertitude. Plusieurs études réalisées ces dernières années témoignent d'une augmentation des effondrements au cours des dernières décennies. Dans ce contexte, la répétition de phénomènes exceptionnels liés au changement climatique inquiète car elle pourrait être de nature à accélérer les processus de dégradation déjà en place, et donc l'augmentation des désordres associés.

Il a été montré que plusieurs facteurs interviennent dans l'occurrence d'instabilité : les facteurs de prédisposition, liés à la configuration même de l'exploitation (géologie, géométrie, géomécanique) mais également à d'autres facteurs aggravants ou déclencheurs, comme la géomorphologie ou encore l'eau.

Afin d'étudier le rôle de chacun de ces facteurs, et de vérifier, sur des cas concrets, les hypothèses qui ont été émises, un travail de collecte et d'analyse d'archives a été initié en 2021, par l'Ineris, sur l'historique des effondrements de carrières souterraines abandonnées en France. L'objectif principal est d'apprendre des événements du passé pour mieux gérer les risques dans le futur, à l'instar de la démarche adoptée par Delus et al. (2021) concernant l'historique des crues de la Meurthe dans le cadre la gestion du risque inondation.

Cette partie présente les résultats des études menées sur l'inventaire des cas d'effondrement de carrières souterraines abandonnées en France ainsi que sur le rôle des facteurs de prédisposition et des facteurs aggravants sur l'occurrence de ces effondrements.

1 Inventaire de cas d'effondrements de carrières souterraines abandonnées

Depuis 2021, l'Ineris réalise un inventaire des cas d'effondrements de carrières souterraines abandonnées en France. Ces travaux s'appuient sur un travail de collecte de sources documentaires dans la presse, les rapports administratifs (inventaires des cavités souterraines, PPR¹⁰), sur internet et dans des articles scientifiques. Loin d'être exhaustif, ce travail de recensement doit donc encore être complété.

Cet inventaire a vocation de réaliser des analyses permettant de comprendre les circonstances des effondrements. Il recense des renseignements de tout type (dates, descriptions, géographie, géologie, etc.) qui ont été sélectionnés sur la base d'hypothèses des causes potentielles des événements survenus. En effet, pour être crédibles, les analyses doivent reposer sur des données quantitatives (ex. : distance à un cours d'eau) et qualitatives (sources narratives) complémentaires qui permettent de proposer une chronologie et un scénario d'évènement en lien avec des facteurs de prédisposition ou aggravants.

Auparavant il est nécessaire de déterminer les informations pertinentes qu'il convient d'acquérir pour être capable de comprendre la cinétique de vieillissement de ces ouvrages ayant mené aux effondrements. Un focus a été réalisé sur le rôle qu'ont pu y jouer ou non les événements hydroclimatiques.

Dans ce chapitre nous présentons l'inventaire et la démarche qui a été adoptée pour l'alimenter.

1.1 Méthodologie et paramètres

La méthodologie proposée se décompose en plusieurs étapes. Dans un premier temps, le recensement des effondrements s'est fait sans restriction afin d'obtenir une vision globale des effondrements passés. Ces effondrements ont comme point commun l'apparition d'un cratère en surface. Ils ont été répertoriés ainsi que différents paramètres caractérisant l'évènement et la carrière elle-même. Notons que le nombre et la nature de ces paramètres a évolué au cours de cette étude en fonction des recherches qui ont été menées.

¹⁰ Plans de Prévention des Risques

Cette liste comprend aujourd'hui environ 550 effondrements survenus à l'aplomb de carrières souterraines abandonnées exploitées par la méthode des chambres et piliers. Les matériaux d'exploitation retenus à ce stade sont la craie, le gypse et le calcaire en raison de leur sensibilité à l'eau.

Chaque effondrement est idéalement décrit par 48 paramètres, regroupés en quatre classes : la localisation de l'effondrement, l'environnement de la carrière, les caractéristiques de l'exploitation et celles de l'effondrement.

Les paramètres retenus découlent des réflexions et analyses préliminaires réalisées sur l'inventaire. Au moment de la rédaction de ce rapport, ils sont au nombre de 48. Leur description est donnée par classe d'appartenance (Tableau 6). Pour chaque paramètre, le taux de remplissage est également renseigné, il varie entre 23 % (hauteur de la galerie) et 100 % pour plusieurs paramètres liés à la localisation des cas d'effondrement et pour la nature du matériau exploité.

1.2 Présentation de l'inventaire

À ce jour la liste d'effondrements concerne environ 150 communes réparties dans 24 départements. Les régions les plus représentées sont la Gironde (calcaire), l'Indre-et-Loire (craie) et l'Île-de-France (gypse) : il s'agissait en effet dans un premier temps de disposer d'échantillons représentatifs (effectifs de plusieurs dizaines) de carrières souterraines creusées dans des contextes géologiques et hydroclimatiques homogènes. Néanmoins, cette liste n'est pas exhaustive car il manque des carrières dans ces départements ainsi que de nombreux autres départements, notamment dans le sud de la France où se concentre la plupart des événements hydroclimatiques intenses : il reste donc encore un travail de collecte important. La répartition sur le territoire des cas de l'inventaire dont la localisation est connue est présentée sur la Figure 36.

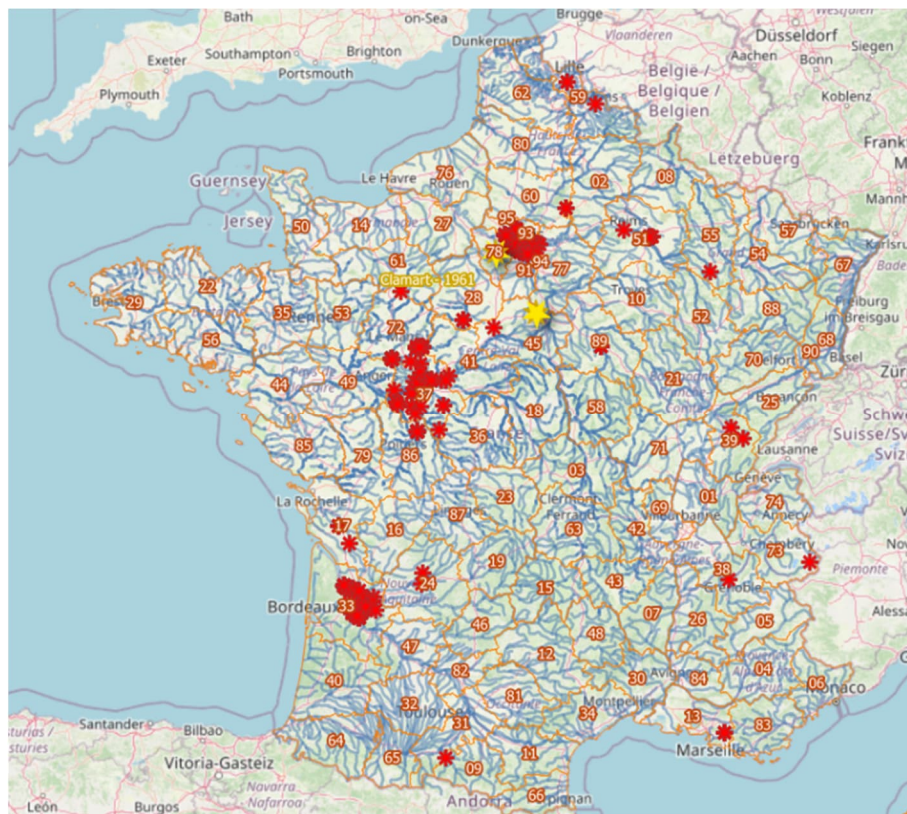


Figure 34. Carrières effondrées listées dans l'inventaire Ineris au 31/12/2023

Tableau 6. Descriptif des paramètres de l'inventaire Ineris et taux de remplissage associés

Classe	Paramètre	Description du paramètre	Format / Unité	Taux de remplissage
LOCALISATION (5)	Référence de l'effondrement	XXX : trigramme de la commune de la carrière effondrée YY : numéro du département concerné ZZ : n° de l'effondrement dans la commune	XXXYY--ZZ	100 %
	Département	Appellation		100 %
	Commune	Appellation		100 %
	Lieu-dit ou nom de la carrière	Appellation		97 %
	Coordonnées	Coordonnées XY Lambert 93 + altitude Z du lieu exact de l'effondrement ou de la carrière si inconnu		61 %
ENVIRONNEMENT DE LA CARRIERE (14)	Matériau exploité	Appellation	Craie / Calcaire / Gypse	100 %
	Géomorphologie 1	Position de la carrière par rapport aux reliefs environnants	Vallée, bas de versant, milieu de versant, haut de versant, plateau	59 %
	Géomorphologie 2	Contexte géomorphologique de la carrière	Corniche, éperon, crête, plateau, vallée	46 %
	Géologie	Strate exploitée	Dénomination géologique	90 %
	Recouvrement		Dénomination géologique	52 %
	Hydrogéologie	Description du contexte hydrogéologique	Description	61 %
	Niveau piézométrique de la nappe	Niveau piézométrique de la nappe	m NGF	52 %
	Profondeur de la nappe par rapport au mur de la carrière	Différence entre profondeur max. de la carrière et niveau piézométrique	m	32 %
	Distance au cours d'eau d'ordre 1	Distance horizontale	m	45 %
	Dénivelé au cours d'eau d'ordre 1	Dénivelé (distance verticale)	m	45 %
	Distance au cours d'eau d'ordre 2	Distance horizontale	m	49 %
	Dénivelé au cours d'eau d'ordre 2	Dénivelé (distance verticale)	m	49 %
	Distance au cours d'eau d'ordre 3	Distance horizontale	m	27 %
	Dénivelé au cours d'eau d'ordre 3	Dénivelé (distance verticale)	m	27 %
EXPLOITATION (10)	Profondeur minimale	Profondeur par rapport à la surface	m	26 %
	Profondeur maximale	Profondeur par rapport à la surface	m	42 %
	Hauteur des galeries	Hauteur moyenne	m	23 %
	Mode d'exploitation	Mode d'exploitation	Description	35 %

Classe	Paramètre	Description du paramètre	Format / Unité	Taux de remplissage
	Taux de défruitement	Taux de défruitement moyen	%	34 %
	Taux de défruitement maximum	Taux de défruitement maximum	%	0 %
	Date de début d'exploitation	Date de début d'exploitation	Année	15 %
	Date de fin d'exploitation	Date de fin d'exploitation	Année	21 %
	Durée de l'exploitation	Fin - Début de l'exploitation	Ans	10 %
	Description de la carrière	Description	Description	48 %
EFFONDREMENT (16)	Année de l'effondrement	Année	Année	85 %
	Date de l'effondrement	Date	JJ-MM-AAAA	84 %
	Précision de la date	Jour/Mois/Saison/Année/Décennie/Inconnu	Description	83 %
	Durée entre début d'exploitation et effondrement	Temps écoulé depuis le début de l'exploitation jusqu' à l'effondrement	Ans	13 %
	Durée entre la fin d'exploitation et effondrement	Temps écoulé depuis la fin de l'exploitation jusqu'à l'effondrement	Ans	16 %
	Surface d'effondrement	Surface de l'effondrement au sol	m ²	32 %
	Diamètre de l'effondrement	Diamètre de l'effondrement au sol	m	53 %
	Profondeur de l'effondrement	Profondeur de l'effondrement par rapport au sol	m	13 %
	Description de l'effondrement	Description	Description	89 %
	Référence bibliographique	Description	Description	99 %
	Nombre de morts		N	53 %
	Nombre de blessées		N	53 %
	Autres informations	Description	Description	41 %
	Autres observations	Description	Description	5 %
	Dates d'effondrements supplémentaires (si > 1)		Années	27 %

À partir de ces paramètres, une première analyse simple a pu être effectuée. La Figure 46 montre la répartition des carrières effondrées en fonction du matériau exploité. On constate que 33 % des effondrements recensés sont survenus dans des carrières souterraines de craie, 43 % de calcaire et 24 % de gypse. Néanmoins, ces chiffres doivent être considérés avec précaution car l'inventaire n'est pas exhaustif. Il renferme actuellement plus d'effondrements à l'aplomb de carrières de calcaire mais cela ne signifie pas qu'il y en a plus dans ce type de matériau. Des effondrements à l'aplomb d'anciennes carrières exploitant d'autres matériaux peuvent exister.

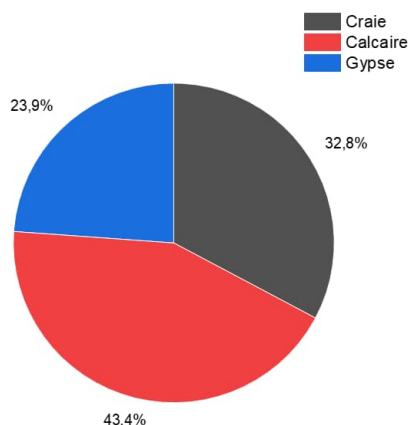


Figure 35. Répartition des carrières recensées par type de matériau exploité

La Figure 36 (à gauche) représente les effondrements en fonction du taux de défrèvement pour les 184 carrières pour lesquelles cette information existe (soit 34 % des cas). Les taux de défrèvement sont systématiquement supérieurs à 50 % et une augmentation significative de la fréquence d'effondrements se marque au-delà de 85 % correspondant à une exploitation quasi totale de la surface de la carrière. Cela peut s'expliquer par le fait que plus le taux de défrèvement est grand, plus la charge des piliers est importante. Néanmoins il faut modérer ce résultat et vérifier la valeur des taux de défrèvement des carrières en général afin de statuer sur ce point qui n'est peut-être dû qu'au fait que la plupart des carrières possèdent un taux de défrèvement autour de 85 %. À ce propos Tristch (2005) annonce un taux de défrèvement des carrières en France compris en général entre 60 et 80 % avec des valeurs plus exceptionnelles de 90 à 95%.

En revanche, il n'existe pas de différence nette en ce qui concerne la répartition du taux de défrèvement en fonction du matériau exploité mais la valeur moyenne tend à se différencier, ce taux étant légèrement plus faible et plus homogène dans la craie que dans le calcaire ou le gypse : $74 \pm 0,1$ % pour la craie, $78 \pm 1,3$ % pour le gypse et $79 \pm 0,9$ % pour le calcaire (Figure 36 à droite).

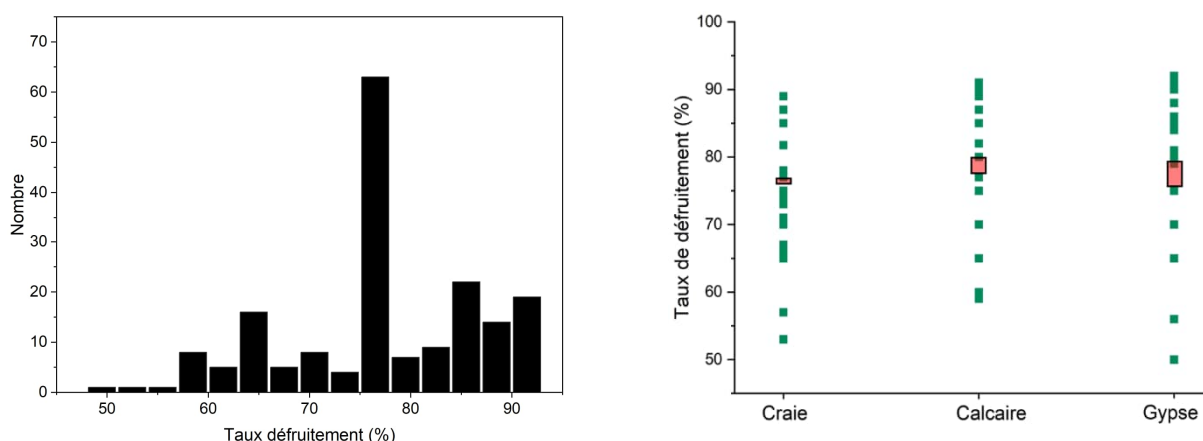


Figure 36. Répartition de 184 effondrements de l'inventaire en fonction du taux de défrèvement (à gauche) et du matériau exploité (à droite). Les rectangles rouges matérialisent les intervalles de confiance des valeurs moyennes.

Une analyse plus détaillée et approfondie sera conduite sur les données disponibles de l'inventaire en considérant l'ensemble des effondrements.

