

Syndicat Intercommunal
Etudes et Prévention des Risques Carrières et Falaises 33

Rapport d'Etude CE_01
26 avril 2024

**Etude globale de la
Grande carrière de Latresne (33360)**
Cartographie, diagnostic et évaluation des aléas

Informations

Intervention pour le compte de : la municipalité de Latresne

Au titre de : Contrat d'étude CE_01 approuvé le 13/08/2020

Lieu d'intervention : Plateau de Latresne

Intervenants diagnostic, relevé
topographique et cartographie : Judith CARPONSIN (Chargée de mission)
Thomas HAUQUIN (Directeur)
Mickaël ANTON (Technicien)

Période d'intervention : août 2020 à avril 2024

Rédaction du rapport : Thomas HAUQUIN (Directeur)
Judith CARPONSIN (Chargée de mission)
Mickaël ANTON (Technicien)



Sommaire

1. Eléments de contexte et objectifs de l'étude	p. 3
1.1 Les carrières de Gironde	p. 3
1.2 La Grande carrière de Latresne	p. 3
1.3 Objectifs de l'étude	p. 4
1.4 Méthode employée	p. 4
2. Exploration - Description générale de la carrière	p. 5
2.1 Caractéristiques d'exploitation	p. 5
2.2 Emprise et volume de la carrière	p. 5
2.3 Conditions d'accès	p. 6
2.4 Conditions de circulation	p. 7
2.5 Limites incertaines	p. 7
2.6 Présence d'eau	p. 7
2.7 Conditions atmosphériques	p. 8
2.8 Dimensions moyennes des galeries et des piliers par étage	p. 8
2.9 Recensement et caractérisation des puits verticaux	p. 8
3. Relevé topographique précis de la carrière	p. 9
3.1 Scan 3D	p. 9
3.2 Géoréférencement des images 3D	p. 10
3.3 Cheminements topographiques	p. 10
3.4 Evaluation des erreurs cartographiques liées aux cheminements topographiques	p. 11
3.5 Carrières non cartographiées	p. 14
4. Identification des principaux aléas et procédure générale d'évaluation	p. 15
4.1 Le comportement mécanique d'une carrière et les aléas associés	p. 15
4.2 Connaissances relatives aux mouvements de terrains généralisés	p. 15
4.3 Connaissances relatives aux effondrements localisés	p. 16
4.4 Procédure générale d'évaluation des aléas	p. 16
5. Evaluation des aléas de mouvement de terrains généralisé	p. 17
5.1 Evaluation du délai d'occurrence	p. 17
5.2 Evaluation de l'intensité	p. 17
5.3 Evaluation de l'aléa à partir de la prédisposition	p. 18
5.4 Ajustement de l'aléa final	p. 22
5.5 Interprétation des niveaux d'aléa	p. 22
6. Evaluation des aléas d'effondrement localisé	p. 22
6.1 Evaluation du délai d'occurrence	p. 22
6.2 Evaluation de l'intensité	p. 23
6.3 Evaluation de l'aléa	p. 23
7. Cartographie des aléas	p. 23
7.1 Marge de sécurité	p. 23
7.2 Bilan chiffré du zonage des aléas	p. 24
8. Conclusions et recommandations du syndicat	p. 25

1. Eléments de contexte et objectifs de l'étude

1.1 Les carrières de Gironde

L'inventaire réalisé par le Bureau des Carrières Souterraines du conseil départemental dénombre, sur le département de la Gironde, plus de 1 400 carrières souterraines de pierres creusées dans la formation géologique des *Calcaires à Astéries* (époque Oligocène, -30 Ma). La superficie cumulée de toutes les carrières est d'environ 1 900 Hectares, sachant qu'il existe des carrières de toutes dimensions (quelques centaines de mètres carrés à quelques centaines d'hectares).

Nous ne savons pas précisément à quelle époque a débuté l'exploitation des carrières, mais elle est probablement très ancienne. Avant le 18^{ème} siècle, on suppose que l'extraction de pierre se faisait majoritairement à ciel ouvert et peut-être localement dans de petites carrières souterraines ouvertes pour répondre à des besoins ponctuels en matériaux de construction. L'activité extractive souterraine à grande échelle aurait eu lieu principalement aux 18^{ème} et 19^{ème} siècles, pour répondre à l'importante demande en pierres de construction de la ville de Bordeaux.

Avant l'installation des voies ferrées, le transport des pierres jusqu'à l'agglomération bordelaise se faisait essentiellement par bateau. Pour des raisons pratiques évidentes, les carrières étaient donc majoritairement implantées à proximité de la Garonne, de la Dordogne et de l'estuaire de la Gironde, principalement en rives droites où le calcaire est affleurant. Le secteur géographique des bords de Garonne, allant de la commune de Latresne, au Nord, jusqu'à la commune de Lestiac-sur-Garonne, au Sud, comporte près d'un tiers de la superficie totale des carrières du Département.

1.2 La Grande carrière de Latresne

La Grande carrière du plateau de Latresne, qui est l'objet de la présente étude, correspond à la plus vaste exploitation de pierres de la commune. Elle fait également partie des plus vastes carrières de Gironde. Son emprise au sol est d'environ de 43 Hectares et elle a été exploitée sur plusieurs étages partiellement superposés.

On suppose que l'exploitation de cette carrière pour la pierre a dû être stoppée définitivement au moment de la seconde guerre mondiale, ou peu de temps après. Mais la carrière n'a pas été immédiatement abandonnée après la fin de l'activité extractive. Certaines parties de la carrière ont été réutilisées pour cultiver des champignons de Paris. Il s'agissait d'une pratique courante à cette époque, car les conditions d'humidité et de température en souterrain sont particulièrement favorables. Il semblerait que cette activité, dont on aperçoit encore les traces dans certaines galeries, fut devenue peu rentable et fut donc définitivement arrêtée dans les années 1970-80. Aujourd'hui, la Grande carrière de Latresne, comme pratiquement toutes les autres carrières de Gironde, est totalement à l'abandon.

La Grande carrière de Latresne se distingue de la plupart des autres carrières de la zone par le nombre important d'habitations récentes situées au-dessus d'elle. On dénombre 177 habitations situées à l'aplomb directe de la carrière. Etant donné l'importance des enjeux humains et bâtis déjà concernés par la carrière et pour limiter les nouvelles constructions dans des zones potentiellement à risque, la municipalité a missionné le bureau d'études ANTEA au début des années 2010 pour procéder à une première étude globale de la carrière. Un géomètre a été missionné dans le cadre de cette étude pour effectuer un relevé topographique et améliorer la délimitation géographique des contours de la carrière, qui avait déjà été en partie réalisée par le Bureau des Carrières Souterraines du conseil départemental. A partir du plan ainsi produit, ANTEA a identifié des secteurs présentant des aléas potentiels de mouvement de terrains, en raisonnant de manière synthétique, à grande échelle, sans tenir compte des caractéristiques précises de l'intérieur de la carrière.

En 2016, le préfet de Gironde a prescrit l'élaboration d'un Plan de Prévention des Risques de Mouvements de Terrains spécifique pour la commune de Latresne. Des études complémentaires ont

été réalisées à cette occasion et les aléas de mouvements de terrains au droit de la Grande carrière ont été réévalués. Mais il s'agit là encore d'une évaluation à grande échelle ne tenant pas compte des caractéristiques locales de l'intérieur de la carrière. Quelques diagnostics géotechniques ont également été réalisés ponctuellement par divers bureaux d'études, à l'échelle de parcelles individuelles, à la demande de leurs propriétaires.

Mais, depuis qu'elle a été abandonnée, la carrière n'a jamais fait l'objet d'un diagnostic complet et précis de son état de dégradation et *a fortiori* n'a pas été suivie de manière régulière au cours du temps. De plus, les contours intérieurs de la carrière, c'est-à-dire les dimensions et les formes des piliers, des galeries et des stots (explication à la section 2.1) qui la constituent, n'ont pas été précisément caractérisées. Ces caractéristiques sont pourtant très importantes pour évaluer les aléas à l'échelle des parcelles individuelles.

1.3 Objectifs de l'étude

La municipalité de Latresne a missionné notre syndicat, dont elle est un des membres fondateurs, pour que nous procédions à une étude exhaustive de la Grande carrière dans le but d'identifier les aléas de mouvement de terrain à l'échelle des parcelles, sur la base de l'état visuel de dégradation des différentes parties de la carrière et sur la base de leurs caractéristiques géométriques.

En parallèle de l'étude réalisée pour le compte de la municipalité, des habitants du plateau de Latresne concernés par la Grande carrière ont fait appel à nos services pour obtenir des diagnostics détaillés de la carrière à l'échelle de leurs parcelles. Toutes les données recueillies à l'occasion de ces études particulières ont été intégrées dans l'étude globale de la carrière.

1.4 Méthode employée

Notre étude a débuté en janvier 2020 et s'est poursuivie jusqu'au mois d'avril 2024. Nous avons réalisé environ 400 H de travail sur le terrain en carrière mobilisant 2 à 3 agents et environ 1 200 H de travail de bureau pour la cartographie et le diagnostic détaillé de la carrière, en comptant le temps passé pour la commune et pour les propriétaires privés. Notre méthode de travail a été la suivante :

1 : Exploration et première reconnaissance générale de la carrière ;

2 : Cartographie

- Scan 3D de l'ensemble des galeries accessibles ;
- Relevés topographiques de certaines galeries ;
- Géoréférencement dans le référentiel Lambert 93 ;
- Traçage en plan de la carrière ;
- Report sur le plan de tous les éléments de repérage potentiellement utiles, comme les murs de pierre bâtis, les galeries remblayées avec des résidus d'extraction, la présence d'eau, les puits et les éboulements de grande ampleur ;
- Superposition du plan aux images aériennes haute résolution de la commune pour pouvoir identifier la position des enjeux présents à la surface du sol par rapport à la carrière ;

3 : Evaluation et zonage des aléas

- Nombreuses prises de photos et vidéos dans toute la carrière pour établir un état des lieux de son niveau d'endommagement actuel.
- Découpage de la carrière en secteurs ;
- Mesures et diagnostics individuels des secteurs ;
- Analyse statistique des données ;
- Définition d'un ensemble de règles spécifiques à cette carrière pour caractériser l'aléa en fonction des caractéristiques mesurées *in situ* ;
- Production d'une carte de zonage des aléas.

