

ANNEXE 3

Rapport INERIS DRS-04-57693/R02

«Zone d'exploitation de bauxite du bassin de Villeveyrac (34) – Contribution à la réalisation d'un plan de prévention des risques miniers

Définition et cartographie de l'aléa »».



Zones d'exploitation de bauxite du bassin de Villeveyrac (34)

Contribution à la réalisation d'un Plan de Prévention
des Risques Miniers

Définition et cartographie de l'aléa

GEODERIS

C. POULARD, C. LOISEAU

*Unité Modélisation et Evaluation des Risques Géotechniques
Direction des Risques du Sol et du Sous-sol*

18 février 2005

Zones d'exploitation de bauxite du bassin de Villeveyrac (34)

Contribution à la réalisation d'un Plan de Prévention des Risques Miniers

Définition et cartographie de l'aléa

GEODERIS

18 FEVRIER 2005

Ce document comporte 46 pages (hors couverture et annexes)

	Rédaction	Vérification	Approbation
NOM	F. POULARD	X. DAUPLEY	C. TAUZIEDE
Qualité	Ingénieur à l'unité Modélisation et Evaluation des Risques Géotechniques de la Direction des Risques du Sol et du Sous-sol	Ingénieur à l'unité Modélisation et Evaluation des Risques Géotechniques de la Direction des Risques du Sol et du Sous-sol	Directeur des Risques du Sol et du Sous-sol
Visa			

TABLE DES MATIERES

1. OBJET ET CONTEXTE.....	4
1.1 CADRE	4
1.2 TRAVAUX REALISES	4
1.3 OBJET ET CONTENU DE L'ETUDE	4
2. ALEA MOUVEMENTS DE TERRAIN	6
2.1 INCERTITUDES DANS LA CARTOGRAPHIE DE L'ALEA	6
2.2 DEFINITION DES CONFIGURATIONS	6
2.2.1 Configurations de travaux souterrains	6
2.2.2 Configurations de travaux à ciel ouverts.....	9
2.2.3 Configurations d'orifices et de désordres en surface	10
2.3 EFFONDREMENTS LOCALISES	11
2.3.1 Évaluation de la prédisposition aux effondrements localisés par configurations	11
2.3.2 Évaluation de l'intensité des effondrements localisés	17
2.3.3 Évaluation du niveau d'aléa.....	17
2.3.4 Zonage de l'aléa	19
2.4 EFFONDREMENT GENERALISE	21
2.5 AFFAISSEMENTS MINIERS.....	23
2.5.1 Évaluation de la prédisposition aux affaissements miniers par configurations	23
2.5.2 Évaluation de l'intensité des affaissements miniers	26
2.5.3 Évaluation du niveau d'aléa.....	27
2.5.4 Zonage de l'aléa	28
2.6 TASSEMENTS.....	30
2.6.1 Évaluation de la prédisposition aux tassements par configurations	30
2.6.2 Évaluation de l'intensité des tassements	31
2.6.3 Évaluation du niveau d'aléa.....	31
2.6.4 Zonage de l'aléa	32
2.7 GLISSEMENTS DE TERRAIN ET ECROULEMENTS	33
2.7.1 Évaluation de la prédisposition aux écroulements et glissements par configurations	33
2.7.2 Évaluation de l'intensité des glissements et des écroulements	36
2.7.3 Évaluation du niveau d'aléa.....	36
2.7.4 Zonage de l'aléa	37
2.8 COULEES DYNAMIQUES.....	37
3. ALEA GAZ DE MINE	39
3.1 ETAT D'ENNOYAGE DES VIDES MINIERS	39
3.2 ELEMENTS RELATIFS AUX GAZ DE MINE	42
3.3 DEFINITION ET CARTOGRAPHIE DE L'ALEA « GAZ DE MINE »	42
3.3.1 Définition des niveaux d'aléa	42
3.3.2 Limites de zonage	43
4. BIBLIOGRAPHIE.....	45
5. LISTE DES ANNEXES.....	46

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Simulation des hauteurs de remontée de voûte dans le phénomène d’effondrement localisé	14
Tableau 2 : Niveaux d’aléa «mouvements de terrain» relatif aux phénomènes d’effondrements localisés	18
Tableau 3 : Marges de sécurité des zones d’aléa «mouvements de terrain» relatif aux effondrements localisés	21
Tableau 4 : Niveaux d’aléa «mouvements de terrain» relatif aux phénomènes d’affaissements miniers	27
Tableau 5 : Marges de sécurité des zones d’aléa «mouvements de terrain» relatif aux affaissements miniers	29
Tableau 6 : Niveaux d’aléa «mouvements de terrain» relatif aux phénomènes de tassements.....	32
Tableau 7 : : Marges de sécurité des zones d’aléa «mouvements de terrain» relatif aux tassements.....	33
Tableau 8 : Niveaux d’aléa «mouvements de terrain» relatif aux phénomènes d’écroulements et de glissements	36
Tableau 9 : Marges de sécurité des zones d’aléa mouvement de terrain relatif aux écroulements et aux glissements.....	37
Tableau 10 : Suivi des niveaux d’eau dans certains orifices miniers du bassin de Villeveyrac de 1994 à 1997	40
Tableau 11 : Marges de sécurité des zones d’aléa relatif à l’émission de gaz de mine en surface.....	44

1. OBJET ET CONTEXTE

1.1 CADRE

Le vaste synclinal de « Villeveyrac », situé dans le département de l'Hérault (34), est le siège d'anciens travaux miniers importants, souterrains et à ciel ouvert, concernant des gisements de bauxite. Ces exploitations s'étendent sur les communes de Villeveyrac, de Loupian et de Mèze.

La DRIRE envisage la réalisation d'un Plan de Prévention des Risques Miniers¹, relatifs à ces travaux. GEODERIS est chargé de mener à terme les études préalables à la mise en œuvre de ce plan. Pour ce faire, il a sollicité la collaboration de l'INERIS.

Le périmètre proposé pour l'établissement de ce PPRM est celui des quatre concessions minières du bassin de bauxite de Villeveyrac : celle des Usclades, celle de Villeveyrac avec une extension dite concession de Montplaisir, celle de Cambellies et celle du Mas Rouch. Il faut ajouter d'autres concessions, toutes incluses dans le périmètre de l'une des précédentes, qui font actuellement l'objet de travaux à ciel ouvert : la concession des « Usclades I » incluse dans celle des Usclades, les concessions de « Villeveyrac I » et « Villeveyrac II », incluses dans celle de Villeveyrac.

1.2 TRAVAUX REALISES

La première étape de ces études, dite phase informative, orientée vers l'acquisition et la collecte des données disponibles, a déjà été effectuée par l'INERIS ; elle a fait l'objet de deux rapports :

- « *Zones d'exploitation de bauxite du bassin de Villeveyrac (34) - Initialisation de la phase informative en vue de la réalisation d'un PPRM* », F. POULARD, C. LOISEAU et référencé INERIS DRS-03-49595/R01 en date du 30 septembre 2003 ;
- « *Zones d'exploitation de bauxite du bassin de Villeveyrac (34) - Contribution à la réalisation d'un Plan de Prévention des Risques Miniers - Phase informative* », F. POULARD, C. LOISEAU et référencé INERIS DRS-04-57693/R01-PROJET, daté du 24 novembre 2004 ;

1.3 OBJET ET CONTENU DE L'ETUDE

Le présent document s'appuie sur les données collectées lors des travaux antérieurs afin de définir, d'évaluer et de cartographier les aléas relatifs aux exploitations de bauxite du bassin de Villeveyrac.

Seront examinés ici tous les aléas qu'il convient d'examiner dans le cadre des PPRM. Il s'agira principalement de l'aléa « mouvements de terrain » et de l'aléa « gaz de mine » (voir [2] et [3]).

¹ Les Plans de Prévention des Risques Miniers (PPRM) ont été instaurés par la loi du 30 mars 1999. Le décret en conseil d'Etat n°2000-547 du 16 juin 2000, relatif à l'application des articles 94 et 95 du code minier, précise les modalités d'application du chapitre I de cette loi.

Les autres aléas « Pollution des eaux et des sols » et « Inondations » sont spécifiques (voir annexe 1) et ne seront pas étudiés dans le présent rapport. Leur évaluation fera l'objet d'une étude particulière.

En ce qui concerne l'aléa « mouvements de terrain », nous avons proposé à GEODERIS, à partir de l'analyse effectuée à l'occasion des précédents rapports, de retenir, a priori, les phénomènes d'effondrement localisé, d'effondrement généralisé, d'affaissement pour les travaux souterrains et ceux de tassement, de glissement de terrain et d'écroulement pour les travaux à ciel ouvert. Concernant l'aléa émission « gaz de mine », seule l'existence de dioxyde de carbone, d'air désoxygéné, de sulfure d'hydrogène ou éventuellement de radon pourrait, à priori, présenter un problème.

Ce document met en exergue les principaux éléments de la phase informative qui permettent de caractériser les aléas et de motiver les choix précédents ; pour plus d'informations, concernant les données générales du dossier, le lecteur est invité à se reporter aux rapports précédemment cités. Enfin, un zonage de l'aléa sera établi sur le fond topographique informatisé de la région de Villeveyrac édité par l'IGN. La cartographie réglementaire et le règlement du PPRM seront à définir ultérieurement dans une autre étude.

Notons que les éventuels phénomènes d'effondrement d'infrastructures de surface liées à l'activité minière (chevalement de puits et bâtiments divers) ne seront pas prises en compte dans l'analyse de l'aléa en raison de la situation administrative des principaux carreaux existants (acceptés par arrêté préfectoral).

En outre, les zones concernées actuellement par des travaux d'exploitation de la bauxite et localement de valorisation de la dalle calcaire menés à ciel ouvert par la SODICAPEI sur les sites du Mas Rouch (concession du Mas Rouch), de L'Olivet (concession de Villeveyrac) et de Comberouge (concession de Villeveyrac) ne seront pas analysées en raison de leur constante évolution.

2. ALEA MOUVEMENTS DE TERRAIN

2.1 INCERTITUDES DANS LA CARTOGRAPHIE DE L'ALEA

Le rendu cartographique a été réalisé à l'échelle du 1/10000. L'ensemble des informations a été reporté sur le fond topographique informatisé de la région de Villeveyrac édité par l'IGN.

Les contours des zones d'aléa définies à l'aplomb des cavités souterraines restent donc soumis à des incertitudes, même minimales, en terme de localisation. Il est également important de considérer dans l'analyse, outre les zones directement sous-minées par les travaux miniers, celles situées dans l'auréole d'influence de ces derniers.

Dans la cartographie de l'aléa, une marge de sécurité, par rapport à l'emprise stricte des travaux miniers au fond, sera donc définie. Elle englobe :

- une incertitude qui peut exister sur le positionnement des travaux ;
- une marge correspondant à l'extension latérale d'un désordre. Celle-ci est censée correspondre à l'angle de rupture des terrains, mais elle est souvent empirique du fait du manque de données.

Les valeurs de cette marge seront précisées plus avant dans ce rapport lors des définitions des différentes configurations de travaux. Notons, dès à présent, que toutes ces marges de sécurité seront, si besoin est, limitées dans leur emprise par l'affleurement du minerai de bauxite qui lui aussi intégrera une incertitude de positionnement variable selon les sites (de 0 à 30 mètres).

2.2 DEFINITION DES CONFIGURATIONS

Conformément au principe général de caractérisation et de hiérarchisation d'un aléa repris en annexe 1, il convient d'identifier, au sein des exploitations, des secteurs distincts en terme de mode d'exploitation, de topographie et de contexte géologique entre autres. L'objectif est de regrouper dans des zones de configuration type des secteurs homogènes vis-à-vis des classes d'intensité et des classes de prédisposition/probabilité d'occurrence des différents phénomènes redoutés.

Sur l'ensemble des exploitations de bauxite du bassin de Villeveyrac, 11 configurations ont été définies. Cette première définition ne prend pas en compte la profondeur des travaux. Ce critère, crucial pour une majeure partie des phénomènes redoutés, sera intégré à l'analyse plus en aval des réflexions, lors de l'évaluation des classes de prédisposition.

2.2.1 Configurations de travaux souterrains

- **Configuration 1** : zones de travaux souterrains exploitées par la méthode des chambres et piliers foudroyés, méthode notée C dans [1]. Les taux de défrêtement avant le dépilage étaient de 65% à 80 %.

Deux sites peuvent, principalement, être rattachés à cette configuration :

- les travaux souterrains de la mine Saint-Farriol sur la concession des Usclades, situés entre 30 et 120 mètres de profondeur et exploités de 1978 à 1989 ;

- la quasi-totalité des travaux souterrains des mines de la Rouquette et de Montplaisir sur la concession de Villeveyrac, exploités entre 1962 et 1985 et situés entre 75 et 300 mètres de profondeur environ. Sont exclus de cette configuration deux secteurs de ces mines : le stot de protection du château de la Rouquette au nord-ouest de la mine de la Rouquette et l'extrémité sud des travaux de la mine de Montplaisir, exploités selon d'autres méthodes. Ces deux derniers secteurs seront étudiés dans les configurations suivantes.
- **Configuration 2** : zones de travaux souterrains exploitées alternativement par les méthodes de chambres et piliers foudroyés et de chambres et piliers abandonnés (avec des taux de défrètement moyens compris entre 30 et 40 %), méthodes notées B et C dans [1].

Sont concernés par cette configuration l'intégralité des travaux souterrains de la mine des Usclades (profondeurs comprises entre 0 et 85 mètres) et ceux de la mine de Roquemale sur la concession des Usclades (profondeurs comprises entre 10 et 80 mètres).

Notons qu'un secteur de cette configuration existe à l'extrémité sud des travaux souterrains de la mine de la Rouquette. Toutefois, compte tenu de ses faibles dimensions et de la forte profondeur (entre 150 et 300 mètres), il n'a pas été jugé nécessaire de l'isoler quant à ses conséquences en surface ; il sera intégré aux travaux alentours de configuration 1.

- **Configuration 3** : zones de travaux souterrains exploitées par la méthode des chambres et piliers abandonnées, méthode notée B dans [1].

En fait, il s'agit de secteurs de traçage mais dont la densité de galeries est telle qu'ils sont assimilables à des exploitations par chambres et piliers abandonnés. Dans cette configuration, le taux de défrètement est faible et estimé au maximum à 25 %. Plusieurs secteurs ont été définis :

- deux zones entre les secteurs de configuration 2 sur les mines de Roquemale et des Usclades, grossièrement à l'est de l'entrée du plan Dalmais à des profondeurs comprises entre 0 et 40 mètres ;
- une zone au sein des travaux souterrains de la mine des Usclades à des profondeurs comprises entre 0 et 80 mètres.

A ces zones, il faut rajouter celle du stot de protection du château de la Rouquette située approximativement à 100 mètres de profondeur.

- **Configuration 4** : zones de travaux souterrains tracés.

Il s'agit de secteurs de traçage situés en périphérie des travaux de configurations précédentes, hormis ceux appartenant à la configuration 3. Ces zones bordent les exploitations des mines de Saint-Farriol, des Usclades et de Roquemale. La gamme de profondeur de ces ouvrages est large, entre 0 et 120 mètres. Généralement les galeries présentent une hauteur de 1,8 mètre et une largeur de 2 mètres. Ces valeurs peuvent être augmentées localement à 3 mètres sur 3 mètres. La zone de galeries reliant le puits de la Rouquette aux zones de travaux souterrains de la mine de Montplaisir et de la mine de la Rouquette sont rattachés à cette configuration.

- **Configuration 5** : zones de travaux souterrains exploitées par la méthode des chambres et piliers « tournés » ou « contournés », méthode notée A dans [1]. Ces travaux ont bien souvent été menés depuis la fin du siècle dernier jusqu'aux années 1960.

Dans ces zones, le minerai n'était pas entièrement pris : à l'époque seule la bauxite « blanche », plus pauvre en fer, était exploitée ; la « rouge » était laissée en place. En outre, les mineurs s'adaptaient aux variations géologiques du gisement comme les apophyses du mur de dolomies qui remontaient parfois jusqu'au toit de la bauxite. Cette exploitation au meilleur de la qualité du minerai conduisait à des schémas d'exploitations peu conventionnels, peu rationnels, qui vont dans tous les sens et très différents d'un point à l'autre du gisement, en termes de tracé et de puissance exploitée par exemple. Le résultat de ces exploitations sont des piliers « tournés » ou « contournés » avec des chambres quasiment systématiquement sans boisage. Ces chambres étaient rarement remblayées et, le plus souvent, compte tenu de la faible profondeur des travaux, les piliers étaient abandonnés, avec des taux de défrètement souvent voisins de 40 %.

Sont concernées ici les travaux souterrains suivants : les mines de Cocaval, de Regagnas, du Chemin du Poussan, de Vicaresse (ou Rec) sur la concession des Usclades, la mine de Comberouge sur la concession de Villeveyrac et la mine du Mas Rouch sur la concession du même nom. Il s'agit toujours de travaux menés bien avant les années 1960 dates des premières concessions. Il n'y a que peu ou pas d'informations disponibles sur ces mines et aucune description n'en est faite dans les dossiers d'abandon. Néanmoins, selon l'exploitant actuel, avant les dates des premières concessions, des tentatives de travaux selon cette méthode A ont été mises en place sur tous les sites précédents, comme à la mine du Chemin du Poussan encore accessible aujourd'hui. Une des caractéristiques principales de ces travaux est qu'ils étaient réalisés quasiment systématiquement entre 0 et 40 mètres de profondeur.

Notons qu'une partie des travaux miniers souterrains de Mas Rouch et de Comberouge ont sans doute été repris par les travaux actuels menés à ciel ouvert mais, en raison de leur évolution, il ne sera pas tenu compte de ces travaux récents dans l'analyse qui suit.

La mine de Cambellies aurait présenté des travaux anciens de cette configuration (traces aux archives). Mais, compte tenu des visites de sites et des entretiens avec l'exploitant actuel, il est très probable que les travaux souterrains n'existent plus aujourd'hui. Ils auraient tous été repris par la réalisation de la découverte. Ce secteur entre donc dans la configuration 7 qui suit.

- **Configuration 6** : zones d’affleurement des lentilles de bauxite potentiellement explorée hors zones de travaux connues.

Est concernée par cette configuration une grande zone limitée par l’affleurement du minerai de bauxite, au nord et à l’est du bassin de Villeveyrac, et par la limite des 40 m de profondeur de la couche de bauxite, en suivant la pente du gisement exploité. Cette limite des 40 mètres de profondeur a été établie grâce aux niveaux NGF des travaux issus des plans scannés ; elle a ensuite été extrapolée dans les secteurs exempts des travaux (en tenant compte de la topographie de surface et de la forme de l’affleurement).

Comme nous le verrons par la suite, ce secteur ainsi délimité présente toutes les caractéristiques géologiques favorables au creusement d’une galerie et à l’initiation d’une zone de travaux anciens (par la méthode A vraisemblablement). Cette profondeur limite résulte de l’étude des documents disponibles qui révèlent que les anciens mineurs ne s’aventuraient jamais au-delà de cette limite car alors les venues d’eau étaient trop importantes en regard des moyens de pompage de l’époque.

2.2.2 Configurations de travaux à ciel ouverts

- **Configuration 7** : zones de travaux à ciel ouverts (découvertes) non remblayées.

Les découvertes faisant partie de cette configuration sont celles :

- de l’Olivet sur la concession des Usclades. Sur sa limite sud, elle présente des fronts rocheux verticaux d’environ 20 mètres de hauteur ;
- l’extrémité ouest de celle de Saint-Farriol sur la concession des Usclades. Elle présente des fronts rocheux verticaux de 10 à 15 mètres de haut ;
- celle de Cambellies sur la concession du même nom. Elle présente des fronts rocheux verticaux sur tous ses abords et une hauteur maximale de 20 mètres.

- **Configuration 8** : zones de travaux à ciel ouverts (découvertes) remblayées.

Les découvertes faisant partie de cette configuration sont celles de Roquemale, des Usclades et Bergerie, de Cocaval, de Regagnas, du Chemin du Poussan, de Vicarrese-Rec et le fond de celle de Saint-Farriol sur la concession des Usclades, celle de Comberouge sur la concession de Villeveyrac et enfin celle du Mas Rouch sur la concession du même nom. Elles sont quasiment toutes aujourd’hui invisibles, le sol ayant été nivelé après le remblayage. Notons une particularité des sites de Regagnas et de Rec-Vicarrese qui présentent une succession de fronts rocheux (reste de la découverte ou de décapage) de hauteur métrique.

- **Configuration 11** : zones de dépôts de stériles.