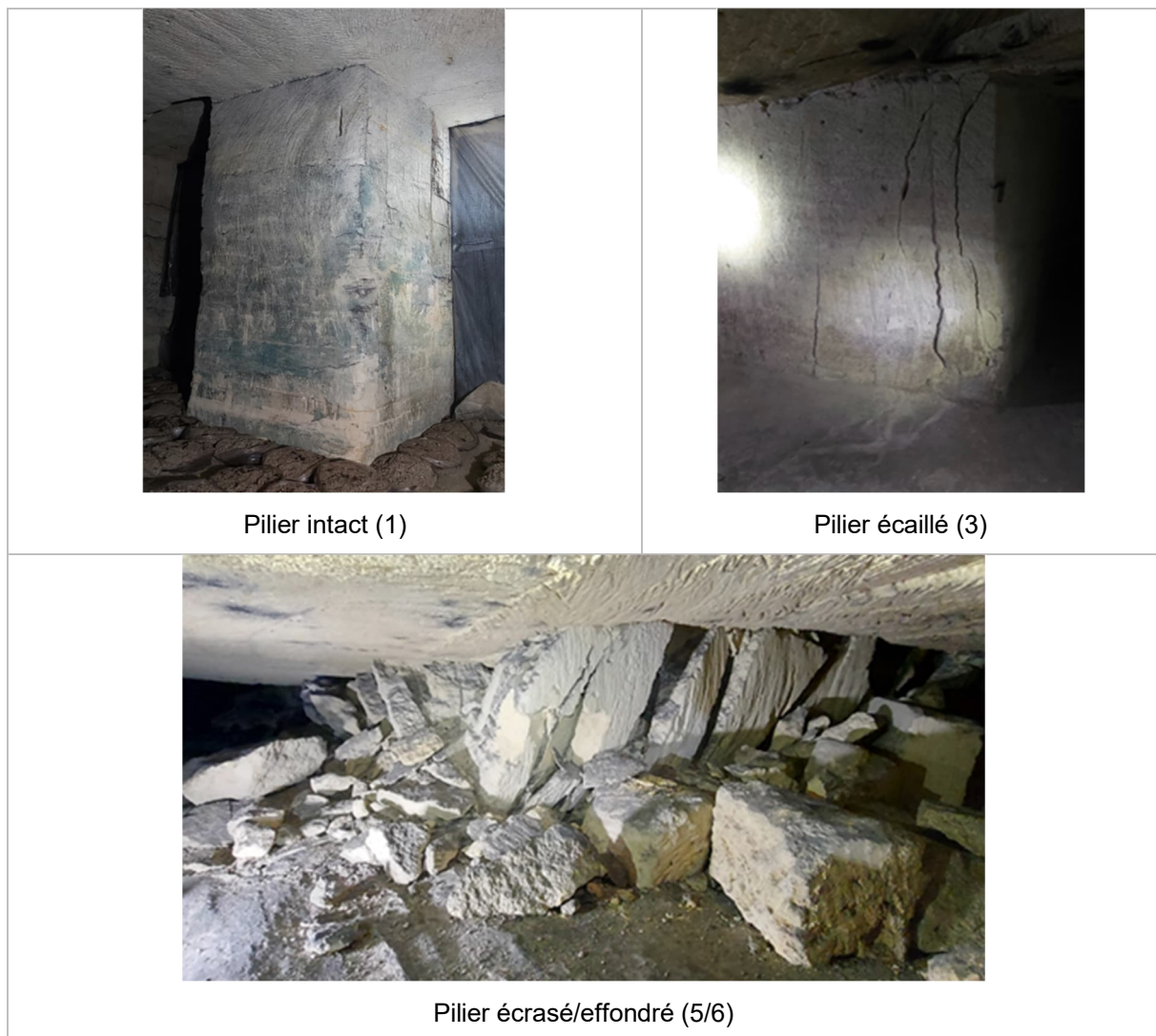
2 Les paramètres d'exploitation : des facteurs de prédisposition

Dans un premier temps, l'analyse de l'inventaire s'est focalisée sur les paramètres de prédisposition pour évaluer si les anciennes carrières, ou plutôt des secteurs d'anciennes carrières, étaient déjà dans des configurations d'instabilité étant donné leur géométrie et la nature des terrains de recouvrement.

Aussi, cette partie présente une analyse de la stabilité des carrières en considérant les paramètres d'exploitation. Elle s'intéresse tout d'abord aux carrières de la Gironde puis à d'autres départements français. Cette méthode d'analyse par région permet de s'affranchir des différences liées à la nature du matériau exploité.

2.1 Présentation de la démarche

La démarche appliquée dans cette étude est inspirée des travaux réalisés par le syndicat intercommunal « Études et Prévention des Risques Carrières et Falaises en Gironde » (EPRCF33) avec qui l'Ineris a signé un accord de collaboration en 2023. Les missions principales de l'EPRCF33, créé en 2018, sont la cartographie des carrières, leur surveillance, leur inspection, et la réalisation de diagnostics de stabilité. Pour cette dernière, le syndicat a développé une méthode de notation basée sur sa propre expérience. Ces notes, qui vont de 1 à 6, permettent d'attribuer un niveau d'endommagement à un secteur d'exploitation donné : 1 = piliers intacts, 2 = piliers fissurés, 3 = piliers écaillés, 4 = piliers affaissés, 5 = piliers écrasés, 6 = piliers effondrés (voir exemples en Figure 37).



La carrière est divisée en plusieurs secteurs dont chacun comporte plusieurs piliers ayant pratiquement les mêmes dimensions. Pour chaque secteur, l'EPRCF33 calcule deux paramètres à l'aide des données

d'exploitation de la zone concernée : l'inverse de l'élanement moyen et la charge exercée sur les piliers (voir plus loin, paragraphe 2.3).

L'inverse de l'élanement se calcule classiquement de la manière suivante :

$$\frac{1}{\text{élanement}} = \frac{lp}{h}$$

où h est la hauteur des chambres et lp la largeur des piliers

À partir des données collectées dans 65 carrières girondines, un graphique de stabilité a été tracé (Figure 38). Chaque secteur de carrières considéré est représenté par un point de couleur correspondant aux 6 niveaux d'endommagement. Deux courbes enveloppes ont été tracées pour délimiter les secteurs stables des secteurs instables ou effondrés :

- une limite d'endommagement (courbe grise) sous laquelle ne se trouvent que des secteurs intacts (points bleus) où la contrainte appliquée sur les piliers est inférieure à environ 1 MPa ; dans ces cas, on observe que l'épaisseur de recouvrement H est majoritairement faible et que le taux de défrètement est inférieur à celui habituellement observé en Gironde (qui est d'environ 70 %) ; bien que la majorité des secteurs intacts environ 81 %) se situe sous cette courbe, on constate néanmoins que certains d'entre eux se placent au-dessus ;
- une limite de rupture (courbe rouge) qui représente théoriquement la contrainte maximale admissible en fonction du critère de rupture, et qui ne peut donc pas être dépassée ; sur cette courbe, se localise la grande majorité (83 %) des secteurs effondrés ; par ailleurs, les taux de défrètement des carrières concernées sont élevés (environ 85 %) et leurs rapports $\frac{lp}{h}$ assez faibles, de l'ordre de 0,4 ;
- entre ces deux courbes, se retrouvent sans distinction les secteurs fissurés, dégradés, altérés, ou écrasés ; même si certains secteurs qui apparaissent fortement dégradés sont proches de la courbe grise, et inversement certains secteurs considérés comme sains tendent vers la courbe rouge, on peut penser en première approximation que la distance du point représentatif de chaque secteur étudié à ces courbes pourrait permettre de cibler rapidement les secteurs les plus propices à un effondrement ; ce point sera à étudier prochainement.

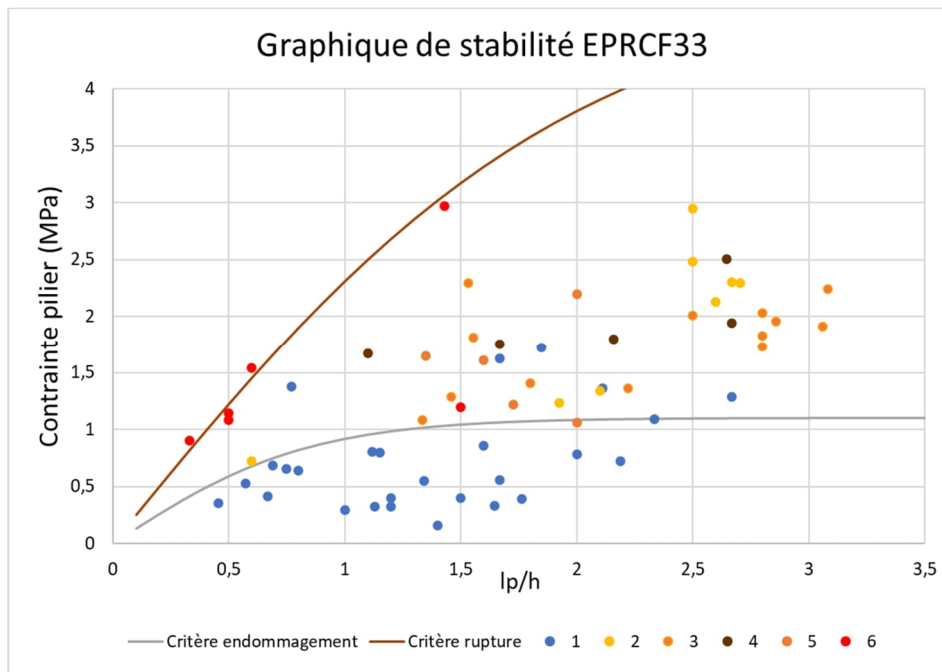


Figure 38. Graphique de stabilité des secteurs de carrières de Gironde (source : EPRCF33). Pour rappel 1 = piliers intacts, 2 = piliers fissurés, 3 = piliers écaillés, 4 = piliers affaissés, 5 = piliers écrasés, 6 = piliers effondrés

Une démarche similaire a ensuite été mise en œuvre par l’Ineris sur les données de son inventaire, lorsque les paramètres d’exploitation et l’état de dégradation des carrières étaient disponibles.

2.2 Application sur les données de l’inventaire en Gironde

Afin d’appliquer la démarche utilisée par l’EPRCF 33 aux données de l’inventaire Ineris, les carrières de Gironde dont un effondrement a été recensé (9) ont été positionnées dans le graphique précédemment présenté. A ces données ont été ajoutées des carrières non effondrées (12) obtenues sur le site www.sig.gironde.fr.

Pour chacun de ces cas, la contrainte appliquée sur les piliers ainsi que leur élancement ont été calculés. Néanmoins, dans certains cas de carrières effondrées où nous ne disposons pas des anciens paramètres d’exploitation mais plutôt d’une gamme de valeurs, nous avons posé l’hypothèse forte suivante : pour qu’il y ait effondrement, il faut que la contrainte sur le pilier soit maximale. Lorsque les valeurs n’étaient pas connues, nous nous sommes basés sur les moyennes calculées sur les carrières étudiées par EPRCF 33 (Tableau 7).

Tableau 7. Moyennes des paramètres utilisés, en l’absence des données disponibles, pour les carrières girondines

Paramètre	Carrières effondrées	Carrières non effondrées
H : hauteur du recouvrement	16,9 m	9,8 m
h : hauteur de galerie	3,6 m	2,44 m
lp : largeur de pilier	3,4 m	3,19 m
τ : taux de défruitement	81 %	76 %
ρ : poids volumique	1800 kg/m ²	
Contrainte moyenne de pilier	1,6	0,738

La Figure 39 présente les points correspondant aux carrières girondines effondrées issues de l’inventaire de l’Ineris et à celles non effondrées issues de la base de données www.sig.gironde.fr. Pour comparaison, nous avons également placé sur ce graphe les deux courbes limites précédemment déterminées par l’EPRCF 33. Cependant, contrairement à la Figure 38, les points représentent ici l’état moyen des carrières prises dans leur globalité, et non celui de secteurs homogènes de carrières.

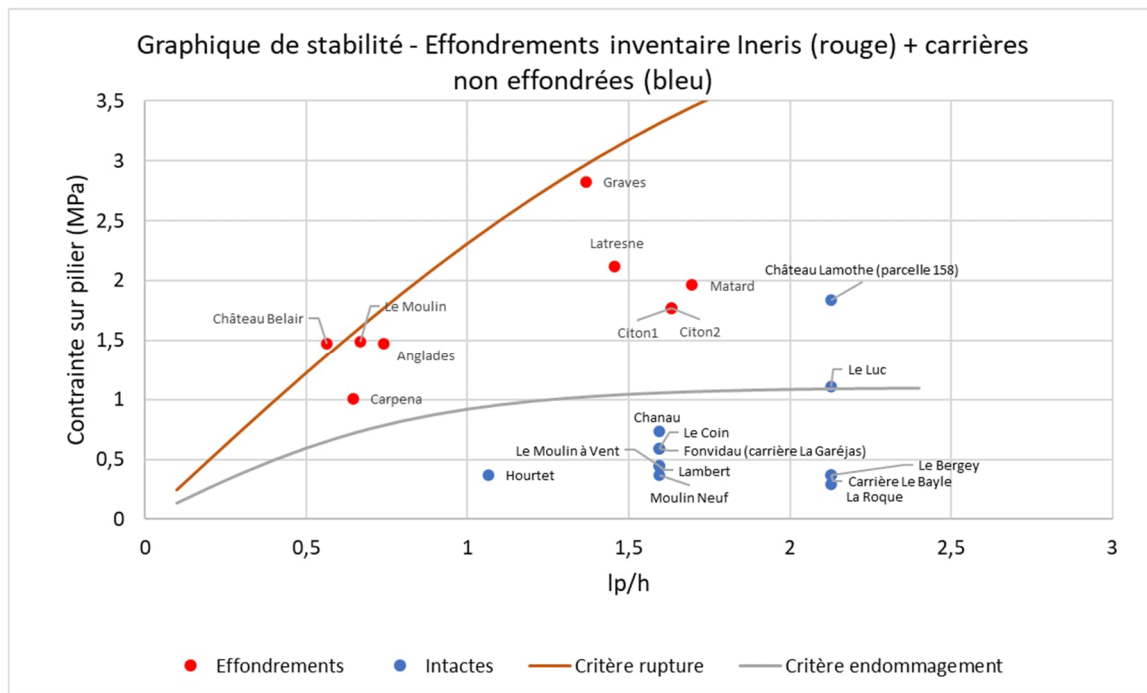


Figure 39. Graphique de stabilité des carrières effondrées de l'inventaire Ineris et des carrières intactes issues de la base de données www.sig.gironde.fr

On observe que la quasi-totalité des carrières non effondrées (88 %) se situe effectivement sur ou sous la limite d'endommagement, et que plusieurs carrières effondrées se positionnent sur (ou à proximité immédiate de) la limite de rupture, ce qui est globalement cohérent avec les résultats de l'EPRCF33. En revanche, la plupart des carrières effondrées se trouve dans la zone intermédiaire entre les deux courbes. Ceci est probablement lié au fait que les données utilisées ici ont été moyennées à l'échelle de chaque carrière alors que l'EPRCF33 travaille sur des secteurs homogènes de carrières. Il est donc possible qu'une analyse plus fine permettant de distinguer les secteurs effondrés et intacts, conduite à une meilleure discrimination des données.

2.3 Comparaison avec les données de l'Indre-et-Loire et du Nord

La même démarche a été appliquée pour des carrières issues de deux autres zones de l'inventaire : les départements de l'Indre-et-Loire et du Nord (Valenciennois et Lillois). A noter que le matériau exploité n'est plus le calcaire mais la craie.

Pour s'affranchir des différences de résistance des matériaux exploités, nous avons travaillé avec des valeurs de contraintes adimensionnelles en divisant la valeur de la charge appliquée sur le pilier par la valeur de la résistance du pilier. Plusieurs relations empiriques sont proposées dans la littérature pour déterminer la résistance du pilier R_p en prenant en compte la résistance à la compression du matériau R_c . La plus utilisée, qui s'applique au cas d'un pilier carré de largeur w , est la suivante (Martins et Maybee, 2000) :

$$R_p = R_c \frac{w^\alpha}{H^\beta}$$

α et β sont des paramètres matériau et H la hauteur du pilier et w sa largeur.

Une recherche bibliographique a permis d'obtenir des valeurs moyennes de résistance à la compression de chacun des matériaux dans les régions concernées (Tableau 8).

Tableau 8. Valeurs de résistance à la compression (R_c) pour les différents matériaux exploités

Département	Matériau	R_c (MPa)	Échelle	Source
Gironde	Calcaire à Astéries	2,5	Région	EPRCF 33
Indre-et-Loire	Tuffeau Blanc	5,8	Région	RP-51868-FR
Nord	Craie du Turonien	5,1	Marly	Archives Ineris
		4,4	Valenciennes	
	Craie du Coniacien	3,4	Lille	

Cas de l'Indre-et-Loire

Pour l'Indre-et-Loire, nous avons utilisé, en plus des 23 carrières effondrées de l'inventaire Ineris, 15 carrières non effondrées suivies par le syndicat intercommunal Cavités 37. Cet organisme s'occupe, depuis 1985, du recensement et de la préservation des cavités souterraines et des falaises rocheuses du département. Pour caractériser l'état de dégradation des carrières inspectées, ils réalisent des inspections géotechniques de la carrière puis un facteur de sécurité F_s est calculé à partir de la résistance du matériau exploité et la contrainte appliquée au pilier. En fonction de leur observation une résistance plus ou moins faible est utilisée pour refléter l'existant et corriger du coefficient de sécurité. Ils adoptent donc un facteur de sécurité corrigé nommé dans ce rapport F_s^* qui permet de noter l'état de dégradation de la carrière.

Ainsi si :

- $F_s^* > 1,5$ la carrière souterraine est considérée comme intacte et le risque d'effondrement des piliers est quasi nul ;
- $1 < F_s^* \leq 1,5$ la carrière souterraine est moyennement endommagée ;
- $F_s^* < 1$ la carrière souterraine est très endommagée et pourrait s'effondrer.

Quinze facteurs de sécurité corrigés (F_s^*) nous ont été fournis par Cavité 37. Pour chacune de ces carrières une contrainte moyenne sur le pilier a été calculée ainsi que le rapport $\frac{l_p}{h}$. Les largeurs de galeries et les taux de défrètement sont issus des diagnostics de sécurité réalisés par Cavités 37.

Les largeurs de piliers l_p ont été calculées en supposant que les piliers ont une section carrée dans l'ensemble des secteurs.

La contrainte des piliers et l'inverse de leur élancement ont également été calculés pour chacune des carrières intactes et sur les cas d'effondrement issus de l'inventaire Ineris.

Pour les carrières issues de l'inventaire Ineris des carrières effondrées les paramètres d'exploitation n'étaient pas connus ($h, H, et \tau$) au droit de l'effondrement mais que nous possédions une gamme de valeurs représentatives de la carrière, les valeurs les plus défavorables à la stabilité ont été retenues.

L'ensemble des points correspondants sont reportés sur la Figure 40 avec le code suivant rouge : carrières effondrées, orange : carrières très endommagées, jaune : carrières endommagées, bleu : carrières intactes.