2. Exploration - Description générale de la carrière

2.1 Caractéristiques d'exploitation

La Grande carrière de Latresne est un vaste chantier d'extraction de pierres de taille calcaires. Elle se situe sous un plateau géomorphologique qui culmine à environ 70 m NGF, immédiatement au Nord du bourg de la commune.

La carrière est constituée de plusieurs étages horizontaux partiellement superposés, qui sont reliés entre eux par des puits verticaux ou par des rampes. Tous les étages ont été exploités selon une méthode d'extraction partielle de type « chambres et piliers abandonnés ». Une partie seulement de la roche disponible sur l'emprise de la carrière a été extraite sous la forme de galeries développées dans le plan horizontal, suivant la stratification naturelle des terrains. La partie restante de la roche a été volontairement conservée sous la forme de piliers, le plus souvent carrés, dont le rôle est de soutenir le poids des terrains recouvrant la carrière pour éviter les effondrements généralisés.

Les dimensions des galeries ont été prévues suffisamment grandes pour permettre la circulation de charrettes servant à évacuer les pierres extraites mais, en même temps, suffisamment étroites pour que le banc de roche constituant le toit des galeries soit, en principe, auto-stable et ne nécessite donc pas de soutènement artificiel.

Les dimensions des piliers et le taux de défrètement (surface de roche extraite par rapport à la surface totale disponible) étaient normalement prévus pour que les piliers soient suffisamment résistants pour soutenir le poids des terrains recouvrant sans s'écraser.

2.2 Emprise et volume de la carrière

La Grande carrière de Latresne s'étend, d'Ouest en Est, de la route de Bordeaux au lieu-dit Pibouleou et, du Nord au Sud, des lieux-dits de Brun et Palens jusqu'à la rue Augustinot.

La forme de la carrière est relativement complexe. Ses contours extérieurs sont très irréguliers ; ses contours intérieurs également. La carrière n'est pas constituée d'une seule grande salle homogène. Il s'agit en fait d'un enchevêtrement assez compliqué de salles plus ou moins grandes, individuellement constituées de galeries et de « petits » piliers carrés et séparées les unes des autres par de grands piliers aux formes irrégulières. Il y a également au centre de la carrière de très grands volumes de roche non-exploités, que l'on appelle des « stots » (se référer au plan de la carrière).

L'emprise totale de la carrière, est d'environ 43 Hectares. La surface de carrière réellement exploitée si l'on additionne les surfaces de tous les étages et si l'on déduit les surfaces des stots centraux, est d'environ 41,3 Hectares. Le tableau suivant indique la répartition de la surface exploitée par étage.

Répartition de la surface de carrière exploitée	
Etage -1	1,9 Ha
Etage -2	6,4 Ha
Etage -3	28,5 Ha
Etage -4	4,5 Ha
Total	41,3 Ha

A l'intérieur des 41 hectares exploités, seulement 60 à 80 % du volume de roche disponible a été extrait, selon les étages, le reste ayant été conservé sous la forme de piliers. Tous étages confondus, on estime que le volume total de roche extrait de la carrière est de l'ordre 500 000 m³. A titre indicatif, une pierre de taille standard (un « doubleron ») mesure environ 64 cm x 32 cm x 32 cm, soit 0,065 m³. On estime donc qu'environ 500 000 / 0,065 ≈ 7,7 millions de pierres de construction auraient été extraites de la carrière.

2.3 Conditions d'accès

La carrière dispose de 4 étages principaux, avec généralement deux étages superposés et très ponctuellement jusqu'à 3 étages superposés.

Précisons que la numérotation des étages telle qu'elle est affichée sur le plan tient compte de leurs superpositions, mais ne tient pas compte de leurs altitudes respectives (car ces altitudes sont variables en fonction des secteurs). C'est-à-dire que certaines parties de l'étage -2, par exemple, sont susceptibles de se trouver à une altitude inférieure à certaines parties de l'étage -3. Mais aux endroits où les deux étages sont superposés, l'étage -2 se situe bien au-dessus de l'étage -3.

Etage -4

L'étage -4 se trouve principalement sous les lieux-dits de Pitrot et Dehoum. On y accède à partir d'une longue rampe descendante (108 m) qui débute sur une propriété privée, rue Augustinot.

On peut également y accéder après avoir traversé l'étage -3 depuis la route de Bordeaux, à partir d'une rampe de jonction (lieu-dit Salvy), mais le trajet est beaucoup plus long.

Il existait initialement au moins deux puits permettant d'accéder à cet étage mais ils ont été soit rebouchés soit condamnés par des éboulements et ne sont donc plus accessibles, ni par le bas, ni par le haut.

Etages -3

L'étage -3 est le niveau d'exploitation principal de la carrière. Il traverse une grande partie du plateau, de la route de Bordeaux, à l'Ouest, jusqu'au chemin de la côté rouge, à l'Est. L'entrée principale de l'étage -3 est un cavage situé à l'arrière d'une propriété privée qui longe la route de Bordeaux. Il y a également une entrée en cavage secondaire le long de cette même route, quelques centaines de mètres plus au Nord. A proximité de ces deux entrées en cavage, on trouve dans le coteau boisé qui surplombe la route de Bordeaux, une petite rampe d'accès abrupte qui mène à l'étage -3, mais cette dernière est peu praticable et difficilement accessible. Il ne s'agissait probablement pas d'une entrée au départ, mais plutôt d'une bouche d'évacuation de pierres.

On peut aussi accéder à l'étage -3 après avoir traversé une partie de l'étage -4 depuis la rue Augustinot, à partir d'une rampe de jonction.

On peut enfin accéder à l'étage -3 directement au centre de la carrière à partir de deux puits verticaux d'une quarantaine de mètres de profondeur, qui se trouvent tous les deux au lieu-dit Pitrot. Ils sont encore accessibles mais ne sont pas équipés. Il faut donc de prévoir le matériel adéquat (lumières, treuil, système anti-chute, etc.) pour y descendre en sécurité.

Il existait autrefois au moins deux autres puits d'extraction reliant l'étage -3 à la surface, aux lieux-dits Pibouleou et La Croix, mais ils ont été remblayés et ne sont plus visibles en surface.

Etage -2 (Brun)

L'étage supérieur du côté Ouest de la carrière, qui correspond au niveau -2 selon notre classification des étages, est accessible à partir d'entrées en cavage multiples réparties sur une centaine de mètres de longueur dans le coteau qui surmonte la route de Bordeaux, au-dessus de l'entrée principale de l'étage -3.

Il n'y a pas de puits d'accès à cet étage depuis la surface. Il existe toutefois un puits d'environ 18 m de profondeur, qui relie cet étage à l'étage inférieur (-3), au lieu-dit Basque-Nord. Ce puits n'est pas équipé ni sécurisé.

Etage -1 (Pitrot)

L'étage supérieur du lieu-dit Pitrot, qui correspond au niveau -1 selon notre classification des étages, est uniquement accessible depuis un puits commun avec l'étage -3, qui se trouve dans les bois, au Nord des terrains de sport du collège.

Il y avait autrefois au moins deux autres puits d'accès dans le même secteur, mais ils ont été remblayés et ne sont donc plus visibles en surface. Un de ces puits se trouve actuellement sous le plancher d'une habitation.

2.4 Conditions de circulation

La majorité des galeries de la carrière est accessible à la marche, à condition de ne pas transporter de matériels trop volumineux, car la hauteur des galeries est rarement supérieure à 1,7 m. Dans certains secteurs de l'étage -2, en particulier, la hauteur ne dépasse pas 1,3 m.

Le repérage en carrière peut s'avérer compliqué car les intersections sont très nombreuses et il est difficile, sans disposer de matériels spécifiques, de déterminer la direction du cheminement emprunté dans la carrière.

Le trajet emprunté pour aller d'un point A à un point B est rarement linéaire, car de nombreux accès ont été murés ou partiellement remblayés avec des résidus d'extraction, ce qui complique d'autant plus le repérage.

Il est vivement conseillé à toute personne qui serait amenée à intervenir dans la carrière, de disposer, soit d'un plan précis de la carrière sur la base duquel se repérer, soit de positionner des points de repère réguliers au sol de la carrière, avec une indication de la direction de la sortie.

2.5 Limites incertaines

Il existe de nombreux départs de galeries remblayés au niveau des contours extérieurs de la carrière (étages -3 et -4) et au niveau des stots centraux (étage -3). Ils ont été reportés sur le plan avec un figuré marron intitulé « remblais » dans la légende. Nous en avons débouché un certain nombre manuellement pour nous assurer de la non-continuité de la carrière, mais nous n'avons pas pu effectuer cette vérification sur l'intégralité du périmètre de la carrière, car cela représente un travail colossal. Notons que, la plupart du temps, les départs de galerie remblayés débouchent sur de petites galeries filantes mesurant quelques dizaines de mètres seulement.

Il y a également quelques extrémités de galeries sur les contours de la carrière qui ont été tracées de manière approximative, en traits pointillés. Nous n'avons pas pu effectuer de mesures précises dans ces extrémités de galeries, car les accès sont trop étroits pour y introduire nos matériels de mesure.

Il subsiste donc, dans certaines zones, une très légère incertitude sur l'emprise exacte de la carrière, mais la quasi-intégralité de la carrière a bien été cartographiée.

2.6 Présence d'eau

En dehors de quelques petites flaques et retenues des eaux d'infiltrations formées au niveau des points bas, le sol des étages -1, -2 et -3 est globalement hors d'eau toute l'année.

Les seuls secteurs qui se situent constamment sous le niveau de battement des nappes phréatiques se trouvent à l'Ouest de l'étage -4, à proximité des anciens locaux de la Gendarmerie - la zone ennoyée dans ce secteur mesure environ 4000 m² - et très ponctuellement (170 m²) au lieu-dit Hautefaye, à l'endroit où il y a un étage inférieur (-4) sous le sol de l'étage principal (-3).

Comme l'eau atteint par endroit le plafond des galeries, certains contours du Nord-Ouest de l'étage -4 n'ont pas pu être relevés, ce qui explique les traits pointillés qui figurent sur le plan.