Elles se situent sur les sites miniers suivants : Roquemale, Usclades, Cocaval, Regagnas, Chemin du Poussan, Vicarrese-Rec, Saint-Farriol, L’Olivet, Mas Rouch et Cambellies. Les deux plus importantes, celles de l’Olivet et de Saint-Farriol, présentent des hauteurs comprises entre 10 à 15 mètres et des pente comprises entre 25° et 35°. Toutes les autres zones de dépôts ont servi au remblayage de découvertes.

2.2.3 Configurations d'orifices et de désordres en surface

- **Configuration 9** : Secteurs affectés par des désordres en surface et/ou des orifices miniers (puits et entrées de galeries) connus et mis en sécurité. Les puits ont été dallés et les entrées de galeries l'ont aussi été après avoir été en partie remblayées. Quant aux fontis traités, ils ont simplement été remblayés.

Sont listés ci-après tous les secteurs répondant à cette configuration :

- les puits de Roquemale 1, de Roquemale 2, des Usclades et le puits du Rec sur la concession des Usclades, le puits de la Rouquette, sur la concession de Villeveyrac ;
- l'entrée du plan Dalmais à la mine de Roquemale, les deux descenderies du carreau de la mine des Usclades, la descenderie de la mine de Regagnas, les quatre descenderies de la mine de Saint-Farriol et la descenderie de Comberouge. Notons une particularités de ces 4 ouvrages dont les orifices se situent une grande partie de l'années sous eaux.

Entre les sites de Regagnas et du chemin du Poussan (concession des Usclades), récemment, une galerie isolée, dite galerie de Granouillet, a été découverte sur ce site. Elle passe sous la route de Villeveyrac à Poussan (RD 2). Elle a été bétonnée sur ses 40 mètres de longueur ; elle fait donc partie des travaux de cette configuration.

Au nord du site de Roquemale (concession de Villeveyrac), selon l'exploitant actuel, en 1997 le passage d'un motoculteur dans les vignes a déclenché la rupture du toit d'une galerie affleurante isolée et la formation d'un fontis d'environ 1 à 1,5 mètre de diamètre et de 2 mètres de profondeur. Il est aujourd'hui remblayé.

Au lieu-dit de la Gare (concession de Villeveyrac), sur ce site, quelques habitations privées ont été construites, un entretien avec les propriétaires a permis de révéler :

- la formation d'un fontis ou cône d'effondrement dans un jardin, probablement au-dessus d'une galerie affleurante (diamètre approximatif 1 mètre et profondeur supérieur à 3 m). Il est aujourd'hui remblayé et n'est donc plus visible mais localisé ;
 - de nombreuses fissures sur les habitations (photos 21.1 et 21.2 de [1]).
- **Configuration 10** : Secteurs affectés par des désordres en surface et/ou des orifices miniers (puits et entrées de galeries) connus et non traités

Sont listés ci-après tous les secteurs répondant à cette configuration.

Sur le site du Chemin du Poussan, le puits du Poussan est encore ouvert et simplement grillagé, les deux descenderies de la mine sont ouvertes mais leur entrée est interdite par un portail. Notons que ces ouvrages ont été gardés en l'état dans l'optique de la réalisation d'un musée de la mine.

Sur le site de L'Olivet (concession de Villeveyrac), lors des travaux actuels de reprise à ciel ouvert du stot de protection de la voie ferrée SNCF, aujourd'hui à l'abandon, deux entrées de galeries non remblayées ont été mises à jour (photos 16.1 et 16.2 de [1]).

Au nord du site de Roquemale (concession de Villeveyrac), selon l'exploitant actuel : « *les Allemands auraient tracé des galeries de recherche durant la Seconde Guerre mondiale* » (photo 17 de [1] et point GPS). D'autre part, une ancienne une galerie de recherche isolée, dont l'entrée s'est éboulée, a été repérée lors de notre visite (photo 18 de [1] et point GPS).

Sur la concession du Mas Rouch, lors des visites de site trois entrées de galeries (photo 19 de [1] et point GPS) et deux effondrements au toit de galeries ont été découverts (photo 22 de [1] et point GPS). Il n'était fait mention de ces travaux dans aucun des documents archivés.

A proximité du site de Regagnas, un orifice assimilable à une entrée de galerie ouverte et non remblayée a été repéré.

La galerie de Granouillet est sans doute à l'origine du cône d'effondrement observé dans son alignement (photos 23 de [1] et point GPS). Ses dimensions sont approximativement de 2,5 mètres de diamètre et 2 mètres de profondeur.

2.3 EFFONDREMENTS LOCALISES

2.3.1 Évaluation de la prédisposition aux effondrements localisés par configurations

Sur les sites des exploitations de bauxite de Villeveyrac, ces phénomènes peuvent résulter de trois mécanismes de rupture distincts : l'effondrement localisé lié à la rupture du toit d'une excavation, celui lié à la rupture d'un pilier isolé et celui lié à la rupture de tête de puits. Nous allons examiner la prédisposition de ces phénomènes sur chacune des configurations retenues en analysant les mécanismes de rupture initiateurs.

2.3.1.1 Configurations 7, 8 et 11

Les secteurs exploités à ciel ouvert et les zones de dépôts ne sont pas soumis à ce genre de phénomène qui, bien évidemment, est directement lié à la présence de travaux souterrains. **Ainsi, les zones de configuration 7, 8 et 11 ne sont pas concernées par les effondrements localisés.**

2.3.1.2 Configurations 1, 2, 3, 4, 5 et 6

Pour les secteurs de **configuration 1, 2, 3, 4, 5 et 6**, les mécanismes de rupture envisageables sont la rupture du toit d'une excavation et/ou la rupture d'un pilier isolé. Dans ces deux cas, l'évaluation de la prédisposition aux effondrements localisés dépend classiquement des paramètres suivants :

- le volume de vides disponibles au sein des travaux souterrains ;
- l'élancement et la résistance mécanique des piliers résiduels ;
- la nature et la résistance mécanique de terrains des couches de minerai, du toit et du recouvrement ;
- l'épaisseur des terrains de recouvrement.

Nous analyserons successivement ces quatre principaux paramètres.

Vides disponibles au sein des travaux souterrains

Compte tenu des méthodes d'exploitations utilisées dans les **secteurs de configurations 2, 3, 4 et 5** (chambres et piliers abandonnés ou chambres et piliers « tournés » ou traçage), **la présence de vides résiduels** au sein de ces travaux souterrains est **très probable, voire certaine**.

Au contraire, il est **peu probable** de rencontrer des vides résiduels au sein des travaux de **configuration 1** menés selon la méthode des chambres et piliers foudroyés, foudroyage souvent qualifié de bonne qualité (caractérisés par de très bon ratio, affaissement / ouverture, de 0,5). D'autre part, aucun effondrement n'est recensé sur ces secteurs, qui sont en outre situés profondément (plus de 100 m à la Rouquette-Montplaisir). **Ainsi, les zones de configuration 1 sont donc très peu sensibles aux effondrements localisés.**

Enfin, au sein de la **configuration 6, la présence de vides est possible**. En effet, les zones de cette configuration présentent toutes les caractéristiques géologiques favorables au creusement d'une galerie, à l'initiation d'une zone de travaux ou au fonçage d'un puits. Les points suivants viennent confirmer cette possibilité :

- la découverte, sur site, d'ouvrages (galeries, chambres, petits puits, etc.) lors de travaux d'exploitation à ciel ouvert actuels : entrées de galeries sur le site de l'Olivet ;
- la découverte, sur site, d'ouvrages (galeries, chambres, petits puits etc) en dehors des zones de travaux souterrains connues :
 - au lieu-dit de la Gare (concession de Villeveyrac), selon l'exploitant actuel : *« une galerie (vieux travaux) a même été découverte sous la voie SNCF longitudinalement à celle-ci, au niveau du site de la gare, l'épaisseur du recouvrement entre le toit de la galerie non remblayée et la voie SNCF n'était que de 40 centimètres »* ;
 - au nord du site de Roquemale (concession de Villeveyrac), une ancienne galerie de recherche isolée, dont l'entrée s'est éboulée, a été repérée ;
 - sur la concession de Mas Rouch, lors des visites du site, trois entrées de galeries non remblayées ont été repérées. Il n'était fait mention de ces travaux dans aucun des documents archivés ;
 - entre les sites de Regagnas et du chemin du Poussan (concession des Usclades), la découverte de la galerie dite du Granouillet ;
- l'apparition de désordres en surface en dehors des zones de travaux souterrains connues : fontis dans le jardin d'un particulier au lieu-dit de la Gare (concession de Villeveyrac), deux autres fontis ont été repérés, l'un sur le site du Mas Rouch et l'autre à proximité de la galerie découverte entre les mines de Regagnas et celle du chemin de Poussan ;
- certains documents papier font état d'ouvrages et de zones de travaux (chambres et piliers tournés) qui ont été réalisés dans le sous-sol du bassin de Villeveyrac mais dont la localisation précise est aujourd'hui difficile.

Élancement et qualité des piliers résiduels

Seules les zones de configuration 2, 3, 5 et éventuellement 6 sont concernées par des piliers abandonnés. Les données sur les piliers des configurations 2 et 3 manquent aujourd'hui. Par contre, la visite de la seule mine encore accessible aujourd'hui, celle du chemin du Poussan (configuration 5) révèle des piliers en mauvaise état : souvent fracturés et quelquefois dégraissés abusivement, voir photos 4.1, 4.2 et 4.3 de [1]. De plus des opérations de soutènement ont été réalisées par endroits, photos 5.2 de [1]. De l'analyse de ce cas particulier, vont être déduites des caractéristiques sensiblement similaires pour les autres exploitations concernées ici sur lesquelles les informations manquent.

Nature et résistance de terrains des couches de minerai, du toit et du recouvrement

Les données dont nous disposons ne nous permettent pas de déterminer très précisément les caractéristiques mécaniques des terrains du toit et du recouvrement de chacune des configurations 1, 2, 3, 4, 5 ou 6. A l'échelle du bassin de bauxite de Villeveyrac, nous retiendrons les caractéristiques suivantes :

- le toit des exploitations souterraines est de mauvaise qualité et de tenue mécanique généralement médiocre :
 - le minerai de bauxite qui le constitue parfois présente une faible résistance à la compression et, qui plus est, se révèle souvent friable (6 à 26 MPa de résistance à la compression simple et sa limite élastique se situe entre 10 et 20 MPa) ;
 - autre particularité du gisement, la couche de bauxite est fréquemment surmontée d'une couche de marnes bauxitiques « fluantes », parfois indurées, de quelques mètres d'épaisseur. Elle est intercalée entre le minerai et les calcaires fuvéliens sus-jacents. Cette couche, appelée « faux-toit » par les mineurs, altère sensiblement la tenue mécanique du toit ;
 - présence de petites failles qui ont pour origine la karstification.

Notons qu'il est possible de rencontrer un banc calcaire dans les terrains du toit (comme c'est le cas à Comberouge). Malheureusement, celui-ci ne peut pas être qualifié de « raide », en raison de la présence de failles locales dues à la karstification du mur. Cette fragilité a probablement permis la remontée en surface d'effondrements localisés observés en surface au-dessus de ce banc calcaire par l'exploitant actuel (secteur de Comberouge).

Cette « absence de toit de résistance mécanique sûre » a justifié en partie l'inexploitabilité de plusieurs gisements (La Viste, Jolimont et la Louve, par exemple) ;

- un recouvrement constitué de marnes rognaciennes à intercalations gréseuses.

Ainsi, compte tenu des trois effondrements localisés connus dans les secteurs de configuration **2, 3, 4, 5 ou 6** (lieu-dit de la Gare, au-dessus de la galerie du Granouillet et au nord du site de Roquemale), les hypothèses suivantes semblent vraisemblables et seront retenues par la suite :

- une montée de voûte est envisageable et ce avec la même probabilité d'occurrence, qu'elle soit consécutive à la rupture du toit d'une excavation ou à la rupture d'un pilier isolé ;
- il n'existe aucun horizon rocheux suffisamment épais et résistant pour arrêter une montée de voûte. La présence du banc résistant reste trop locale (exemple de Comberouge pour être généralisée).

Dans ce cas (absence d'horizon rocheux suffisamment épais et résistants pour bloquer une montée de voûte), le seul mécanisme capable de s'opposer à la remontée d'un fontis en surface est l'auto-comblement par foisonnement des éboulis.

Pour étudier ce mécanisme, l'INERIS a développé un outil de calcul s'appuyant sur une modélisation analytique des volumes mis en jeu lors de la propagation d'une cloche d'éboulement. Nous avons appliqué cet outil (dont les principes sont détaillés en annexe 2) aux conditions de site retenues et présentées dans le tableau ci-dessous :

	Hauteur des vides (m)	Largeur des vides (m)	Rayon de remontée de fontis (m)	Angle de talus naturel (°)	Coefficient de foisonnement*	Hauteur de remontée de fontis (m)
Configurations 2 et 3	3 à 3,5	3	1,5	35	1,3	29 à 37
Configuration 4	3	3	1,3 à 1,5	35	1,3	29 à 35
Configuration 5 et 6	2	3	1,3 à 1,5	35	1,3	16 à 22
Descenderie de Comberouge	3	6	2,5 et 3	35	1,3	20 à 25

Tableau 1 : Simulation des hauteurs de remontée de voûte dans le phénomène d'effondrement localisé

*valeur faible qui s'explique par la présence supposée d'eau au sein de la majeure partie des travaux et par la présence d'une couche de marnes bauxitiques « fluantes » au toit immédiat des travaux

Le calcul met en évidence que la hauteur maximale de remontée de fontis avoisine les 40 mètres. Ce résultat est également vérifié sur le terrain, puisque selon les anciens mineurs aucun fontis en surface n'a été observé au-delà de cette limite de profondeur. Notons qu'une approche probabiliste prenant en compte les variations des principaux paramètres (hauteur des vides de 2 à 3 m, coefficient de foisonnement de 1,3 à 1,35) a été aussi réalisée et vient confirmer les résultats précédents.

Nous considérerons donc, dans une approche raisonnablement sécuritaire, que l'ensemble des terrains pour lesquels la profondeur des vides résiduels est inférieure à 40 mètres peut s'avérer sensible au risque de remontée de fontis. Cette valeur tient compte du contexte géologique et des caractéristiques des terrains de recouvrement.

Au vu de tout ce qui précède, nous retiendrons les prédispositions aux effondrements localisés suivantes :

- **configuration 1 : prédisposition très peu sensible ;**
- **configurations 2, 3, 4 et 5 : prédisposition qualifiée de sensible pour les secteurs à moins de 40 m**, compte tenu d'une présence de vides très probable voire certaine et d'une faible profondeur. Les secteurs situés à plus de 40 mètres de profondeur auront une prédisposition **très peu sensible aux effondrements localisés**. Notons que les secteurs de cette configuration situés sur les mines de la Rouquette et de Montplaisir sont situés à plus de 100 mètres de profondeur, ce qui exclut toute remontée de fontis, donc une **prédisposition nulle**. Ces zones d'aléa correspondant nul seront tout de même cartographiées dans un objectif de mémoire des travaux ;
- **configuration 6 : zones peu sensibles aux effondrements localisés (pour l'ensemble de la configuration qui se trouve être à moins de 40 m de profondeur)**, compte tenu d'une présence de vides éventuelle mais non certaine. Cette qualification de sensible reflète aussi l'objectif de conservation de la mémoire de travaux potentiels.

2.3.1.3 Configurations 9 et 10

Configuration 9 :

- *Les entrées de galeries, plans ou descenderies (galerie de Granouillet, descenderie de Comberouge, plan Dalmais, les deux descenderies du carreaux des Usclades et les quatre descenderies de la Mine de Saint-Farriol)*

Tous ces ouvrages ont subi le même traitement de mise en sécurité. Il consiste en la réalisation d'un mur en béton armé de 1 mètre d'épaisseur ancré aux parements à des distances variables des entrées de galeries. Puis, le « déversement » de remblai de tout-venant et de blocs rocheux dans les galeries, sans traitement particulier (clavage ou compactage) ; ces matériaux venant prendre appui sur ce mur. Enfin, bien souvent, les entrées en surface ont été murées voire dallées.

Sans autre donnée complémentaire, concernant notamment la stabilité du mur en béton retenant les remblais, nous ne pouvons exclure la rupture potentielle de ce mur, sous l'effet d'infiltration d'eau de ruissellement par exemple². De plus, les pentes de ces galeries entre 20 et 30 % viennent surcharger ces murs dont la stabilité à long terme s'en trouve encore amoindrie. Ainsi, les parties remblayées de ces ouvrages, entre l'entrée et quelques dizaines de mètres de longueur, seront définies **comme « peu sensibles »** au phénomène d'effondrement localisé. Pour les parties des galeries situées au-delà du mur en béton et à moins de 40 mètres³ de profondeur, qui correspondent à des secteurs non remblayés et à faible profondeur, **un niveau de prédisposition « sensible »** leur sera associé, à l'image des travaux de configuration 2, 3, 4 et 5 à moins de 40 mètres. Enfin, pour les parties de ces ouvrages situés plus profondément (seule une partie de la descenderie de Comberouge est concernée), nous retiendrons un niveau de prédisposition aux effondrements localisés **nul**.

Les quatre descenderies du site de Saint-Farriol passent sous un recouvrement supérieur à 40 mètres avant d'avoir atteint la limite des remblais (environ 35 mètres de l'entrée) d'où une prédisposition nulle et un aléa nul, sur la portion au-delà de 35 mètres.

Notons que le zonage de l'aléa correspondant prendra en compte une incertitude de calage des plans sur lesquels ont été repérés les tracés de ces galeries (voir Tableau 3).

² Dans des bassins miniers, certes différents de celui de Villeveyrac, certaines études menées par l'INERIS ont relaté de tels phénomènes. Ce fut le cas par exemple de la fendue Pinnelong n°2 sur la commune de Saint-Etienne dont la tête s'est effondrée le 2 mars 1996 sous l'effet d'eau de pluie.

³ Ces galeries ont les mêmes dimensions que celles retenues pour les travaux de configuration 2, 3, 4 et 5, voir tableau 1.

- *Les puits (Roquemale 1, de Roquemale 2, des Usclades et le puits du Rec sur la concession des Usclades, le puits de la Rouquette sur la concession de Villeveyrac)*

Tous ces puits ont eux aussi subi un traitement commun. Il a consisté en la mise en place d'une dalle de béton, dont les caractéristiques complètes sont données seulement pour le site de la Rouquette en annexe 9 de [1]. Aucun de ces ouvrages n'a été remblayé avant la mise en place de la dalle de fermeture. Les dalles, bien que d'épaisseur correcte, de 40 à 50 cm, ont des largeurs en moyenne du double du périmètre du puits, qui suffisent à prévenir tout risque à court terme mais plus difficilement à long terme. Seule aujourd'hui la réalisation de bouchon autobloquant et/ou d'un remblayage complet permettent d'approcher cet objectif de stabilité à long terme. Notons aussi que les terrains sur lesquels reposent les différentes dalles sont, au mieux, de nature marno-gréseuse donc de tenue mécanique difficilement quantifiable.

En outre, ces puits sont soumis à des battements de nappe phréatique qui peuvent venir mettre en péril leur intégrité, en modifiant le comportement mécanique des terrains alentour. Nous rappelons, d'ailleurs, à ce sujet, que, lors du fonçage du puits du Rec, les ouvriers ont vu le boisement du puits être écrasé par les marnes « fluantes » au toit de la couche de bauxite à une profondeur d'environ 50 m, sans conséquence en surface cet événement reste néanmoins notable. Des recommandations, établies lors de l'abandon des travaux, conseillent de limiter les pompages dans ces puits afin de réduire les battements de nappe. Toutefois, ces derniers sont toujours possibles au gré des événements pluvieux (des données de l'exploitant actuel font état, par exemple, de variations d'une vingtaine de mètres des niveaux d'eau sur quelques mois, voir Tableau 10).

Compte tenu de toutes ces informations, nous définirons, autour de chacun de ces puits, la **prédisposition** aux effondrements localisés **comme « sensible »**.

- *Sur la concession de Villeveyrac, au lieu-dit de la Gare, le fontis apparu dans le jardin d'un particulier aujourd'hui remblayé.*

Toutefois, la présence de vides est, à cet endroit probable, ce qui conduit à **définir une zone peu sensible** aux effondrements localisés.

Configuration 10 :

- Le site de la mine du Chemin du Poussan fait l'objet d'un vaste projet qui vise à terme la réalisation d'un musée. Trois ouvrages ont été recensés sur ce site :
 - le puits du Poussan encore ouvert et simplement grillagé ;
 - les deux descenderies de la mine permettant l'accès aux zones de travaux souterrains ; elles sont fermées par un portail et équipées de grillage boulonnés évitant d'éventuelles chutes de blocs.