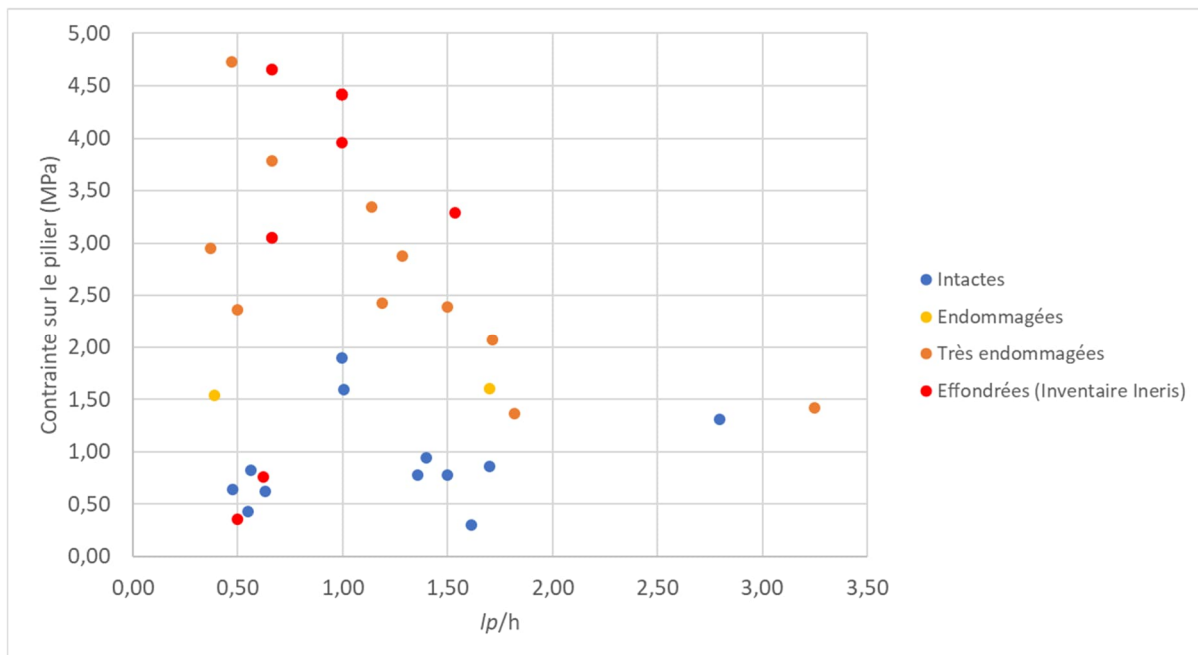


Figure 40. Graphique de stabilité des carrières souterraines d'Indre-et-Loire

Au regard de ces résultats, on observe qu'au-delà d'une contrainte de 1 MPa, les carrières sont soit effondrées soit très endommagées quelle que soit la valeur du paramètre lp/h .

Comme pour le cas de la Gironde, on distingue plus ou moins 3 zones regroupant les carrières effondrées ou très endommagées dans le haut du graphique, les carrières saines dans le bas du graphique et une zone intermédiaire avec les carrières endommagées.

Néanmoins dans les deux départements, on trouve des cas singuliers qui confirment que les paramètres d'exploitation ne suffisent pas pour expliquer le processus de dégradation de ces ouvrages. Notamment on remarque la présence de deux individus « effondrés » pour une contrainte inférieure à 1 MPa alors que globalement en dessous de cette valeur les carrières semblent généralement intactes. Ces données issues de l'inventaire Ineris doivent être étudiées afin de comprendre les facteurs qui ont pu favoriser l'effondrement.

Cas du Nord

Pour le département du Nord, les données concernant l'état de dégradation des cavités sont issues des inspections géotechniques réalisées ces dernières années par l'Ineris dans les 6 carrières suivantes :

- trois carrières souterraines dans le Valenciennois (craie turonienne), exploitées par chambres et piliers, dont la carrière du Chemin Vert à Marly découpée en 5 secteurs ;
- trois carrières souterraines de Lille (craie coniacienne).

Pour ces carrières et secteurs, aucun effondrement de grande ampleur n'a été relevé, néanmoins elles sont dans l'ensemble assez endommagées voire très endommagées à la vue des observations.

Les moyennes des paramètres d'exploitation obtenues à partir des données relevées sont indiquées dans le Tableau 9 et les contraintes et les élancements calculés pour chaque carrière sont représentés sur la Figure 41.

Tableau 9. Valeurs moyennes des paramètres des carrières du Valenciennois et du Lillois

Paramètre	Valenciennois	Lillois
H	16,75 m	10,23 m
h	3,46 m	2,60 m
lp	3,02 m	3,74 m
τ	0,72	

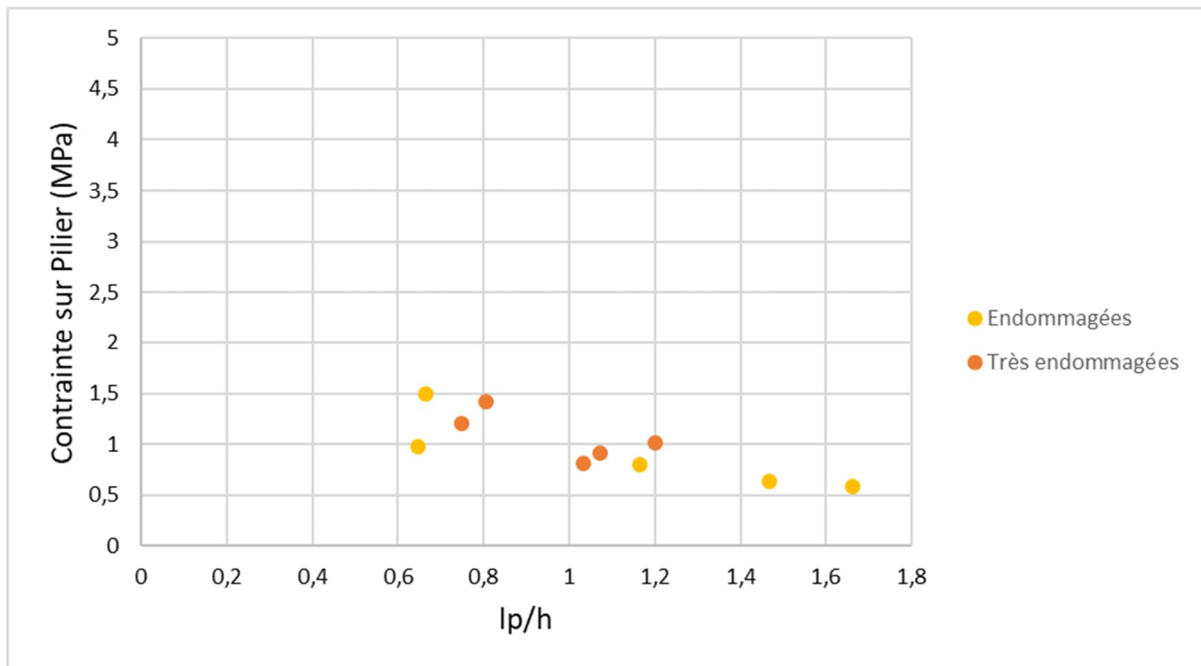


Figure 41. Graphique de stabilité des carrières de craie du Valenciennois et du Lillois

Une première remarque au vu de ce graphique est que globalement les contraintes sur pilier sont très inférieures à celles calculées dans les carrières de Gironde et d'Indre-et-Loire ce qui peut être liée aux caractéristiques de la craie.

Pour pouvoir comparer les données en s'affranchissant de l'influence des caractéristiques mécaniques qui sont intrinsèques à chaque matériau exploité, le graphique a été rendu adimensionnel en divisant la contrainte par la résistance mécanique du pilier, elle-même fonction de la résistance du massif. C'est l'objet du paragraphe suivant.

2.4 Discussion

Martin et Maybee (2000) ont rassemblé les différentes formules empiriques permettant de calculer la résistance des piliers en fonction de leur géométrie. Une comparaison graphique de ces formules est présentée sur la Figure 42. La résistance du pilier est normalisée par rapport à la résistance à la compression de la roche. Ces relations montrent que la résistance de pilier diminue en fonction de son élancement pour une même charge. Les piliers les plus élancés sont les plus vulnérables. La rupture d'un pilier pourrait être observée pour une contrainte largement inférieure à sa résistance. Ce résultat permet d'expliquer certaines observations faites sur des piliers qui sont théoriquement intacts. Sur la base de nombreuses études empiriques, la résistance des piliers ne dépasse généralement pas 70 % de la résistance à la compression du matériau exploité bien qu'il existe encore une grande incertitude sur les formules à utiliser. Néanmoins ce serait plutôt la résistance des piliers qui interviendrait dans la stabilité des ouvrages souterrains et non la résistance du matériau lui-même.

Tableau 10. Formule empirique de la résistance des piliers en fonction des paramètres d'exploitation (Martin et Maybee, 2000)

Reference	Pillar strength formulas (MPa)	σ_c (MPa)	Rock mass	No. of pillars
[3]	$133 \frac{W^{0.5}}{H^{0.75}}$	230	Quartzites	28
[4]	$65 \frac{W^{0.46}}{H^{0.66}}$	94	Metasediments	57
[5]	$35.4(0.778 + 0.222 \frac{W}{H})$	100	Limestone	14
[6]	$0.42\sigma_c \frac{W}{H}$	—	Canadian Shield	23
[7]	$74(0.778 + 0.222 \frac{W}{H})$	240	Limestone/Skarn	9
[8]	$0.44\sigma_c(0.68 + 0.52\kappa)$	—	Hard rocks	178 ^a

^a Database compiled from published sources including those listed in this table.

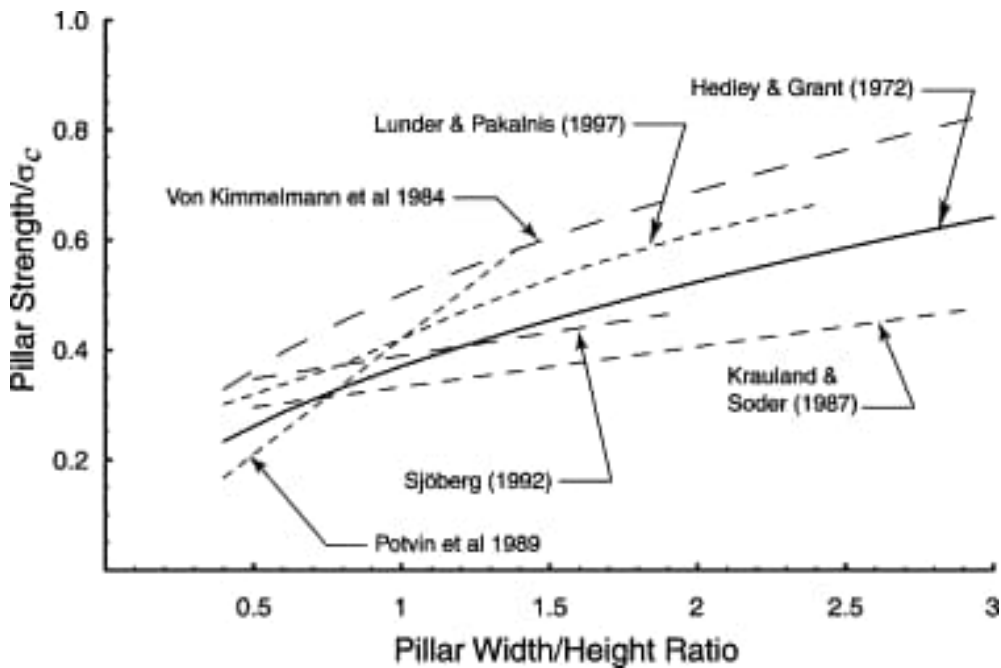


Figure 42. Comparaison des différentes formules empiriques de calcul de la résistance des piliers (Martin et Maybee, 2000)

Pour notre étude nous avons choisi la formulation proposée par Salamon and Munro (1967) pour les mines de charbon en Afrique de Sud, pour calculer la résistance à la compression d'un pilier R_{cp} :

$$R_{cp} = R_c \times \frac{lp^\alpha}{h^\beta} \text{ avec } \alpha = 0,46 \text{ et } \beta = 0,66.$$

où R_c est la résistance à la compression du matériau et α et β deux paramètres intrinsèques au matériau.

À partir de cette formule, nous avons calculé, pour l'ensemble des cas de Gironde, d'Indre et de Valenciennes la contrainte normalisée des piliers. La Figure 43 présente les résultats obtenus.

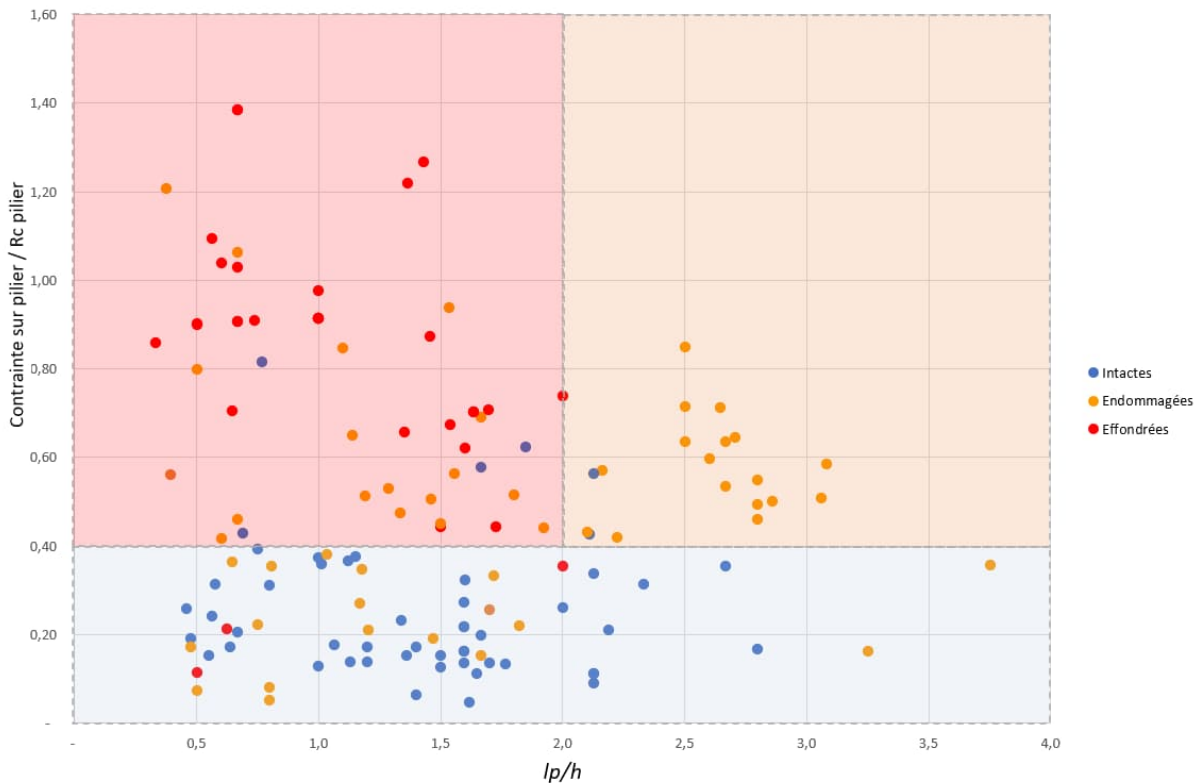


Figure 43. Graphique de stabilité adimensionnel des piliers de l'ensemble des carrières souterraines abandonnées de Gironde, d'Indre-et-Loire et de Valenciennes

Le graphique peut être divisé en trois secteurs qui sont indiqués par des rectangles de couleur :

- bleu, (contrainte sur pilier/ R_{cp}) inférieur à 0,4 ; on y trouve globalement des carrières en plutôt bon état,
- rouge, (contrainte/ R_{cp}) supérieur à 0,4 et $\frac{l_p}{h} < 2$, on y trouve les carrières effondrées,
- orange pour tous les autres secteurs, dans lequel les carrières sont majoritairement endommagées

Ce découpage permet d'évaluer théoriquement l'état de stabilité des cavités (ou secteurs de cavités) et de comparer cet état avec l'endommagement observé au fond.

Ainsi bien que dans la majorité des cas, l'utilisation des paramètres d'exploitation dans les calculs d'instabilité suffisent pour expliquer l'effondrement des cavités, ce graphique met en évidence qu'il existe des cas pour lesquels la stabilité théorique, l'endommagement ou la ruine des piliers (entraînant un effondrement) ne sont pas en adéquation avec le découpage construit également à partir des paramètres d'exploitation. Cette approche étant empirique, il est probable que les simplifications de calculs (homogénéisation des valeurs utilisées par secteur notamment) et les incertitudes sur les paramètres utilisées dans le calcul influencent les résultats. Néanmoins, il est également possible que d'autres facteurs interviennent dans les instabilités observées. Ainsi on observe 2 cas intéressants qu'il nécessiterait d'étudier celui des cavités intactes « théoriquement » qui se sont finalement effondrées, celui des cavités « effondrées » théoriquement et qui sont finalement intactes. Par ailleurs le cas des carrières endommagées est également très intéressant premièrement parce qu'il est difficile de savoir comment la carrière va évoluer et deuxièmement car il pose la question de l'impact du temps (vieillessement).

Dans la suite de cette étude nous avons travaillé sur l'impact de deux facteurs potentiellement aggravants, à savoir la géomorphologie des sites et les événements hydroclimatiques.

3 Les paramètres géomorphologiques sont-ils des facteurs aggravants ?

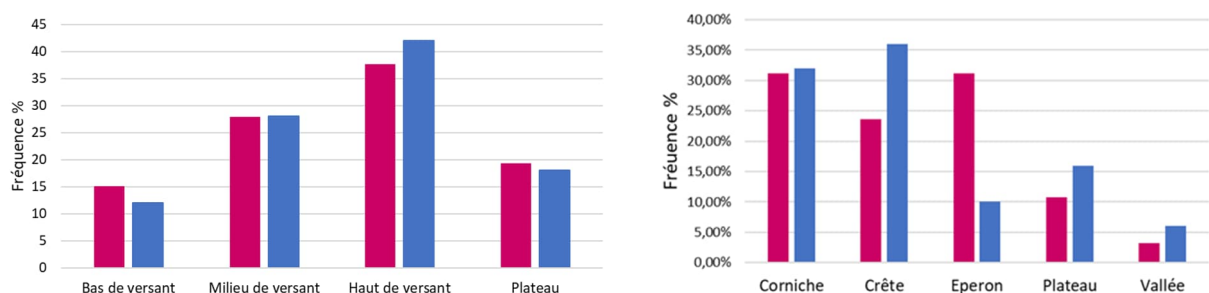
Il a été vu précédemment que l'eau pouvait jouer un rôle dans la dégradation des conditions de stabilité des carrières souterraines abandonnées (chapitre 2) et qu'elle pouvait exercer une influence différente selon le contexte géomorphologique, que ce soit dans le plan horizontal (distance au thalweg) ou vertical (hauteur par rapport au thalweg) (chapitre 1). Dans cette partie de l'étude, on s'intéresse à ces deux contextes, respectivement appelés « Géomorphologie 1 » et « Géomorphologie 2 ». Pour pouvoir comparer leur impact potentiel, il est nécessaire de comparer les carrières effondrées à un lot de référence de carrières non effondrées. Pour ce faire, nous avons travaillé sur deux départements homogènes sur les plans hydroclimatique et géologique : la Gironde et l'Indre-et-Loire.