2.7 Conditions atmosphériques

Notre détecteur de gaz (Microclip x3) a mesuré un taux d'oxygène compris entre 20,5% et 20,9% dans l'intégralité de la carrière, y compris dans les renforcements étroits éloignés des entrées, sachant que le taux d'oxygène « normal » mesuré à la surface est de 20,9%. Par ailleurs, aucune concentration anormale de gaz toxique n'a été détectée.

L'atmosphère de la carrière est parfaitement respirable, pour le moment.

2.8 Dimensions moyennes des galeries et des piliers par étage

Les altitudes et les dimensions des galeries et des piliers varient d'un étage à l'autre car les configurations d'exploitation ont été adaptées à l'épaisseur des terrains recouvrant, qui est variable d'un étage à l'autre. Il y a également d'importantes variations de dimensions à l'intérieur d'un même étage.

A titre indicatif, nous avons reporté dans le tableau suivant les caractéristiques géométriques et topographiques moyennes représentatives des différents étages.

	Altitude sol de carrière (m NGF)	Altitude ciel de carrière (m NGF)	Altitude terrain naturel (m NGF)	Profondeur carrière (m)	Hauteur galeries (m)	Largeur piliers (m)	Largeur galeries (m)	Taux de défrètement local
Etage -1	34	35,4	68	32,3	1,4	4,2	3,2	67 %
Etage -2	31,5	33	62	29,9	1,5	3,9	3,3	67 %
Etage -3	14,8	16,5	56,2	36,2	1,7	4,5	2,8	62 %
Etage -4	12,1	13,7	45,5	31,8	1,6	4,3	3,2	67 %

Il faut noter que le sol de la carrière est recouvert des résidus d'extraction (poussière de roche issue de la taille) qui ont été étalés et compactés sur place. Ces résidus n'étaient vraisemblablement jamais évacués de la carrière. On estime, étant donné les dimensions des outils utilisés par les carriers, que les résidus représentent environ 35% du volume des pierres effectivement extraites de la carrière. Compte tenu du fait que les résidus de taille ont été plus ou moins compactés, on suppose que les galeries étaient donc initialement plus hautes d'environ 25% à 35%, en moyenne. En pratique, l'épaisseur de résidus au sol est très hétérogène car ces résidus ont parfois été déplacés d'une galerie à l'autre pour diverses raisons.

2.9 Recensement et caractérisation des puits verticaux

Nous avons reporté dans le tableau suivant les caractéristiques de tous les puits identifiés dans la carrière. L'auscultation de l'intérieur des puits permet de déterminer le caractère plus ou moins massif des terrains recouvrant (dernière ligne du tableau), qui, comme nous le verrons par la suite, a un rôle important dans l'occurrence des mouvements de terrains.

Puits n°	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
Lieu-dit	Basque Nord	La Croix	Pitrot	Pitrot	Pitrot	Dehoum	Pibouleou	Salvy	Pitrot	Basque Nord
Type de puits	Entre étages + Extraction	Aération	Aération + Extraction	Aération + Eau	Entre étages	Aération ?	Aération ?	Aération + Extraction	Aération + Extraction	Aération + Extraction
Parcelle cadastrale	AM 563	AM 1457	AM 1578	AM 1628	AM 1630	AM 1102	AM 1548	AM 1074	AM 1565	AM 837
Altitude terrain naturel (m NGF)	66	67	54	55	53	37	70	67	66	19
Profondeur (m) mesurée du ciel de carrière au terrain naturel	N.C.	49,7	37,3	36,3	38	23,6	50	32	30	4,3
Etages traversés	-2 et -3	-3	-1, -2 et -3	-3	-3 et -4	-4	-3	-1	-1	-3
Accessibilité du puits	OK	Remblayé	OK	OK	OK	Fermé ?	Remblayé	Remblayé	Remblayé	Fermé
Caractéristiques des terrains traversés	Rocheux	Non visible	Rocheux	Rocheux	Rocheux	Non visible	Non visible	Non visible	Non visible	Rocheux

3. Relevé topographique précis de la carrière

3.1 Scan 3D

Le relevé 3D de la carrière a été réalisé au moyen d'un scanner laser dynamique de la marque GEOSLAM, modèle : Zeb Revo RT. Cet appareil permet d'imager la géométrie intérieure d'un espace, sous la forme d'un nuage de points tridimensionnel, en temps réel, tout en s'y déplaçant à vitesse de marche. L'appareil est doté d'un émetteur/récepteur laser qui enregistre le temps mis par un faisceau laser pour effectuer un aller-retour après réflexion sur une paroi. Du temps de trajet du laser est déduite la distance entre la paroi et le point d'émission. Cette opération de calcul de distance est effectuée, à l'avancée et dans toutes les directions grâce à la tête rotative du scanner, avec un échantillonnage d'environ 36 000 points/seconde. L'appareil est associé à un ordinateur embarqué qui utilise un algorithme de localisation et cartographie simultanée (algorithme SLAM) pour déterminer le mouvement progressif du scanner à l'intérieur des galeries et ainsi reconstituer une image globale de la zone scannée ainsi que le trajet emprunté.

La reconstitution des trajets peut être erronée lorsque les distances parcourues sont excessivement longues ou bien lorsque les galeries traversées ne présentent pas suffisamment de détails géométriques pour que l'algorithme SLAM puisse correctement calculer le déplacement à l'intérieur de ces galeries. Après une longue phase de test, nous avons conclu que les acquisitions au scanner ne doivent pas dépasser 10 à 15 minutes, ce qui correspond environ à 500 m de cheminement ou à environ 3 000 m² de superficie, au maximum.

La Grande carrière de Latresne, qui mesure environ 41,3 Hectares, au total, en cumulant les superficies des différents étages, a donc été scannée par petites surfaces successives, qui se chevauchent. Nous avons réalisé environ 400 relevés au scanner.

Pour reconstituer une image globale de la carrière, les relevés successifs ont été fusionnés en superposant manuellement leurs surfaces de chevauchement à l'aide d'un logiciel de traitement de nuages de points (CloudCompare, en l'occurrence).

3.2 Géoréférencement des images 3D

L'image 3D globale de la carrière obtenue par fusion de tous les relevés successifs s'avère être largement déformée sur de longues distances, ce qui est tout à fait normal au vu de la précision du scanner. Nous avons donc découpé le scan global en 190 portions, qui, lorsqu'elles sont prises individuellement, ont une déformation minimale. Des vues en plan (vue de-dessus) de ces portions de carrière ont été extraites des images 3D.

Les vues en plan de toutes les portions de la carrière ont ensuite été géoréférencées et projetées individuellement dans le système de coordonnées LAMBERT 93, qui est le système de référence pour les cartes officielles en France métropolitaine, et superposées aux images aériennes haute résolution de la commune par l'intermédiaire d'un Système d'Information Géographique (SIG).

L'opération de géoréférencement a été faite en 3 étapes :

(1) Des points de repère ont été matérialisés à la surface du sol, à proximité des entrées de la carrière, par des repères d'arpentage fixes. Leurs coordonnées dans le système Lambert 93 ont été mesurées à l'aide d'un récepteur GPS précis à +/- 3 cm. (2) A partir de ces points de repère, nous avons procédé à un cheminement topographique à l'intérieur de la carrière au moyen d'un tachéomètre de haute précision (station totale). Les stations de mesure successives qui constituent le cheminement topographique ont également été matérialisées par des repères d'arpentage plantés dans le sol de la carrière. Depuis certaines stations de mesure, nous avons déterminé les coordonnées de plusieurs angles de piliers par visées laser. (3) Les images en plan des différentes portions de carrière provenant des scans 3D ont été géoréférencées à partir des coordonnées de ces angles de piliers.

L'opération qui consiste à géoréférencer les images de la carrière à partir de points de repère est une transformation géométrique. Il existe plusieurs types de transformations géométriques qui déforment plus ou moins les images pour les faire coïncider au mieux avec les points de repères choisis. En l'occurrence nous avons le plus souvent utilisé des transformations de type polynomial d'ordre 1 : l'image de la carrière est tournée, translaturée jusqu'à la bonne position sur la carte, mise à l'échelle (si nécessaire) et éventuellement légèrement distordue pour la faire correspondre au mieux avec les points de repère topographiques. A certains endroits particuliers, nous avons dû procéder à des transformations géométriques plus sophistiquées (de type « Thin Plate Spline ») pour faire coïncider les images 3D avec les points de repère. Lors des transformations géométriques, les petites erreurs de reconstruction liées à l'algorithme SLAM du scanner laser sont compensées de sorte qu'à la fin du géoréférencement, il n'y a jamais plus de quelques centimètres d'écart entre les positions des points de repère topographiques mesurées avec le tachéomètre et les positions des angles de piliers avec lesquelles elles sont censées coïncider.

3.3 Cheminements topographiques

Description de la procédure

Le cheminement topographique consiste à mesurer les coordonnées successives de points de repère positionnés dans la carrière, le long d'un trajet particulier, à partir de points précédents de coordonnées connues.

On démarre le cheminement depuis deux points GPS positionnés à la surface, un des deux points étant placé devant l'entrée de la carrière par commodité. La procédure est ensuite la suivante :

- On installe le tachéomètre sur le point GPS positionné devant l'entrée de la carrière, dont on connaît les coordonnées. Il s'agit de la première station de mesure.
- On vise le deuxième point GPS positionné suffisamment loin du premier, dont on connaît également les coordonnées, afin de déterminer l'orientation dans laquelle pointe l'appareil par rapport au Nord (l'azimut).
- On positionne ensuite un point de repère dans la carrière, dont on détermine les coordonnées en le visant avec le tachéomètre depuis la première station de mesure. On appelle cette opération une « visée avant ». Le tachéomètre calcule la distance entre le point mesuré et le point sur lequel il se trouve et en déduit, connaissant la direction de visée, ces coordonnées géographiques.
- On déplace le tachéomètre sur le point qui vient d'être mesuré, qui devient donc la deuxième station de mesure et on vise le point précédent, dont les coordonnées sont connues, pour déterminer l'orientation de l'appareil par rapport au Nord. On appelle cette opération une « visée arrière ». La distance entre les deux points est de nouveau mesurée et elle doit normalement être identique à quelques millimètres près à la distance mesurée lors de la « visée avant ».
- On répète l'opération autant de fois que nécessaire jusqu'à atteindre le point souhaité dans la carrière, qui se situe possiblement à plusieurs centaines de mètres du point de départ.