Nous retiendrons une **prédisposition très sensible pour le puits du Poussan et sensible pour les deux galeries**.

- Sur le site de L'Olivet (concession de Villeveyrac), les deux entrées de galeries non remblayées qui ont été mises à jour (photos 16.1 et 16.2 de [1]) ne présentent pas d'aléa à proprement parler puisqu'elles vont être reprises par les travaux à ciel ouverts actuels.
- Sur la concession du Mas Rouch, lors des visites de site, trois entrées de galeries (photo 19 de [1] et point GPS) et deux effondrements au toit de galeries ont été découverts (photo 22 de [1] et point GPS). La présence de vide est de nouveau certaine ; chacun de ces 5 sites sera considéré **comme sensible** vis-à-vis des effondrements localisés.

- Au nord du site de Roquemale (concession de Villeveyrac) :

La visite du secteur supposé exploité pendant la guerre par les Allemands (photo 17 de [1] et point GPS) n'a pas révélé la présence de vides. Néanmoins, une galerie de recherche reste probable. **Cette zone sera donc peu sensible** aux effondrements localisés.

D'autre part, l'ancienne galerie de recherche isolée dont l'entrée est s'éboulée et qui a été repérée lors de notre visite (photo 18 de [1] et point GPS) engendre, elle aussi, une zone où la **prédisposition sera retenue comme « sensible »** (relativement aux effondrements localisés), compte tenu de la présence très probable de vides.

2.3.2 Évaluation de l'intensité des effondrements localisés

Dans le cas des exploitations de bauxite du bassin de Villeveyrac, les conséquences en surface d'effondrements localisés se sont traduites par la formation de fontis ou de cônes d'effondrements, dont certains sont encore visibles (photos 22 et 23 de [1]). Les visites de sites ont mis en évidence des désordres de 2 à 3 mètres de profondeur et de 1 à 2,5 mètres de diamètre, dimensions suffisantes pour « faire disparaître » un motoculteur en 1997 ! De plus, des riverains du lieu-dit de la Gare ayant vu l'apparition d'un fontis dans leur jardin, soulignent la vélocité du phénomène.

Compte tenu de ces informations et des valeurs seuils fournies dans le « guide PPRM » [2], nous retiendrons **une intensité « modérée » pour les effondrements localisés sur l'ensemble du bassin de Villeveyrac**. Une exception sera retenue pour les secteurs foudroyés où la bonne qualité du foudroyage limite les dimensions des vides résiduels et donc des dimensions des effondrements localisés potentiels. **Les secteurs de cette configuration présenteront donc une intensité très faible.**

2.3.3 Évaluation du niveau d'aléa

En s'appuyant sur le principe de classification des niveaux d'aléa définis dans le « guide PPRM » [2], on définira les classes suivantes pour chacune des configurations :

		Prédisposition	Intensité	Aléa
Configuration 1		Très peu sensible	Très faible	Nul
Configurations 2, 3, 4 et 5	0-40 m de profondeur	Sensible	Modérée	Moyen
	> 40 m de profondeur	Rouquette-Montplaisir	Nulle	Nul
		Autres	Très peu sensible	Modérée
Configuration 6		Peu sensible	Modérée	Faible
Configuration 9	galerie de Granouillet	Peu sensible, sur toute sa longueur	Modérée	Faible, sur toute sa longueur
	plan Dalmais	Peu sensible, sur les 30 premiers mètres et sensible au-delà	Modérée	Faible, sur les 30 premiers mètres et moyen au-delà
	Fontis au lieu dit de la Gare	Peu sensible	Modérée	Faible
	descenderie de Comberouge	Peu sensible, sur les 20 premiers mètres, sensible sur les 200 mètres suivants et nulle au-delà	Modérée	Faible, sur les 20 premiers mètres, moyen sur les 200 mètres suivants et nul au-delà
	les deux descenderies du carreau des Usclades	Peu sensible, sur les 20 premiers mètres et sensible au-delà	Modérée	Faible, sur les 20 premiers mètres et moyen au-delà
	les quatre descenderies de la Mine de Saint-Farriol	Peu sensible, sur les 35 premiers mètres et nulle au-delà	Modérée	Faible, sur les 35 premiers mètres et nulle au-delà
	Puits de Roquemale 1, de Roquemale 2, des Usclades, du Rec et de la Rouquette	Sensible	Modérée	Moyen
Configuration 10	2 galeries du chemin du Poussan	Sensibles, sur toute leur longueur	Modérée	Moyen
	Puits du Poussan	Très sensible	Modérée	Fort
	Zone potentiellement exploitée par les Allemands	Peu sensible	Modérée	Faible
	Entrées de galeries et fontis au nord du site de Roquemale	Sensible	Modérée	Moyen
	Les désordres et orifices retrouvés au Mas Rouch	Sensible	Modérée	Moyen
Configurations 7, 8 et 11		Non concernées		

Tableau 2 : Niveaux d'aléa « mouvements de terrain » relatif aux phénomènes d'effondrements localisés

2.3.4 Zonage de l'aléa

La cartographie de l'aléa relatif aux effondrements localisés est donnée en annexe 4.

Puits

La zone d'aléa est un cercle de 25 mètres de diamètre.

Cette marge forfaitaire de sécurité intègre :

- une incertitude de positionnement GPS (qui reste inférieure à 5 mètres pour ces puits) ;
- une extension latérale du phénomène de 10 mètres. Cette extension latérale est liée à la frange altérée des terrains de surface utilisée bien souvent dans le domaine de la stabilité des têtes de puits en l'absence de données précises. L'épaisseur de cette frange varie de 0 à 10 mètres sur les exploitations de bauxite du bassin. En considérant un angle d'influence de 45° (valeur communément retenue pour les terrains sub-surfaciques et déconsolidés), la valeur de 10 mètres d'extension latérale découle naturellement selon la formule $H \cdot \tan(45^\circ)$.

Zones de travaux souterrains

Le retour d'expérience sur les fontis et les effondrements localisés montre que leurs conséquences se limitent à une certaine extension latérale autour du tracé du vide potentiel. Comme pour les puits, cette extension latérale est liée à la frange altérée des terrains de surface. Par le même raisonnement que précédemment pour les puits, la valeur de 10 mètres d'extension latérale découle naturellement. En outre, il faut intégrer une zone d'incertitude de positionnement de l'ouvrage correspondant au calage des plans. Les marges de sécurité globales, intégrant les deux précédentes, sont synthétisées, pour chacune des configurations, dans le tableau ci-après.

Autres ouvrages débouchant au jour :

Les zones d'aléa associées auront une en forme « ellipsoïdique » de 50 mètres⁴ de longueur sur 30 mètres de large et orientée perpendiculairement à l'affleurement, voir Figure 1. Cette marge intègre la réalisation d'une potentielle galerie affleurante tracée en couche, semblable à celle du Granouillet avec une incertitude de positionnement (< 5 m) et une extension latérale du phénomène de 10 m.

⁴ Cette distance tient compte de la longueur de 40 mètres correspondant à la longueur de la galerie de Granouillet.

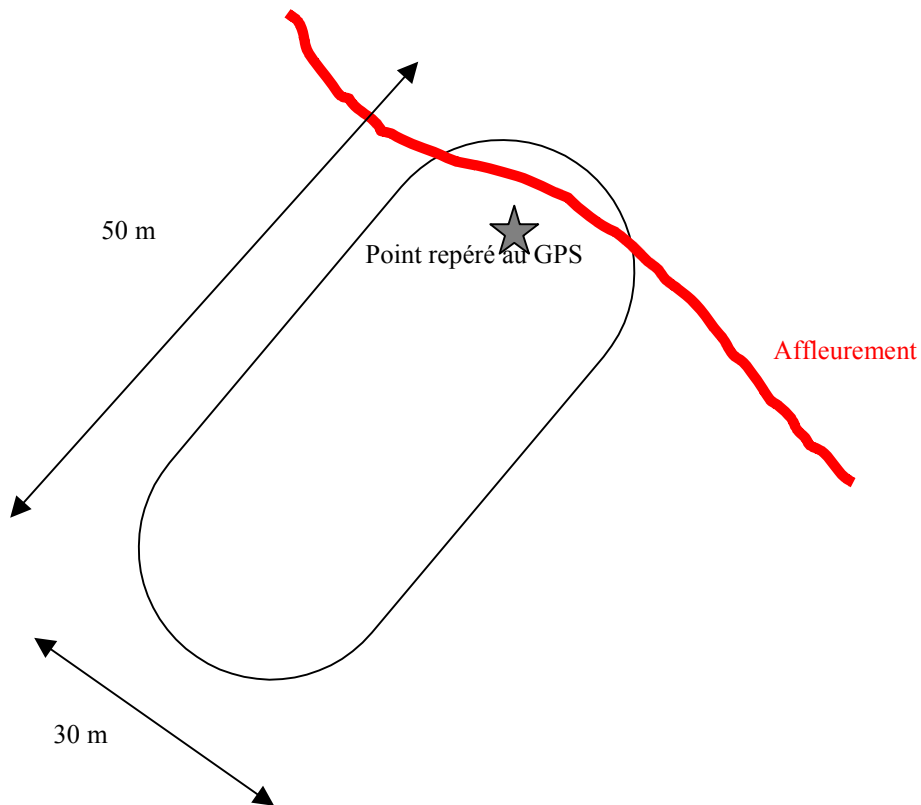


Figure 1 : Zone d'aléa de forme « éllipsoïdique » de 50 mètres de longueur sur 30 mètres de large et orientée perpendiculairement à l'affleurement

Notons une particularité de la galerie de recherche au nord du site de Roquemale, sa zone d'aléa sera un cercle de 50 mètres de diamètre. La valeur de cette marge est définie de façon à englober le secteur où, en 1997, le passage d'un motoculteur dans les vignes avait déclenché la rupture du toit de cette galerie affleurante.

		Extension latérale (m)	Incertitude de calage de plans (m)	Incertitude de repérage GPS (m)	Marge de sécurité globale (m)
Configuration 1		10	20	Sans objet	30
Configurations 2, 3, 4 et 5		10	15	Sans objet	25
Configuration 6		10	-	Sans objet	10
Configuration 9	galerie de Granouillet	10	15	Sans objet	25
	plan Dalmais	10	15	Sans objet	25
	Fontis au lieu dit de la Gare	10	Sans objet	< 5	« ellipsoïde » de 50 m de long sur 30 m de large et perpendiculaire à l’affleurement
	descenderie de Comberouge	10	25	Sans objet	35
	les deux descenderies du carreau des Usclades	10	15	Sans objet	25
	les quatre descenderies de la Mine de Saint-Farriol	10	15	Sans objet	25
	Puits de Roquemale 1, de Roquemale 2, des Usclades, du Rec et de la Rouquette	10	Sans objet	< 5	Cercle de 25 m de diamètre
Configuration 10	2 galeries du chemin du Poussan	10	15	Sans objet	25
	Puits du Poussan	10	Sans objet	< 5	Cercle de 25 m de diamètre
	Zone potentiellement exploitée par les Allemands	10	Sans objet	> 5	« ellipsoïde » de 50 m de long sur 30 m de large et perpendiculaire à l’affleurement
	Entrées de galeries et fontis au nord du site de Roquemale	10	Sans objet	< 5	Cercle de 25 m de rayon
	Les désordres et orifices retrouvés au Mas Rouch	10	Sans objet	< 5	« ellipsoïde » de 50 m de long sur 30 m de large et perpendiculaire à l’affleurement
Configurations 7, 8 et 11		Non concernées			

Tableau 3 : Marges de sécurité des zones d’aléa « mouvements de terrain » relatif aux effondrements localisés

2.4 EFFONDREMENT GENERALISE

Les zones d’exploitation de bauxite du bassin de Villeveyrac ont connu un accident majeur survenu en décembre 1973. Les informations décrivant cet événement ne nous permettent pas de le considérer, sans équivoque, comme un effondrement généralisé.

En effet, si les termes de « (...) *trois hectares de quartiers d'exploitation, presque totalement dépilés, s'effondraient (...)* » et de « (...) *et le processus d'effondrements progressif et total s'est trouvé embrayé (...)* » [5] apparentent le phénomène à un effondrement généralisé, les conséquences en surface décrivent plutôt un phénomène d'affaissement « (...) *le mur est du jardin s'est écroulé sur 10 mètres environ (...)* *Le pilastre ouest de la porte d'entrée du jardin est cassé et penche de 20° par rapport à la verticale (...)* *Le champ s'est affaissé (...)* *de nombreuses fissures et lézardes sur les murs (...)* », [5].

Bien que similaire à un effondrement généralisé du point de vue des mécanisme de rupture, l'événement de 1973 a eu des conséquences en surface qui l'apparentent sans doute donc plus à un affaissement minier.

Nous rappelons (annexe 1 et [2]) qu'un des critères essentiels dans la réalisation d'un effondrement généralisé est la présence d'un banc raide au sein du recouvrement capable de reprendre une partie des efforts mais également de se rompre de manière brutale. Les informations dont nous disposons aujourd'hui ne nous permettent pas de mettre en évidence la présence d'un tel banc sur les exploitations de bauxite de Villeveyrac. Certains écrits de chefs de chantiers signalaient la présence de « *bancs calcaires durs* » mais ils se trouvaient presque systématiquement fracturés. Ainsi, la rupture potentielle des piliers résiduels se traduira en surface par l'un des phénomènes suivants :

- un fontis, dans le cas de la rupture d'un pilier (voir paragraphe 2.3) ;
- une cuvette d'affaissement, dans le cas de la rupture de plusieurs piliers consécutivement à un phénomène de surcharge (voir paragraphe 2.5) ou une rupture de piliers isolés.

On ajoutera les éléments suivants, qui, eux aussi, conduisent à minimiser la probabilité d'occurrence des effondrements généralisés :

- dans le cas de secteurs profonds, où s'initient généralement les effondrements généralisés, les méthodes d'exploitations mises en place n'ont pas laissés de vides résiduels importants (méthode de foudroyage de configuration 1) ;
- dans les secteurs moins profonds, la faible épaisseur des terrains de recouvrement génère de faibles contraintes sur les piliers résiduels (configuration 2). A titre d'exemple, à 50 mètres de profondeur et pour des taux de défrètement de 30 à 40 %, les sollicitations dans les piliers sont au maximum de 2,1 MPa. Pour de telles sollicitations, le coefficient de sécurité vis-à-vis de la rupture des piliers est de 3 (voir annexe 3) ;
- à la suite de l'événement de 1973, la méthode des chambres et piliers abandonnés a été délaissée au profit de celles par chambres et piliers foudroyés. Ainsi, il est probable que les zones de travaux où les méthodes étaient appliquées simultanément comportent un foudroyage dans les secteurs les plus exposés (configuration 2).

Ainsi, compte tenu de toutes ces informations, le phénomène d'effondrement généralisé ne sera pas retenu sur l'ensemble du bassin de Villeveyrac. Il ne sera donc pas cartographié.

2.5 AFFAISSEMENTS MINIERS

2.5.1 Évaluation de la prédisposition aux affaissements miniers par configurations

2.5.1.1 Configurations 7, 8, 9, 10 et 11

Ce type de phénomènes se rencontre :

- sur des zones de travaux souterrains d'exploitations totales (chambres et piliers foudroyés par exemple) lors des phases d'extraction principalement ou, dans une moindre mesure, peu de temps après l'arrêt des travaux (annexe 1) ;
- sur des zones de travaux souterrains d'exploitations partielles, consécutivement à la rupture locale ou étendue, des éléments assurant la stabilité de l'ouvrage minier (piliers, intercalaires entre couches, toit, mur). Le phénomène peut donc être initié plusieurs années ou décennies après la fermeture des travaux, suite à l'évolution de la résistance des roches.

Ainsi, les seules zones répondant à ces critères, soit celles de configurations 1, 2, 3, 4, 5 et 6, seront retenues pour analyse.

2.5.1.2 Configuration 1

Pour les secteurs de **configuration 1** (La Rouquette, Montplaisir et Saint-Farriol), des études de suivi d'affaissement nous permettent de déclarer aujourd'hui, à la date de rédaction de ce rapport, les terrains sous-minés par ces travaux comme stables :

- « *Actuellement (1997), l'ensemble des terrains affectés par l'exploitation (de Montplaisir) est stable. Les seuls mouvements résiduels sont de l'ordre de grandeur des fluctuations naturelles de la surface topographique ou occasionnés par des imprécisions de mesures liées à l'ancienneté des repères* » [4];
- « *la zone de la lentille de la Rouquette a été entièrement dépilée. L'essentiel de l'affaissement a suivi de très près l'exploitation Bien que la plupart des bornes ont disparu, on peut considérer que la surface est maintenant stabilisée* », [4] ;
- Enfin, une lettre de M. Eugène, Directeur de la DRIRE par délégation du 30 octobre 1997, précise que « *la stabilisation est aujourd'hui définitive des terrains concernés (mines souterraines Saint-Farriol) ... je vous autorise à arrêter la surveillance topographique* » ;
- des témoignages relatant des foudroyages efficaces, caractérisés par de très bon ratios affaissement / ouverture, de l'ordre de 0,5. Ainsi, l'existence de vides résiduels, même limités, est peu probable ;
- les exploitations de ces secteurs ont été arrêtées en 1989 pour Saint-Farriol et en 1985 pour la Rouquette-Montplaisir, soit une arrêt vieux de plus de cinq ans. Cette durée correspond à l'ordre de grandeur suggéré dans le guide méthodologique de réalisation des PPRM (voir annexe 1), au-delà de laquelle la probabilité de voir se développer un affaissement résiduel pourra être négligée. On se référera alors plutôt à l'aléa tassement pour caractériser le devenir de la zone.

Compte tenu de ces informations, ces secteurs présentent **une prédisposition d'affaissements miniers nulle**. Notons que ces secteurs pourront être soumis à un autre type de phénomènes, celui de tassements, qui sera étudié plus avant.

2.5.1.3 Configurations 2, 3 et 5

Sur les secteurs de **configuration 3**, la présence de vides est certaine. Elle résulte de la méthode d'exploitation par chambres et piliers abandonnés. Il en est de même pour les secteurs de **configuration 5**, exploités par la méthode des chambres et piliers « tournés ». Sur les secteurs de **configuration 2**, la présence de vides est possible voire probable, puisqu'il a été difficile d'y distinguer les secteurs de chambres et piliers abandonnés de ceux foudroyés. Une rupture des piliers résiduels est donc envisageable dans l'une de ces trois configurations. Cette rupture peut générer un report de charge sur les piliers voisins qui, à leur tour, peuvent se rompre. Compte tenu du contexte géologique, cet éventuel phénomène en chaîne se traduira en surface par une cuvette d'affaissement et non par un effondrement généralisé (voir paragraphe 2.4). Les zones exploitées ici présentent des largeurs totale :

- de l'ordre de 150 à 200 mètres pour une profondeur de 60 à 80 mètres ;
- de l'ordre de 50 à 120 mètres pour une profondeur maximale de 50 mètres.

Les secteurs ont donc des largeurs suffisantes en regard de la profondeur pour que les effondrements au fond atteignent la surface (zones sur-critiques⁵). En effet, le rapport largeur exploitée / profondeur maximale est au minimum de 1,2 sur les zones exploitées ici. A titre illustratif, la limite de criticité retenue sur le bassin ferrifère lorrain est fixée à la valeur de 0,4 pour ce même rapport [6].

Pour ces trois types de zones, il convient donc d'étudier précisément la prédisposition à la rupture des piliers résiduels ou du toit des galeries. Nous ne disposons pas des données chiffrées nécessaires à la mise en place de calculs de sollicitation et/ou de contraintes sur l'ensemble des secteurs concernés. En effet, non seulement les dimensions réelles des piliers et celles des vides ne sont pas toujours disponibles et, même lorsque nous en disposons, les récits de mineurs précisent que l'exploitation réelle au fond ne respectaient pas toujours scrupuleusement les schémas définis. Les piliers étaient « *dégraissés abusivement* », comme nous avons pu nous en rendre compte lors de notre visite de la mine du Chemin du Poussan (configuration 5).

Il paraît donc difficile de définir une profondeur limite de travaux à partir de laquelle la pression des terrains de recouvrement engendrerait une contrainte dans les piliers ou dans le toit des exploitations telle que leur rupture serait prévisible. Mais les observations de terrains ont montré que tout effondrement de travaux dans la bande des 0 - 40 m de profondeur s'est traduit par des effondrements localisés et non des affaissements.