3.1 Étude des carrières de calcaire de Gironde

L'inventaire Ineris recense 93 carrières effondrées en Gironde, pour lesquelles on dispose de l'ensemble des informations géomorphologiques. On y a ajouté 50 carrières non effondrées, recensées sur le site <https://sig.gironde.fr/> ou dans divers rapports d'étude, notamment du BRGM. L'analyse porte donc sur un effectif total de 143 carrières qui ont toutes été creusées dans le banc de calcaires à Astéries de l'Oligocène.

En ce qui concerne le paramètre « Géomorphologie 1 », l'histogramme de la Figure 44a montre que la majorité des carrières, qu'elles soient effondrées ou non, se situe en haut de versant (39 %). Viennent ensuite les configurations en milieu de versant (28 %), en plateau (19 %) puis en bas de versant (14 %). Malgré ces différences notables, le taux d'effondrement (ratio du nombre de carrières effondrées au nombre total de carrières recensées) est quasiment identique pour toutes les configurations, allant d'un minimum de 62 % pour le haut de versant à un maximum de 70 % pour le bas de versant. Il apparaît que la légère sur-représentation des carrières effondrées en haut de versant reflèterait simplement le fait qu'un grand nombre de carrières souterraines a ici été creusé dans cette configuration géomorphologique, laquelle correspond à la meilleure accessibilité du banc de calcaire à Astéries qui n'affleure qu'en plateau. Cette analyse montre donc que, dans l'échantillon étudié, le positionnement vertical des anciennes carrières a un impact limité sur leur prédisposition à l'effondrement.

En revanche, en ce qui concerne le paramètre « Géomorphologie 2 », l'histogramme de la Figure 44b semble plus discriminant. La configuration en éperon, qui ne totalise que 24 % des carrières, correspond en effet à un taux d'effondrement de 85 %, et celle en corniche à un taux de 64 %, les autres configurations évoluant entre 50 et 55 %. Ainsi, il apparaît que la configuration en éperon pourrait favoriser les effondrements, probablement en raison de la présence de deux versants suborthogonaux à proximité des carrières. Cependant, cela n'est pas corroboré par la configuration en crête, qu'on pourrait penser plus sensible que la précédente du fait de la fracturation associée aux deux versant subparallèles. Ce premier résultat devra donc être confirmé par la prise en compte d'un plus grand nombre de carrières, notamment non effondrées.



a) Paramètre « Géomorphologie 1 »

b) Paramètre « Géomorphologie 2 »

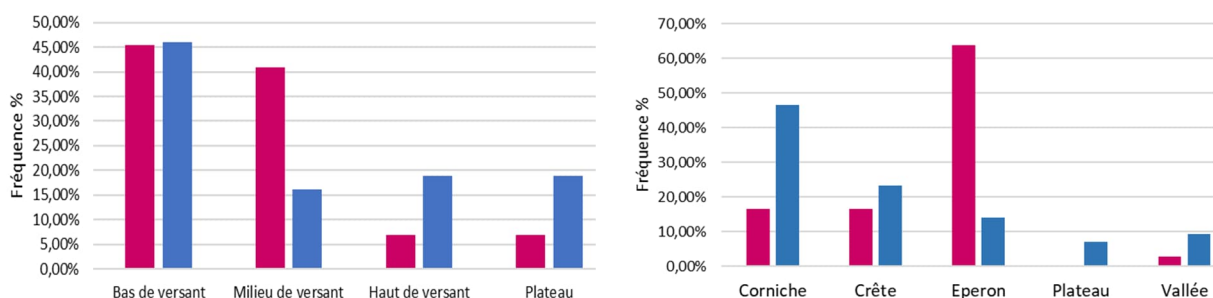
Figure 44. Histogrammes des 93 carrières effondrées (en rouge) et des 50 carrières non effondrées (en bleu) de Gironde en fonction des paramètres géomorphologiques

3.2 Étude des carrières de craie d'Indre-et-Loire

La même démarche présentée pour les carrières de Gironde a été appliquée à 80 carrières d'Indre-et-Loire qui ont été creusées dans la craie tuffeau du Turonien. L'inventaire dispose de 44 carrières effondrées auxquelles ont été ajoutées 36 carrières non effondrées issues de la BD cavités¹.

En ce qui concerne le paramètre « Géomorphologie 1 », la Figure 45a montre que la configuration en milieu de versant serait la plus impactante avec un taux d'effondrement de 75 %, contrairement aux configurations en haut de versant et en plateau. Toutefois, ces dernières sont assez peu représentées dans ce contexte géologique où l'essentiel des carrières a été creusé à la base ou au milieu des versants, lesquels sont entièrement formés de craie.

En ce qui concerne le paramètre « Géomorphologie 2 », la Figure 45b montre que la configuration en éperon semble de nouveau être la plus impactante avec un taux d'effondrement de 85 %, du même ordre que précédemment. Cette fois, au contraire, c'est la configuration en corniche qui semble la moins impactante avec un taux d'effondrement de seulement 27 %



a) Paramètre « Géomorphologie 1 »

b) Paramètre « Géomorphologie 2 »

Figure 45. Histogrammes des 36 carrières effondrées (en rouge) et des 43 carrières non effondrées (en bleu) d'Indre-et-Loire en fonction des paramètres géomorphologiques

3.3 Synthèse

Cette première analyse de l'impact des configurations géomorphologiques sur la prédisposition à l'effondrement des carrières souterraines a été appliquée aux cas de la Gironde et de l'Indre-et-Loire qui concernent deux types différents de roches. Le paramètre « Géomorphologie 1 », qui témoigne de la distance de la carrière au thalweg, n'apparaît pas discriminant dans le calcaire de Gironde où les carrières souterraines ont été essentiellement creusées en haut des versants. En revanche, dans la craie d'Indre-et-Loire où cette roche forme la totalité des versants, la configuration en milieu de versant serait la plus impactante, contrairement aux configurations en haut de versant et en plateau. Le paramètre « Géomorphologie 2 », qui témoigne quant à lui de la hauteur de la carrière par rapport au thalweg, montre une prédominance de la configuration en éperon dans les effondrements des deux contextes géologiques.

Les résultats obtenus ici sont une première ébauche montrant que le contexte géomorphologique peut représenter un facteur de prédisposition. Ils doivent cependant être confirmés d'une part en augmentant la taille des échantillons analysés et, d'autre part, en étudiant d'autres contextes géologiques (gypse) et hydroclimatiques (zone méditerranéenne), ainsi que d'autres régions françaises.

4 Les évènements hydroclimatiques sont-ils des facteurs aggravants ?

4.1 Comparaison des données de l'inventaire avec les événements exceptionnels de Météo France

Sur le territoire de la France métropolitaine, Météo France a recensé 447 événements pluvieux dits « mémorables » entre 1766 et 2020 (<http://pluiesextremes.meteo.fr/france-metropole/-Evenements-memorables-.html>). Il s'agit par exemple des précipitations ayant conduit à la crue centennale de la Seine et de ses affluents en janvier 1910 ou de celles ayant affecté le centre de la France en mai et juin 2016. À partir de l'inventaire réalisé par l'Ineris, nous avons regardé s'il existait une correspondance entre la survenue de ces événements climatiques exceptionnels et certains effondrements recensés. Pour cela, une mise en perspective des 139 effondrements datés au jour près dans la liste avec ces 447 événements pluvieux mémorables a été réalisée. À ce stade du recensement, ces effondrements ne concernent encore qu'une quinzaine de départements (13, 17, 24, 28, 33, 37, 39, 51, 59, 72, 75, 78, 86, 92, 93, 94), essentiellement localisés à l'ouest, au nord, au centre et à l'est de la France. Il manque donc entre autres une grande partie des effondrements survenus dans le sud de la France, des Alpes aux Pyrénées, c'est-à-dire là où se produisent environ 60 % des événements climatiques extrêmes recensés par Météo France.

De ce fait, seuls deux ou trois effondrements peuvent être strictement reliés à la survenue de l'un de ces événements pluviométriques extrêmes d'une durée d'un à quelques jours :

- l'effondrement catastrophique de la carrière souterraine de craie de Château-Landon (Seine-et-Marne), survenu le 21 janvier 1910 au cours de la crue historique de la Seine et de ses affluents ; celle-ci a duré du 18 janvier au 26 février 1910 et a touché une vingtaine de départements dont la Seine-et-Marne où le Loing est entré en crue centennale la veille de cet effondrement (Gombert et Cherkaoui, 2011a) ;
- l'effondrement de plusieurs puits d'une carrière souterraine à Gidy (Loiret) survenu le 8 juin 2016 à la suite des fortes pluies qui ont atteint un cumul de 140 mm à Orléans du 27 mai au 1^{er} juin ; il s'en est suivi une dizaine de jours d'inondation de la vallée sèche de la Retrève qui traverse la commune ;
- éventuellement, l'ouverture d'un fontis le 1^{er} septembre 2010 à la surface d'une crayère de Châlons-en-Champagne (Marne) qui pourrait être en lien avec les fortes précipitations survenues deux semaines auparavant (15 août 2010) sur le nord-est de la France et notamment dans la Marne où il est tombé localement plus de 100 mm d'eau en 48 h.

Sur ces bases, la probabilité qu'un événement climatique extrême puisse être directement à l'origine de l'effondrement observé d'une carrière souterraine abandonnée ou de l'un de ses secteurs serait de l'ordre du pourcent, valeur qui ne tient toutefois pas compte des régions méridionales de la France où se produisent la majorité de ces événements climatiques, ni des nombreux effondrements recensés mais non datés au jour près.

C'est ainsi qu'une autre approche complémentaire a été entreprise, qui consiste à repérer, dans les commentaires des effondrements recensés, ceux qui sont en lien probable avec des conditions météorologiques dégradées, comme des pluies fortes mais non exceptionnelles. Sur 86 commentaires de nature hydrologique ou hydrogéologique concernant des effondrements datés au jour près, 13 y font référence, soit 15 % des effondrements actuellement recensés (Tableau 11). Bien qu'il n'ait pas été établi de lien direct entre les événements climatiques cités et les effondrements, il apparaît que ces derniers sont survenus dans des contextes climatiques anormalement pluvieux.

Tableau 11. Exemples de conditions hydroclimatiques dégradées en lien probable avec des effondrements de carrières souterraines

Réf. Inventaire Ineris	Conditions climatiques	Date de l'effondrement	Localisation
SGP33-03	Pluies exceptionnelles de l'hiver 1864-1865	07/02/1865	Saint-Germain-du-Puch (33)
CHA86-01	Hiver rigoureux avec pluies abondantes.	12/01/1887	Châtelleraut (86)
EPN51-01, EPN51-02	Pluies diluviennes pendant l'hiver	23/02/1900, 20/03/1900	Épernay (51)
CLA77-01	Crue centennale du Loing	21/01/1910	Château-Landon (77)
SGR33-02	Pluies persistantes 6 mois avant accident	05/05/1910	St-Germain-la-Rivière (33)
CRO33-01	Pluies hivernales abondantes	01/02/1920	Croignon (33)
CHP39-01	Plusieurs jours avant la catastrophe des pluies diluviennes se sont abattues sur la région	27/07/1964	Champagnole (39)
AVY17-01	Très abondantes pluies d'orage les 14 et 15 août dans une carrière peu profonde avec de fortes infiltrations d'eau au toit	Août 1972	Avy (17)
MFM93-01	Fortes pluies peu de temps avant le fontis	26/04/1986	Montfermeil (93)
MBO09-01	Effondrement amplifié par des venues d'eaux météoritiques à travers recouvrement	2000	Mercenac-Bonrepaux (09)
LOS59-01	Année de fortes pluies	27/12/2001	Loos (59)
GID45-01	Très fortes précipitations et inondations les jours précédents	08/06/2016	Gidy (45)
NEP33-01	Pluies abondantes au cours des derniers mois et infiltrations dans la carrière	13/03/2021	Naujan-et-Postiac (33)

Cette première analyse met donc en évidence qu'environ 1 % des effondrements observés s'est produit en lien avec un événement pluvieux exceptionnel et que 15 % d'entre eux sont survenus à l'occasion de périodes particulièrement pluvieuses, sans toutefois que cette pluviométrie soit qualifiée d'exceptionnelle. Il faut également tenir compte de deux biais importants : (1) une sous-estimation liée au fait qu'il ne s'agit là que de désordres rapportés par des témoins (c'est-à-dire ayant le plus souvent affecté des biens), et (2) une surestimation car seuls les trois-quarts de la France sont potentiellement concernés par la présence de carrières souterraines (les zones de socle en sont généralement dépourvues) alors que la totalité du territoire peut être touchée par ce type d'évènement hydroclimatique.

À cet effet, l'exemple de la commune de Château-Landon est intéressant puisque dans un secteur long de seulement 1 km, et dans un contexte géologique (craie) et géomorphologique (base de versant) homogène, ont coexisté cinq carrières souterraines. Parmi elles, 4 se sont effondrées à différentes époques : avant 1878, en 1878, en 1897 et en 1910. La cinquième carrière, intacte à ce jour, a donc traversé sans encombre les périodes successives de précipitations intenses ou de fortes crues qui ont pourtant été préjudiciables aux quatre autres¹¹. Cela montre qu'un événement pluvieux exceptionnel ne constitue pas, seul, une condition suffisante à la survenue d'un effondrement de carrière souterraine, même en roche sensible, mais une combinaison de facteurs (méthode d'exploitation, la durée de la période d'exploitation, la date d'abandon, la dimension des vides, la hauteur de la carrière par rapport à la nappe ou au cours d'eau, la fissuration du massif, la situation géomorphologique de la carrière (base ou rebord de versant), etc.)

Sur le seul plan hydroclimatique, l'analyse réalisée par Noury et al. (2019) sur les 3000 désordres qui ont touché des marnières de Normandie en 1995 et en 2001, montre que le mécanisme initiateur semble

¹¹ C'est d'ailleurs pour cela que cette carrière a été choisie comme laboratoire souterrain par l'Ineris et le CEREMA, et instrumentée pour suivre son comportement en temps réel en relation avec les événements hydroclimatiques (niveau de nappe, niveau du Loing, niveau du canal, pluviosité, températures).

avoir été la répétition pendant plusieurs mois de conditions climatiques humides. Pourtant, prises isolément, ces pluies ne constituaient pas des événements exceptionnels.

Ainsi, dans l'état actuel de nos investigations, il semblerait que trois types distincts d'événements hydroclimatiques soient susceptibles de participer à l'occurrence d'effondrement de tout ou partie d'une carrière souterraine en roche sensible :

- un événement isolé d'intensité extrême, comme cela a été le cas des orages de juin 2016 dans le Loiret (Gidy) ;
- un événement d'intensité importante mais non extrême survenant au cours d'une période anormalement longue et humide, comme cela est illustré par la crue centennale du Loing à Château-Landon en 1910 ;
- une succession d'événements susceptibles de créer, dans la durée, une période particulièrement humide, comme cela a été observé en 1995 et 2001 dans les marnières de Normandie.

Dans la très grande majorité des cas, ces trois types d'événements hydroclimatiques semblent plutôt générer des désordres d'ampleur modérée (petits effondrements), et non des effondrements de grande ampleur. Dans la suite du travail, on tentera donc de réaliser une mise en corrélation de ces trois types d'événements hydroclimatiques avec les dates d'effondrements recensés, tout en tenant compte du contexte environnemental des carrières (géologie, hydromécanique, géomorphologie, hydrogéologie). Par ailleurs une réflexion sur le moyen de traiter l'impact des sécheresses exceptionnelles sur la stabilité de ces mêmes ouvrages devra être entreprise.

4.2 Rétro-analyse hydroclimatique

4.2.1 Objectifs et démarche

L'hypothèse de départ repose sur la sensibilité à l'eau de certaines roches poreuses dont la résistance à la compression peut chuter rapidement et fortement après une phase d'imbibition. Lorsque cette dégradation de la résistance affecte un ou plusieurs piliers, il peut se produire un effondrement souterrain qui se propage jusqu'à la surface. Sachant que la plupart des carrières souterraines a été creusée jusqu'à quelques mètres seulement au-dessus de la nappe phréatique, tout événement exceptionnel de nature climatique (pluie intense) ou hydrologique (forte crue) qui peut induire une variation de niveau de cette nappe risque donc de les impacter.

Pour évaluer le rôle de ces événements hydroclimatiques, il convient de recenser les épisodes pluvieux particuliers, en matière d'intensité ou de durée, susceptibles d'avoir conduit à un cumul de précipitations anormalement important : ces données sont maintenant accessibles gratuitement sur le site de Météo France¹² (<https://meteo.data.gouv.fr/datasets>). En n'importe quel point du territoire métropolitain, il est ainsi possible d'obtenir un cumul de précipitations (ou de le calculer par rapport aux stations météorologiques limitrophes), et de remonter plusieurs décennies en arrière selon les stations.

En ce qui concerne les eaux de surface, les chroniques de niveau ou de débit des cours d'eau sont généralement disponibles sur le site HydroPortail (<https://www.hydro.eaufrance.fr/>), et les données en temps réel sur celui de Vigicrues (<https://www.vigicrues.gouv.fr/>) pour certains cours d'eau.

Les informations sur le niveau des nappes sont du ressort du BRGM et sont disponibles sur le site Infoterre (<https://infoterre.brgm.fr/>), lequel renvoie généralement au site ADES qui est le portail national d'accès aux données sur les eaux souterraines (<https://ades.eaufrance.fr/>). Malheureusement, il est souvent délicat de parvenir à trouver un ouvrage souterrain (puits, forage, piézomètre) qui soit à la fois localisé à proximité du site à étudier, implanté dans la bonne nappe et dont les données soient disponibles à la période qui nous intéresse. De ce fait, il est souvent nécessaire de réaliser une analyse préalable du contexte hydrogéologique afin de s'appuyer sur des ouvrages implantés dans la même nappe mais à une certaine distance, ou à proximité mais dans une nappe différente. Cela requiert alors une mise en corrélation des données piézométriques entre plusieurs ouvrages avec une interpolation qui induit une certaine incertitude dans les résultats, tant en matière d'amplitude que de datation des pics de hautes eaux.