Cheminement dans les étages principaux -3 et -4

Nous avons effectué deux cheminements topographiques principaux à l'intérieur des étages inférieurs -3 et -4 qui forment la traversée Est-Ouest de la carrière : un premier débutant au niveau de l'entrée principale côté Ouest, route de Bordeaux, et se terminant au Nord-Est de la carrière au lieu-dit Hautefaye, et un deuxième débutant au niveau de l'entrée principale côté Sud-Est, rue Augustinot, et rejoignant le premier cheminement au niveau de deux embranchements situés respectivement à Hautefaye et à Pitrot. Plusieurs cheminements secondaires ont également été réalisés pour atteindre des parties enclavées de la carrière à partir de ces cheminements principaux, de sorte que tous les secteurs des étages -3 et -4 ont été au moins partiellement couverts par les cheminements topographiques. Nous avons réalisé environ 600 mesures topographiques dans les étages inférieurs.

Cheminement dans l'étage -2 (lieu-dit Brun)

Nous avons effectué un cheminement topographique dans l'étage supérieur (-2), situé à l'Ouest du plateau, selon la même procédure. Le cheminement débute au niveau de points de repère positionnés le long de la route de Bordeaux et se termine non-loin de l'extrémité Est de l'étage -2, environ 550 m plus loin, dans le secteur de La Croix. Nous avons réalisé environ 100 mesures topographiques dans l'étage supérieur (-2).

Cheminement dans l'étage -1 (lieu-dit Pitrot)

Comme dans le reste de la carrière, nous avons réalisé un scan 3D complet de l'étage -1. En revanche, les conditions d'accès relativement compliquées et le temps restreint que nous avons pour explorer cet étage ne nous ont pas permis d'y réaliser un cheminement topographique. Pour géoréférencer les images provenant du scan 3D, nous nous sommes basés sur un relevé topographique existant, réalisé par le géomètre Willy MAZEAU dans les années 2010, dans le cadre d'une étude confiée par la mairie de Latresne à la société ANTEA.

3.4 Evaluation des erreurs cartographiques liées aux cheminements topographiques

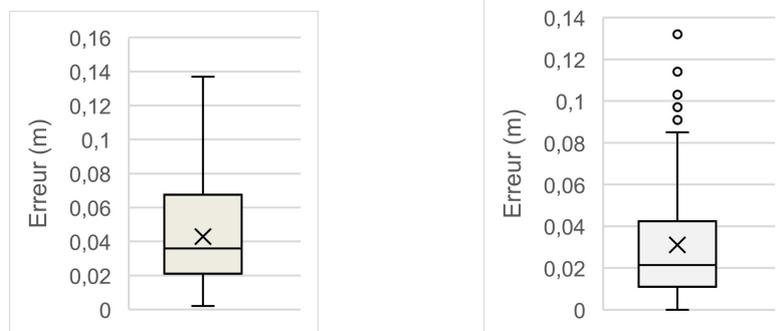
Erreurs de positionnement et erreurs d'orientation au démarrage des cheminements topographiques

La première visée d'un cheminement topographique est effectuée entre deux points de repère mesurés au GPS, à la surface. Si l'erreur de positionnement sur chaque point GPS est d'environ +/3 cm, alors cela signifie que l'on produit également une erreur sur l'estimation de l'orientation (azimut) lorsque l'on effectue la première visée entre les deux points GPS.

Si l'erreur de positionnement de quelques centimètres n'est pas, en elle-même, problématique, l'erreur d'orientation induite par l'erreur de positionnement peut toutefois l'être. Car, en effet, une petite erreur d'orientation au démarrage peut entraîner une grande erreur de position en fin de cheminement du fait de la démultiplication de l'erreur avec la distance. Pour minimiser l'erreur d'orientation au démarrage du cheminement, nous avons positionné volontairement les points GPS le plus loin possible l'un de l'autre (310 m au niveau de la route de Bordeaux et 150 m au niveau de la rue Augustinot), tout en restant dans la portée de l'appareil de mesure.

Nous ne pouvons pas connaître l'erreur réelle d'orientation produite sur la première visée du cheminement, ni l'erreur de position induite en fin de cheminement. En revanche, on peut simuler informatiquement la gamme d'erreur de positionnement possible en fin de cheminement connaissant la gamme d'erreur possible sur la première mesure d'orientation et la propageant sur l'ensemble des points de mesure successifs.

Nous avons réalisé cet exercice sur les deux cheminements principaux en réalisant pour chacun d'eux 100 tirages aléatoires de l'erreur initiale d'orientation (compatible avec la précision du GPS qui est de +/- 3cm). Les graphiques suivants (de type « box plot ») montrent la distribution statistique obtenue des erreurs de positionnement en fin de cheminement.



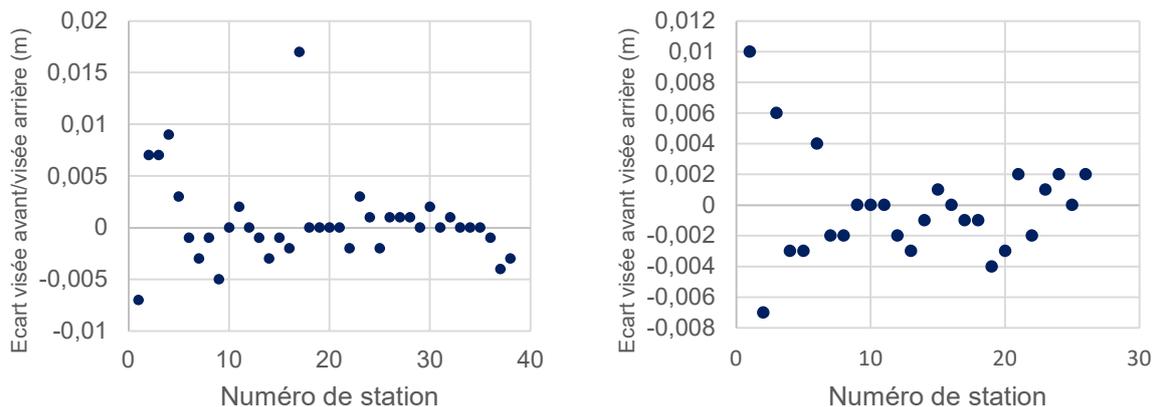
On constate que la valeur moyenne de l'erreur de positionnement (la croix centrale des graphiques), en fin de cheminement, se situe entre 3 cm et 5 cm, ce qui est très faible. L'erreur maximale possible (qui est peu probable), est de l'ordre de 14 cm, ce qui reste somme toute acceptable pour une étude de cette nature.

Erreurs de mesure au tachéomètre lors des cheminements topographiques

Lors des visées effectuées manuellement avec le tachéomètre, on commet nécessairement de petites erreurs liées à l'imprécision de la mise à niveau de la cible de visée et au fait que notre vision imparfaite ne permet pas de pointer très exactement le milieu de point de repère.

L'appareil de mesure compare systématiquement les distances mesurées lors de la visée avant et lors de la visée arrière entre deux mêmes points. On doit normalement s'assurer que cette erreur est faible et que la moyenne de toutes les erreurs produites est proche de zéro. Si c'est bien le cas, alors cela signifie que les erreurs de visées sont aléatoires et doivent globalement se compenser d'un point à l'autre. Si la moyenne des erreurs produites sur l'ensemble du cheminement est éloignée de 0, alors cela signifie qu'il y a une erreur de mesure systématique qui se cumule d'un point à l'autre et peut donc potentiellement provoquer des erreurs significatives sur la position mesurée des points qui sont éloignés du point de départ du cheminement.

Les graphiques suivants montrent les écarts de distance mesurés entre les visées avant et visées arrières successives le long des cheminements principaux des étages -3 et -4. Le premier cheminement (graphique de gauche) va de la route de Bordeaux jusqu'au lieu-dit Hautefaye, à environ 900 m. Le deuxième cheminement (graphique de droite) va de la rue Augustinot au lieu-dit Pitrot, à environ 700 m.



On constate que les erreurs varient entre -7 mm et +17 mm, et sont le plus souvent comprises entre -4 mm et +4 mm, ce qui est tout à fait correct pour une étude de cette nature.

De plus, on note que la moyenne des erreurs est proche de 0, ce qui montre qu'il s'agit d'erreurs aléatoires susceptibles de se compenser au fil des cheminements. Ces erreurs ne doivent normalement pas provoquer de graves distorsions du plan de la carrière.

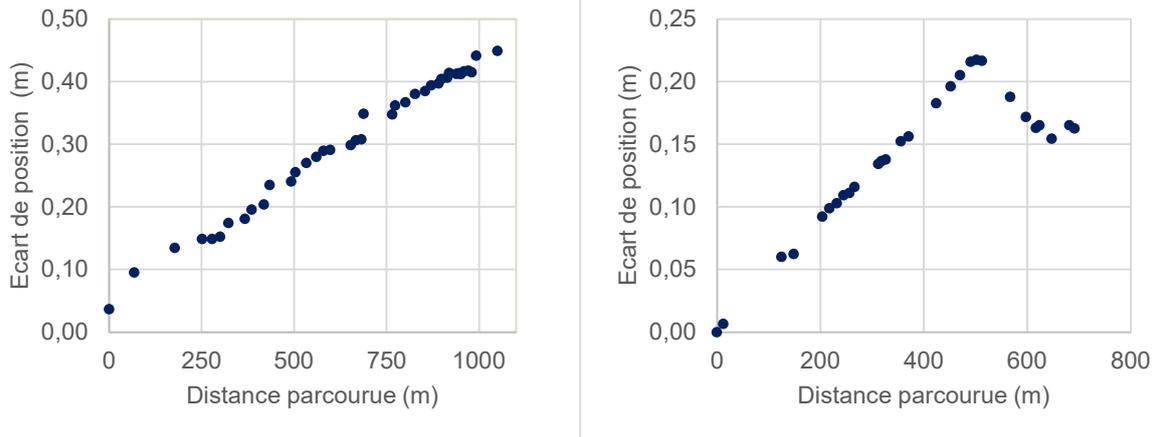
Altération linéaire du système de référence LAMBERT 93

Le système de représentation Lambert 93 sur lequel les plans sont projetés fait partie de ce que les mathématiciens appellent une projection conique conforme de la surface théorique de la Terre (cette surface étant assimilée à une ellipsoïde de révolution). Ce type de projection conserve les formes des objets et les angles (une sphère reste une sphère, un angle droit reste droit), mais elle altère les distances. En un point donné, l'altération des distances est identique dans toutes les directions, mais l'ampleur de l'altération dépend de la latitude à laquelle on effectue les mesures. A Latresne, la latitude est d'environ $44,78^\circ$, ce qui correspond à une altération linéaire d'environ -53 cm/km. C'est-à-dire qu'une distance horizontale réelle de 1 000 m mesurée entre deux points de la commune sera d'environ 999,47 m sur une carte projetée en LAMBERT 93.