Compte tenu de toutes ces informations, nous allons distinguer :

- les secteurs de **configuration 2, configuration 3 et de configuration 5** à plus de 50 mètres de profondeur qui seront **considérés comme sensibles aux affaissements miniers** ;
- les secteurs de **configuration 2, configuration 3 et de configuration 5** à moins de 50 mètres de profondeur qui seront **considérés comme très peu sensibles aux affaissements miniers**.

⁵ la surface critique d'une zone de travaux souterrains est l'étendue à partir de laquelle l'effondrement de la totalité de cette zone se traduira en surface par un affaissement minier. En deçà de cette aire limite, il n'y a aucune conséquence en surface.

Cette limite des 50 mètres peut paraître basse, au vu des faibles sollicitations générées par le poids des terrains de recouvrement qui sont au maximum de 6,3 MPA à cette profondeur (annexe 3). Toutefois, il faut tenir compte de la faible résistance à la compression du minerai de bauxite de Villeveyrac, constituant les piliers des exploitations, qui peut descendre localement jusqu'à 6 MPa. Ainsi, les différentes simulations menées (annexe 3) révèlent un coefficient de sécurité moyen de 1,4 (rapport entre contrainte limite à la rupture et contrainte effective dans le pilier).

On ajoutera les éléments suivants qui viennent confirmer le choix de cette limite « basse » des 50 mètres de profondeur :

- la présence d'un « faux-toit », constitué de marnes bauxitiques « fluantes » d'une tenue mécanique très faible qui vient altérer sensiblement « la raideur » du toit et ce même à de faibles profondeurs ;
- dans le toit de la couche de bauxite, on rencontre fréquemment de petites failles qui ont pour origine des tassements consécutifs à la karstification intense du mur et qui viennent encore fragiliser le toit. Cette fragilité est corroborée par les récits d'anciens mineurs : « *les coups de toit et autres chutes de toit étaient fréquents dans les secteurs situés entre 20 et 40 mètres du front de taille* » et « *à la Rouquette des étançons hydrauliques puis de boulons, de 1,80 m, ont été mis au toit avec des densités importantes (doubles de celles de mines de fer)* ».

Notons une originalité de la zone du stot du château de la Rouquette dans la mine de la Rouquette (configuration 3). Cette zone s'est effondrée en 1973, conduisant à de répercussions en surface (voir paragraphes suivants). Ainsi, elle ne devrait plus présenter de prédisposition à la rupture de piliers. Néanmoins, sans autres informations sur la « qualité »⁶ de cet effondrement, nous ne pouvons pas totalement écarter l'occurrence d'un affaissement lié à la rupture de piliers résiduels. C'est pourquoi une **prédisposition sensible** sera retenue.

⁶ Caractérisant, par exemple, l'étendue de la zone effondrée au fond et la présence de piliers résiduels.

2.5.1.4 Configuration 4

Les secteurs **de configuration 4** doivent être découpés du point de vue de leur prédisposition aux affaissements miniers :

- le secteur de galeries reliant le puits de la Rouquette aux zones de travaux souterrains de la mine de Montplaisir et de la mine de la Rouquette, situé profondément entre 200 et 300 mètres, a des dimensions trop peu importantes pour que les conséquences d'un effondrement dans cette zone se traduisent par un affaissement en surface. En effet, la largeur de cette zone est d'environ 35 mètres d'où un rapport largeur / profondeur maximale de 0,16. Cette valeur est bien inférieure à la limite de 0,4 retenue comme valeur seuil définissant la sous-criticité⁵ d'une zone sur le bassin ferrifère lorrain [6]. Ainsi, ce secteur présente une **prédisposition aux affaissements miniers nulle** ;
- les secteurs de cette configuration des mines des Usclades, de Roquemale et de Saint-Farriol doivent être scindés en deux. Une première partie, correspondant aux travaux entre 0 et 50 m de profondeur, se trouve, en outre, caractérisée par des piliers massifs et peu élancés (15 m de largeur en moyenne). Nous y retiendrons une **prédisposition aux affaissements miniers très peu sensible**. Un second secteur est défini au-delà de 50 mètres. Ce dernier présente une sollicitation sur les « pseudos-piliers » résiduels sensiblement plus importante que les secteurs précédents. C'est pourquoi, par le même raisonnement que celui mené pour les configurations 2, 3 et 5, nous retiendrons **ces secteurs comme sensibles aux affaissements miniers**.

2.5.1.5 Configuration 6

La bande « 0-40 mètres de profondeur » constituant l'ensemble **des secteurs de configuration 6 est très peu sensible aux affaissements miniers**. En effet, non seulement la contrainte dans les terrains de ce secteur est peu importante en raison de la faible profondeur (voir annexe 3) mais aussi la présence de vides y est simplement suspectée. De plus, si vide il y avait, il s'agirait plus vraisemblablement de galeries isolées que de vastes zones d'exploitation réelles pouvant générer un affaissement. De ce fait, l'aléa correspondant à cette bande 0-40 mètres sera **nul**. La zone de configuration 6 sera tout de même affichée sur la carte d'aléa « affaissement » dans un objectif de conservation de la mémoire des travaux.

2.5.2 Évaluation de l'intensité des affaissements miniers

L'intensité du désordre généré en surface par un affaissement minier dépend des valeurs de l'affaissement maximal attendu qui conditionnent les valeurs des déformations maximales attendues. Ce sont généralement ces critères de déformations (ou de mise en pente) qui sont retenues comme paramètres caractéristiques de l'intensité d'un affaissement (voir annexe 1). Les déformations et les pentes sont généralement inversement proportionnelles à la profondeur de l'exploitation à configuration de travaux identiques (ouvertures, méthodes ...).

Les études de suivi d’affaissement disponibles ont permis de mesurer « 2 mètres au centre de la cuvette à l’aplomb des travaux de Montplaisir » et « un affaissement maximal de 1,5 mètre au centre de la cuvette à l’aplomb des travaux de La Rouquette ». Les comptes rendus de visites de sites successifs à l’événement de 1973 font état « du mur de jardin qui s’est écroulé sur 10 mètres environ ... d’une pilastre de porte d’entrée de jardin qui s’est cassée et penche de 20° par rapport à la verticale ... d’un champ qui s’est affaissé ...de nombreuses fissures et lézardes sur les murs ... ».

Compte tenu de l’homogénéité de l’ouverture des travaux souterrains sur l’ensemble des concessions du bassin de bauxite de Villeveyrac, 2 à 3 m, et d’une pente de gisement exploité qui varie peu (en moyenne 20 % à 30 %), les conséquences d’affaissements miniers potentiels resteront du même ordre que celles détaillées ci-dessus. Ainsi, nous définirons :

- un **niveau d’intensité modéré** pour les secteurs correspondant à des travaux situés entre 0 et 50 mètres de profondeur ;
- un **niveau d’intensité limitée** pour les secteurs correspondant à des travaux situés à plus de 50 mètres de profondeur.

Aucune mesure de déformations n’étant disponible, la valeur de profondeur retenue comme discriminante pour la prédisposition l’a aussi été pour discriminer l’intensité (effets d’autant plus faibles que l’exploitation est profonde).

2.5.3 Évaluation du niveau d’aléa

En s’appuyant sur le principe de classification des niveaux d’aléa, on définira les classes suivantes pour chacune des configurations :

		Prédisposition	Intensité	Aléa
Configuration 1		Nulle	Sans objet	Nul (non affichée)
Configurations 2, 3 et 5	Stot de la Rouquette	Peu sensible	Limitée	Faible
	0-50 m de profondeur	Très peu sensible	Modérée	Faible
	> 50 m de profondeur	Sensible	Limitée	Moyen
Configuration 4	Zone de traçage des mines de Saint-Farriol, des Usclades et de Roquemale à plus de 50 m de profondeur	Sensible	Limitée	Moyen
	Zone de traçage des mines de Saint-Farriol, des Usclades et de Roquemale à moins de 50 m de profondeur	Très peu sensible	Modérée	Faible
	Zone de traçage entre les mines de la Rouquette et de Montplaisir	Nulle	Sans objet	Nul (non affiché)
Configuration 6		Nulle	Sans objet	Nul (affiché pour mémoire)
Configurations 7, 8, 9, 10 et 11		Non concernées		

Tableau 4 : Niveaux d’aléa « mouvements de terrain » relatif aux phénomènes d’affaissements miniers

2.5.4 Zonage de l'aléa

La cartographie de l'aléa relatif aux affaissements est donnée en annexe 5.

L'analyse menée sur les documents recueillis lors de la phase informative qui présentaient des informations relatives aux angles d'influence des travaux souterrains nous permet de retenir la valeur de 35° comme étant suffisamment sécuritaire pour garantir un niveau d'aléa nul en dehors de cette enveloppe. De plus, les rares résultats théoriques⁷ tenant compte de l'influence du pendage du gisement sur les valeurs d'angle d'influence de travaux miniers ne révèlent des modifications notables qu'à partir de valeurs de pente supérieures ou égales à 30°. Cette valeur est supérieure au pendage du gisement de Villeveyrac généralement compris entre 20 % et 30 %, soit entre 11° et 17°. Nous retiendrons donc 35° comme valeur d'angle d'influence des travaux miniers sur l'ensemble du bassin.

Ainsi, nous pouvons définir une marge d'influence, par rapport à l'emprise stricte des travaux miniers en y intégrant l'angle d'influence [$H_{max} \cdot \tan(35^\circ)$] et l'incertitude de calage des plans informatisés. Les valeurs finales retenues sont synthétisées dans le tableau ci-après.

Notons que le tracé des zones de configuration 6 intègre déjà une incertitude, due au positionnement de l'affleurement de bauxite (voir paragraphe 2.2). En outre, la largeur de la zone de configuration 6 (au maximum de 230 mètres) semble suffisante pour intégrer aussi l'extension latérale du phénomène d'affaissement dans cette zone où l'existence de travaux est supposée et non avérée. Il est donc inutile de rajouter une marge supplémentaire au niveau de la zone d'aléa.

⁷ Abaques d'affaissement des bassins houillers du Nord et du Pas-de-Calais, de la Lorraine et de la Sarre, par exemple.

			Hmax (mètres) Côté aval pendage	Hmax*tan(35°) (mètres) Côté aval pendage	Incertitude (mètres)	Marge de sécurité globale retenue (mètres)
Configurations 2, 3 et 5	0-50 m de profondeur	travaux de Cocaval, Regagnas, Chemin du Poussan, Vicairesse, une partie des travaux de Usclades et de Roquemale	50	35	15	50
		Comberouge	30 (estimée)	21	10	30
		Mas Rouch	50	35	20	55
	> 50 m de profondeur	une partie des travaux des Usclades	85	60	15	75 aval (50 amont)
		une partie des travaux de Roquemale	80	56	15	70 aval (50 amont)
		le stot de protection du château de la Rouquette	100	70	15	85
Configuration 4	Zones de traçage moins de 50 m (Saint-Farriol, Usclades et Roquemale)		50	35	15	50
	Zones de traçage à plus de 50 m	Saint-Farriol	150	105	15	120 aval (50 amont)
		Usclades	85	60	15	75 aval (50 amont)
		Roquemale	125	87	15	100 aval (50 amont)
Configuration 6			40	Sans objet	Sans objet	Sans objet
Configurations 7, 8, 9, 10 et 11			Non concernées			

Tableau 5 : Marges de sécurité des zones d'aléa « mouvements de terrain » relatif aux affaissements miniers

2.6 TASSEMENTS

2.6.1 Évaluation de la prédisposition aux tassements par configurations

Par tassement (voir annexe 1), on entend ici :

- tout abaissement de la surface du sol lié à la consolidation des terrains déstructurés par des travaux d'exploitations par foudroyage (configuration 1 par exemple) ;
- tout abaissement de la surface du sol lié à la recompaction des remblais dans les ouvrages débouchant au jour remblayés (configuration 9) ou dans les zones de travaux à ciel ouvert remblayées (configuration 8 et 11).

Les zones de travaux remblayés sont aussi concernées par ces phénomènes mais aucune exploitations de ce type n'a été recensée sur le bassin de Villeveyrac.

2.6.1.1 Configuration 1

Malgré les informations mentionnant des autorisations d'arrêt de surveillance suite à une stabilité totale des terrains (voir paragraphe 2.5.3) ou des témoignages relatant des foudroyages efficaces (très bons ratios affaissement / ouverture, de 0,5, une recompaction, sous l'effet de leur propre poids, des massifs meubles constituant les terrains foudroyés est encore possible. Ce phénomène peut être amplifié par l'action de perturbations extérieures (applications de surcharge en surface, mouvements de nappes au sein des différents sites miniers du bassin de Villeveyrac).

Nous retiendrons, de ce fait, ces secteurs **de configuration 1 comme sensibles aux tassements**.

2.6.1.2 Configuration 9 (uniquement galeries remblayées)

Les informations dont nous disposons sur la nature des remblais et le descriptif des opérations de remblayage sont trop parcellaires pour garantir une absence totale de vides résiduels. Au contraire, des remblais d'enrochements simplement déversés qui ont été utilisés sur certaines galeries augmentent la probabilité de rencontrer des vides résiduels et des remblais peu ou pas compactés. Ainsi, une recompaction et/ou une remobilisation de ces remblais est toujours possible sous l'effet des infiltrations des eaux de ruissellement par exemple. C'est pourquoi **les orifices des zones de galeries remblayées seront retenus comme sensibles aux tassements**.

2.6.1.3 Configuration 8

Le même raisonnement que celui appliqué précédemment aux galeries remblayées s'appliquent aux verses et découvertes remblayées. Sous l'effet de surcharges importantes en surface ou à l'occasion de modifications sensibles des conditions hydriques au sein des matériaux constitutifs de ces ouvrages, des tassements sont susceptibles d'affecter la surface. C'est pourquoi **les découvertes remblayées seront retenues sensibles aux tassements** comme pour les galeries remblayées.

2.6.1.4 Configuration 6

Le même raisonnement mené pour les affaissements au paragraphe 2.5.1.5 conduit à un aléa nul en tassement pour cette zone.

2.6.1.5 Configuration 11

Les zones de dépôts de stériles (configuration 11) peuvent aussi présenter des mouvements de terrains de type tassements. Seules sont concernées les zones de dépôts de l'Olivet et de Saint-Farriol car les autres ont toutes servi aux remblayage des découvertes correspondantes et ont donc été examinées au paragraphe 2.6.1.3. Ces mouvements se localiseront sur les sommets des zones de dépôts. En l'absence de localisation précise des ces sommets sur les plans disponibles, nous cartographierons l'ensemble des dépôts.

2.6.1.6 Autres configurations (2, 3, 4, 5, 7, 10 et les puits dallés de configuration 9)

Il est très peu probable qu'un mouvement de terrain dans les secteurs de configurations 2, 3, 4, 5 ou 9 (hors parties des galeries remblayées) se traduise par un phénomène de tassement. Il s'agira plutôt d'effondrements localisés (fontis) ou d'affaissement. Néanmoins, lorsque le vide résiduel d'une galerie ou d'une exploitation partielle est limité ou lorsque la profondeur du vide est trop importante, la propagation en surface de la rupture peut être arrêtée par auto-foisonnement avant d'avoir atteint la surface. Avec le temps et sous l'influence de modifications hydrologiques, la recompaction du matériau foisonné dans la zone déconsolidée peut entraîner la formation de tassements. Ce mécanisme reste rare et non observé sur le terrain. **C'est pourquoi nous retiendrons comme peu sensibles aux tassements les secteurs de configurations 2, 3, 4, 5, 9 (hors parties des galeries remblayées) et 10.**

Les découvertes non remblayées (configuration 7), les orifices ouverts (configuration 10) et les puits dallés de configuration 9 ne sont pas concernées par les phénomènes de tassement.

2.6.2 Évaluation de l'intensité des tassements

Généralement (voir annexe 1 et [2]), on entend par « tassement » un abaissement du sol caractérisé par de faibles mouvements de terrain horizontaux et verticaux.

A Villeveyrac, selon les experts, les seuls mouvements résiduels attendus au-dessus des exploitations foudroyées « *sont de l'ordre de grandeur des fluctuations naturelles de la surface topographique* » [4]. Ainsi, en l'absence de cas concrets de tassement survenu sur le bassin de Villeveyrac, il est probable que l'ordre de grandeur des tassements attendus se limite à quelques centimètres.

Donc, l'intensité des tassements peut être considérée comme très limitée sur l'ensemble des secteurs concernés par les tassements.

2.6.3 Évaluation du niveau d'aléa

En s'appuyant sur le principe de classification des niveaux d'aléa, on définira les classes suivantes pour chacune des configurations :

	Prédisposition	Intensité	Aléa
Configuration 1	Sensible	Très limitée	Faible
Configuration 2, 3, 4, 5	Peu sensible	Très limitée	Faible
Configuration 6	Nulle	Sans objet	Nul (affiché pour mémoire)
Configuration 8	Sensible	Très limitée	Faible
Configuration 9 (uniquement galeries remblayées)	Sensible	Très limitée	Faible
Configuration 11	Sensible	Très limitée	Faible
Configurations 7, 10 et les puits dallés de configuration 9	Non concernée		

Tableau 6 : Niveaux d'aléa « mouvements de terrain » relatif aux phénomènes de tassements

2.6.4 Zonage de l'aléa

La cartographie de l'aléa relatif aux tassements est donnée en annexe 6.

Le phénomène de tassement au-dessus de travaux miniers souterrains est similaire à celui de l'affaissement en terme d'angle d'influence en surface (prise en compte du même angle d'influence de 35 °). Ainsi, pour définir les marges de sécurité globales relatives à l'aléa tassement des configurations 1, 2, 3, 4, 5 et 6, nous reprendrons celles définies pour les affaissements et mentionnées dans le Tableau 5.

Les travaux des configurations 8 et 11 étant des travaux à ciel ouvert, la marge de sécurité globale sera égale à l'incertitude de calage des plans, soit au maximum de 20 mètres.

Enfin, pour les secteurs de configurations 9 (galeries remblayées uniquement), une détermination spécifique des marges de sécurité doit être menée. La recompaction des remblais de ces galeries va mobiliser les terrains se situant autour de l'orifice de la galerie. En effet, il est très probable que les tassements se propagent plus préférentiellement en suivant les remblais jusqu'en surface plutôt qu'en remontant dans les terrains situés à l'aplomb du tracé de la galerie. Ainsi, dans la même optique que le zonage des effondrements de têtes de puits (voir paragraphe 2.3.1.3), nous retiendrons une zone de 25 mètres de diamètre autour des orifices de ces galeries.

Quant aux parties de ces galeries non remblayées leur zone d'aléa sera incluse dans la zone d'aléa générée par les travaux de configuration 1, 2, 3, 4 ou 5 qu'elles desservent.

L'ensemble des résultats est synthétisé dans le tableau ci-dessous.

		Extension latérale (m)	Incertitude de calage de plans (m)	Marge de sécurité globale (m)
Configuration 1	Saint-Farriol	$84=120*\tan(35)$	15	100
	Rouquette	$70=100*\tan(35)$	15	85
	Montplaisir	$210=300*\tan 35$	20	230
Configuration 2, 3, 4, 5 et 6		Voir Tableau 5		
Configuration 9 (uniquement les galeries remblayées)	galerie de Granouillet plan Dalmais	Sans objet	Sans objet	cercle de 25 mètres de diamètres autour de l'orifice
	les deux descenderies du carreau des Usclades les quatre descenderies de la Mine de Saint-Farriol descenderie de Comberouge			
Configuration 8		0	20	20
Configuration 11		0	20	20
Configurations 7, 10 et les puits dallés de configuration 9		Non concernées		

Tableau 7 : : Marges de sécurité des zones d'aléa « mouvements de terrain » relatif aux tassements

2.7 GLISSEMENTS DE TERRAIN ET ECROULEMENTS

2.7.1 Évaluation de la prédisposition aux écoulements et glissements par configurations

2.7.1.1 Configurations 1, 2, 3, 4, 5, 6, 9 et 10

Généralement (voir annexe 1), on entend par « glissement » un mouvement de terrain constitué de terres meubles situé le long d'une zone de rupture définie par une surface continue et dont la composante horizontale du déplacement est plus importante que la composante verticale (à l'opposé des mouvements de terrain de type « tassement » ou « affaissement »). Ces phénomènes de glissement s'observent le plus couramment le long des flancs des ouvrages de dépôts et des découvertes. Un écoulement rocheux est aussi un mouvement de pente mais qui mobilise des masses rocheuses plus ou moins volumineuses se détachant d'une paroi généralement très raide pour aller s'écraser au pied du front. **Toutes les zones de travaux souterrains des configurations 1, 2, 3, 4, 5, 6, 9 et 10 ne sont donc pas concernées par ce type de phénomènes.**

2.7.1.2 Configuration 7

- Découverte de l'Olivet

Celle-ci n'ayant pas été remblayée après son exploitation, elle laisse donc apparaître une vaste excavation qui se remplit d'eau au rythme des événements pluvieux et des mouvements de nappes consécutifs (photos 24 et 25 de [1]).