¹² Ce qui n'était pas encore le cas au cours de cette étude.

Nous avons appliqué cette démarche à trois cas d'effondrement issus de l'inventaire, et particulièrement bien étudiés, compte tenu notamment des données hydroclimatiques, géologiques, géomorphologiques et des témoignages de riverains.

4.2.2 Effondrement de Château-Landon (77)

A la suite d'une fin d'année 1909 et d'un début d'année 1910 très humides dans le Bassin parisien, les précipitations tombant sur des sols déjà en eau et gelés (donc quasiment imperméables) provoquent une crue centennale de la Seine (Gombert et Cherkaoui, 2011a). Le 20 janvier 1910, l'un de ses affluents, le Loing, entre également en crue centennale et déborde de son lit. Le lendemain, la carrière souterraine de craie de Beaulieu s'effondre sur 4 ha, occasionnant la disparition du hameau de Lorroy et faisant 7 victimes (Kreziak et Watelet, 2016). A cette occasion, on constate que trois autres carrières souterraines de craie s'étaient précédemment effondrées à diverses dates dans ce même secteur (Figure 46).

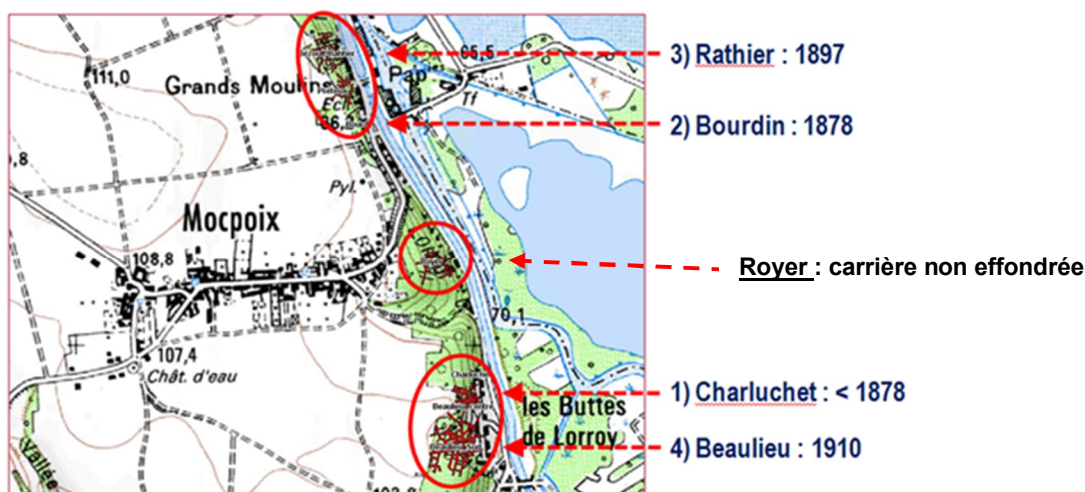


Figure 46. Localisation des carrières de Château-Landon (avec tracé de leurs galeries en rouge) et date de leur effondrement (Watelet et Kreziak, 2010)

a) Contextes géographique et géologique

Toutes ces carrières se trouvaient à la base du versant ouest de la vallée du Loing, en bordure du canal du Loing à la Seine, vers 70 m d'altitude. Elles exploitaient la craie du Campanien qui est ici une craie fine et friable, servant non pas de matériau de construction mais de base pour des peintures et des enduits, appelée le « Blanc de Meudon ». Cette craie est ici surmontée d'une quarantaine de mètres de formations du Tertiaire puis du Quaternaire (Figure 47) : argile à silex, poudingues, calcaires, sables, limons.

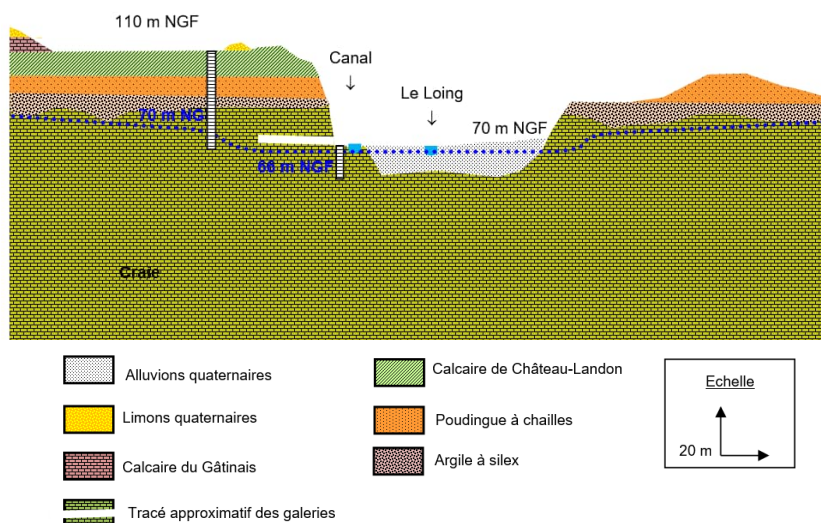
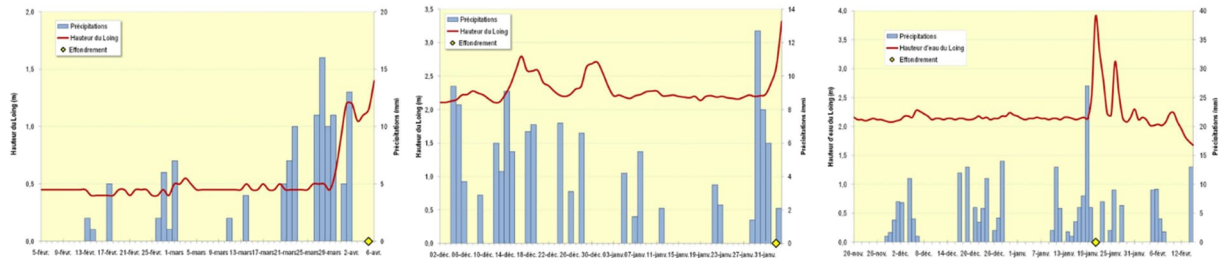


Figure 47. Coupe géologique NW-SE passant la carrière Beaulieu (Gombert et Cherkaoui, 2011a)

b) Analyse hydroclimatique

Les années qui ont précédé les trois effondrements datés ont été globalement plus humides que la moyenne. Au pas de temps mensuel, on constate que les effondrements du 5 avril 1878 et du 21 janvier 1910 sont survenus à la suite d'un mois particulièrement pluvieux, et que celui du 2 février 1897 est survenu après un mois normal mais qui a suivi une fin d'année pluvieuse. Au pas de temps journalier, 1 à 3 épisodes pluvieux forts (> 10 mm/j) se sont produits dans les deux semaines qui ont précédé chaque effondrement (Figure 48).



a) Effondrement du 05/04/1878

b) Effondrement du 02/02/1897

c) Effondrement du 21/01/1910

Figure 48. Précipitations et niveau du Loing à Nemours avant les effondrements survenus à Château-Landon (d'après Gombert et Cherkaoui, 2011a)

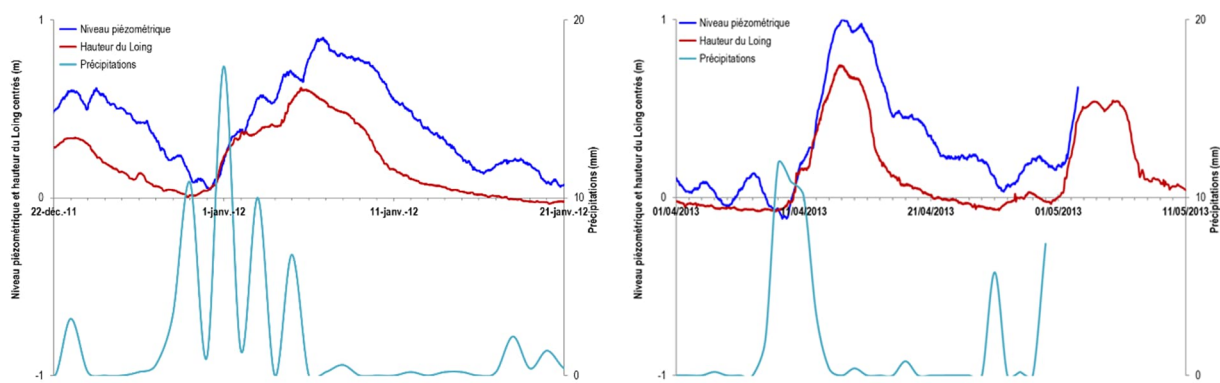
c) Analyse hydrologique

L'analyse des niveaux d'eau du Loing à la station de Nemours, située à 12 km en aval, montre que les effondrements se sont produits en période de hautes eaux du Loing (entre fin janvier et début avril) et chaque fois au cours d'une forte crue (voir les courbes rouges de la Figure 48). Cependant, au cours des 75 ans de suivi journalier de ce cours d'eau, une crue aussi importante que celle de 1910 ne s'est produite qu'une seule fois alors qu'il y a eu plusieurs crues similaires à celles de 1878 ou de 1897. Ainsi, seul l'effondrement de janvier 1910 est survenu au cours d'une crue d'ampleur exceptionnelle.

d) Analyse piézométrique

Compte tenu de la date de ces événements, nous ne disposons d'aucun piézomètre permettant de connaître le comportement de la nappe de la craie et de la nappe alluviale du Loing : ce type de suivi ne débute pas avant la seconde moitié du XX^e siècle. Toutefois, nous avons supposé que le fonctionnement hydrogéologique devait alors être identique à l'actuel avec une double alimentation des eaux souterraines : d'une part, par l'infiltration lente des précipitations efficaces sur les plateaux du Gâtinais et, d'autre part, par la percolation rapide des eaux de débordement du Loing au sein de sa nappe alluviale (en continuité hydraulique avec la nappe de la craie) en période de crue.

Pour vérifier cette hypothèse, une sonde piézométrique automatique a été installée de 2011 à 2013 dans un piézomètre implanté au droit de la carrière souterraine effondrée de Beaulieu, afin d'analyser la réponse de l'aquifère de la craie aux crues du Loing. Il est apparu que cette nappe réagissait de manière quasi synchrone avec les variations de hauteur du Loing et ce, avec une amplitude égale voire supérieure (Figure 49). Cela montre que l'hypothèse d'une réponse rapide et forte de la nappe de la craie aux crues du Loing (1878, 1897 et 1910) est plausible.



a) Détail de la crue du 5 janvier 2012

b) Détail de la crue du 13 avril 2013

Figure 49. Analyse de la réponse du Loing et de la nappe de la craie à des crues récentes

Le suivi hydrologique et hydrogéologique mis en place depuis 2019 dans la carrière souterraine Royer, la seule encore en état du secteur, confirme ce comportement (Figure 50). Il montre que la réaction de la nappe de la craie à l'entrée de la carrière (courbe bleue) est synchrone des fluctuations de niveau du Loing (courbe verte) mais que la portion de nappe située en amont de la carrière, au droit du plateau, tamponne quelque peu cet impact (courbe rouge).

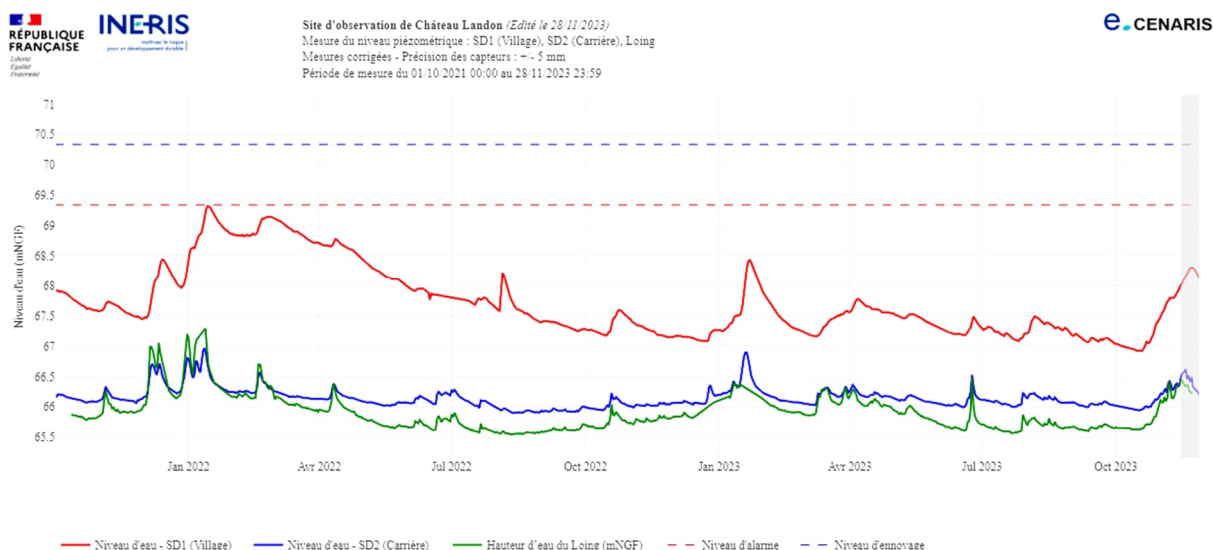


Figure 50. Suivi hydrologique et hydrogéologique de la carrière souterraine Royer (données Ineris)

e) Conclusion

Sachant que les témoins de l'effondrement de 1910 avaient constaté, quelques heures auparavant, des remontées d'eau souterraine par les puits creusés au fond de l'ancienne carrière, il a été possible de proposer la reconstitution suivante du scénario de cet effondrement :

- après plusieurs jours de précipitations survenues sur des sols gelés, l'épisode pluvieux du 20 janvier 1910 engendre une crue centennale du Loing et de ses affluents, inondant entièrement la plaine alluviale ;
- l'infiltration des eaux d'inondation fait monter le niveau de la nappe alluviale, créant un effet de « barrage hydraulique » vis-à-vis de la nappe de la craie qui lui est connectée ;
- du fait de son inertie, celle-ci n'entre en crue que le lendemain et l'eau vient buter contre ce barrage hydraulique ; son niveau remonte rapidement en bordure de la vallée et déborde dans les anciens quartiers de la carrière souterraine qu'elle inonde ;
- la résistance à la compression des piliers de craie chute alors en quelques heures, entraînant l'effondrement en masse de l'ensemble de la carrière souterraine, puis du coteau.

4.2.3 Effondrement de Clamart et Issy-les-Moulineaux (92)

Le 1^{er} juin 1961, une carrière souterraine de craie s'effondrait sur le territoire des communes de Clamart et d'Issy-les-Moulineaux (92), entraînant la destruction d'un quartier urbain (Figure 51) et faisant 21 morts et plus de cinquante blessés. L'analyse hydroclimatique de cette catastrophe s'est avérée plus complexe que prévu en raison du peu de données hydrologiques et surtout hydrogéologiques disponibles pour cette période (Gombert et Cherkaoui, 2011b). Cette carrière de craie avait été exploitée jusqu'en 1880 entre 39 et 54 m de profondeur par rapport au plateau, et il existait au-dessus une autre carrière souterraine peu profonde (vers 5 m sous le plateau) qui avait exploité les calcaires du Lutétien (Duval, 2011). La carrière de craie était divisée en deux niveaux dont un niveau inférieur qui était déjà partiellement ennoyé sur quelques dizaines de centimètres de hauteur par l'eau de la nappe de la craie depuis au moins 1943, voire depuis les années 1910.

a) Contextes géographique et géologique

On se trouve ici sur le coteau de la rive gauche de la Seine qui passe à environ 500 m au nord-ouest et qui coule vers 30 m d'altitude (Figure 51 à gauche). L'ancienne carrière exploitait la craie du Sénonien sur deux niveaux situés respectivement à 39 et 54 m de profondeur, soit 44 et 29 m NGF. L'altitude du sol était de l'ordre de 80 à 90 m NGF. La craie est ici surmontée d'une quarantaine de mètres de formations du Tertiaire (Figure 51 à droite) : marnes, argiles, sables, calcaires.

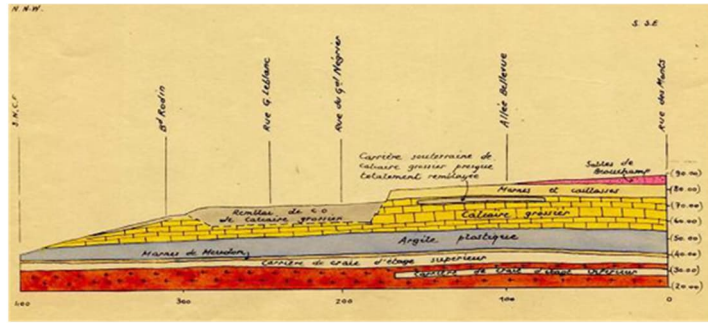


Figure 51. Localisation de la carrière effondrée de Clamart (ovale jaune, à gauche) et coupe géologique schématique (à droite) (d'après Duval, 2011)

b) Analyse climatique

Les données de précipitations ont été acquises auprès de Météo France sur trois stations qui encadrent la zone d'étude : Meudon, Bagneux et Clamart. Elles ont été analysées au pas de temps mensuel pour la période allant de janvier 1941 à décembre 1960 à la station de Clamart, à l'exception de la période 1953-1959 où les données ont dû être acquises à la station de Meudon. Les données manquantes à la station de Clamart ont ensuite été recalculées grâce à une régression linéaire réalisée sur les données de 1953 et de 1960 entre les précipitations de Clamart et de Meudon.

La moyenne annuelle des précipitations au cours de la période 1941-1960 est de 608 mm avec, jusqu'en 1952, la succession de cycles de deux à quatre années humides et d'une année sèche. A partir de 1953, on observe cinq années sèches consécutives entrecoupées de deux années parmi les plus humides de la décennie, dont l'année 1960 avec plus de 700 mm. Les conditions pluviométriques de l'année 1961, où s'est produit l'effondrement, étaient donc à la reprise des précipitations après un cycle de sécheresse débuté 8 ans auparavant.