Les points de repère GPS positionnés devant les entrées de la carrière ont bien été mesurés dans le référentiel LAMBERT 93. En revanche, les images 3D produites par le scanner laser sont des mesures cartésiennes à l'échelle 1:1. Il n'y a pas d'altération des distances (sauf erreurs de construction de l'image 3D). Pour garantir une adéquation optimale avec les images 3D, les mesures topographiques au tachéomètre ont elles-aussi été faites à l'échelle 1:1. Il en résulte que les images géoréférencées de la carrière ne sont pas parfaitement compatibles avec le référentiel LAMBERT 93 sur lequel elles ont été projetées. En clair, il y a un écart entre la position de la carrière telle que nous l'avons représentée par rapport aux enjeux de surface, et sa position réelle dans le référentiel LAMBERT 93.

Connaissant le cheminement réalisé, cet écart de position peut être estimé. Il suffit, dans un tableur, d'altérer la distance qui a été mesurée entre tous les couples de points de repère successifs, selon une proportion correspondant à l'altération linéaire théorique à la latitude des points en question. En faisant cela point après point sur les deux cheminements principaux, on a calculé un écart maximal entre la position réelle sur le référentiel LAMBERT et la position mesurée par le cheminement topographique d'environ 45 cm dans un cas et 22 cm dans l'autre (voir graphique ci-dessous). A proximité des points de départ, l'erreur de position est de seulement quelques centimètres.

Ces écarts seront pris en compte dans la cartographie des aléas (cf. section 7.1).



Evaluation des erreurs réelles en fin de cheminement

Si l'on additionne toutes les sources d'erreur possibles, on aboutit en fin de cheminement, à une erreur théorique potentielle entre la position affichée de la carrière et sa position réelle par rapport aux enjeux de surface, dans le référentiel LAMBERT 93, de l'ordre de quelques dizaines de centimètres.

Pour évaluer l'erreur réelle de positionnement réelle de la carrière sur notre plan, nous avons mesuré au GPS la position, dans le référentiel LAMBERT 93, des deux puits se situant au milieu de l'étage -3, au lieu-dit Pitrot. Nous avons constaté pour ces deux puits un écart d'environ 40 cm entre le plan et la réalité, ce qui est effectivement compris dans la gamme d'erreur théoriquement attendue.

En guise de vérification complémentaire, nous avons également comparé la position mesurée d'un même point situé au fond de la carrière, au lieu-dit Hautefaye, à partir de deux cheminements provenant de points de départ éloignés d'environ 1 km, en l'occurrence les deux entrées principales de la carrière, Route de Bordeaux et Rue Augustinot. L'écart entre les deux positions mesurées du même point est d'environ 25 cm, ce qui est effectivement compris dans la gamme d'erreur attendue.

Globalement, ces vérifications montrent que le plan que nous avons produit permet de localiser la carrière par rapport aux enjeux de surface et notamment aux routes et aux bâtiments d'habitation, avec une imprécision de l'ordre de +/- 40 cm à proximité des cheminements topographiques. Il est possible que l'erreur soit un peu plus importante en s'éloignant des zones où nous avons réalisé des cheminements topographiques. Mais globalement la majorité de la superficie de la carrière a été couverte par les cheminements et nous considérons que l'erreur maximale de positionnement ne dépasse jamais 80 cm. Lorsqu'on la rapporte aux dimensions des galeries et des piliers (3 à 4 m de largeur), cette erreur nous semble raisonnable et permet de faire un diagnostic précis.

Cas particulier de l'étage -1, lieu-dit Pitrot

Etant donné la méthode employée par le géomètre qui a effectué les relevés de l'étage -1, nous supposons que l'imprécision sur le positionnement de la carrière par rapport aux enjeux de surface pourrait être de l'ordre de +/- 1 m au niveau de l'extrémité Nord de l'étage et probablement moindre à proximité du puits d'accès où ont été débutés les relevés. Mais nous ne pouvons pas garantir cette gamme d'imprécision, n'ayant pas nous-même effectué les relevés. Ce point sera pris en compte dans la cartographie de l'aléa.

3.5 Carrières non cartographiées

Notons qu'il existe plusieurs petites carrières isolées se trouvant sur l'emprise du plan mais n'étant pas connectées avec la Grande carrière. Nous ne les avons pas relevées ni cartographiées dans le cadre de cette étude. Pour identifier l'ensemble des carrières du centre-ville, il convient de se référer au plan de l'inventaire départemental des carrières, qui est régulièrement mis à jour sur le site internet du Département de la Gironde.

4. Identification des principaux aléas et procédure générale d'évaluation

4.1 Le comportement mécanique d'une carrière et les aléas associés

La création des carrières induit une modification du champ de contrainte à l'intérieur de la roche : les piliers sont surcomprimés dans la direction verticale et le toit des galeries est soumis à un fléchissement vertical.

La surcompression des piliers peut, si elle induit des contraintes mécaniques qui excèdent la limite d'élasticité des piliers, occasionner des dommages pouvant conduire à un écrasement des piliers. Dans certaines conditions l'écrasement des piliers peut entraîner un effondrement ou un affaissement de grand diamètre, plus ou moins brutal, de la surface du sol. On parle d'un **aléa de mouvement de terrain généralisé**.

La mise en flexion du toit des galeries peut faire apparaître des fissures de traction, qui se situent généralement à mi-portée entre les piliers, et dans un second temps des fractures de cisaillement inclinées au-dessus des angles de piliers, qui peuvent conduire à des éboulements localisés. Si les terrains recouvrant sont peu épais et/ou peu résistants, alors l'éboulement du toit d'une galerie peut se propager verticalement et provoquer l'apparition d'un effondrement localisé, de quelques mètres de diamètre, à la surface du sol. On parle dans ce cas d'un **aléa d'effondrement localisé** (ou « fontis », parfois).

Notons que, jusqu'à présent, aucun mouvement de terrain généralisé ni aucun effondrement localisé, en lien avec la carrière, ne s'est produit sur le plateau de Latresne.

4.2 Connaissances relatives aux mouvements de terrains généralisés

L'effondrement ou l'affaissement généralisé des terrains situés au-dessus d'un secteur de carrière est presque toujours induit ou précédé par l'effondrement ou l'écrasement d'un certain nombre de piliers à l'intérieur d'un secteur bien délimité.

Les conditions de stabilité ou d'instabilité des piliers ont été massivement étudiées depuis les années 1960 après de graves accidents miniers survenus, notamment, en Afrique-du-Sud et dans la région parisienne, à partir de rétro-analyses statistiques. Ce sujet est toujours étudié à l'heure actuelle, notamment par notre syndicat, avec des outils plus modernes que ceux utilisés dans les années 1960, mais les conclusions demeurent relativement constantes. Il est convenu par un grand nombre de spécialistes des mines et carrières souterraines que l'effondrement ou l'écrasement des piliers nécessite que trois conditions soient réunies :

- La contrainte de compression verticale agissant sur les piliers, du fait du poids des terrains recouvrant, devient égale à la capacité de résistance maximale des piliers. Soit parce que la résistance des piliers a diminué au cours du temps par effet de fluage, soit parce que la contrainte agissant sur les piliers a augmenté pour une raison quelconque.
- Les piliers doivent avoir un comportement fragile. C'est-à-dire que leur résistance doit chuter rapidement à partir d'un certain niveau d'endommagement.
- Les terrains recouvrant doivent être suffisamment souples pour accompagner l'écrasement des piliers. Si les terrains sont rigides, alors ils ne se déforment pas suffisamment pour que les piliers continuent de s'écraser et l'ensemble reste stable, même si les piliers sont endommagés.

Il a été largement démontré qu'un des principaux facteurs qui conditionnent la résistance à la compression des piliers, ainsi que leur caractère plus ou moins fragile, est leur rapport de forme : largeur/hauteur, que nous noterons par la suite l/h . Plus l/h est élevé, plus les piliers sont résistants et moins ils sont fragiles, au sens mécanique du terme.

La souplesse des terrains recouvrant dépend de nombreux facteurs. Certains ne sont pas toujours mesurables ou observables, comme la composition des terrains, leur caractère plus ou stratifiés, la présence éventuelle de discontinuités géologiques (fissures, fracture, faille, cavités karstiques, etc.). D'autres sont facilement mesurables à partir du moment où l'on dispose d'un plan de la carrière ; il s'agit en particulier des dimensions des secteurs d'exploitation et de leur taux de défrètement, que nous noterons τ .

L'analyse en retour d'expérience que nous menons depuis plus de 4 ans sur les anciennes carrières de Gironde met en évidence les points suivants :

- Tous les effondrements ou affaissements généralisés connus se sont produits dans des secteurs où les piliers avaient un rapport $l/h \leq 2$;
- Tous les effondrements sont survenus dans des secteurs de carrières présentant un taux de défrètement $\tau \geq 72\%$;
- Les piliers étaient soumis à une contrainte de compression verticale moyenne σ supérieure à $\tanh(1,2 \times l/h)$;
- Les salles d'exploitations concernées par les effondrements présentaient une longueur Q supérieure à 1,9 fois l'épaisseur des terrains recouvrant H , soit $Q/H > 1,9$;
- Selon les témoignages recueillis, les effondrements et affaissements de grande ampleur sont survenus dans des carrières déjà depuis longtemps endommagées.

4.3 Connaissances relatives aux effondrements localisés

Les effondrements localisés se produisent la plupart du temps dans des carrières peu profondes et/ou présentant des galeries excessivement larges par rapport à l'épaisseur des terrains recouvrant, et disposant d'un toit de faible résistance mécanique.

En Gironde, la grande majorité des effondrements localisés qui ont été observés se sont produits dans des secteurs où le toit des carrières présente de nombreux défauts géologiques contribuant à réduire sa résistance mécanique, comme des fissures, des vides karstiques, des stratifications argileuses, etc. et dont l'épaisseur des terrains recouvrant est inférieure à une dizaine de mètres.