La bordure nord de cette excavation se confond avec le flanc sud de la zone de dépôts de stériles adjacente. Un examen visuel de cette zone n'a pas permis de déceler de secteur de pente trop importante. Celle-ci est estimée en moyenne à 30° - 35°. En outre, la zone est aujourd'hui exploitée à ciel ouvert. Nous retiendrons l'ensemble de la **zone de dépôt de l'Olivet comme sensible aux glissements** (voir plus avant) cette zone englobant une partie de la bordure nord de la découverte.

La limite sud de l'excavation étant exempte de travaux, elle présente un front rocheux d'une quinzaine de mètres de hauteur. Un examen visuel a permis de mettre en évidence un reboisement du sommet de ce front mais il a aussi révélé une pente de talus relativement forte, parfois sub-verticale, ainsi que la présence de quelques blocs en fond de découverte provenant sans doute d'un glissement ou d'un écoulement survenu au-dessus. Notons qu'en raison d'une paroi très raide et d'un massif de une nature rocheuse et fracturée, le phénomène redouté le plus probable est l'écroulement rocheux. **Ainsi, nous retiendrons ce côté sud de la découverte comme sensible aux écroulements.**

- Découverte de Saint-Farriol

Celle-ci n'a été remblayée qu'en partie, elle laisse aussi une excavation qui se remplit d'eau au rythme des événements pluvieux.

Tandis que la bordure est de cette découverte se confond avec la topographie existante, la limite ouest nécessite de prendre plus de précautions. En effet, ce flanc de la découverte est fortement penté (proche de la verticale) présentant un front rocheux d'une dizaine de mètres de hauteur. Il présente, en sa partie inférieure, des entrées de galeries remblayées, certes, mais sous eau. Compte tenu de ces informations, la stabilité à long terme de ce front ne peut être garantie. Notons aussi que, par le passé, ce secteur a déjà connu un événement qualifié de « *glissement de terrain* » dans les documents archivés. En effet, suite au glissement des marnes situées au toit des entrées de galeries au fond de la découverte, les terrains en haut de crête se sont écroulés, entraînant avec eux une partie des vignes situées au-dessus.

Ainsi, nous retiendrons **ce côté ouest de la découverte comme sensible aux écroulements de terrain**. D'autre part, **la limite est de la découverte sera définie comme sensible aux glissements, en raison d'une pente plus faible**. Cette classification reflète plus un objectif de préservation de la mémoire de travaux que des niveaux d'aléa réels.

- Découverte de Cambellies

L'excavation qui reste aujourd'hui présente des abords proches de la verticale sur la quasi-totalité de son pourtour et sur une dizaine de mètres de hauteur. De nombreux blocs en fond de découverte ont pu être observés ainsi que des rigoles de ravinement, parfois profondes, creusées le long des flancs. Des incertitudes demeurent sur la présence d'orifices de travaux souterrains qui pourraient venir sous-caver les flancs de la découverte. Enfin, en 1983, à la suite de forts événements pluvieux, un écoulement consécutif à un glissement de terrains marneux du flanc nord-est de l'excavation s'est produit. Compte tenu de ces informations et sans autres données, nous retiendrons comme **sensibles aux écoulements tous les abords de la découverte**. La même remarque que précédemment sur les écoulements rocheux peut être faite ici.

Il faut noter la découverte de Cambellies est le lieu d'une décharge dont le statut n'est pas clairement ; ce point devra être examiné en détail lors de la phase post PPRM ou lorsque le règlement sera défini. Elle sera traitée à part (voir paragraphe 2.7.4.).

2.7.1.3 Configuration 8

Les découvertes de Roquemale, des Usclades et Bergerie, de Cocaval, de Regagnas, du Chemin du Poussan, de Vicarresse-Rec ont toutes été remblayées et quasiment aucune excavation ne subsiste aujourd'hui sur ces découvertes. Toutefois, sur les sites de Regagnas et de Rec-Vicarresse, des petits fronts rocheux verticaux de hauteur métrique subsistent. On en déduit à l'échelle des autres sites que de telles situations sont probables. **Ainsi, les phénomènes d'écroulement sur ces secteurs ont une prédisposition faible (l'aléa correspondant sera faible).**

2.7.1.4 Configuration 11

L'ensemble des zones de dépôts de cette configuration a pu être observé. Les deux plus importantes, celles de l'Olivet et de Saint-Farriol, présentent une hauteur d'environ 15 à 20 mètres et de flancs de pente de 30° à 40° pour la première et une dizaine de mètres de hauteur et 25° de pente pour la seconde.

Toutes les autres zones de dépôts ont servi au remblayage de découverte.

En outre, aucun glissement de flancs de dépôts n'a été recensé dans la phase informative. Néanmoins, l'absence d'étude de stabilité de pentes ne nous permet pas de garantir à long terme la stabilité de ces dépôts. C'est pourquoi nous **retiendrons ces secteurs comme peu sensibles aux glissements**.

2.7.2 Évaluation de l'intensité des glissements et des écroulements

Les découvertes de configuration 7 sont des ouvrages aux dimensions importantes correspondant à des volumes de stériles extraits importants (1 600 000 m³ pour celle de Saint-Farriol et 3 500 000 m³ pour celle de L'Olivet). Ainsi, compte tenu de la quasi-verticalité des fronts de talus incriminés et d'une hauteur moyenne de 15 à 20 mètres, dans l'éventualité d'un mouvement rocheux les volumes mobilisés seraient importants (sans doute > 100 m³). **Par conséquent, nous retiendrons une intensité élevée pour les écroulements de terrains dans ces découvertes de configuration 7.** En revanche, les flancs des zones de dépôts de configuration 11 (celle de Saint-Farriol et de L'Olivet) de hauteurs moindres et constitués de matériaux plus meubles, pourraient générer des glissements dont l'intensité est jugée **modérée**. Le même raisonnement sera appliqué **à la limite est de la découverte de Saint-Farriol concernée par des glissements.**

2.7.3 Évaluation du niveau d'aléa

En s'appuyant sur le principe de classification des niveaux d'aléa, on définira les classes suivantes pour chacune des configurations :

		Prédisposition	Intensité	Aléa
Configurations 1, 2, 3, 4, 5, 6, 9 et 10		Non concernées		
Configuration 7	Limite sud de la découverte de l'Olivet	Sensible (écroulement)	Elevée	Moyen
	Complémentaire de la découverte de l'Olivet	Analyse incluse dans celle de la zone de dépôt de l'Olivet		
	Limite ouest de la découverte de Saint-Farriol	Sensible (écroulement)	Elevée	Moyen
	Limite est de la découverte de Saint-Farriol	Sensible (glissement)	Modérée	Faible
	Découverte de Cambellies*	Sensible (écroulement)	Elevée	Moyen
Configuration 8		Faible (écroulement)	Elevée	Faible
Configuration 11*	Zone de dépôts de l'Olivet	Peu sensible (glissement)	Modérée	Faible
	Zone de dépôts de Saint-Farriol	Peu sensible (glissement)	Modérée	Faible

Tableau 8 : Niveaux d'aléa « mouvements de terrain » relatif aux phénomènes d'écroulements et de glissements

*La zone de décharge de cette découverte a été retenue en aléa faible (glissement) en raison de sa pente moyenne. Ce zonage permettra aussi de conserver la mémoire de cette zone.

2.7.4 Zonage de l'aléa

La cartographie de l'aléa relatif aux glissements de terrain ou mouvements de pente est donnée en annexe 7.

La zone d'aléa associée aux découvertes non remblayées ou plus précisément les zones de crêtes intégrera, outre l'incertitude des plans, une marge d'extension latérale de 20 mètres (en considérant un angle de 45° et une hauteur moyenne de 20 mètres). Cette marge prise de part et d'autre de la limite de la crête de fronts intègre la zone d'épandage des potentiels écroulements rocheux ou glissements ainsi que la zone soumise au phénomène de recul du front.

Normalement, la zone concernée par les glissements des flancs des zones de dépôts de stérile devrait se limiter aux bords des zones de dépôts ; en l'absence de ces limites précises, l'ensemble de la zone de dépôts a été cartographié avec la même marge que celle des découvertes précédentes. Les secteurs exploités à ciel ouvert remblayés (configuration 8) mais de plus faible hauteur que les découvertes précédentes généreront une extension latérale moindre, de l'ordre de 10 mètres.

Les marges de sécurité globale sont synthétisées dans le tableau ci-dessous :

		Extension latérale (m)	Incertitude de calage de plans (m)	Marge de sécurité globale (m)
Configurations 1, 2, 3, 4, 5, 6, 9 et 10		Non concernées		
Configuration 7	Limite sud de la découverte de l'Olivet	20	15	35
	Complémentaire de la découverte de l'Olivet	Analyse incluse dans celle de la zone de dépôt de l'Olivet		
	Limite ouest de la découverte de Saint-Farriol	20	15	35
	Limite est de la découverte de Saint-Farriol	20	15	35
	Découverte de Cambellies	20	10	30
Configuration 8		10	15	25
Configuration 11	Zone de dépôts de l'Olivet	20	15	35
	Zone de dépôts de Saint-Farriol	20	15	35

Tableau 9 : Marges de sécurité des zones d'aléa mouvement de terrain relatif aux écroulements et aux glissements

2.8 COULEES DYNAMIQUES

Il s'agit de coulées dynamiques qui affectent principalement les digues des bassins de rétention de matériaux fins mais peuvent, exceptionnellement, se développer le long de certains terrils, voire de flancs de découvertes creusées en massif de roche tendre.

Dans les zones exploitées sur le bassin de Villeveyrac, aucune digue de rétention n'a été recensée.

Les visites de sites et les observations des verses situées sur l'emprise des exploitations de bauxite de Villeveyrac révèlent des ouvrages bien souvent non saturés et constitués de matériaux en blocs ou gravier plus ou moins grossier. En outre, les rares zones de dépôts de stériles encore visibles aujourd'hui ont, pour la plupart, été reboisées. Le drainage de ces dépôts se fait naturellement et de manière efficace comme en témoignent les observations des mineurs actuels et l'apparition temporaire (à la suite de pluies) de sources en pied d'ouvrage (site de Roquemale et de Cambellies).

Enfin, la liquéfaction de matériaux constituant les flancs des découvertes reste peu probable en raison du caractère massif du matériau considéré.

Notons, tout de même, qu'à la suite deux épisodes de fortes précipitations, deux phénomènes de type coulée ont été observés sur les découvertes de Saint-Farriol et de Cambellies. Néanmoins, en raison de la cinétique faible de ces phénomènes (de l'ordre de la journée) et de du caractère local de leurs conséquences, nous les avons traités comme des glissements de terrains et non comme des coulées généralement plus rapides (de l'ordre de l'heure) et aux conséquences plus étendues (voir paragraphe 2.7).

Ainsi aucune des conditions d'apparition d'un événement de type coulée n'a été mise en évidence sur les exploitations de bauxite du bassin de Villeveyrac : existence de matériaux présentant un caractère thixotropique⁸, présence de fines particules, existence de digues ... (voir annexe 1).

La prédisposition des sites miniers aux coulées sera donc considérée comme nulle quelle que soit la configuration de travaux définie.

Par conséquent, il n'y a pas d'aléa relatif aux phénomènes de coulées sur le bassin de bauxite de Villeveyrac.

⁸ C'est-à-dire pouvant brutalement être affectés par un phénomène de liquéfaction.

3. ALEA GAZ DE MINE

Dans l'ensemble des documents consultés lors de la phase informative, aucune information sur le gaz de mine relatif aux exploitations de bauxite du bassin de Villeveyrac n'a été retrouvée :

- ni étude spécifique au gaz de mine, comme une analyse du risque résiduel d'émission de gaz de mine en surface, par exemple, y compris dans le cadre des dossiers d'abandon des travaux ;
- ni référence à un quelconque accident en relation avec le gaz de mine.

En principe, le phénomène d'émission de gaz de mine en surface doit être considéré dans le cas où les trois éléments suivants sont réunis [2] :

- la présence de vides constituant un réservoir souterrain ;
- la présence de gaz dangereux ;
- la possibilité d'accumulation et de migration de ces gaz, à des teneurs significatives, vers la surface.

3.1 ETAT D'ENNOYAGE DES VIDES MINIERES

Dans le cas des exploitations de bauxite du bassin de Villeveyrac, seule la nappe captive karstique, circulant préférentiellement dans les dolomies aquifères, a été concernée par les travaux souterrains. Il existe d'autres aquifères isolés dans les formations du Crétacé et de l'Eocène mais des études hydrogéologiques, menées localement (site de Comberouge), ont montré que ces aquifères n'avaient pas d'impact sur les exploitations de bauxite (voir paragraphe 3.1.6.1 de [1]).

Sur au moins deux sites, la Rouquette-Montplaisir et Saint-Farriol, nous savons que cette nappe est revenue à son niveau d'équilibre (entre les cotes +30 m NGF et +40 m NGF) depuis les années 1990 pour l'un et 1997 pour l'autre. Des rapports hydrogéologiques en attestent. Ainsi, la totalité des travaux souterrains de ces deux sites est aujourd'hui ennoyée car située plus profondément que cette cote. Sur les autres sites, les données visant à définir précisément les remontées de nappe manquent. Toutefois, il est très probable que la nappe soit remontée dans ces travaux comme elle l'a fait dans les travaux de Saint-Farriol qui présentaient des profondeurs minimales et maximales encadrant celles de tous les autres travaux. Cette hypothèse est confirmée par les hauteurs des niveaux d'eau dans les quelques puits suivis par l'exploitant actuel (voir Tableau 10), qui présentent tous des niveaux supérieurs ou égaux à +30 m NGF et/ou +40 m NGF, sauf exception notable lors de sécheresse ou de fortes pluies.

NOUVELLES CÔTES DE NIVEAU NGF (Fermeture des puits) sur béton					
DATE	A - PUIITS DU REC	B - PUIITS USCLADES	C - CALADE SONDRAGE n°2	D - ROQUEMAL PUIITS n°2	ST FARRIOL NIVEAU EAU
	NIVEAU 45.06	NIVEAU 56.91	NIVEAU 30.76	NIVEAU 55.71	
4/01/94	coule	52,59	coule	51,29	34,14
4/02/94	44,21	49,19	coule	47,68	34,26
7/03/94	coule	52,61	coule	52,13	34,61
5/04/94	coule	50,65	coule	49,48	34,34
5/05/94	44,09	45,93	coule	45,34	34,30
5/06/94	42,19	42,31	coule	42,21	34,17
5/07/94	40,55	40,24	02,29	40,09	33,05
4/08/94	38,76	38,31	01,26	38,49	29,50
5/09/94	37,18	36,71	02,05	36,82	28,71
4/10/94	40,88	38,19	00,78	38,80	29,98
8/11/94	coule	51,31	coule	53,01	33,90
7/12/94	coule	50,17	coule	50,94	34,53
4/01/95	coule	40,91	coule	43,44	34,43
5/02/95	43,58	39,58	coule	41,25	34,23
7/03/95	42,08	37,01	coule	39,04	34,28
4/04/95	40,91	36,23	coule	38,11	34,16
4/05/95	39,67	35,23	coule	36,90	34,23
6/06/95	38,37	33,76	03,12	34,79	33,88
4/07/95	37,26	34,33	pompape	35,61	31,40
8/08/95	34,26	fond de mesure	04,12	10,95	26,64
5/09/95	32,65	fond de mesure	04,06	07,69	26,70
5/10/95	31,30	fond de mesure	03,24	06,99	27,52
6/11/95	32,04	fond de mesure	02,14	27,88	28,62
5/12/95	35,96	fond de mesure	01,22	28,06	29,54
3/01/96	coule	35,41	00,82	29,99	31,58
8/02/96	coule	49,91	coule	45,43	34,93
5/03/96	coule	47,41	coule	39,89	34,91
5/04/96	coule	44,81	coule	37,51	34,63
6/05/96	coule	40,96	coule	31,68	34,43
5/06/96	coule	37,91	coule	33,71	34,21
5/07/96	43,80	34,61	coule	24,71	34,16
5/09/96	42,71	42,96	coule	42,76	33,96
8/10/96	44,01	43,79	coule	43,40	34,31
6/11/96	43,08	45,27	coule	44,92	34,72
5/12/96	coule	44,05	coule	43,76	34,24
6/01/97	coule	54,91	coule	53,11	34,73
5/02/97	coule	55,61	coule	coule	34,75
9/03/97	coule	54,91	coule	52,95	34,67
7/04/97	coule	53,58	coule	52,27	34,53

Tableau 10 : Suivi des niveaux d'eau dans certains orifices miniers du bassin de Villeveyrac de 1994 à 1997⁹

⁹ Tableau Excel : document de travail transmis par les exploitants actuels

Ainsi sans plus d'information, et notamment en l'absence d'un schéma de circulation des eaux souterraines précis à l'échelle du bassin, qui peut s'avérer complexe en raison du caractère captif de cette nappe et d'une tectonique compliquée, nous ne pouvons que supposer l'ennoyage partiel des vides souterrains. Cette hypothèse a été confirmée par l'exploitant actuel. Il est probable que les rares vides souterrains qui subsistent se situent dans les travaux entre les affleurements et la cote minimale de la nappe évaluée à +30 m NGF sur les sites de la Rouquette-Montplaisir et de Saint-Farriol. Dans cette hypothèse, les cotes des travaux lues sur les plans permettent de définir les zones non ennoyées :

- mine de Roquemale : cote minimale des travaux : -82 m NGF et maximale : +46 m NGF, la quasi-intégralité des travaux est ennoyée ;
- mine des Usclade : cote minimale des travaux : -30 m NGF et maximale : +22 m NGF, les travaux sont partiellement ennoyés ;
- mine de Cocava : cote minimale des travaux : +40 m NGF et maximale : +70 m NGF, ainsi une grande partie des travaux souterrains serait non ennoyée mais cette zone se trouve restreinte puisque des travaux à ciel ouvert ont repris en grande partie les vieux travaux souterrains (dans des proportions inconnues) ;
- mine de Regagna : les travaux souterrains de cette mine sont peu connus. Nous les retiendrons non ennoyés ;
- mine du Chemin du Poussan : cote minimale des travaux : +19 m NGF et maximale : +46 m NGF. La partie non ennoyée des travaux représente donc environ 50 % de la superficie de la mine ;
- mine de Vicaresse : cote minimale des travaux : +13 m NGF et maximale : +45 m NGF. Une petite partie de la mine apparaît donc comme non ennoyée ;
- mine de Comberouge et du Mas Rouch : en l'absence de données sur les profondeurs des travaux, nous retiendrons l'ensemble des travaux de ces deux mines comme non ennoyé. Cette approche sécuritaire est retenue par absence de données précises. Elle répond plus à une attente de préservation de la mémoire des travaux qu'à une réelle définition d'aléa. Notons que, lors de nos visites de site sur les travaux de reprise à ciel ouvert, la présence d'eau a été constatée ponctuellement sur des secteurs de vieux travaux souterrains, au-delà de la cote +30 mètres NGF.

Par manque d'informations complémentaires, la profondeur des travaux de Comberouge sera prise arbitrairement égale à la différence entre la cote maximale de la surface et la cote supposée de la nappe (+30 m NGF), soit 15 mètres.

Pour les travaux de Mas Rouch, la profondeur a été estimée par rapport à la position de l'affleurement. La valeur retenue est de 40 mètres ;

- mine de Cambellies : il est très probable que les travaux souterrains n'existent plus aujourd'hui. Ils ont tous été repris par la réalisation de la découverte.

La remontée des eaux s'étant déjà produite, l'effet de pistonage des gaz de mine vers la surface a déjà eu lieu. La grande majorité des travaux souterrains est maintenant ennoyée de sorte que la probabilité d'émission de gaz de mine en surface devient négligeable à l'aplomb de ces travaux.

3.2 ELEMENTS RELATIFS AUX GAZ DE MINE

Compte tenu de la nature du gisement exploité et des roches encaissantes, seule l'existence de dioxyde de carbone, d'air désoxygéné, de sulfure d'hydrogène ou éventuellement de radon pourrait présenter un problème.