Dans le détail, les mois précédant l'effondrement ont été caractérisés par une accélération de ce cyclage : les mois de juillet 1960 à janvier 1961 ont été très pluvieux, les mois de février à avril 1961 ont montré un déficit de précipitations, et le mois de mai qui a immédiatement précédé l'effondrement a de nouveau été très pluvieux. A l'échelle journalière, on note que 93 % des précipitations du mois de mai 1961 se sont concentrées sur la dernière semaine précédant l'effondrement, avec notamment 48 mm sur la seule journée du 25 mai 1961 (Figure 52).

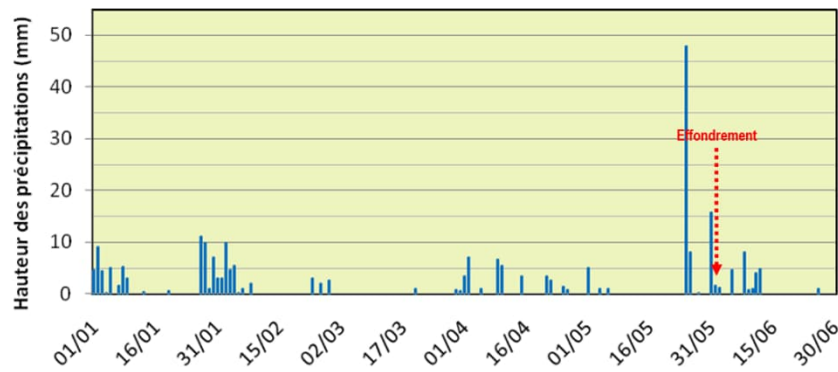


Figure 52. Précipitations journalières de janvier à juin 1961 à la station de Clamart (Gombert et Cherkaoui, 2011b)

c) Analyse hydrologique

La nappe de la craie qui envoyait les niveaux bas de la carrière effondrée était probablement à l'équilibre hydraulique avec l'eau de la Seine ou de sa nappe alluviale. Les niveaux et débits de la Seine ont donc été analysés. Le débit interannuel moyen mesuré à Paris (au Pont d'Austerlitz, à 10 km en amont) est de 319 m³/s au cours du 20^e siècle. L'année 1961, avec un débit moyen de 279 m³/s, apparaît comme une année moyenne qui suit deux autres années moyennes, et une année de très hautes eaux en 1958. En raisonnant au pas de temps mensuel, on constate que le débit de la Seine était faible au cours du mois précédant l'effondrement. Au pas de temps journalier, le fleuve était déjà entré en étiage estival lors de la survenue de l'effondrement (Figure 53) : sa hauteur d'eau n'était en effet que de 0,89 à 1,13 m, inférieure à sa cote interannuelle moyenne de 1,20 m.

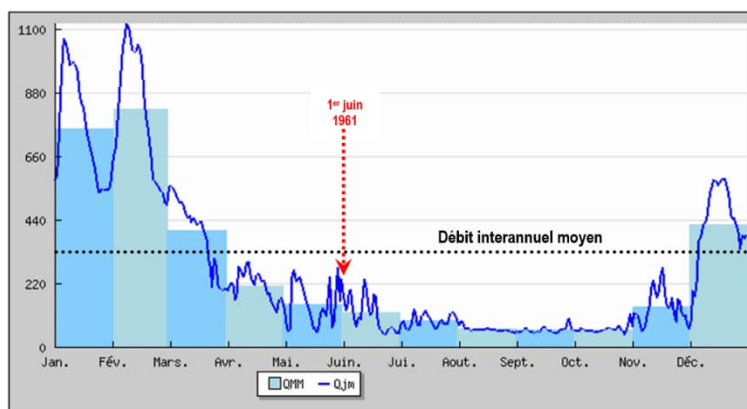


Figure 53. Débit journalier moyen de la Seine au pont d'Austerlitz à Paris en 1961 (Gombert et Cherkaoui, 2011b)

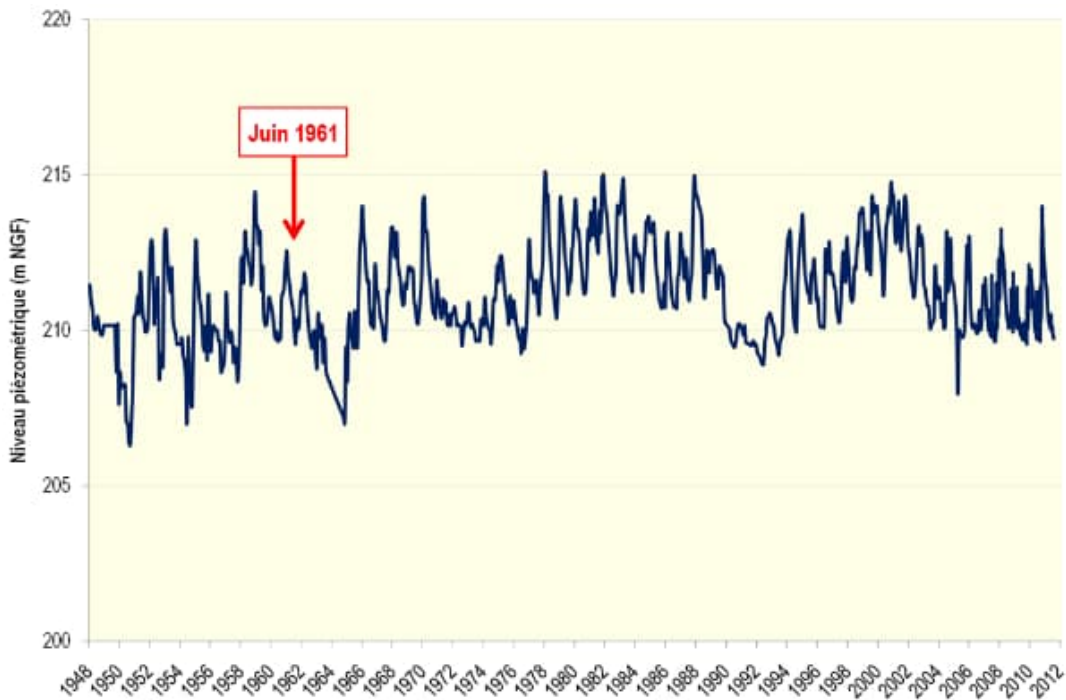
d) Analyse piézométrique

Il existe plusieurs formations aquifères au droit du site. De bas en haut, il s'agit de la craie, des calcaires lutétiens, des marnes et caillasses et des sables de Beauchamp. Les deux premières sont indépendantes sur le plan hydraulique car séparées par la formation des argiles sparnaciennes réputées imperméables.

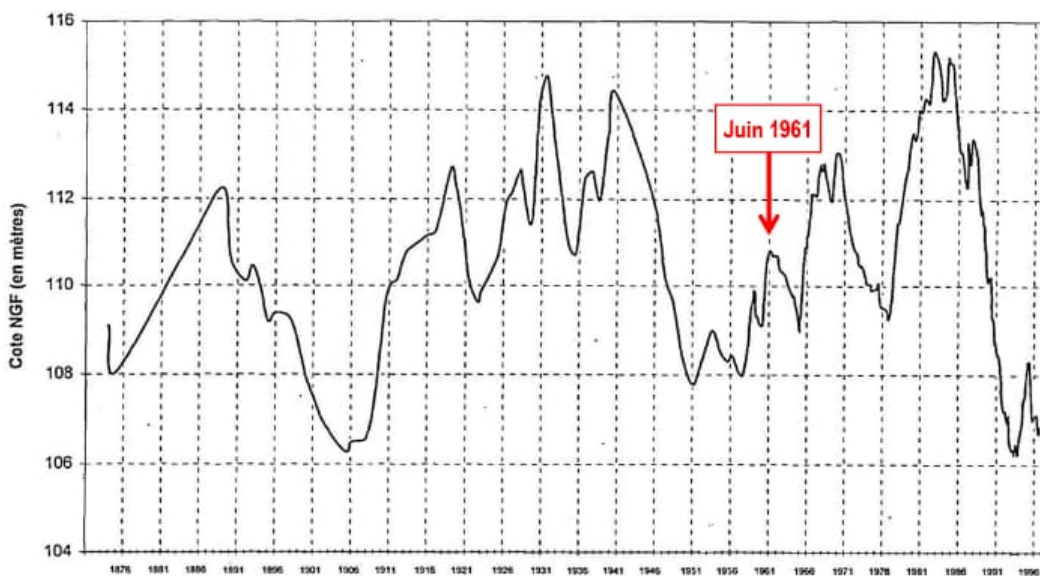
Avant l'effondrement de la carrière, son niveau inférieur était localement inondé sous quelques décimètres d'eau issue de la nappe de la craie en équilibre avec la Seine. En 1950, une forte venue d'eau avait été observée au cours d'une visite du niveau supérieur, provenant vraisemblablement des calcaires lutétiens sus-jacents (Duval, 2011) mais cela semble avoir été un évènement isolé et localisé. L'étude hydrogéologique post-accident a donc principalement porté sur de possibles fluctuations de niveau de la nappe de la craie. Pour cela, la piézométrie de cette nappe a été reconstituée au droit de la carrière effondrée à partir des rares chroniques disponibles et selon le raisonnement suivant : (i) récupération des chroniques piézométriques de l'année 1961 et des années précédentes sur les ouvrages disponibles et relativement éloignés de la zone d'étude, (ii) ajustement statistique avec les ouvrages les plus proches du site mais dont la chronique ne remonte pas jusqu'à l'année 1961 et (iii) reconstitution de la piézométrie de la période 1960-1961 au droit du site.

Parmi les 292 piézomètres suivis par l'agence de bassin Seine-Normandie, le plus représentatif des conditions hydrogéologiques de Clamart est celui de Perdreauxville : il se trouve à 50 km en aval, près de Mantes-la-Jolie, non loin de la Seine qui tamponne fortement ses fluctuations piézométriques comme cela doit être le cas à Clamart. Ce piézomètre peut donc servir de référence pour le site de Clamart sauf qu'il n'existe que depuis 1969. Il a donc fallu reconstituer l'évolution probable de son niveau piézométrique en se basant sur d'autres piézomètres dont les chroniques remontaient jusqu'à l'année 1961, et en tenant compte d'une nécessaire période de recouvrement avec ce dernier. Seuls deux ouvrages satisfaisant à ces conditions ont pu être trouvés (Figure 54) : le forage 03272X0004 de Toury (Eure-et-Loir) situé à 70 km de Clamart mais dans le bassin de la Loire et dans la nappe des calcaires de Beauce, et le puits 03314X1035 de Coulours (Yonne), implanté dans la nappe de la craie du bassin de la Seine mais à 120 km de Clamart.

Dans les deux cas, l'année 1961 apparaît comme une année de piézométrie moyenne sans écarts notables compte tenu de la précision des mesures.



a) Nappe de la craie à Coulours (89)



b) Nappe des calcaires de Beauce à Toury (28)

Figure 54. Chroniques piézométriques des deux ouvrages mesurés de part et d'autre de l'année 1961 (document AESN à gauche et BRGM à droite, in : Gombert et Cherkaoui, 2011b)

Sur la base de ces documents, on a ensuite recherché la meilleure régression statistique avec les mesures réalisées à Perdreaux. Malgré la différence de réactivité entre la nappe des calcaires de Beauce et celle de la craie, c'est le piézomètre de Toury qui s'est révélé le plus intéressant pour reconstituer la chronique piézométrique de celui de Perdreaux autour de l'année 1961 (Figure 55). Au final, l'analyse du comportement à long terme des nappes régionales (craie et calcaires de Beauce) laisse penser qu'il n'y a pas eu de variations significatives du niveau piézométrique de la nappe de la craie au droit du site de Clamart au moment de l'effondrement ou peu avant. La situation piézométrique régionale était calme et correspondait à une période de niveau moyen de la nappe de la craie faisant suite à un cycle d'étiage pluriannuel.

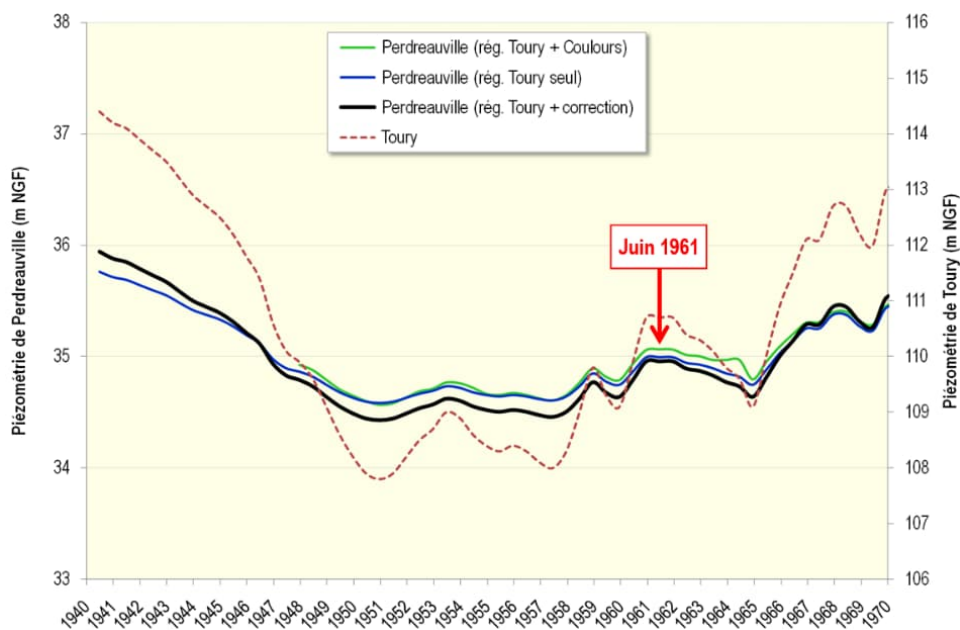


Figure 55. Reconstitution de la piézométrie à Perdreauville de 1940 à 1970 en fonction des données de Toury et de Coulours (d'après Gombert et Cherkaoui, 2011b)

e) Fuites d'eau

Quelques facteurs anthropiques potentiellement aggravants ont été notés peu avant l'effondrement :

- des travaux de terrassement étaient en cours en lisière est du site et des chocs consécutifs à l'utilisation d'une pelle mécanique ont été ressentis par les riverains ; ces travaux ont en outre provoqué la rupture d'une canalisation d'eau qui a libéré environ 100 m³ d'eau en 2 h quelques temps avant l'effondrement ; cette eau s'est infiltrée dans les terrains susjacents à la carrière ;
- un robinet de purge du système d'arrosage du stade, situé au nord-ouest du site, est resté ouvert par erreur au cours des trois premières semaines de mars, ce qui a engendré le déversement de 2500 m³ d'eau ; rien n'indique toutefois que l'eau ait débordé du dispositif de purge qui la dirige vers le réseau d'égouts ; par ailleurs, cette fuite ne correspond qu'à un débit moyen de 5 m³/h et il est donc possible qu'il n'y ait pas eu de débordement du dispositif d'évacuation ni d'infiltration significative dans les terrains.

f) Conclusion

Les eaux en présence sur le site peuvent avoir trois origines naturelles (nappe, cours d'eau, précipitations) et une origine artificielle (rupture de canalisation). Aucun élément n'indique qu'il ait pu se produire un événement piézométrique ou hydrologique significatif peu avant l'effondrement survenu le 1^{er} juin 1961 : la nappe de la craie était à un niveau normal à bas, et la Seine se trouvait en conditions de basses eaux. En revanche, quelques jours avant l'effondrement, des précipitations anormalement élevées se sont produites (notamment le 25 mai 1961) ainsi qu'une fuite de réseau d'eau au droit du site.

4.2.4 Effondrement de Naujan et Postiac (33)

Le 13 mars 2021, un effondrement généralisé est survenu à l'aplomb d'une partie de l'ancienne carrière souterraine abandonnée de calcaire Bellegarde, sur la commune de Naujan-et-Postiac, en Gironde (Lecomte et Pilch, 2022 ; Renaud, 2023). Cet effondrement a affecté en surface une zone quasi-circulaire d'environ 50 m de diamètre sur 5 à 6 m de profondeur. Après une description succincte du lieu où s'est produit l'effondrement, l'état des principaux paramètres hydroclimatiques susceptibles d'avoir joué un rôle dans son déclenchement est passé en revue : précipitations, hauteur et débit des cours d'eau, niveau piézométrique de la nappe.

a) Contextes géographique et géologique

Le secteur affecté par l'effondrement se trouve au lieu-dit Bellegarde, à l'extrémité d'un éperon dominant le ruisseau de Vincène à sa confluence avec l'Engranne (Figure 56). Le profil topographique de la butte de Bellegarde montre que la zone effondrée se trouve à 54 m d'altitude et qu'elle domine la vallée de

l'Engranne qui coule vers 14 m NGF au sud, et celle d'un petit affluent dont le thalweg se trouve vers 30 m NGF au nord. Sur le plan géomorphologique, l'effondrement se trouve en configuration de crête, résultat d'une érosion régressive avec deux versants formant un angle aigu. Dans ce cas particulier, les zones de détente mécanique liées aux deux vallées ont tendance à devenir subparallèles et la totalité de la crête est alors potentiellement soumise à une double fracturation. Cette configuration est donc particulièrement propice à l'infiltration d'eaux météoriques du fait de la présence de nombreuses fractures ouvertes.