Dans les carrières plus profondes, les éboulements susceptibles de survenir au toit des galeries s'auto-comblent par effet de foisonnement, avant d'atteindre la surface du sol. Il ne peut donc généralement pas y avoir d'effondrement localisé, sauf cas particuliers.

4.4 Procédure générale d'évaluation des aléas

Les aléas sont classiquement évalués en effectuant le croisement de deux critères indépendants : l'**intensité** du phénomène redouté (en l'occurrence l'effondrement des terrains de surface) et sa **probabilité d'occurrence**, sachant que la probabilité doit normalement être définie pour un **délai** particulier. Dans les plans de prévention des risques, le délai classiquement considéré est de 100 ans.

Il est généralement impossible de déterminer une probabilité d'occurrence au sens strict, qui soit comprise entre 0% et 100%. Il est souvent plus pertinent de raisonner en termes de **prédisposition** plutôt qu'en termes de probabilité. On parle généralement de prédisposition faible, moyenne ou forte, car il est difficile d'être plus précis. La prédisposition est évaluée ou calculée selon des règles spécifiques à chaque type d'aléa et qui sont définies par les experts en charge de l'étude d'aléas, selon les connaissances théoriques générales et selon le retour d'expérience régional. Il n'y a pas de règles universellement applicables dans tous les contextes.

Il faut également définir l'échelle spatiale à laquelle sont évalués les aléas - il peut s'agir d'une échelle en rapport avec l'urbanisation (échelle des parcelles cadastrales, échelle des secteurs géographiques) ou bien d'une échelle en rapport avec la configuration de la carrière – ainsi que la manière dont les aléas sont reportés sur les documents cartographiques (avec ou sans marge).

5. Evaluation des aléas de mouvement de terrains généralisé

5.1 Evaluation du délai d'occurrence

D'après les informations recueillies dans les archives, certains effondrements se seraient produits pendant la période d'exploitation des carrières, au 19^{ème} siècle (Saint-Germain-du-Puch, 1873). D'autres effondrements se sont produits 40 à 60 ans après la fin de l'exploitation (Saint-Germain-du-Puch, 1964, Cénac, 1978 ; Camblanes-et-Meynac, 1982) et d'autres plus de cent ans après la fin de l'exploitation (Saint-Emilion, 2007 ; Saint-Germain-du-Puch, 2011 ; Naujan-et-Postiac, 2021 ; Nérigean, 2024). Les temporalités sont donc très diverses et nous n'avons pas la moindre idée du temps que peut mettre un effondrement pour se produire dans une carrière qui est pour le moment stable, comme celle du plateau de Latresne. La seule chose dont nous sommes à peu près sûrs est que les carrières qui se sont effondrées présentaient déjà des signes d'endommagement bien avant la date de leur effondrement et que cet endommagement a évolué de manière visible au cours du temps.

On peut donc avancer les hypothèses suivantes :

- Un secteur de carrière très peu (ou pas) endommagé ne s'effondrera probablement pas dans des délais auquel il fait sens de raisonner lorsque l'on s'intéresse à l'aménagement du territoire, typiquement une centaine d'années.
- Concernant les secteurs de carrière déjà significativement endommagés, le délai d'effondrement potentiel est très incertain. Il semble raisonnable d'évaluer les aléas en considérant un délai suffisamment long pour tenir compte du fait que l'état de dégradation des carrières est susceptible d'évoluer au cours du temps, mais le délai doit également être compatible avec le recul que nous avons sur l'évolution des carrières. En ce qui nous concerne, ce recul est d'environ une centaine d'années, depuis l'arrêt de l'activité extractive.

Considérons donc une évaluation de l'aléa à échéance centennale, conformément à la doctrine des Plans des Prévention des Risques.

5.2 Evaluation de l'intensité

L'intensité d'un effondrement ou affaissement généralisé peut être déterminée en fonction de sa superficie et de son amplitude verticale. La notion de superficie est déjà intégrée dans la cartographie des zones d'aléa (l'emprise de la zone d'aléa définit l'emprise potentielle des mouvements de terrains), elle ne doit donc pas intervenir dans l'évaluation de l'intensité, pour éviter toute redondance. En revanche, l'amplitude verticale attendue de l'effondrement/affaissement peut être considérée de manière séparée dans l'évaluation de l'intensité.

Il est évidemment impossible de prédire avec précision l'amplitude d'un futur mouvement de terrain, car cette amplitude dépend de nombreux paramètres inconnus. En revanche, on peut évaluer l'amplitude maximale possible d'un effondrement ou affaissement connaissant les caractéristiques géométriques du secteur de carrière concerné. Si l'on considère un effondrement intégral, c'est-à-dire un effondrement qui comble l'intégralité du vide de la carrière, sans aucun foisonnement des matériaux effondrés, alors on peut montrer que l'amplitude maximale de l'affaissement des terrains de surface doit être égale au produit suivant :

$$\text{Taux de défrètement} \times \text{hauteur des galeries}$$

Ce calcul est pessimiste car il ne tient pas compte du fait que les piliers ne s'écraseraient sûrement pas totalement et du fait que les terrains ont une certaine rigidité qui amoindrirait l'amplitude du mouvement en se rapprochant de la surface du sol. Quoi qu'il en soit, ce calcul permet d'obtenir un ordre de grandeur physiquement réaliste de l'amplitude potentielle d'un mouvement de terrain.

Lorsqu'on applique ce calcul en considérant les dimensions caractéristiques de la Grande carrière de Latresne, on obtient des amplitudes de mouvement de terrains qui varient entre 0,9 m et 2,5 m. On constate que même l'amplitude la plus faible est suffisante pour provoquer de graves dégâts sur un bâtiment, voire son effondrement total.

L'intensité ne sera donc pas, pour nous, un facteur différenciant dans l'évaluation des aléas, puisqu'elle est toujours très importante. Nous nous concentrerons plutôt sur la caractérisation de la prédisposition, qui, comme nous le verrons par la suite, est très variable à l'échelle de la carrière.

5.3 Evaluation de l'aléa à partir de la prédisposition

Découpage de la carrière en secteurs

Nous constatons que les effondrements ou affaissements généralisés survenus en Gironde concernent toujours des secteurs bien délimités, qui mesurent quelques dizaines de mètres de diamètre. Pour évaluer les aléas de mouvement de terrains, il n'y a donc pas lieu de considérer les piliers de manière individuelle ou au contraire de considérer la carrière dans sa globalité. L'échelle d'étude la plus pertinente est celle des « secteurs d'exploitation » composées de quelques piliers à quelques dizaines de piliers.

Les secteurs d'exploitation sont parfois très clairement délimités dans la carrière par la présence de piliers barrières ou de stots. Mais, le plus souvent, les piliers ont des dimensions et des formes très irrégulières, de sorte qu'on n'est pas capable d'effectuer une sectorisation de manière évidente.

Nous avons donc décidé de se fixer deux règles pour sectoriser de manière consistante la carrière :

- Tout pilier de plus de 100 m² de section constitue une limite de secteur (car nous considérons qu'un pilier de cette taille ne peut pas s'effondrer).
- Tout passage perpendiculairement auquel il n'y a pas plus de 2 piliers constitue une limite de secteur (car nous considérons qu'un passage de cette taille ne peut pas s'effondrer).
- Les salles dans lesquelles il n'y a pas plus de 2 rangées de piliers dans le sens de la largeur ne sont pas considérées car elles ne présentent, selon nous, aucun risque d'effondrement.
- Tous les secteurs constitués de moins de 12 piliers ne sont pas pris en compte, car nous considérons que de tels secteurs ne peuvent pas s'effondrer, étant donné la configuration de la carrière.
- Les limites extérieures des secteurs sont considérées à mi-distance entre les dernières rangées de piliers et le front de taille.

En appliquant ces règles et en réajustant manuellement certaines limites pour tenir des dispositions particulières de piliers, nous avons abouti à un découpage de la carrière en 47 secteurs, tous étages confondus, pour lesquels l'aléa de mouvement de terrain a été évalué individuellement. Les parties de la carrière qui n'appartiennent à aucun secteur sont considérées d'office comme ne présentant aucun aléa de mouvement de terrains généralisé.

Les caractéristiques suivantes ont été mesurées pour chaque secteur :

- Largeur moyenne des piliers l_p ;
- Largeur moyenne des galeries l_g ;
- Hauteur moyenne des galeries h_g ;
- Epaisseur moyenne des terrains recouvrant H ;
- Dimensions du secteur (périmètre P , superficie S , largeur q et longueur Q) ;
- Le nombre de piliers dans le secteur (N_p) ;
- Etat de dégradation de (pratiquement) tous les piliers de la carrière suivant l'échelle de dégradation présentée à la section suivante.

Et les indicateurs suivants ont été calculés :

- Rapport de forme des piliers : l/h ;
- Taux de défrètement local τ ;
- Rapport de forme du recouvrement $Q/H, q/H$;
- Contrainte verticale moyenne agissant sur les piliers (selon la méthode de l'aire tribulaire) :
$$\sigma = \frac{18000 \times H}{1 - \tau}$$
 (18 000 étant le poids volumique moyen des terrains exprimé en N/m^3) ;
- Etat de dégradation des piliers moyenné par secteur.

Le tableau de données complet est fourni en annexe du présent rapport.

Diagnostic de l'état de dégradation des piliers

Sur la base de notre expérience des carrières de Gironde, en général, et des carrières de Latresne et des communes voisines en particulier, nous avons mis au point une échelle de notation à 7 catégories pour caractériser l'état de conservation/dégradation des piliers (se référer au dossier photo joint) :

- 0 : piliers intacts (aucune fissuration, ni aucune déformation) ;
- 1 : piliers fissurés (fissures dans les angles) ;
- 2 : piliers faiblement écaillés (fissures dans les angles et dans la longueur des piliers formant des écailles de quelques dizaines de centimètres de profondeur, toujours en contact avec les parois) ;
- 3 : piliers fortement écaillés (fissures dans les angles et dans la longueur des piliers formant des écailles de plusieurs dizaines de centimètres de profondeur, qui ont tendance à s'incliner et à se détacher des parois) ;
- 4 : piliers affaissés (écailles tombées au sol, piliers en forme de sablier, affaissement vertical de l'ordre de quelques millimètres à centimètres) ;
- 5 : piliers écrasés (écrasement vertical des piliers sur plusieurs dizaines de centimètres, multiples fracturations découpant les piliers en plusieurs blocs disjoints) ;
- 6 : piliers effondrés (pilier totalement écrasés ou basculés au sol, secteur inaccessible).