En effet :

- les travaux étaient très peu boisés¹⁰, ce qui écarte la formation de gaz par décomposition ou de l'altération de ces ouvrages ;
- aucune information révélant une concentration notable en gaz dans le minerai de bauxite ou dans les formations encaissantes n'a été retrouvée. On peut raisonnablement supposer que, si tel avait été le cas, des mesures auraient été réalisées ;
- les mineurs rencontrés nous ont témoigné « *ne jamais avoir été confrontés au problème de gaz de mine* », en dehors des problèmes liés à l'aérage, bien évidemment ;
- un bref retour d'expérience sur les mines de bauxite en France révèle qu'il est très rare de rencontrer de problématiques gaz de mine sur ces sites.

Ces informations ne sont toutefois pas suffisantes pour exclure totalement le phénomène d'émission de gaz dangereux en surface.

3.3 DEFINITION ET CARTOGRAPHIE DE L'ALEA « GAZ DE MINE »

3.3.1 Définition des niveaux d'aléa

Dans ces conditions, nous retiendrons :

- un aléa « émission de gaz de mine » faible associé uniquement aux orifices et/ou désordres débouchant au jour (même s'ils ont été mis en sécurité) qui possèdent une liaison avec des travaux souterrains non enoyés : il s'agit des zones de travaux de configuration 9 et 10 de l'aléa « mouvements de terrain » :
 - les puits de Roquemale 1, de Roquemale 2, des Usclades et le puits du Rec sur la concession des Usclades, le puits de la Rouquette, sur la concession de Villeveyrac ;
 - l'entrée du plan Dalmais à la mine de Roquemale, les deux descenderies du carreau de la mine des Usclades, la descenderie de la mine de Regagnas, les quatre descenderies de la mine de Saint-Farriol et la descenderie de Comberouge ;
 - entre les sites de Regagnas et du chemin du Poussan (concession des Usclades), l'entrée de la galerie isolée de Granouillet et le fontis à proximité ;
 - du fontis et de la galerie de recherche isolée dont l'entrée s'est éboulée au nord du site de Roquemale (concession de Villeveyrac) ;
 - sur la concession du Mas Rouch, les trois entrées de galeries ;

¹⁰ Seuls des vestiges de boisages ont été retrouvés sur de vieux travaux souterrains à Comberouge concernant uniquement des galeries de traçage ou d'infrastructures. Sur tous les autres sites et notamment les plus récents le boisage n'était pas pratiqué [1].

- un aléa faible à l'aplomb des zones de travaux non ennoyés que nous avons défini précédemment (les secteurs de travaux souterrains situés entre la surface et la cote +30 m NGF). Ce niveau d'aléa reflète plus un objectif de préservation de la mémoire des travaux non ennoyés comme potentiellement émetteurs de gaz qu'un réel niveau aléa. En effet, ces zones devraient présenter un niveau inférieur à celui des orifices en raison de :
 - l'existence d'un faux-toit de marnes « fluantes » et l'existence d'un recouvrement marneux à passées gréseuses, parfois d'une épaisseur cumulée de plusieurs dizaines de mètres. Ces types de recouvrement sont de nature à limiter la possibilité d'émission de gaz de mine en surface ;
 - l'existence d'exutoires privilégiés pour le gaz, constitués par les orifices débouchant au jour qui drainent les gaz de mine. Les gaz de mine ont donc la possibilité de s'évacuer vers la surface plus facilement par ces ouvrages que par les terrains de recouvrement.

Mais, afin de ne pas introduire un niveau d'aléa intermédiaire, le même niveau faible leur a été attribué, niveau d'ailleurs pleinement justifié pour les orifices.

3.3.2 Limites de zonage

La carte d'aléa relative à l'émission de gaz de mine en surface est présentée en annexe 8.

Le zonage de l'aléa lié aux travaux non ennoyés a été établi en prenant les règles adoptées pour l'aléa affaissement, à savoir en considérant un angle d'influence de 35°. Cet angle englobe les déstructurations du toit (flexion, fissurations et fracturations des bancs) liés à des ruptures locales au sein des panneaux qui pourraient alors être des vecteurs privilégiés pour la migration des gaz de mine vers la surface. Les marges de sécurité finales retenues sont détaillées dans le tableau suivant.

Pour les ouvrages débouchant au jour, nous considérons que les émissions sont possibles tout au plus à l'intérieur d'un rayon de 20 m autour de l'ouvrage. Cette marge comprend une extension latérale des migrations de gaz de mines estimée à 15 m et une erreur de positionnement des ouvrages au GPS (retenue inférieure à 5 mètres).

	Hmax (m) par rapport à la cote +30m NGF	Hmax*tan35 (m)	Incertitude de calages des plans (m)	Marges globales de sécurité (m)
Mine souterraine de Saint-Farriol	Pas de zone d'aléa « gaz » car ennoyée intégralement			
Mine souterraine de la Rouquette	Pas de zone d'aléa « gaz » car ennoyée intégralement			
Mine souterraine de Roquemale	30	21	15	35
Mine souterraine des Usclades	30	21	15	35
Mine souterraine de Cocaval	20	14	15	35
Mine souterraine de Regagnas	15	11	15	30
Mine souterraine du Chemin du Poussan	30	21	15	25
Mine souterraine de Vicarresse	20	14	15	30
Mine souterraine de Comberouge	15	11	10	20
Mine souterraine du Mas Rouch	40 (estimée)	28	20	50
Mine souterraine de Cambellies	Pas de zone d'aléa « gaz » car travaux souterrains entièrement repris à ciel ouvert			

Tableau 11 : Marges de sécurité des zones d'aléa relatif à l'émission de gaz de mine en surface

4. BIBLIOGRAPHIE

- [1] Zones d'exploitation de bauxite du bassin de Villeveyrac (34) - Contribution à la réalisation d'un Plan de Prévention des Risques Miniers - Phase informative, INERIS DRS-04-57693/R01, F. POULARD, C. LOISEAU novembre 2004 ;
- [2] L'élaboration des Plans de Prévention des Risques Miniers - Guide méthodologique - Volet technique relatif à l'évaluation de l'aléa, INERIS DRS-04-51198/R01 PROJET n° 2, INERIS, BRGM, GEODERIS, ENSMP, IRSN, CSTB, en cours de réalisation à la date de rédaction du présent rapport ;
- [3] Décret no 2000-547 du 16 juin 2000 relatif à l'application des articles 94 et 95 du code minier, Art. 2-I du Chapitre Ier « Élaboration des plans de prévention des risques miniers » du Titre Ier « Dispositions relatives aux plans de prévention des risques miniers », www.equipement.gouv.fr/bulletinofficiel/fiches/Bo200012/A0120007.Ham ;
- [4] Concession de Villeveyrac - Evolution des mouvements de surface à l'aplomb des lentilles de la Rouquette-Montplaisir - Synthèse des résultats, GC Var, juin 1993 ;
- [5] Rapport sur les exploitations de la Sté Aluminium Pechiney à Villeveyrac - DRIRE Languedoc Roussillon, G. Crépel, 10 octobre 1986 ;
- [6] Rapport GEODERIS, GEODERIS R-2003/10 du 3 février 2003 ;
- [7] Travaux de mise en sécurité de la Fendue Pinnelong n°2 (extrait du dossier d'abandon des travaux des HBCM sur la commune de Saint-Etienne), HBCM Direction des Sites Arrêtés, 26 novembre 2001.

5. LISTE DES ANNEXES

Repère	Désignation précise	Nombre de pages
Annexe 1	Principes généraux de la démarche de définition et de cartographie de l'alea	25 A4
Annexe 2	Approche analytique du problème d'autocomblement des galeries	7 A4
Annexe 3	Le modèle de « l'aire tributaire »	4 A4
Annexe 4	Cartographie de l'aléa relatif aux effondrements localisés	Hors format
Annexe 5	Cartographie de l'aléa relatif aux affaissements	Hors format
Annexe 6	Cartographie de l'aléa relatif aux tassements	Hors format
Annexe 7	Cartographie de l'aléa relatif aux écroulements et aux glissements	Hors format
Annexe 8	Cartographie de l'aléa relatif à l'émission de gaz de mine en surface	Hors format
Annexe 9	Liste des logiciels utilisés	2 A4

ANNEXE 1

PRINCIPES GENERAUX DE LA DEMARCHE DE DEFINITION ET DE CARTOGRAPHIE DE L'ALEA

1. Contexte.....	3
2. Introduction.....	3
3. Aléa « mouvements de terrain »	3
3.1 Description des mécanismes et phénomènes.....	3
3.1.1 L'effondrement localisé	3
3.1.2 L'effondrement généralisé	6
3.1.3 L'affaissement minier	7
3.1.4 Le tassement.....	11
3.1.5 Le glissement ou mouvement de pente	12
3.2 Evaluation de l'aléa « mouvements de terrain ».....	15
3.2.1 Intensité.....	15
3.2.2 Probabilité d'occurrence ou prédisposition	15
3.2.3 Niveaux d'aléa	16
4. Aléa « pollution des eaux et des sols »	16
4.1 Description des mécanismes et phénomènes.....	16
4.2 Evaluation de l'aléa « pollution des eaux et des sols ».....	17
4.2.1 Intensité.....	17
4.2.2 Probabilité d'occurrence ou prédisposition	17
5. Aléa « Inondations »	18
5.1 Les phénomènes redoutés.....	18
5.1.1 Modification du régime des émergences.....	18
5.1.2 Apparition de zones détrempées ou de marécages	20
5.1.3 Inondation des sous-sols et points bas.....	21
5.1.4 Modification du régime des cours d'eau.....	21
5.1.5 Inondations brutales	21
5.2 Evaluation de l'aléa « Inondations ».....	22
5.2.1 Intensité.....	22
5.2.2 Probabilité d'occurrence ou prédisposition	22
6. Aléa « émission de gaz de mine »	23
7. Bibliographie	24

1. CONTEXTE

Cette annexe a été réalisée sur la base des données du « guide PPRM », [2], elle constitue une extraction des informations applicables au cas de l'exploitation de bauxite du bassin de Villeveyrac. Pour toute information plus précise sur un point particulier de la méthodologie le lecteur est invité à se référer au guide.

2. INTRODUCTION

La notion d'aléa est un concept spécifique à la terminologie du risque naturel qui est désormais reconnue et appliquée dans le domaine des risques miniers. Elle correspond à la probabilité qu'un **phénomène** se produise sur un site donné, au cours d'une période de référence, en atteignant une **intensité** ou une **gravité** qualifiable ou quantifiable.

La caractérisation et la hiérarchisation d'un aléa reposent donc classiquement sur le croisement de l'**intensité prévisible** du phénomène avec sa **probabilité d'occurrence**.

Dans le domaine minier, la réglementation [1], suggère d'examiner en détail les aléas suivants :

- aléa « mouvements de terrain », caractérisé, entre autres, par les phénomènes d'affaissements, d'effondrements et de glissements ;
- aléa « émission de gaz de mine » caractérisé, entre autres, par les émanations de gaz dangereux et les émissions de rayonnements ionisants ;
- aléa « impact environnemental » caractérisé, entre autres, par les phénomènes d'inondations et de pollutions des sols ou des eaux.

3. ALEA « MOUVEMENTS DE TERRAIN »

3.1 DESCRIPTION DES MECANISMES ET PHENOMENES

3.1.1 L'effondrement localisé

Un effondrement localisé se caractérise par l'apparition soudaine en surface d'un cratère d'effondrement dont l'extension horizontale varie généralement de quelques mètres à quelques dizaines de mètres de diamètre. La profondeur du cratère dépend principalement de la profondeur et des dimensions des travaux souterrains. Si, dans la majorité des cas, cette profondeur se limite à quelques mètres, dans certaines configurations particulières, elle peut atteindre voire dépasser une dizaine de mètres (effondrements de tête de puits par exemple).

En fonction du mécanisme initiateur du désordre et de la nature des terrains de sub-surface, les parois du cratère peuvent être sub-verticales ou inclinées, donnant ainsi naissance à une forme caractéristique d'entonnoir.

Les dimensions du désordre et le caractère brutal de sa manifestation en surface font des effondrements localisés des phénomènes potentiellement dangereux, notamment lorsqu'ils se développent au droit ou à proximité de secteurs urbanisés.

Ce phénomène peut résulter de plusieurs mécanismes de rupture.

L'effondrement localisé par rupture du toit d'une galerie : le phénomène de fontis

On parle de **fontis** lorsque l'instabilité qui affecte la surface résulte de la remontée au jour d'un éboulement initié au sein d'une excavation souterraine (galerie, chambre d'exploitation...). Lorsque la voûte initiée par la rupture du toit de l'excavation ne se stabilise pas mécaniquement du fait de la présence de bancs massifs au sein du recouvrement, elle se propage progressivement vers la surface et, si l'espace disponible au sein des vieux travaux est suffisant pour que les matériaux éboulés et foisonnés puissent s'y accumuler sans bloquer le phénomène par « auto-comblement », la voûte peut atteindre la surface du sol. Si le développement d'une montée de voûte est un phénomène très lent qui peut prendre plusieurs années ou décennies, l'apparition du fontis en surface se fait, quant à elle, de manière soudaine, ce qui rend le phénomène potentiellement dangereux pour les personnes et les biens situés dans son emprise.

L'apparition de ce type de désordre en surface ne concerne que les travaux peu profonds. Les retours d'expérience menés sur plusieurs bassins miniers ont ainsi montré que, sauf spécificité géologique ou d'exploitation, au-delà d'une cinquantaine de mètres de profondeur (et parfois moins), les anciens vides miniers n'étaient plus susceptibles de provoquer ce phénomène en surface.

L'effondrement par rupture de pilier(s) isolé(s)

Au sein d'une exploitation menée par la méthode des chambres et piliers abandonnés, la ruine d'un (ou de quelques) pilier(s) peut se traduire, en surface, par un effondrement lorsque la profondeur des travaux et la raideur du recouvrement ne sont pas suffisamment importantes. On parle alors de **rupture de pilier(s) isolé(s)**.

La dimension de la zone affectée en surface est généralement plus importante que celle résultant d'un simple fontis mais sensiblement plus réduite que dans le cas d'un effondrement généralisé décrit plus loin. Comme les fontis, les ruptures de piliers isolés sont des phénomènes purement locaux qui ne dépendent pas de la géométrie globale des exploitations mais uniquement de conditions locales défavorables.

Ces conditions défavorables peuvent résulter de la méthode d'exploitation ayant conduit, dans certains secteurs, à des extractions locales trop intensives laissant des piliers sous-dimensionnés, fragilisés ou mal superposés. Elles peuvent aussi résulter d'hétérogénéités géologiques (zones fracturées ou faillées, venues d'eau...).

Comme les fontis, l'apparition de ce type de désordre en surface ne concerne que les travaux peu profonds

L'effondrement d'une tête de puits

Un ancien puits d'exploitation, mal remblayé (à l'aide de matériaux qui peuvent être remobilisés, notamment en présence d'eau), peut débourrer, c'est-à-dire voir son remblai s'écouler au sein des ouvrages souterrains auquel il est raccordé, avec pour conséquence la formation d'un cratère présentant les mêmes dimensions que la colonne du puits.

Ce débouillage peut, dans certains cas (assez fréquents lorsqu'il s'agit de très vieux puits), s'accompagner, ou être suivi, d'une rupture du revêtement du puits et d'un effondrement des terrains peu compétents environnants, comme le sont généralement les terrains superficiels. Il se produit alors un cône d'effondrement dont les dimensions dépendent des caractéristiques géologiques et mécaniques locales des terrains.

La manifestation en surface peut ainsi se restreindre à un cratère de petite taille (quelques mètres de diamètre au maximum) ou générer des désordres plus importants (diamètre pouvant dépasser une dizaine de mètres).

L'effondrement de la surface peut également résulter de la rupture de l'ouvrage réalisé en tête de puits (platelage en bois, dalle de surface, bouchon mal dimensionné...). Dans ce cas, l'effondrement se circonscrit généralement au seul diamètre de puits, la rupture des terrains environnants n'étant qu'exceptionnelle.

La rupture d'une tête de filon

Lorsque l'exploitation d'un filon s'est développée à proximité immédiate de la surface ou lorsqu'une exploitation à ciel ouvert a contribué à excaver postérieurement le stot de protection laissé au-dessus d'un filon exploité en souterrain, il convient de s'interroger sur le risque de rupture de la tête de filon. Cette rupture peut se développer par cisaillement le long des interfaces filon-épointes (on parle alors de rupture du pilier couronne) ou par cisaillement sub-vertical de l'éponte la plus sensible à une rupture en porte-à-faux.

La forme du cratère en surface dépend étroitement de la nature des terrains et des caractéristiques d'exploitation mais peut différer du fontis par un contour plus allongé, aligné sur l'orientation du filon. Si la largeur d'effondrement n'excède ainsi que très rarement une dizaine de mètres, l'extension longitudinale peut atteindre plusieurs dizaines de mètres dans le prolongement du filon (exemple des anciennes mines de fer de Segré (49)).

Débouillage d'un chantier penté remblayé

Ce mécanisme, susceptible d'affecter les couches fortement pentées (filons, couches en dressant), est assez similaire à celui d'un débouillage de puits. Lorsque l'exploitation s'est développée jusqu'en surface et a donné lieu à un remblayage des vides, la rupture d'un barrage d'arrêt souterrain peut induire un débouillage des produits de comblement vers des vides plus profonds. Cet écoulement induit un effondrement en surface dont la forme et les dimensions dépendent directement des conditions d'exploitation.

Combustion

Dans certaines configurations très spécifiques, la combustion de matières carbonées présentes au sein de travaux souterrains ou d'ouvrages de dépôt d'anciennes mines de combustibles solides, peut générer la formation de petites cavités proches de la surface susceptibles de s'effondrer. Dans un tel scénario, les conséquences potentielles sur les victimes sont aggravées du fait de la température des terrains incandescents ou des vapeurs émises (pouvant atteindre plusieurs centaines de degrés).

3.1.2 L'effondrement généralisé

Les effondrements généralisés, également appelés effondrements en masse, se manifestent par la rupture, souvent dynamique (quelques secondes), de tout ou partie d'une exploitation, affectant ainsi la stabilité des terrains de surface sur des étendues pouvant atteindre plusieurs hectares. La hauteur d'effondrement affectant la partie centrale peut atteindre plusieurs mètres et même plusieurs dizaines de mètres quand c'est une cavité de dissolution du sel qui s'effondre. Cette zone centrale est bordée par des fractures ouvertes, sub-verticales, délimitant des « marches d'escalier » dont les conséquences peuvent, elles aussi, s'avérer très dommageables pour les personnes et les biens situés en surface.

Ils traduisent une instabilité d'ensemble d'une partie de l'exploitation résultant généralement d'une extraction trop intensive. Ce sont des phénomènes heureusement très rares mais dont les conséquences sont potentiellement graves car ils génèrent une quantité considérable d'énergie. Ils peuvent ainsi s'accompagner de secousses sismiques, parfois détectables jusqu'à plusieurs centaines de kilomètres du secteur concerné. Notons également l'effet de souffle susceptible de projeter, sur de grandes distances, des matériaux par les galeries et les puits ouverts, mettant ainsi en péril les personnes et installations se trouvant à proximité (phénomène « d'air blast »).

Les effondrements généralisés peuvent affecter des exploitations profondes comparativement aux effondrements localisés. Leur développement exige également une extension horizontale des travaux suffisante au regard de leur profondeur.

Ce phénomène peut résulter de plusieurs mécanismes de rupture.

L'effondrement brutal de piliers abandonnés résultant d'une rupture du toit

Les effondrements brutaux exigent une combinaison de critères défavorables à la stabilité. Ils ne peuvent en effet se développer que dans le cas où une rupture simultanée des piliers et des terrains de recouvrement est envisageable. Pour ce faire, deux conditions sont généralement requises.

De tels phénomènes exigent l'existence d'une configuration d'exploitation que l'on peut caractériser de « fragile ». En ce sens, l'existence de taux de défrèvement élevés, de volumes de vides importants et la présence de configurations d'exploitation peu robustes (piliers sous-dimensionnés, présentant un fort élancement, exploitation multi-niveaux avec mauvaise superposition des piliers) sont autant de paramètres favorables au développement d'une rupture en masse.

De plus, puisque la rupture des piliers doit être associée à une rupture concomitante des terrains de recouvrement, ces phénomènes se développent préférentiellement sous des recouvrements présentant un (ou des) horizon(s) raide(s), capable(s) de reprendre tout ou partie du poids des terrains de surface en le reportant sur les bords fermes, ce qui soulage (temporairement) les piliers et autorise, indirectement, une exploitation excessive et un sous-dimensionnement des piliers.

Si ces bancs raides dans le toit atteignent leur limite élastique, ils peuvent, en cas de sollicitation différée, être amenés à se rompre brutalement. La rupture du (ou des) banc(s) raide(s) par flexion ou cisaillement le long des bords fermes induit une surcharge soudaine appliquée aux piliers qui se retrouvent brutalement soumis à l'intégralité du poids du recouvrement. Ces piliers très fragiles se rompent alors de manière simultanée et la descente du recouvrement s'effectue en un temps très court (quelques secondes), ce qui explique la brutalité du phénomène en surface.