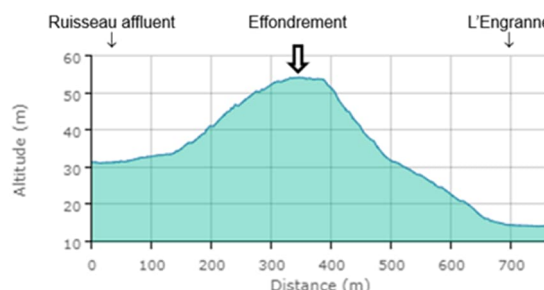
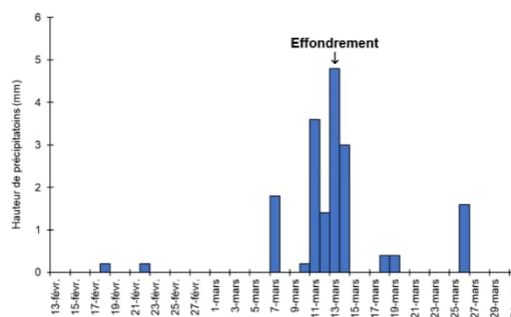
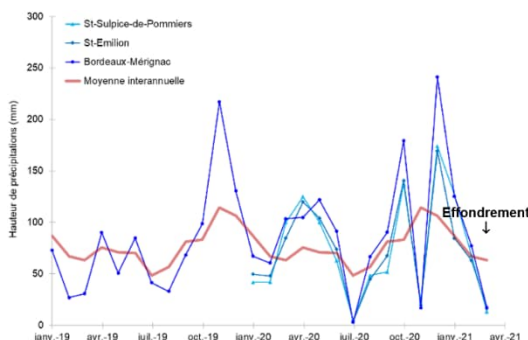


Figure 56. Localisation topographique de la zone effondrée (ovale rouge, à gauche) et profils topographique NW-SE de la butte de Bellegarde (à droite) (d'après GéoPortail)

b) Analyse climatique

Les observations météorologiques locales ont fait état de facteurs aggravants au cours des mois qui ont précédé l'effondrement, sous la forme de pluies abondantes « occasionnant des surcharges reprises par les piliers et des infiltrations dans la carrière¹³ ». Il n'existe pas de station météorologique à Naujan-et-Postiac et les stations les plus proches se trouvent à St-Sulpice-de-Pommiers (13 km au sud) et à St-Emilion (14 km au nord). Néanmoins, les valeurs mesurées à ces deux stations sont comparables (Figure 57a), y compris avec celles de la station de Bordeaux-Mérignac, située à 35 km à l'ouest mais qui a l'avantage d'être suivie depuis plus longtemps, et de disposer ainsi d'une fiche synthétique des normales climatiques sur la période 1991-2020.

Au cours du mois de mars 2021, le Bulletin climatologique mensuel régional de MétéoFrance a fait état de conditions anticycloniques dominantes qui ont éloigné ou atténué les perturbations. Les pluies ont donc été faibles sur toute la région Nouvelle-Aquitaine et sont restées déficitaires par rapport à la moyenne. Cela se voit bien sur la Figure 57b qui montre 7,0 mm de précipitations dans la semaine précédant l'effondrement, et seulement 7,4 mm un mois avant. Le jour même, il n'est tombé que 3 à 5 mm de pluie aux trois stations météorologiques étudiées (Figure 57b).



a) Données mensuelles aux trois stations

b) Données journalières à Bordeaux-Mérignac

Figure 57. Hauteurs de précipitations mesurées (sites [meteociel.fr](https://mteociel.fr) et meteo60.fr)

En revanche, l'examen des données pluviométriques de la dernière décennie à la station de Bordeaux-Mérignac est intéressant (Figure 58). Il montre que le mois de décembre 2020 a été le plus pluvieux de la période 2014-2021 avec 241 mm alors que la moyenne attendue était de 106 mm. Il en va de même

¹³ <https://observatoire-risques-nouvelle-aquitaine.fr/risques-naturels/risques-nouvelle-aquitaine-un-effondrement-de-terrain-sest-produit-le-13-mars-2021-sur-la-commune-de-naujan-et-postiac-33-au-droit-dune-ancienne-carriere-souterraine/> (consulté le 28 novembre 2023)

des mois d'octobre 2020, janvier 2021 et février 2021. Seul le mois de novembre 2020 et le début du mois de mars 2021, mois de l'effondrement, sont restés plus secs que la normale. Au total, sur le semestre précédent l'effondrement, il est tombé 192 mm de plus que la normale attendue, soit l'équivalent de 2 mois supplémentaires de pluie.

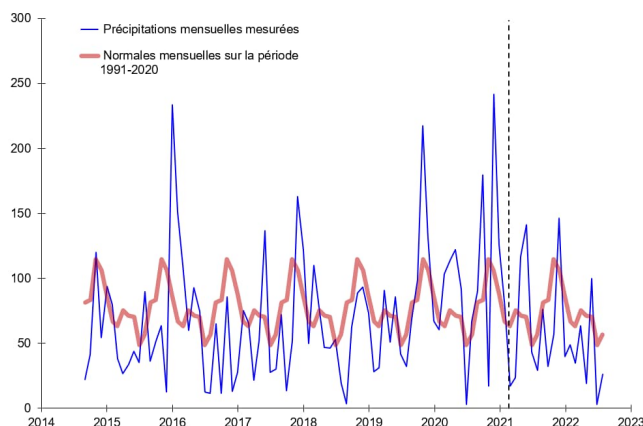


Figure 58. Évolution de la pluviométrie mensuelle à Bordeaux de 2014 à 2022 (données meteo60.fr) (le trait en pointillés matérialise la date de l'effondrement de Naujan-et-Postiac)

Une analyse plus détaillée montre qu'il n'y a pas eu d'évènement pluviométrique exceptionnel au cours de l'année précédant l'effondrement, à l'exception du mois de mai 2020 au cours duquel a été atteint le record de précipitations journalières de la période 1991-2020 avec 71 mm. L'année 2020 s'est plutôt caractérisée par un excédent de 26 jours de pluie par rapport à une année normale, dont 20 jours de précipitations supérieures à 10 mm/jour.

c) Analyse hydrologique

L'Engranne est un petit cours d'eau qui se jette dans la Dordogne au nord-est du site. Au cours de l'année qui a précédé l'effondrement, son débit a varié de 0,03 à 16,4 m³/s à la station de Baigneaux, située à 6 km en amont du site. Son débit de crue centennale calculé à cette station correspond pratiquement au débit maximum de 16,9 m³/s atteint le 11 mai 2020. Toutefois, à Baigneaux, le bassin versant ne mesure que 26 km² alors qu'il est d'environ 110 km² au droit de Bellegarde : on peut donc considérer que le débit doit y être environ 3 fois plus fort, et qu'il a ainsi dû varier de 0,1 à 50 m³/s au cours de l'année qui a précédé l'effondrement. Le jour même de l'effondrement, le débit était de 0,15 m³/s à Baigneaux, soit environ 0,45 m³/s à Bellegarde, en légère décroissance depuis la petite crue survenue un mois auparavant. La hauteur d'eau correspondante de l'Engranne a varié de 0,29 à 1,20 m à Baigneaux au cours de la période de suivi, avec une hauteur de 0,35 m le jour de l'effondrement (Figure 59). Il n'est pas possible d'estimer la hauteur d'eau exacte atteinte au droit de Bellegarde lors de l'effondrement mais celle-ci n'a pas dû être importante car il est certain que le ruisseau n'était pas en crue.

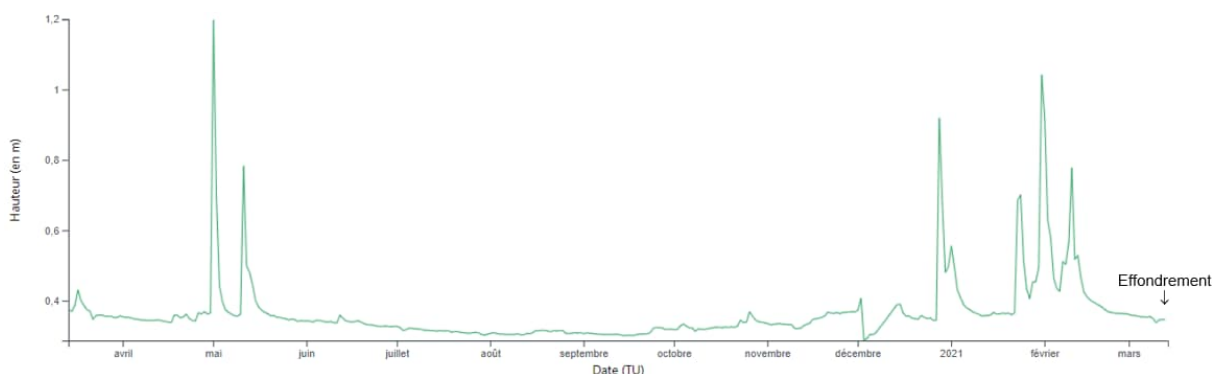


Figure 59. Hauteur d'eau de l'Engranne à Baigneaux de février 2020 à mars 2021 (Source : HydroPortail)

d) Analyse hydrogéologique

L'ancienne carrière souterraine de Bellegarde exploitait le calcaire à Astéries qui est également une roche réservoir potentiellement aquifère. Cependant, les données piézométriques manquent à proximité immédiate du site, ou elles sont anciennes et peu représentatives de l'état de la nappe au moment de l'effondrement (Tableau 12). Il apparaît en outre que ces ouvrages sont implantés au milieu d'un plateau ou en fond de vallée, et qu'il est donc peu probable que leur niveau piézométrique reflète celui de Bellegarde qui se trouve sur une crête drainée sur trois de ses côtés.

Tableau 12. Mesures piézométriques disponibles autour de Naujan-et-Postiac (d'après InfoTerre)

Commune	Date de mesure	Distance	Niveau piézométrique (m NGF)
Rauzan	1970	4 km à l'est	52
Romagne	1970	4 km au sud-ouest	81
Espiet	1957 à 1971	7 km au nord-ouest	31 à 40

Quelques ouvrages relativement éloignés et/ou implantés dans d'autres formations aquifères disposent cependant d'une chronique piézométrique intéressante. Il s'agit :

- dans les calcaires à Astéries, des forages du Pout, à 14 km au nord-ouest, et de Verdelaïs, à 24 km au sud-ouest ;
- dans les alluvions de la Dordogne, des forages de Saint-Laurent-des-Combes, à 10 km au nord, et de Mouliets-et-Villemartin, à 12 km au nord-est, ;
- dans les sables de l'Eocène, du forage de Génissac situé à 9 km au nord-ouest.

En regroupant leurs niveaux piézométriques sur un même graphique, on constate néanmoins une certaine similarité qui laisse présager un comportement global comparable de ces différentes nappes en réponse aux mêmes conditions climatiques (Figure 60). Ainsi, au cours des mois qui ont précédé l'effondrement, ces nappes ont toutes réagi aux fortes précipitations qui se sont produites. Elles ont atteint leur niveau maximum en février 2021, soit environ un mois avant l'effondrement : il s'agit là du maximum observé au cours des 14 à 16 ans de suivi disponible, et même jusqu'à 50 ans en arrière pour la nappe des calcaires à Astéries de Verdelaïs qui est suivie depuis longtemps.

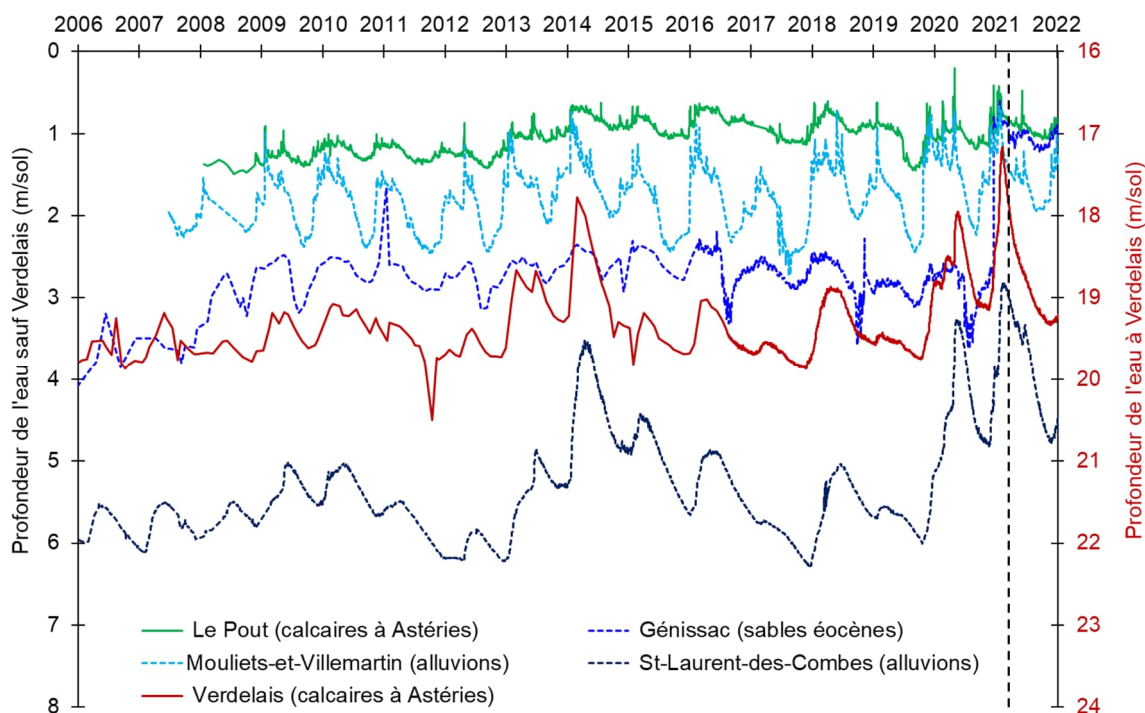


Figure 60. Evolution du niveau piézométrique aux alentours de Naujan-et-Postiac (Source : ADES)
(Le trait en tiretés représente la date de l'effondrement)

e) Conclusion

L'ancienne carrière souterraine de Bellegarde située sur la commune de Naujan-et-Postiac s'est effondrée le 13 mars 2021.

Le ruisseau qui borde le site de Bellegarde, l'Engranne, a eu un comportement exceptionnel 10 mois avant l'effondrement, avec une crue de fréquence cinquantennale. Néanmoins, son débit était normal au moment de l'effondrement et au cours des jours qui l'ont précédé.

L'analyse des précipitations a montré qu'aucun épisode pluvieux exceptionnel n'est survenu au cours de l'année qui a précédé l'effondrement, à l'exception d'un record de pluie journalière 10 mois auparavant. En revanche, les 12 mois précédant l'effondrement ont connu un excédent pluviométrique de 307 mm, correspondant à l'équivalent de 4 mois de pluies supplémentaires. Il semble s'être produit un excédent du nombre de jours pluvieux (plutôt qu'un excédent d'intensité pluvieuse) avec notamment 20 jours supplémentaires de précipitations supérieures à 10 mm/jour.

Le niveau piézométrique au droit du site de Bellegarde n'est pas connu mais il pourrait être relativement proche du mur de la carrière effondrée. Or, la réponse des nappes aux diverses sollicitations pluviométriques a été nette : elles ont atteint leur maximum piézométrique des 15 dernières années en février 2021, c'est-à-dire au cours du mois qui a précédé l'effondrement. L'amplitude de la remontée piézométrique, de l'ordre de 2 m, est relativement modeste dans les nappes étudiées mais il est possible qu'elle ait été supérieure de quelques mètres au droit du site de Bellegarde étant donné sa configuration géomorphologique. Au vu des données disponibles, on ne peut donc pas exclure qu'il ait pu se produire un ennoyage temporaire et localisé de la carrière au cours du mois qui a précédé son effondrement.

En conclusion, l'eau n'apparaît pas comme un mécanisme déclencheur de l'effondrement mais son excès au cours de l'année qui a précédé l'effondrement – tant sur le plan climatique, qu'hydrologique ou hydrogéologique – n'a pu qu'aggraver les conditions de survenue d'un tel événement.

Néanmoins la carrière se trouve dans une position géomorphologique sensible, à savoir sur une crête soumise à un « appel au vide » sur trois de ses côtés. Dans ce cas, les zones de détente mécanique liées aux deux vallées ont tendance à devenir subparallèles et la totalité de la crête est alors potentiellement soumise à l'influence cumulée des deux directions de fracturation. Ce point est aggravé par la faible profondeur de la carrière dont l'étage supérieur se développe entre 5 et 10 m seulement sous la surface du plateau, et qui est donc soumise en outre à la décompression superficielle. Cette configuration est favorable à l'existence de nombreuses fractures et fissures de décompression, et donc à la pénétration d'eau météorique en cas de précipitations. Une étude du comportement HM des terrains de recouvrement ainsi que de l'impact des variations de leur poids permettrait peut-être de statuer sur ce point.

4.3 Synthèse

L'impact des conditions hydroclimatiques exceptionnelles sur les effondrements a été étudiée à deux échelles.

La première concerne un essai de mise en corrélation des dates d'effondrements avec celles des épisodes pluvieux « mémorables » recensés par Météo France depuis le XVIII^e siècle. Il en résulte que seuls deux ou trois effondrements (dont celui de Château-Landon en 1910) peuvent être liés à la survenue de l'un de ces épisodes pluvieux. Dans l'état actuel des données, une relation pluies extrêmes-effondrements ne concernerait donc que quelques pourcents des effondrements recensés.

La seconde relève d'une approche plus naturaliste. Elle s'appuie sur les observations climatologiques ou météorologiques notées par les personnes qui ont signalé les effondrements. Il s'agit le plus souvent d'épisodes de pluies ou de crues particulièrement longs ou intenses sans toutefois devenir extrêmes. Sur ces bases, on remarque que 15 % des effondrements recensés sont survenus dans des contextes climatiques anormalement pluvieux (dont ceux de Clamart en 1961 et de Naujan-et-Postiac en 2021). Ces résultats corroborent ceux d'autres auteurs qui ont remarqué une sur-représentation des désordres en surface à la suite de périodes anormalement humides (notamment Noury et al. (2019) en Normandie).

Il résulte de ce travail que les événements hydroclimatiques susceptibles d'induire l'effondrement de tout ou partie d'une carrière souterraine en roche sensible appartiennent à trois types distincts : un événement isolé d'intensité extrême, un événement d'intensité importante mais non extrême survenant au cours d'une période anormalement longue et humide, ou une succession d'événements « normaux » susceptibles de créer, dans la durée, une période particulièrement humide.

2 Conclusions

L'Ineris travaille sur la problématique du vieillissement des carrières souterraines depuis de nombreuses années. Ce document présente une synthèse des connaissances acquises sur ce sujet.