Dans la Grande carrière de Latresne, nous avons observé régulièrement les catégories 1 à 4. Nous n'avons observé que très rarement des piliers intacts (catégorie 0) et aucune occurrence de pilier totalement écrasé ou effondré (catégories 5 et 6). Il est également important de préciser que nous n'avons constaté aucun changement significatif de l'état des piliers au cours des 4 années d'étude.

Notons dès maintenant que les dégradations visibles aux parois des piliers n'ont rien d'atypique. Nous constatons systématiquement ce type de dommages lorsque la contrainte verticale sur les piliers dépasse une valeur de l'ordre de 1 MPa à 1,2 MPa, ce qui est bien le cas dans la Grande carrière de Latresne. Cette valeur de contrainte correspond à la limite d'élasticité des piliers, c'est-à-dire la contrainte de compression au-delà de laquelle les premiers dommages apparaissent et où les piliers ne se comportent donc plus de manière élastique. Cela ne signifie pas forcément que les piliers sont sur le point de s'effondrer, ces dommages sont simplement représentatifs d'un changement de comportement mécanique.

La résistance maximale des piliers, c'est-à-dire la contrainte maximale qu'ils sont capables de soutenir avant de s'effondrer ou de s'écraser, peut se trouver bien au-delà de leur limite d'élasticité.

Analyse des données sectorisées

Pour comprendre le comportement mécanique de la carrière il est intéressant d'analyser les corrélations statistiques susceptibles d'exister entre l'état de dégradation moyen des piliers de chaque secteur et les différents indicateurs géométriques que nous avons calculés.

Le tableau suivant indique les valeurs des coefficients de corrélation de *Spearman* (corrélation de rang), à la première ligne et les probabilités associées (*p-value*), qui définissent le niveau de significativité des corrélations, à la deuxième ligne. Les corrélations significatives au risque de 5% sont indiquées en rouge (soit les corrélations dont la probabilité qu'elles soient dues au hasard est inférieure à 5%).

	h_g	l_p	l_g	H	S	P	Q	q	τ	N_p	l/h	Q/H	q/H	σ
Corrélation avec l'état des piliers	7%	17%	3%	35%	40%	32%	47%	14%	-11%	36%	13%	19%	-12%	33%
p-value	65%	26%	86%	2%	1%	4%	0%	38%	47%	2%	39%	20%	45%	3%

On constate que les corrélations significatives au risque de 5% concernent, d'une part, des indicateurs de la charge imposée aux piliers : H et σ et, d'autre part, des indicateurs des dimensions des secteurs : S , P , Q et N_p . Parmi les indicateurs relatifs aux dimensions des secteurs on constate que la longueur maximale des secteurs Q est l'indicateur associé à la plus forte corrélation. Il sera donc retenu par la suite.

Sur la base de nos données, on peut donc affirmer que les piliers ont, en moyenne, tendance à être plus endommagés que la moyenne dans les secteurs de grande taille soumis à une charge importante imposée par le poids des terrains recouvrant.

On constate que les facteurs qui ont une influence sur l'endommagement des piliers sont également les facteurs qui sont, selon notre retour d'expérience, associés à un plus grand risque d'effondrement. Par extension, on peut donc raisonnablement supposer que l'endommagement des piliers est un facteur d'augmentation du risque d'effondrement, ce qui semble assez naturel.

Notons que les valeurs des coefficients de corrélations sont bien significatives mais restent néanmoins modérées, ce qui signifie qu'il existerait d'autres facteurs, que nous n'avons pas pris en compte et qui contribueraient à expliquer pour partie l'état d'endommagement des piliers. La résistance intrinsèque de la roche (qui est susceptible de varier de manière notable d'un secteur à l'autre et d'un étage à l'autre) et la composition des terrains recouvrant font à coup sûr partie de ces facteurs. Les aléas devront être évalués avec suffisamment de précaution pour tenir compte du fait que ces deux facteurs, potentiellement importants, n'ont pas été considérés dans l'étude.

Définition de règles d'évaluation des aléas

L'évaluation des aléas consiste à agréger ou combiner les différents facteurs influents qui jouent un rôle prédominant dans la probabilité d'occurrence des effondrements et à en extraire un indicateur chiffré.

Le choix des facteurs influents considérés dans l'évaluation de l'aléa et le choix de la méthode d'agrégation de ces facteurs sont arbitraires. Compte tenu des connaissances théoriques générales présentées à la section 4 du rapport et compte tenu des résultats présentés à la section précédente, nous avons décidé de retenir les 4 facteurs influents suivants, qui sont selon nous les plus importants :

- l/h ;
- Q/H et Q ;
- τ ;
- **Etat de dégradation des piliers.**

Nous avons établi 3 classes de chaque facteur, chaque classe étant associée à une note : **1, 2 ou 3**.

Les classes des facteurs ont été agrégés par paires, par le biais d'une opération multiplicative, de manière à obtenir deux indicateurs distincts : un indice de la fragilité des piliers et un indice de la souplesse des terrains recouvrant (voir tableaux suivants).

Indice de la fragilité des piliers	$l/h > 3$ (1)	$3 \geq l/h > 2$ (2)	$l/h \leq 2$ (3)
Piliers fissurés (1)	1	2	3
Piliers écaillés (2)	2	4	6
Piliers affaissés (3)	3	6	9

Indice de la souplesse des terrains	$Q/H < 1$ ou $Q < 35 m$ (1)	$1 \leq Q/H < 1,5$ ou $35 m \leq Q < 50 m$ (2)	$Q \geq 1,5$ ou $Q \geq 50 m$ (3)
$\tau < 60\%$ (1)	1	2	3
$60\% \leq \tau < 70\%$ (2)	2	4	6
$\tau \geq 70\%$ (3)	3	6	9

Ces deux indices ont été à leur tour agrégés par multiplication pour obtenir un indicateur chiffré de l'aléa de mouvement de terrain généralisé. Plus le chiffre est élevé, plus l'aléa est élevé.

ALEA de mouvement de terrain généralisé		Indice de fragilité des piliers					
		1	2	3	4	6	9
Indice de souplesse des terrains recouvrant	1	1	2	3	4	6	9
	2	2	4	6	8	12	18
	3	3	6	9	12	18	27
	4	4	8	12	16	24	36
	6	6	12	18	24	36	54
	9	9	18	27	36	54	81

Afin de clarifier l'affichage des niveaux d'aléa sur la carte de zonage, nous avons finalement effectué des regroupements des valeurs de l'aléa en catégories synthétiques, pour aboutir à la classification suivante :

ALEA de mouvement de terrain généralisé		Indice de fragilité des piliers					
		1	2	3	4	6	9
Indice de souplesse des terrains recouvrant	1	Très faible	Très faible	Très faible	Faible	Faible	Moyen
	2	Très faible	Faible	Faible	Faible	Moyen	Moyen
	3	Très faible	Faible	Faible	Moyen	Moyen	Fort
	4	Faible	Faible	Moyen	Moyen	Fort	Fort
	6	Faible	Moyen	Moyen	Fort	Fort	Très fort
	9	Moyen	Moyen	Fort	Fort	Très fort	Très fort

5.4 Ajustement de l'aléa final

Les catégories d'aléas déterminées à partir du tableau précédent ont été, dans un second temps, ajustées en considérant d'autres facteurs susceptibles d'avoir une influence sur la prédisposition, à savoir :

- La configuration des piliers ;
- Les superpositions d'étages ;
- La fragilité des terrains recouvrant.

L'aléa a été augmenté d'un niveau pour les secteurs présentant des configurations de piliers particulièrement défavorables, c'est-à-dire des très grands groupes de piliers de petite taille sans aucun pilier de grande taille. Il a été à l'inverse diminué d'un niveau pour les configurations favorables.

L'aléa a été augmenté d'un niveau en cas de superposition de deux secteurs appartenant à deux étages différents et présentant tous les deux un aléa non-négligeable.

L'aléa a été augmenté d'un niveau dans les secteurs où nous avons constaté visuellement que les terrains recouvrant sont particulièrement souples et fragiles et/ou le toit des galeries présente des défauts géologiques majeurs (fissures, vides karstiques, stratifications). Cela correspond essentiellement aux parties de la carrière qui se situent sous le coteau, à proximité de la Route de Bordeaux, car l'épaisseur de roche y est globalement moins importante au-dessus de la carrière et les fissures géologiques (fissures de versant, en l'occurrence) y sont plus fréquentes.

Notons que la présence éventuelle d'eau dans les galeries n'a volontairement pas été considérée comme un facteur aggravant l'aléa, car nous n'avons, pour le moment, identifié aucune corrélation entre la présence permanente d'eau en carrière et l'occurrence des effondrements. Aucune étude n'a jamais montré une telle corrélation à notre connaissance.

5.5 Interprétation des niveaux d'aléa

Précisons que les niveaux d'aléa sont à considérer de manière relative. C'est-à-dire qu'un aléa noté « très fort » est à considérer « très fort » par rapport à la moyenne de l'aléa de cette carrière. Mais cela ne signifie pas forcément qu'il y a un danger imminent et absolu. En effet, la Grande carrière de Latresne ne présente pas, globalement, une configuration aussi défavorable que les carrières Gironde qui ont déjà connu des effondrements. La surveillance régulière de la carrière conduira peut-être, dans le futur, à identifier des zones présentant un danger imminent (se référer aux recommandations de la section 8), mais ce n'est pas le cas pour l'instant.

6. Evaluation des aléas d'effondrement localisé

Compte tenu de sa profondeur et de sa configuration géomécanique, la Grande carrière de Latresne est globalement peu concernée par les aléas d'effondrement localisé. Jamais aucun effondrement de ce type n'a d'ailleurs été observé au-dessus de cette carrière malgré sa très grande superficie et malgré le fait que les effondrements localisés sont des phénomènes récurrents en Gironde. Mais il existe tout de même quelques zones de la carrière où cet aléa doit être considéré.