Rupture en chaîne des piliers

La déstabilisation d'un grand nombre de piliers ne se traduit pas inéluctablement par un effondrement brutal induisant une secousse sismique majeure. L'instabilité peut résulter d'une rupture progressive « en chaîne » des piliers adjacents.

Ce type de manifestation, semble-t-il assez rare, exige que les piliers aient, dans leur grande majorité, atteint un « état-limite » de stabilité. La modification ou le développement d'un facteur déclenchant peut alors suffire à initier la rupture d'une partie des piliers. En se ruinant, ces derniers induisent un report de charge sur les piliers voisins qui, à leur tour, se rompent. Le recouvrement s'effondre alors en suivant le front d'éboulement souterrain. Le phénomène n'est pas aussi violent que celui décrit ci-dessus mais la cinétique de l'effondrement (quelques minutes à quelques heures) suffit à le rendre potentiellement dangereux pour les personnes et les biens situés dans son emprise lorsque l'amplitude des mouvements prévus en surface est importante.

L'effondrement de cavités salines de dissolution

Le problème résulte de la rupture différée du toit de cavités salines isolées, parfois oubliées, dont la taille a fini, avec le temps, par dépasser une valeur limite assurant la stabilité de l'ouvrage. L'évolution de la taille des cavités, même longtemps après la fin des travaux d'extraction de saumure, s'explique fréquemment par la mise en communication,

volontaire ou involontaire, de cavités voisines durant la phase d'exploitation, autorisant ainsi la circulation d'eaux non saturées demeurant agressives vis-à-vis du sel constituant l'encaissant des cavités.

Dans la majorité des cas, ces effondrements se développent sur quelques heures, voire quelques dizaines d'heures, la cinétique du mouvement étant conditionnée par l'évacuation de la saumure. Dans le cas, rare, où cette saumure est remplacée par de l'air, le mouvement peut alors prendre un caractère brutal.

On notera également, pour mémoire, que des désordres graves peuvent être causés par des forages non étanches traversant à la fois des horizons salifères et des nappes d'eau en charge sous ces formations. Les remontées d'eau peuvent en effet induire des dissolutions et créer des cavités de grande taille au sein des évaporites.

3.1.3 L'affaissement minier

L'affaissement se manifeste par un réajustement des terrains de surface induit par l'éboulement de cavités souterraines résultant de l'extraction ou de la disparition (dissolution, combustion) de minerai. Les désordres, dont le caractère est généralement lent, progressif et souple, prennent la forme d'une dépression topographique, sans rupture cassante importante, présentant une allure de cuvette.

Ce type de manifestation concerne aussi bien les exploitations en plateaux menées à grande profondeur (plusieurs centaines de mètres) et présentant des extensions horizontales importantes que les exploitations filoniennes ayant laissé des vides résiduels importants après extraction.

L'amplitude de l'affaissement est directement proportionnelle à l'ouverture des travaux souterrains. Le coefficient de proportionnalité dépend notamment de la profondeur des travaux et de la nature des méthodes d'exploitation et de traitement des vides (foudroyage, remblayage...). Dans la majorité des cas, les amplitudes maximales observées au centre de la cuvette, durant ou après l'exploitation, sont d'ordre décimétrique à métrique.

Généralement, ce ne sont pas tant les déplacements verticaux qui affectent principalement les bâtiments et infrastructures de surface, mais plutôt les déformations du sol (déplacements différentiels horizontaux, flexions, mise en pente...). En fonction de leur position au sein de la cuvette d'affaissement, les déplacements différentiels horizontaux peuvent prendre la forme de raccourcissements (zones en compression vers l'intérieur de la cuvette) ou d'extension (zones en traction vers l'extérieur de la cuvette).

Les déformations et les pentes sont proportionnelles à l'affaissement maximum au centre de la cuvette et inversement proportionnelles à la profondeur de l'exploitation. Ainsi pour une même épaisseur exploitée, les effets seront d'autant plus faibles que l'exploitation est profonde.

Comme la plupart des autres phénomènes d'instabilité, les affaissements miniers ne se limitent pas au strict aplomb des contours de travaux souterrains. On appelle « angle d'influence », l'angle défini entre la verticale et la droite joignant la bordure souterraine de l'exploitation et la limite extérieure de la cuvette d'affaissement en surface. En fonction de la nature et de l'épaisseur des terrains constituant le recouvrement, l'angle d'influence varie classiquement entre une dizaine et une quarantaine de degrés en plateau. L'existence d'un pendage influe également directement sur les valeurs de l'angle d'influence, tout comme la présence d'accidents géologiques majeurs (failles).

Ce phénomène peut résulter de plusieurs mécanismes de rupture.

Cas des exploitations totales menées dans des terrains stratifiés

Toute exploitation par tailles ou par défilage, quelle qu'en soit la profondeur, induit forcément un éboulement ou foudroyage des premiers bancs du toit des travaux souterrains. Cet éboulement génère la formation de blocs de formes et de tailles variables qui, en s'enchevêtrant, permet la persistance de vides résiduels et, de fait, une augmentation, souvent sensible, entre le volume occupé par les éboulis et celui qu'occupaient les terrains en place.

Ce phénomène, appelé « foisonnement » permet aux matériaux éboulés de remplir la cavité d'exploitation ainsi que le volume des terrains initialement en place ce qui a pour conséquence de stopper le phénomène d'éboulement, les terrains sus-jacents trouvant appui sur le tas d'éboulis. Ces éboulis présentant une forte compressibilité, les bancs rocheux sus-jacents préalablement découpés par les discontinuités naturelles qui les affectent fléchissent progressivement avec, pour conséquence, la formation d'une cuvette en surface.

L'amplitude des affaissements étant directement proportionnelle à l'ouverture des travaux, il n'est pas rare que, durant la période d'exploitation, les terrains de surface soient descendus de plusieurs mètres, voire, plus exceptionnellement, de plus d'une dizaine de mètres.

Le retour d'expérience disponible sur différents bassins miniers français et européens indique que la quasi-totalité de l'affaissement se produit durant l'extraction et que la durée de l'affaissement résiduel se limite à quelques années. Au-delà, les risques de reprise d'affaissement (ou de remontée de la surface du sol) résultent de variations importantes des conditions environnementales (ennoyage ou dénoyage des travaux, application de surcharges en surface) et affectent principalement les exploitations les moins profondes. Ils correspondent, de fait, pleinement au phénomène de tassement décrit plus haut.

Cas des exploitations partielles en terrains stratifiés

Dans le cas d'exploitations partielles, l'éboulement des travaux souterrains résulte de la rupture progressive des éléments assurant la stabilité de l'ouvrage minier (piliers, intercalaires entre couches, toit, mur). Le phénomène peut donc être initié plusieurs années ou décennies après la fermeture des travaux, suite à l'évolution de la résistance des roches. Lorsque l'éboulement des travaux miniers est réalisé sur une surface suffisante, les mécanismes de foisonnement et de flexion des bancs sus-jacents sont similaires au cas des exploitations totales par taille ou défilage.

L'intensité de l'affaissement reste proportionnelle à l'ouverture des travaux souterrains. Il n'est donc pas rare que les mouvements verticaux observés puissent dépasser, une amplitude d'ordre métrique. L'ampleur des mouvements est également proportionnelle au taux de défrètement. En effet, plus les piliers sont volumineux, plus ils occupent de l'espace en souterrain et limitent ainsi l'amplitude du mouvement.

On peut décomposer l'affaissement à l'aplomb d'exploitations partielles en trois phases distinctes.

La première phase, dite « de mise en place », peut s'avérer très longue (plusieurs années à plusieurs centaines d'années). Elle se traduit par un affaiblissement progressif des piliers sous l'effet cumulé du temps, de la pression des terrains de couverture et des paramètres environnementaux régnant au sein de l'édifice minier (eau, température...).

La seconde phase, dite « d'affaissement », intervient lorsque le phénomène de rupture des piliers s'initie au sein de l'ouvrage minier, sous l'effet possible d'un facteur déclenchant (modification de l'état de contrainte ou des paramètres environnementaux par exemple). Elle se développe classiquement sur une période variant de quelques jours à plusieurs mois, durant laquelle la plus grande partie de l'affaissement se donne en surface. C'est donc la phase la plus critique durant laquelle un suivi attentif de l'évolution des structures présentes en surface peut s'avérer nécessaire.

La phase ultime, dite « résiduelle », correspond à l'affaissement résiduel. Si cette phase peut se prolonger sur des périodes assez longues (plusieurs années), les mouvements résiduels sont généralement très limités et, la plupart du temps, non décelables en surface.

Cas des exploitations filoniennes

L'exploitation de gisements filoniens peut donner naissance à des phénomènes d'affaissement en surface. Quand la profondeur d'exploitation est importante, du fait du faible volume des vides résiduels (filons souvent de faible puissance), la répercussion des désordres en surface se traduit généralement par une large extension de la cuvette d'affaissement et par des amplitudes d'affaissement vertical et de déplacements différentiels horizontaux faibles.

Les gisements filoniens ayant donné naissance à plusieurs types de méthodes d'exploitation, plusieurs mécanismes peuvent être à l'origine du développement de cuvettes d'affaissement en surface.

Dans le cas de chambres montantes remblayées, les vides résiduels et/ou la compressibilité des remblais mis en place peuvent être à l'origine d'une convergence des épontes. Cette convergence se traduit par la formation d'une voûte de décompression au toit de l'exploitation, avec développement de fissures au sein du massif rocheux. Si les stots séparant des chantiers adjacents viennent à se rompre et que l'exploitation est suffisamment étendue, cette voûte de décompression peut atteindre la surface et générer des affaissements. On notera également le risque d'écoulement de remblais fins (débouillage) et la génération de vides à forte profondeur susceptibles de se refermer et d'induire une cuvette en surface. Le mécanisme est relativement semblable pour les méthodes d'exploitation descendantes sous dalles. En cas de rupture progressive des dalles, la convergence du toit peut générer des reprints de vides en surface.

Les exploitations menées par « piliers abandonnés » ou par « sous-niveaux abattus », peuvent, comme dans le cas des exploitations partielles menées en terrains stratifiés, générer des ruptures au toit de chambres laissées vides ou des ruptures de piliers. Lorsque la profondeur d'exploitation est importante, la répercussion des désordres en surface se traduit généralement, là encore, par l'apparition d'une cuvette d'affaissement.

Cas des exploitations salines par dissolution

Les cuvettes d'affaissement se développant à l'aplomb d'exploitations de sel peuvent résulter de différents mécanismes en fonction des contextes géologiques et d'exploitation des anciens travaux.

Durant la phase d'exploitation, l'extraction d'importantes quantités de saumure prélevées au sein des nappes salées localement présentes au toit des horizons salifères a engendré des dissolutions préférentielles en attirant l'eau douce superficielle vers le sel pour remplacer la saumure extraite. Lorsque l'extension de la nappe salée était limitée et que les prélèvements étaient importants, les affaissements résultants peuvent avoir présenté de fortes amplitudes (plusieurs mètres en une cinquantaine d'années dans certaines zones du bassin de Dombasle par exemple) et avoir induit des déformations en surface dommageables pour les biens.

Pour ce qui concerne la phase post-exploitation, les modifications hydrogéologiques induites par les exploitations de sel (par mines ou par cavités de dissolution) peuvent induire, de manière pérenne ou durant des périodes prolongées, des circulations d'eaux non saturées à la surface des couches de sel. Lorsque ces modifications sont de faible ampleur et affectent de très larges secteurs, les répercussions en surface sont très limitées. Dans certaines configurations spécifiques toutefois (présence de surépaisseurs significatives de sel, variation de pendage des couches), les dissolutions peuvent enlever une épaisseur de sel suffisamment importante et donner naissance à des cuvettes peu étendues et sensiblement plus marquées.

Les cavités créées par dissolution au sein du sel par les exploitants tendent, pour leur part, à se refermer du fait des caractéristiques rhéologiques particulières du sel. Pour les cavités peu profondes (jusqu'à quelques centaines de mètres), le phénomène est négligeable. Ce n'est plus le cas pour les cavités profondes (plus de 1000 m) qui se referment assez rapidement. Il en résulte un affaissement en surface d'amplitude souvent réduite car la fermeture « attire » du sel pouvant venir de très loin. L'affaissement se développe donc sur une surface nettement plus importante que l'aire d'influence définie en périphérie des exploitations d'autres matériaux.

Enfin, l'intrusion lente et progressive d'eau au sein d'anciens secteurs de mines d'évaporites exploités par des méthodes totales peut entraîner des dissolutions, elles aussi lentes et progressives, également susceptibles d'induire en surface des affaissements.

Cas des ouvrages en combustion

L'échauffement accidentel ou l'auto-échauffement de la matière organique persistant au sein d'anciens travaux souterrains ou d'ouvrages de dépôt peut initier la combustion du minerai dans le cas des mines de combustibles solides (charbon, lignite, schistes bitumineux...).

Cette combustion induit la « disparition » de matériau et, de fait, l'apparition possible d'affaissements en surface. La lenteur du mécanisme et les volumes généralement limités de vide créés expliquent que les manifestations en surface se traduisant, à quelques exceptions près, par la création de cuvettes d'affaissements peu importantes, tant en terme d'amplitude des mouvements verticaux qu'en terme de superficie des cuvettes.

Ces affaissements limités peuvent s'observer aussi bien en surface des verses ou terrils en combustion qu'à l'aplomb d'anciens travaux souterrains soumis au phénomène de combustion spontanée. En sus des mouvements de terrain au sens strict, d'autres types de risques ou nuisances, bien plus critiques, peuvent affecter les personnes et biens environnants (incendies, accumulation de gaz toxiques), ou être à l'origine de sur-accidents (proximité de conduites de gaz, présence d'anciennes munitions enfouies au sein du dépôt ...).

3.1.4 Le tassement

Dans le cadre de l'après-mine, on parle de tassements lorsque les mouvements du sol ne résultent pas de l'extraction, de la combustion ou de la dissolution du minerai mais s'expliquent par la recompaction d'un massif meuble (amas de matériaux granulaires) ou affecté par les travaux souterrains (terrains foudroyés).

Sous l'action de perturbations extérieures (applications de surcharge en surface, mouvements de nappes au sein des terrains concernés, sollicitations vibratoires...) ou sous l'effet de leur propre poids, les terrains qui présentent une forte porosité peuvent être amenés à se tasser et donner naissance à des mouvements de faible ampleur en surface (sauf exception, l'amplitude maximale est d'ordre décimétrique).

Ce type de manifestation peut avoir des conséquences assez similaires avec le phénomène naturel de retrait-gonflement des sols argileux, sous l'effet de battements de nappe ou de variations du profil hydrique dans le proche sous-sol.

Les conséquences redoutées résultent principalement du fait que la surface peut être affectée par des tassements différentiels qui sont susceptibles d'engendrer des effets sur les bâtiments et les infrastructures.

Ce phénomène peut résulter de plusieurs mécanismes de rupture.

Anciennes exploitations menées par foudroyage du toit ou anciennes zones effondrées

Même si la majorité des terrains exploités à l'aide d'une méthode induisant le foudroyage du toit (exploitation par taille ou par piliers dépilés) sont sujets, durant la phase de mouvements résiduels, au développement de tassements, les manifestations les plus perceptibles se développent à l'aplomb des secteurs peu profonds (quelques dizaines de mètres sous la surface).

Dans ces conditions, en effet, le poids des terrains surmontant les anciens chantiers miniers n'est pas suffisant pour garantir une recompaction complète des terrains foudroyés au cours des années suivant les travaux d'extraction. Ceci permet la persistance d'une porosité artificielle élevée proche de la surface.

Tassements sur ouvrages de dépôt, découvertes exploitées par auto-remblayage ou anciens ouvrages remblayés

Les stériles d'exploitation, mis en dépôt par voie sèche sous forme de verses ou utilisés à des fins de remblayage d'anciennes découvertes, peuvent présenter une composition assez hétérogène, tant en terme de nature des matériaux qu'en terme de granulométrie. Leur mise en place, souvent assurée par simple déversement, ne garantit pas une compaction complète des déblais. Il en va de même pour les puits ou galeries d'accès remblayés. Les matériaux déversés dans ces ouvrages peuvent subir une compaction parfois importante, susceptible d'engendrer la formation d'une dépression en surface.

Compaction secondaire de terrains meubles

Bien que très exceptionnel, un mécanisme assez similaire peut être observé, lorsque la modification du régime hydrogéologique résultant de l'arrêt des travaux miniers induit des battements de la nappe au sein de terrains sensibles à un phénomène de compaction secondaire (tourbes par exemple). En présence de charges suffisantes en surface (bâti ou infrastructures), le phénomène de compaction secondaire peut induire des tassements sensibles, et ce même si les terrains concernés ne sont pas directement affectés par les anciens travaux miniers.

Soulèvement des terrains

Lors de l'exploitation des mines profondes, les terrains encaissants ont été désaturés par les pompages d'exhaure mis en œuvre durant l'exploitation. La resaturation des terrains pendant l'ennoyage peut, dans certaines configurations, se traduire par une remontée lente et très étalée de toute la zone précédemment dénoyée. L'amplitude des mouvements verticaux observés peut atteindre quelques décimètres.

Même si ce phénomène se manifeste par une remontée et non un abaissement des terrains de surface, le mécanisme initiateur est sensiblement le même que celui à l'origine des tassements. Il s'agit en effet d'une remobilisation, postérieure à l'exploitation, de terrains affectés par les anciens travaux miniers.

Au regard des retours d'expérience disponibles, les mouvements de ce type sont très étalés dans l'espace (faible courbure) et ne provoquent pas d'effets visibles sur les bâtiments traditionnels.

3.1.5 Le glissement ou mouvement de pente

Les mouvements de pente, qu'ils soient superficiels ou profonds (glissements, ravinements), constituent le type de désordres le plus couramment observé le long des flancs des ouvrages de dépôts ou des versants de découvertes creusées en roche meuble.

Mouvements superficiels

Il s'agit de phénomènes généralement lents et mettant en jeu des volumes de matériau restreints (quelques dizaines de m³). Ils prennent principalement la forme de glissements pelliculaires ou de rigoles de ravinement, parfois profondes, avec pour conséquence

l'épandage de matériau en pied. Si les éboulis ne sont pas remaniés, la configuration redevient stable et l'instabilité cesse.

Si ce type de phénomènes induit fréquemment des nuisances paysagères, il est relativement rare que des risques pour les personnes et les biens en résultent directement, tant en pied qu'en crête de talus. Les éléments éboulés peuvent toutefois contribuer à affecter l'écoulement de cours d'eau situés en aval immédiat du pied. D'autre part, lorsque les crevasses de ravinement atteignent des profondeurs importantes (jusqu'à plusieurs mètres) et présentent des parois sub-verticales, des risques de chutes de personnes dans ces « canyons » ainsi que des risques de chutes de pierres ou d'ensevelissement sous des éboulements de parois doivent être pris en compte.

Le développement d'instabilités superficielles peut favoriser le déclenchement d'une rupture de plus grande ampleur et devra donc, systématiquement, être pris en considération. Une attention toute particulière doit ainsi être accordée au développement de ce type de désordres le long des flancs de digues de rétention. En effet, un affaiblissement, même limité, des ouvrages de rétention des résidus liquides ne doit, en aucun cas, être négligé.

Mouvements profonds

Les glissements profonds résultent du mouvement d'une masse de terrain le long d'une zone de rupture définie par une surface continue (dont la forme peut être circulaire, plane ou quelconque) et dont la vitesse de déplacement, en phase critique, varie fréquemment de quelques millimètres à quelques mètres par heure. Ce type de phénomène est susceptible d'affecter aussi bien les ouvrages de dépôts que les flancs de découvertes creusées en massif de roche tendre.

Les volumes concernés, qui peuvent s'avérer importants, se répandent vers l'aval sous forme de cônes d'épandage et peuvent être à l'origine de la dégradation des éventuels bâtis et ouvrages situés en pied. Il peut également s'avérer nécessaire de s'attacher à caractériser les effets que ces mouvements de masse peuvent produire sur les terrains situés à l'amont du talus (effet de recul de crête).

Lorsque les discontinuités affectant le massif rocheux ou l'ouvrage de dépôt ne jouent pas un rôle prépondérant sur son comportement, l'instabilité prend généralement la forme d'un glissement circulaire ou « en loupe ». A l'inverse, lorsque l'instabilité prend naissance à la faveur d'une couche ou d'une hétérogénéité présentant des caractéristiques géomécaniques médiocres, il s'agit plutôt d'un glissement plan.