Dans le cas carrières souterraines abandonnées si la géométrie et la nature des matériaux exploités sont généralement des facteurs importants à ne pas négliger dans la réalisation des diagnostics de stabilité de ces ouvrages, l'occurrence d'un effondrement est souvent liée à des facteurs tiers encore peu connus. La modélisation numérique peut permettre de mieux comprendre les différents mécanismes de rupture et leurs conditions d'apparition, notamment à l'aide d'études paramétriques, pour un type d'exploitation située dans une région donnée. Néanmoins elle nécessite de bien comprendre et de mieux maîtriser les phénomènes pouvant favoriser les instabilités qui sont souvent dépendantes du contexte de l'ouvrage (géologique, géomorphologique, hydroclimatique...).

Ainsi, l'augmentation attendu de la fréquence des événements climatiques forts ou extrêmes a initié les travaux menés par l'Ineris sur l'impact du changement climatique sur le risque d'effondrement des carrières souterraines abandonnées. Associé à plusieurs autres facteurs intrinsèques, le changement climatique pourrait en effet favoriser l'instabilité des carrières souterraines en agissant sur le niveau des nappes d'ennoyage (Gombert et al., 2018), sur l'inondation des parties basses par des crues ou encore sur la percolation d'eau au toit des exploitations peu profondes, mais peu d'études ont été menées pour le démontrer.

L'Ineris a donc commencé à inventorier ces facteurs dans le but de les quantifier. Deux études relatives aux différents contextes géomorphologiques susceptibles de favoriser les instabilités et concernant les carrières proches d'un cours d'eau et supposées de ce fait potentiellement submersibles (à l'instar de la carrière Beaulieu de Château-Landon qui s'est effondrée en 1910 suite à ce type d'évènement) sont présentées dans ce document. Les premiers résultats montrent que le contexte géomorphologique peut représenter un facteur de prédisposition. Ils doivent cependant être confirmés. Par ailleurs nous avons montré le nombre de carrières situées à proximité des cours d'eau est loin d'être négligeable. Si on considère qu'il s'agit là de carrières plus sensibles car potentiellement plus soumises aux effets de l'eau, il est important de réaliser un travail plus approfondi pour identifier parmi ces carrières, celles réellement concernées par un risque d'effondrement. Ces deux analyses préliminaires doivent être poursuivies de manière à obtenir une liste la plus exhaustive possible des différents facteurs aggravants.

Par la suite un important travail de collecte et d'analyse d'archives a été entamé par l'Ineris en 2021 afin de mener une étude historique des effondrements de carrières souterraines abandonnées en France. L'objectif principal est d'apprendre des événements du passé pour mieux gérer les risques dans le futur. Cet inventaire, qui contient à ce jour plus de 500 cas, demande encore à être enrichi car beaucoup d'informations sur le contexte des effondrements sont souvent manquantes et plusieurs régions de France sont sous-représentées (notamment dans le Sud où surviennent souvent des événements hydroclimatiques extrêmes).

Une analyse préliminaire a été menée sur la base de l'inventaire disponible à partir des paramètres d'exploitation : contrainte sur le pilier et élancement. Elle aboutit à la mise en évidence de trois états de caractérisation de la stabilité des piliers : stable, endommagé et en ruine. Cette analyse montre que, dans certains cas, l'évolution de l'état de l'ouvrage est difficile à prédire car elle dépend probablement d'autres facteurs qui, s'ils sont aggravants (comme cela peut être le cas de l'eau ou du contexte géomorphologique), peuvent conduire à un effondrement.

C'est ainsi qu'une seconde étude a été menée sur l'impact des configurations géomorphologiques sur la prédisposition à l'effondrement des carrières souterraines en collaboration avec l'EPRCF33 et Cavité 37. Appliquée aux cas de la Gironde et de l'Indre-et-Loire (zones géologiquement et climatiquement homogènes, issues de l'inventaire), elle montre qu'en fonction de la région le contexte géomorphologique peut représenter un facteur de prédisposition. Néanmoins ces premiers résultats doivent être confirmés d'une part en augmentant la taille des échantillons analysés et, d'autre part, en étudiant d'autres contextes géologiques (gypse) et hydroclimatiques (zone méditerranéenne) dans d'autres régions françaises.

Enfin nos premières investigations sur le lien entre les effondrements et les événements hydroclimatiques montre qu'il y aurait trois types distincts d'évènements susceptibles d'aggraver des instabilités et de mener à l'effondrement de tout ou partie d'une carrière souterraine en roche sensible : un évènement isolé d'intensité extrême, un évènement d'intensité importante mais non extrême

survenant au cours d'une période humide anormalement longue, ou une succession de petits événements susceptibles de simuler, dans la durée, une période particulièrement humide. Cependant, la plupart du temps, ces trois types d'événements hydroclimatiques semblent plutôt générer des désordres d'ampleur modérée (petits effondrements), et non des effondrements de grande ampleur.

Un essai de mise en corrélation des conditions hydroclimatiques avec les dates d'effondrements recensés, dans trois cas d'effondrement de grande ampleur a été réalisé. Là encore il est difficile de trouver un lien direct de cause à effet, sauf pour le cas de la carrière Beaulieu à Château-Landon. Dans la mesure où une telle corrélation existerait bel et bien, sa mise en évidence se heurte pour l'instant à plusieurs biais : le peu de données disponibles (seulement 139 effondrements sont précisément datés sur les 500 recensés), la faible représentativité (pour l'instant) de la partie sud de la France où se produisent environ 60 % des pluies extrêmes, le fait que la plupart des effondrements sont rapportés par des témoins privilégiant les zones où des biens ont été affectés, le fait que certaines zones touchées par des pluies extrêmes sont dépourvues de carrières souterraines (zones de socle ou de montagne), et surtout le fait que l'impact des pluies extrêmes sur l'instabilité d'une carrière souterraine peut se faire sentir plusieurs jours voire plusieurs semaines après leur survenue (absence de relation directe de cause à effet). Ces biais ne pourront être levés qu'en augmentant significativement la taille de l'effectif d'effondrements recensés, en s'intéressant notamment aux régions méridionales, et en filtrant les événements hydroclimatiques pour ne s'intéresser qu'aux seules zones concernées par l'existence de carrières souterraines.

3 Perspectives

Afin de poursuivre ces travaux, plusieurs pistes sont envisagées. Tout d'abord, il est nécessaire à court terme de compléter l'inventaire en traitant toutes les régions où se trouvent des carrières souterraines abandonnées et se rendant aux différentes archives départementales pour collecter plus d'informations. Par ailleurs, il existe une diversité et une multiplicité de documents, non exploités dans cette étude, qui permettraient d'identifier des événements passés : à titre d'exemple, les archives de la Société Nationale des Chemins de Fer (SNCF) peuvent constituer une source d'information importante qui reste à analyser. Lorsqu'il aura atteint une taille suffisante (de l'ordre du millier d'effondrements de grande ampleur), cet inventaire constituera un outil puissant pour mener des rétro-analyses multicritères détaillées des facteurs d'instabilité des carrières souterraines abandonnées. En effet, diverses approches se développent aujourd'hui en France, notamment l'utilisation d'outils d'intelligence artificielle qui nécessite de disposer au préalable d'un vaste échantillonnage de secteurs effondrés mais aussi de secteurs stables pour comparaison. L'analyse des données pourrait permettre, à moyen terme, de repérer les facteurs qui ont un impact majeur sur les instabilités de grande ampleur de carrières souterraines (affaissements ou effondrements) dans le but de proposer un outil d'aide à la décision. Ces éléments pourront également alimenter les critères descriptifs de la base de données nationale des mouvements de terrain de manière à la rendre plus adaptée à ce type de retour d'expérience.

En parallèle, pour bien comprendre les mécanismes de rupture qui peuvent intervenir dans l'apparition de désordres, notamment lors d'événements climatiques extrêmes (charges cycliques sur les piliers liées à l'infiltration d'eau dans les terrains de recouvrement, cycles répétés de saturation-désaturation lors des épisodes de fluctuations piézométriques, lubrification des plans de failles par percolation d'eau, etc.), des travaux de modélisation pourraient être menés sur des cas d'intérêt ciblés par l'inventaire. Ce type de travail a déjà été initié sur le site de Château-Landon (Renault et al., 2018 ; Al Heib et al., 2023) ; il pourra être appliqué avec profit au cas de la carrière Royer dont l'instrumentation par l'Ineris (Conil et al., 2020) a pour objectif d'étudier sur le long terme la déformation de l'ouvrage engendrée par les variations saisonnières, voire par un événement hydroclimatique extrême (s'il venait à se produire dans les années à venir) ;

D'autre part, les événements hydroclimatiques pris en compte actuellement sont liés à un excédent d'eau : pluies extrêmes, fortes crues, remontées importantes de nappes. Or, dans le cas des effondrements naturels (de type karstique), on sait qu'il existe aussi un impact des périodes de sécheresse prolongées et surtout des épisodes de précipitations qui – sans être forcément extrêmes – viennent y mettre fin (Gombert et al., 2014). Par la suite, une réflexion devra être menée sur l'analyse de l'impact des sécheresses exceptionnelles sur la stabilité des carrières souterraines, ainsi que sur l'alternance de plus en fréquente de longues périodes de sécheresse et de pluies, comme ce fut le cas en 2023.

4 Remerciements

Les auteurs remercient :

- l'IGC Paris et en particulier Jules Querleux pour les échanges fructueux sur la problématique liée à l'eau dans les carrières et pour les informations sur les superficies des zones des carrières souterraines recensées dans les départements de Paris et sa petite couronne ;
- Thomas Hauquin directeur d'EPRCF33 et sa collègue Judith Carponsin pour avoir partagé leurs données et leur expérience du terrain ;
- l'ensemble des collaborateurs de Cavités 37, et notamment sa directrice Mandy Mignon, pour avoir pris le temps de sélectionner les cas traités dans ce rapport et pour l'organisation de visites de carrières sur leur territoire ;
- Clara Maghami, étudiante de l'École des Mines de Nancy, qui a réalisé en 2023 un stage à l'Ineris de Master 2 sur le sujet de la stabilité des carrières souterraines en lien avec leur vieillissement et avec le changement climatique.

5 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.
- Al Heib M., Lecomte A.; Conil N., Synthèse - Analyse de l'interaction entre deux aléas : cavité et inondation, Rapport Ineris, Ineris - 212836 - 2741657
- Al Heib M, Conil N, Gombert P, 2023. Influence of geology and topography on the occurrence of mine massive collapse—back-analysis of a historical collapse of chalk mine (France). *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, <https://doi.org/10.1007/s10064-023-03234-z>
- Bolot N, Devos A, Pierre G, Chalumeau L, Lejeune O, 2014. Détente mécanique et dynamique de versant dans l'Eocène de l'est du bassin de Paris, France. *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 20/2 (2014) : 121-132.
- Bonvallet J, Chambon C, 1980. Détermination d'un coefficient de sécurité dans les exploitations par chambres et piliers abandonnées. *Revue Française de Géotechnique*, Novembre 1980, n°3 : 15-29.
- 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.
- Conil N, Hauquin T., Gombert P, Al Heib M, Maghami C., 2024, Rétro-analyse d'effondrements de carrières souterraines abandonnées (France), Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur – Poitiers 2024, accepté.
- Dejean M., 1981, Stabilité et consolidation des exploitations souterraines abandonnées, *Revue Française de géotechnique* numéro 17.
- Delaunay J, 1977. Principe d'une étude des risques liés aux mouvements du sol et du sous-sol dans un domaine d'échelle régionale. Application, typologie des mouvements et pathologie des terrains en Touraine. Rapport BRGM 77-SGN-215-GTC, avril 1977, 317 p.
- Devos A, Chalumeau L, Bolot N, Sosson C, Barre E, Lejeune O, Gobance G, 2012. Organisation spatiale de la fracturation de détente mécanique de versant en carrières souterraines. Application aux plateaux des calcaires éocènes du Bassin de Paris. *Physio-Géo*, 6/1 : 243-262. <https://doi.org/10.4000/physio-geo.2819>
- Didier C, Al Heib M, Gombert P, Charmoille A, 2010. Impact du changement climatique sur la stabilité des cavités souterraines : Etat des connaissances. Rapport INERIS DRS-10-103862-00411A, 12/01/2010, 75 p. + annexes.
- Duval C, 2011. Retour d'expérience sur l'effondrement de Clamart du 1er juin 1961. Synthèse bibliographique et analyse technique. Rapport INERIS-DRS-11-117680-09921A
- Esterhuizen G.S, 2006. An evaluation of the strength of slender pillars. SME Annual Meeting, St. Louis, Missouri.
- Gombert P, 1997. Quantification du rôle des paramètres climatiques dans la dissolution karstique. *C.R. Acad. Sci. Paris*, 324/IIa : 17-23.
- Gombert P, Auvray C, Al Heib M, 2013. In-situ and laboratory tests to evaluate the impact of water table fluctuations on stability of underground chalk mines. *Procedia Earth and Planetary Science* 7 (2013) 304-308.
- Gombert P, Cherkaoui A, 2011a. Analyse climatologique, hydrologique et hydrogéologique des effondrements survenus à Château-Landon (77) aux XIX^e et XX^e siècles. Rapport INERIS DRS-11-117680-00812A, 02/03/2011, 61 p. + ann.
- Gombert P, Cherkaoui A, 2011b. Retour d'expérience sur l'effondrement de Clamart (92) du 1^{er} juin 1961. Analyse du rôle de l'eau. Rapport INERIS DRS-11-117680-11123A, 43 p. (non publié).
- Gombert P, Cherkaoui A, 2013. Rôle de l'eau dans la stabilité des carrières souterraines abandonnées et partiellement ou temporairement ennoyées et impact attendu du changement climatique. *Tunnels et Espaces Souterrains*, 240 : 468-482.

Gombert P, Lecomte A, 2018. Etude méthodologique de l'impact du ruissellement sur les risques liés à la présence de cavités abandonnées : application à l'arrondissement de Cambrai. Rapport Ineris DRS-18-168864-00610A, 42 p..

Gombert P, Orsat J, Mathon D, Alboresha R, Al Heib M, Deck O, 2014. Rôle des effondrements karstiques sur les désordres survenus sur les digues de Loire dans le Val d'Orléans (France). Bull Eng Geol Environ, 74/1: 125-140, DOI 10.1007/s10064-014-0594-8.

Gombert P, Thoraval A, Watelet JM, 2018. Geomechanical response of an abandoned chalk mine to multi-annual water table fluctuations. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, <https://doi.org/10.1007/s10064-018-1321-7>

Gourdier S, Noury G, Perrin J, Luu LH, Philippe P, 2017. Retour d'expérience sur les effondrements de cavités dans l'Orléanais suite à la crise météorologique du printemps 2016. CFMS – Journée technique du 4 mai 2017 – Risque Cavités : 35 p.

IPCC, 2023. AR6 Synthesis Report: Climate Change 2023. <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-cycle/> (consulté le 10/01/2024).

Lecomte A, Pilch N, 2022. Effondrement généralisé de Naujan-et-Postiac (33). Observations, données disponibles et premières réflexions. Note Ineris-206836-2733550-v1.0, 22/06/2022, 15 p.

Letourneur J, Dayre M, 1981. Aspects physico-mécaniques et incidences géotechniques de la décompression. In: Bulletin de l'Association de géographes français, 477-478, 58e année, Mars-avril 1981 : 133-138. doi : <https://doi.org/10.3406/bagf.1981.5243>

Loughan FC, 1969. Geological Process: Chemical Weathering of the Silicate Minerals. F. C. Loughnan. Elsevier, New York, 1969, 154 pp.

Lucbèreilh J, 2015. Arrêté portant institution de servitudes d'utilité publique à la demande de la société PAREXGROUP concernant une carrière souterraine anciennement exploitée à Crouzilles et à Trogues. Arrêté préfectoral n° 20098 du 16 mars 2015, Préfecture d'Indre-et-Loire, 8 p.

Martin, C D, Maybee, W G, 2000. The strength of hard rock pillars, Int. J. Rock Mech Min. Sci, vol. 37, pp 1239-1246.

Moiriat D, Pothérat P, Durville JI, Bébien J, 2005. Observations sur la fracturation liée à l'incision d'une vallée - Carrière souterraine des Brillants (Hauts-de-Seine). Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 258-259/4523, Oct.-Nov.-Déc. 2005 : 3-14.

Nédellec JL, Cruchet M, 2003. Etude bibliographique de la typologie des éboulements rocheux et des modes de rupture associés – Applications au contexte de l'île de La Réunion. Rapport BRGM RP-52909-FR, 47 p.

Noury G, Perrin J, Gourdier S, 2018. Rôle des intempéries dans les mouvements de terrain liés aux cavités : retour sur la crise « Loiret » Juin 2018. Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur – Champs-sur-Marne 2018 : 8 p.

Noury G, Pannet P, Meire B, 2020. Mouvements de terrains liés aux marnières (76, 27) – Chroniques temporelles et influence des intempéries. Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur – Lyon 2020 : 7 p.

Kreziak C, Watelet JM, 2016. Analyse et interrogations liées à l'effondrement de la carrière souterraine de craie de Lorroy en 1910. 8. JNGG 2016 "Analyser concevoir et aménager dans la durée", Juillet 2016, Nancy, 9 p.

Renaud V, 2023. Rétroanalyse de l'effondrement de la carrière souterraine de Naujan-et-Postiac. Rapport Ineris – 212824 – 2769616 – v1.0, 28/06/2023, 42 p.

Roberts D. et Esterhuyse J., (sans date), Guidelines for Pillar design in Bord-and-Pillar operations, ISBN: 978-0-7988-5651-5. <https://mandelaminigprecinct.org.za/wp-content/uploads/2021/08/Guideline-Technical-Services-Bord-Pillar.pdf>.

Thomaïdis C, Peragallo J., 2011. Les carrières souterraines de Gironde. Revue Géologues, 169 : 50-53.

Tritsch J.J., Toulemont M., Durville J.L., Pothérat P. (2002). Guide technique : Évaluation des aléas liés aux cavités souterraines. Collection Environnement - Risques naturels, LCPC/INERIS/MATE, 130 p.

Tritsch J.J., (2005) Les mécanismes de ruptures des carrières souterraines abandonnées. Évaluation et gestion des risques liés aux carrières souterraines abandonnées : séminaire de restitution et de valorisation des travaux INERIS -réseau des LPC, May 2005, Paris, France. pp.74-92. Ineris-00972493.