6.1 Evaluation du délai d'occurrence

Le délai d'occurrence des effondrements localisés est très incertain. En général, on constate qu'ils se déclenchent pendant ou peu de temps après les périodes de fortes pluies. L'automne est donc une période particulièrement sensible. Mais nous sommes incapables de prévoir au cours de quelle année un effondrement va avoir lieu. Comme pour les aléas de mouvement de terrains généralisé, on raisonne sur la base d'un délai de référence centennal, afin de tenir compte du fait que l'état de la carrière est susceptible d'évoluer de manière notable au cours du temps, mais il faut garder à l'esprit que la temporalité est très incertaine.

6.2 Evaluation de l'intensité

Comme pour les mouvements de terrains généralisés, l'intensité d'un effondrement localisé est définie par son diamètre (ou sa superficie) et son amplitude verticale. Le diamètre est déjà intégré dans la cartographie de l'aléa, il ne doit donc pas être de nouveau considéré dans l'évaluation du niveau de l'aléa pour éviter toute redondance.

L'amplitude verticale d'un effondrement localisé dépend de plusieurs facteurs, comme la largeur des galeries, la hauteur des galeries, l'épaisseur des terrains recouvrant, le caractère plus ou moins brutal de l'effondrement, le coefficient de foisonnement des terrain effondrés, etc. Il se trouve que la plupart de ces facteurs a également une influence sur la prédisposition. Les deux aspects (prédisposition à l'effondrement et intensité) peuvent en fait être évalués de manière concomitante.

6.3 Evaluation de l'aléa

Les effondrements localisés sont des évènements ponctuels qui concernent des portions restreintes de galeries. L'aléa correspondant doit donc être évalué localement, galerie par galerie. Il n'y a pas lieu d'effectuer une sectorisation comme nous l'avons fait pour les aléas de mouvement de terrains généralisé.

Les effondrements localisés se produisent à la suite de l'endommagement et de l'éboulement du toit des galeries. Dans les carrières de Gironde, les éboulements de toit surviennent généralement au droit des galeries présentant une grande largeur, et/ou des défauts de nature géologiques, comme des fissures, des vides karstiques ou des stratifications horizontales.

De plus, il faut noter qu'en dehors de situations très exceptionnelles, il est pratiquement impossible que l'éboulement du toit d'une galerie provoque un effondrement localisé de la surface du sol lorsque l'épaisseur des terrains recouvrant (H) est supérieure à 15 m (en considérant les dimensions de galeries caractéristiques de la Grande carrière de Latresne). Toutes choses étant égales par ailleurs, la probabilité d'effondrement augmente à mesure que l'épaisseur des terrains diminue.

Pour évaluer les aléas d'effondrement localisé dans la Grande carrière de Latresne, nous avons tenu compte de l'épaisseur des terrains recouvrant H et de la présence de défauts géologiques dans le toit des galeries. En revanche, la largeur des galeries n'a pas été considérée car elle est relativement constante dans toute la carrière.

Le tableau suivant présente notre méthode d'évaluation de l'aléa d'effondrement localisé.

ALEA d'effondrement localisé		Epaisseur des terrains recouvrant			
		$H > 15 \text{ m}$	$15 \text{ m} \geq H > 10 \text{ m}$	$10 \text{ m} \geq H > 5 \text{ m}$	$H \leq 5 \text{ m}$
Défauts géologiques dans le toit et/ou toit fragile ?	Non	Négligeable	Très faible	Faible	Moyen
	Oui	Négligeable	Faible	Moyen	Fort

7. Cartographie des aléas

7.1 Marge de sécurité

Notons que, sur la carte de zonage, l'emprise des zones d'aléa a été volontairement affichée plus large que l'emprise des secteurs ou des galeries concernées à l'intérieur de la carrière, afin de tenir compte des deux points suivants :

- Les erreurs de positionnement cartographique, qui ont été évaluées à la section 3.4. Nous avons élargi les zones d'aléa de 40 cm à proximité des cheminements topographiques, de 80 cm dans les secteurs éloignés des cheminements topographique et de 2 m pour ce qui concerne l'étage supérieur (-1) du lieu-dit Pitrot, pour lequel l'erreur de positionnement est incertaine en raison du fait que nous n'avons pas nous-même effectué les relevés topographiques.
- La zone d'influence des mouvements de terrain potentiels. En cas d'effondrement en carrière, il est difficile de prévoir l'emprise du mouvement de terrain induit, en surface. En ce qui concerne les effondrements déjà survenus en Gironde, nous avons constaté que l'emprise de l'effondrement au sol est, à peu de choses près, identique à l'emprise de l'effondrement en carrière. Mais on peut tout à fait imaginer des situations dans lesquelles les mouvements de terrain déborderaient légèrement de l'emprise de l'effondrement en carrière, par effet de tassement ou de fléchissement. Par précaution, il nous a donc semblé raisonnable de considérer un angle d'influence de 20° mesuré par rapport à la verticale depuis le toit des galeries (valeur généralement conseillée pour les roches calcaires). *L'angle de 45° parfois considéré dans les études d'aléas nous semble exagérément pessimiste étant donné les conditions géologiques locales.*

Le schéma présenté dans le document annexe illustre la manière dont est représentée sur la carte une zone d'aléa pour un secteur de carrière donné.

Du fait de l'élargissement de l'emprise des zones d'aléas par rapport à l'emprise des secteurs de carrière concernés par l'aléa, il est fréquent que des zones présentant des niveaux d'aléa différents se chevauchent. Au niveau des chevauchements de deux zones présentant deux aléas différents, nous avons choisi de retenir et d'afficher sur la carte le niveau d'aléa le plus fort des deux.

7.2 Bilan chiffré du zonage des aléas

Niveau d'aléa mouvement de terrain généralisé	Superficie de carrière concernée	Pourcentage de la superficie totale de la carrière	Surface totale avec marge d'influence (Ha)	Nombre d'habitations concernées
Aucun aléa	29,5 Ha	71%	N.C.	93
Très faible	0,2 Ha	1%	0,26 Ha	2
Faible	1,5 Ha	4%	5,0 Ha	25
Moyen	4,7 Ha	11%	8,0 Ha	32
Fort	3,5 Ha	8%	6,7 Ha	23
Très fort	1,9 Ha	5%	2,3 Ha	2
TOTAL	41,3 Ha	100%	22,3 Ha	177

Niveau d'aléa effondrement localisé	Surface totale avec marge d'influence	Nombre d'habitations concernées
Aucun aléa	N.C.	173
Très faible	0,6 Ha	4
Faible	0,7 Ha	0
Moyen	0,24 Ha	0
Fort	0,1 Ha	0

8. Conclusions et recommandations du syndicat

La Grande carrière de Latresne présente la particularité d'être située sous un grand nombre d'habitations (177 si l'on compte uniquement les maisons situées à l'aplomb immédiat de la carrière). Elle est nettement endommagée, mais n'a pour l'instant jamais connu d'effondrement de grande ampleur et, *a fortiori*, n'a jamais provoqué de mouvement de terrain à la surface du sol.

Toute la partie Nord de la carrière, qui concerne environ 93 habitations, présente une configuration géométrique et géomécanique favorable à une stabilité durable et nous n'y voyons aucun aléa significatif.

En revanche, l'endommagement de la carrière est susceptible de s'aggraver au cours du temps, dans ces parties centrale et Sud, qui présentent des configurations géométriques et géomécaniques nettement moins favorables. On peut s'attendre, en particulier, à ce que les piliers s'écrasent progressivement par effet de fluage, ce qui pourrait provoquer, à terme, dans des délais difficilement prévisibles, des mouvements de terrains généralisés susceptibles de générer de graves dégâts sur le bâti et par conséquent des dégâts humains.

Nous estimons que 29 % de la superficie de la carrière est concernée par des aléas de mouvements de terrain. Et 13% de la superficie de la carrière est considéré comme présentant un aléa fort ou très fort, ce qui concerne 25 habitations.

Nous conseillons à la commune d'informer les propriétaires des aléas qui les concernent et de leur recommander de prévoir des mesures de prévention adaptées au niveau d'aléa. Le tableau suivant propose des mesures de préventions qui nous semblent raisonnables au vu des caractéristiques de la carrière et des enjeux concernés.

Niveau d'aléa	Recommandations (si présence d'enjeux à la surface)
Aucun aléa	Surveillance visuelle tous les 20 ans ou à chaque changement de propriétaire
Aléa très faible	Surveillance visuelle tous les 10 ans
Aléa faible	Surveillance visuelle tous les 5 ans
Aléa moyen	Surveillance visuelle tous les 2 ans
Aléa fort	Surveillance visuelle 1 fois par an + mise en place éventuelle d'un dispositif de suivi instrumenté léger en carrière
Aléa très fort	Surveillance visuelle tous les 6 mois + mise en place d'un dispositif instrumenté complet et permanent en carrière avec un système d'alerte automatique

Notre syndicat est parfaitement compétent pour effectuer la surveillance visuelle régulière des carrières, à la demande des propriétaires concernés et selon des modalités à définir le cas échéant.

En ce qui concerne la mise en place d'un dispositif d'instruments de mesure en carrière avec enregistrement de différents paramètres et mise en place éventuelle d'un dispositif d'alerte automatique, nous recommandons toutefois de faire appel à un bureau d'études géotechniques spécialisé.

Notons que les aléas sont par définition incertains. Ils sont donc susceptibles d'être réévalués au cours du temps en fonction des observations faites lors des inspections successives et en fonction de l'évolution de nos connaissances.

Si des évolutions notables de l'endommagement de la carrière sont repérées, alors le niveau d'aléa sera réévalué à la hausse, ce qui conduira à augmenter le niveau de vigilance. Si de telles évolutions sont constatées dans des secteurs déjà associés à un aléa fort ou très fort, alors des mesures plus drastiques deviendront peut-être nécessaires, comme de la consolidation de la carrière (si possible, en fonction de l'accessibilité du site et du danger potentiel pour les ouvriers) ou bien, dans des situations extrêmes, l'évacuation des habitations à risque.

Précisons que pour le moment, il ne nous semble pas justifié de prendre de telles mesures, y compris dans les zones affectées d'un aléa fort ou très fort. Nous recommandons simplement de prévoir, dans un premier temps, une surveillance attentive et régulière de la carrière selon les préconisations du tableau précédent.