Toute rupture, même initialement lente et progressive, affectant une digue de bassin de rétention est susceptible de se transformer en coulée si les matériaux stockés en amont finissent par submerger l'ouvrage rompu et se déverser dans l'environnement.

Ce phénomène peut résulter de plusieurs mécanismes de rupture.

La rupture d'un flanc de talus intervient lorsque les forces motrices (de pesanteur et hydrauliques) qui tendent à le mettre en mouvement deviennent supérieures aux forces résistantes (résistance au cisaillement des matériaux) qui s'opposent pour leur part aux déformations et aux glissements des pentes. C'est généralement le développement de perturbations affectant les conditions environnementales caractérisant le talus qui constitue l'élément déclencheur de la rupture.

Mauvaise gestion des eaux

Le développement de mouvements de pente résulte fréquemment d'une mauvaise gestion des eaux souterraines ou de surface. Lorsque aucun système de drainage et d'écoulement maîtrisé des eaux n'a été mis en œuvre (ou lorsqu'il n'est pas ou plus

efficient), le ruissellement des eaux le long des flancs peut favoriser l'entraînement des particules, notamment dans des régions sujettes à des précipitations violentes (orages méditerranéens par exemple).

La rupture peut également survenir en cas de modification des conditions hydrauliques régnant dans un ouvrage de dépôt et, notamment, à sa base. Si, dans la plupart des configurations, le dépôt est constitué de matériaux perméables et convenablement drainés, certaines modifications du régime d'écoulement des eaux (obturation ou rupture d'un drain, création d'un bassin de décantation) peuvent initier la présence d'eaux stagnantes à l'interface dépôt-terrain d'assise ou la formation de zones marécageuses en pied de dépôt. Lorsque les caractéristiques des matériaux constituant la base du talus s'avèrent sensibles à l'eau, ces modifications hydrauliques peuvent être à l'origine de ruptures de grande ampleur.

Topographie des flancs mal adaptée

Le développement de mouvements superficiels s'observe préférentiellement le long de flancs peu végétalisés, contenant une proportion importante de particules fines (d'où une grande sensibilité des digues). L'existence de grandes surfaces planes faiblement inclinées vers le talus aval ou, à l'inverse, de talus aval trop raides favorisent également le développement de glissements pelliculaires ou d'érosion régressive des flancs.

Affaiblissement du pied de talus

Les ruptures profondes peuvent se développer en cas d'**affaiblissement du pied du talus** (ou butée de pied). Ceci peut résulter de l'entraînement de quantités importantes de produits en cas de crues sévères affectant un cours d'eau longeant la base du talus. Le prélèvement de matériau à la base du talus, dans un but d'exploitation de substances valorisables ou d'aménagement des terrains en pied, peut également contribuer à sa déstabilisation. Enfin, on notera le cas spécifique où le pied de talus est affecté par la présence d'anciens travaux miniers souterrains. Si ces travaux viennent à se rompre ou s'affaisser, la remobilisation du pied peut être à l'origine d'une déstabilisation du talus.

Rupture des terrains d'assise

Dans le même ordre d'idée, d'éventuelles modifications hydrauliques peuvent être à l'origine d'instabilités de talus induites par **rupture ou fluage des terrains d'assise** lorsque ceux-ci s'avèrent sensibles à l'eau (limons argileux par exemple). L'affaiblissement des caractéristiques mécaniques des terrains d'assise peut aboutir à une lente déformation du dépôt ou du flanc de fosse, sous son propre poids, généralement dans le sens de la pente du terrain naturel. Il se forme alors, de manière caractéristique, un bourrelet au pied des terrains d'assise et une inclinaison des arbres en avant du talus.

Autres mécanismes

On citera enfin comme autres mécanismes aggravants, voire déclencheurs, les **sollicitations dynamiques** (séismes, vibrations...), la mise en œuvre de certains aménagements (enlèvement de la végétation, réaménagements non maîtrisés), le développement de certaines **activités humaines** (VTT, moto-cross, surcharge en bord de crête...) ou **animales** (animaux fouisseurs) susceptibles de contribuer à la déstabilisation des flancs de talus.

A l'inverse, certains matériaux de terril entrés en combustion acquièrent, sous l'effet de transformations physico-chimiques, une cohésion supérieure à leur cohésion initiale ce qui constitue un facteur favorable à la stabilité en grand de l'ouvrage.

3.2 EVALUATION DE L'ALEA « MOUVEMENTS DE TERRAIN »

3.2.1 Intensité

L'intensité du phénomène redouté correspond à ses conséquences physiques en surface, par exemple en termes volumétriques (surface concernée, amplitude...) ou en termes de dommages pouvant être occasionnés. On admet alors généralement plusieurs niveaux ou classes d'intensité, classiquement au nombre de trois (faible, moyen, fort), mais pouvant être élargis, au cas par cas, de très faible à très fort.

3.2.2 Probabilité d'occurrence ou prédisposition

Pour les mouvements de terrain, la détermination de la probabilité d'occurrence des désordres ou d'évènements indésirables pose le difficile problème de leur prévision dans le temps. A la différence d'une inondation ou d'un séisme qui sont des phénomènes cycliques, les phénomènes issus des mouvements de terrain ne se manifestent qu'une seule fois en un lieu donné. Par conséquent, on ne dispose pas de données historiques permettant d'estimer une fréquence (ou une probabilité d'occurrence) de ces phénomènes.

Plutôt que d'estimer une probabilité d'occurrence correspondant à une période donnée (annuelle, décennale, centennale...), ce qui laisserait une grande place à la subjectivité et à l'incertitude, l'approche de ce concept est menée en termes de prédisposition du site vis-à-vis d'un type donné de rupture.

Cette prédisposition est évaluée en fonction de paramètres caractérisant l'environnement du secteur considéré (topographie, épaisseur de recouvrement, présence de failles...) et la technique d'exploitation utilisée (galeries, chambres et piliers...), autant de facteurs exprimant la « prédisposition » d'un site.

Pour chaque secteur exploité, les différents phénomènes susceptibles d'affecter la stabilité des terrains de surface se voient donc attribuer une probabilité d'occurrence spécifique (par exemple, les probabilités que se produise, en un point donné de la surface, un effondrement généralisé ou un affaissement progressif ne sont pas identiques).

On rappellera que, dans une démarche de prévention des risques et d'aménagement du territoire telle que retenue dans le cadre de l'élaboration d'un PPRM, il convient d'évaluer la prédisposition d'un site à l'apparition d'instabilité en surface **dans le long terme**. Il est ainsi nécessaire de tenir compte du vieillissement inéluctable du matériau rocheux et donc de la dégradation de ses caractéristiques mécaniques dans le temps.

Quatre classes de prédisposition à l'apparition de désordres en surface sont définies : négligeable, faible, moyenne et forte.

Si la notion de prédisposition à l'apparition de désordres peut suffire dans le cas d'ouvrages connus, en présence de très anciennes exploitations dont on ne connaît pas avec certitude l'existence et/ou la localisation, il est d'usage de pondérer ce paramètre par la probabilité de présence de vides.

3.2.3 Niveaux d'aléa

Pour les mouvements de terrain, le niveau d'aléa est ensuite obtenu par combinaison des classes d'intensité et de prédisposition/probabilité d'occurrence. Il en résulte des classes différentes d'aléas de très faible à très fort.

Cette approche est appliquée séparément à chacun des différents secteurs géographiques à étudier en fonction de leur configuration, déterminée par le mode d'exploitation, l'épaisseur, la nature des terrains de recouvrement, etc. L'étude est menée en se plaçant dans une perspective de comportement à long terme.

Le croisement de l'intensité des phénomènes et de leurs mécanismes associés avec leur classe de probabilité d'occurrence permet d'obtenir différents niveaux d'aléa.

Cette qualification de l'aléa n'en demeure pas moins **relative**. Les types de désordres prévisibles dans les différentes zones constituant une exploitation donnée pourraient, en effet, induire un niveau d'aléa moindre sur d'autres sites où les exploitations souterraines présentent des configurations plus défavorables.

4. ALEA « POLLUTION DES EAUX ET DES SOLS »

4.1 DESCRIPTION DES MECANISMES ET PHENOMENES

Des impacts environnementaux potentiels peuvent être liés, d'une part, à l'existence d'un dépôt de déchets miniers sur le site et, d'autre part, aux modifications des réseaux hydrogéologiques et hydrographiques engendrées par l'exploitation minière (et/ou son arrêt).

Les exploitations minières produisent en effet, outre la substance exploitable, des volumes importants de déchets. Ces résidus miniers résultent soit de la recherche et de l'exploitation minière, soit du traitement du minerai. Ils sont généralement disposés en surface sous la forme de terrils (ou verses) ou utilisés en remblayage de découverte. Leur maintien en place peut générer des nuisances, diverses parmi lesquelles des feux, des explosions, des problèmes d'instabilité mécanique, de l'envol de poussières, du relarguage de composés toxiques, etc. Les deux derniers phénomènes cités peuvent avoir des conséquences sur un plan environnemental, et par là, sur un plan sanitaire.

Les impacts sur les réseaux hydrogéologiques et hydrographiques peuvent être d'ordre quantitatif (modification des écoulements, remontée de la nappe, apparitions de résurgences...) et d'ordre qualitatif (modification de la qualité des eaux souterraines et de surface...), et donc sur l'environnement et la santé humaine. En effet, lors de l'arrêt des travaux miniers, l'exhaure étant généralement stoppée, de l'eau peut s'accumuler dans les ouvrages souterrains. La remontée des eaux dans les vides miniers peut alors provoquer l'émergence d'eaux potentiellement polluées en surface, dans les réseaux hydrographiques voisins. Des variations des conditions hydrogéologiques peuvent également inonder ponctuellement des zones de travaux habituellement exemptes d'eau, par exemple à la suite de fortes pluies. Le contact des eaux souterraines avec les parois des galeries auparavant hors d'eau peut alors modifier la qualité des eaux. En effet, les sulfures qui peuvent être contenus dans la roche sont, au contact de l'air, oxydés en sulfates, et, lors de la montée des eaux, peuvent être lessivés. L'augmentation des teneurs en métaux lourds, sulfates, et acidité peuvent alors provoquer un impact sur l'environnement lors de la sortie de ces eaux dans le milieu naturel.

Ces sources de pollutions temporaires ou permanentes peuvent présenter des risques chroniques d'exposition parmi lesquels des risques sanitaires (liés à la consommation d'eau, l'irrigation, l'abreuvement, la baignade en rivière, etc.) et des risques pour les écosystèmes.

4.2 EVALUATION DE L'ALEA « POLLUTION DES EAUX ET DES SOLS »

4.2.1 Intensité

La notion d'intensité caractérisant le phénomène de pollution des eaux souterraines est étroitement liée à la concentration d'un ou de plusieurs composants (Pb, Cu, As, etc.) ayant un impact sur le milieu et sur l'homme.

Par ailleurs, la concentration en éléments polluants conditionne l'usage que l'on peut pratiquer des eaux ce qui permet de rattacher l'intensité d'un phénomène de pollution à des usages et à leur altération.

Dans la pratique, l'évaluation de la qualité de l'eau est menée par les différents acteurs du domaine à l'aide d'outils spécifiques appelés SEQ : Systèmes d'Évaluation de la Qualité des eaux¹. Il existe un SEQ pour les cours d'eau et un SEQ pour les eaux souterraines.

Dans ces méthodes d'évaluation, plusieurs types d'usages sont définis :

- pour les cours d'eau : production d'eau potable (AEP et industries alimentaires), loisirs et sports aquatiques, irrigation, abreuvement, aquaculture auxquels est ajoutée une « potentialité biologique » pour exprimer l'aptitude de l'eau à soutenir les équilibres biologiques ;
- Pour les eaux souterraines : production d'eau potable, industrie, énergie, abreuvement des animaux, irrigation auxquels vient s'ajouter l'« état patrimonial » destiné à fournir une indication sur le degré de pollution des nappes souterraines.

La qualité de l'eau peut donc être directement évaluée par son aptitude à être utilisée pour différents usages potentiels en fonction d'une série d'altérations mesurées par des concentrations en éléments polluants. Les éléments retenus pour caractériser les altérations sont ceux qui sont strictement liés au domaine minier car il s'agit d'apprécier l'impact des phénomènes d'origine minière sur les eaux et non les conséquences d'autres pratiques dérivées par exemple de l'agriculture ou de l'industrie.

La définition de l'aléa est ensuite difficile à appréhender, du fait que les impacts environnementaux liés à l'exploitation minière se situent dans le domaine du chronique. La probabilité d'occurrence, ou plutôt la sensibilité du site à voir se produire un phénomène donné, sera égale à 1. De ce fait, l'aléa « Environnement » sera surtout défini par l'intensité d'un phénomène, ici la concentration anormalement élevée de substances chimiques particulières dans l'environnement, et l'impact qu'elle peut occasionner selon les usages de l'eau.

4.2.2 Probabilité d'occurrence ou prédisposition

Lorsqu'une contamination est mesurée, avec à l'appui des analyses le confirmant, la prédisposition est avérée, il s'agit d'un constat. Dans ce cas, la prédisposition étant certaine, l'aléa dépendra directement de l'intensité observée du phénomène.

¹ <http://www.rnde.tm.fr> – Réseau national des données sur l'eau

Dans le cas de phénomènes chroniques il n'y a pas nécessairement de stabilisation des processus d'évolution physico-chimique.

Les prédispositions les plus caractéristiques se présentent lorsqu'il y a :

- contact direct et lessivage des terrains au sein des anciens travaux (voir drainage minier acide), ruissellement sur des ouvrages à ciel ouvert avec des déversements dans les eaux de surface et dans les eaux souterraines ;
- contact direct et lessivage des résidus miniers ou de tout autre produit stockés en souterrain, ce qui peut être le cas lorsque les travaux ont été remblayés avec des résidus miniers au sens large, ou à la suite de ces contacts directs déversement dans des exutoires de surface ;
- déversement direct de produits contaminants dans les travaux souterrains ennoyés ou dans les eaux de surface ;
- entraînement des produits contaminants stockés en surface et déversés dans les eaux de surface ;
- infiltrations d'eaux de drainage acide provenant d'une exploitation à ciel ouvert vers les travaux miniers sous-jacents ;
- de façon moins courante, alimentation des nappes souterraines par les eaux de surface elles-mêmes contaminées ;
- alimentation des cours d'eau par les émergences minières elles-mêmes contaminées;
- contact et entraînement par les eaux de surface des sols et des poussières transportées par voies aériennes.

Enfin des phénomènes accidentels peuvent notamment :

- lorsque des résidus stockés en surface, des produits dangereux confinés ou non mais rendus inactifs peuvent se déverser accidentellement dans les travaux souterrains et en conséquence dans les secteurs ennoyés ;
- en cas de rupture par érosion de la couverture ouvragée protégeant un stockage ;
- en cas de pollution des eaux consécutive à l'effondrement (crue, séisme, coulées boueuses) d'une digue ou d'un stockage ;
- lors de l'apparition d'une nouvelle émergence ou en cas de contamination d'une émergence existante non polluée à la suite de la modification du trajet des eaux souterraines.

5. ALEA « INNONDATIONS »

5.1 LES PHENOMENES REDOUTES

5.1.1 Modification du régime des émergences

Les modifications des propriétés du sous-sol par l'exploitation minière entraînent, après la fin de celle-ci, l'établissement d'un schéma de circulation de l'eau souterraine qui diffère de celui qui prévalait pendant l'exploitation, mais aussi de celui qui existait avant la mise en exploitation.

Les exutoires des nappes d'eau souterraine, qu'ils soient naturels (sources, résurgences) ou artificiels (puits ou galeries débouchant au jour), connaissent, du fait de cette modification, des changements qui peuvent être de diverses natures :

- simple modification des caractéristiques de l'écoulement à l'exutoire (augmentation ou diminution du débit moyen, modification de la distribution du débit dans le temps ...);
- réapparition d'émergences qui existaient avant l'exploitation et que celle-ci avait asséchées. Les caractéristiques de l'écoulement de ces exutoires rétablis diffèrent en général des caractéristiques anciennes, en particulier si des travaux ont modifié les conditions d'émergence (remblayage, obturation...). Il n'est pas rare que l'eau ne réapparaisse pas à l'emplacement exact de l'ancienne source. On notera par ailleurs que, dans les parties les plus à l'amont des bassins versants hydrogéologiques en particulier, certaines émergences qui existaient avant l'exploitation minière peuvent ne pas réapparaître après la cessation de celle-ci;
- apparition de nouvelles émergences. Ceci se produit en particulier dans les parties les plus à l'aval d'un bassin versant hydrogéologique. Une nouvelle émergence peut soit résulter d'un ancien ouvrage minier débouchant au jour et aménagé pour servir de point de débordement au réservoir minier, soit prendre la forme d'une source ou d'une résurgence « naturelle » apparaissant en un point bas de la topographie.

Dans tous les cas, les phénomènes observés s'expliquent par la remontée du niveau piézométrique des nappes d'eau souterraine causée par l'arrêt des pompages d'exhaure. Cette remontée a pour résultat de remettre en eau un milieu que l'exploitation avait asséché.

Ce milieu ayant été modifié, les nouvelles circulations diffèrent souvent des anciennes. Elles empruntent les cheminements anciens, mais également certains cheminements nouveaux, créés par l'exploitation (vides miniers et terrains fracturés voire foudroyés, dont la perméabilité est très élevée). Il s'établit alors, dans le sous-sol, une distribution de la piézométrie différente de celle qui existait avant le début de l'exploitation minière.

Dans le cas le plus simple, qui est aussi le plus courant, on peut dire que la création de vides miniers, en accroissant la perméabilité « en grand » du milieu souterrain, a contribué à réduire les pertes de charge des écoulements. Cela induit, par rapport à l'état antérieur à l'exploitation, une baisse du niveau de l'eau souterraine à l'amont du bassin versant et une remontée à l'aval. Cette situation favorise, en aval, l'apparition d'émergences ou l'augmentation du débit des sources existantes, au détriment de celles initialement présentes à l'amont. Le débit global qui, pour sa part, dépend pour l'essentiel de facteurs extérieurs au milieu souterrain (les précipitations), ne varie pas en moyenne.

Dans certains cas, en particulier quand l'exploitation minière a entraîné des modifications de grande ampleur des conditions de l'écoulement de l'eau souterraine, comme la mise en communication d'ensembles hydrogéologiques auparavant séparés les uns des autres, l'établissement du nouveau schéma de circulation de l'eau souterraine s'avère particulièrement complexe. Dans ce cas, l'apparition de nouvelles sources ou la modification du régime des sources existantes peuvent intervenir en des lieux inattendus et très éloignés de l'exploitation minière.

On notera que le nouveau schéma d'écoulement qui s'établit dans une ancienne zone minière ne présente pas nécessairement la pérennité d'un schéma d'écoulement purement naturel. La géométrie du milieu peut en effet se modifier au cours du temps (effondrement de vides miniers). Sous l'effet de l'augmentation de la pression de l'eau, le débouillage de discontinuités préexistantes, telles que des karsts ou des failles, peut également perturber les écoulements de manière soudaine et non prévisible. De nombreux phénomènes physico-chimiques (entre autres des phénomènes de dissolution-précipitation), dans un milieu a priori réactif comme le sont la plupart des gisements minéraux, peuvent aussi intervenir, modifiant la perméabilité du sous-sol. Les situations les plus critiques se rencontrent certainement dans les zones d'exploitation de substances solubles (sel et potasse), dans lesquelles il est très difficile de garantir que le régime d'écoulement qu'on observe à un moment donné constitue un régime stable.

5.1.2 Apparition de zones détremées ou de marécages

Lorsque l'eau qui remonte jusqu'à la surface du sol ne peut pas s'évacuer de manière satisfaisante, soit parce que les capacités de drainage de surface sont insuffisantes, soit parce que la zone d'émergence constitue une dépression fermée, on peut voir apparaître en surface, de manière permanente ou à certaines périodes de l'année, des zones détremées voire même de véritables marécages.

En zone urbaine, les conséquences sont généralement inacceptables et des dispositions sont prises pour s'opposer à de telles nuisances. En zone rurale, des mesures compensatoires sont rarement prises et l'apparition de zones humides peut aller jusqu'à interdire toute utilisation du sol, y compris à des fins agricoles.

Les mécanismes à l'origine de ce type de désordre sont sensiblement similaires à ceux qui sont à l'origine des apparitions de résurgences (remontée du niveau piézométrique lié à l'arrêt des pompes d'exhaure, modifications des schémas de circulation des eaux souterraines).

On rappellera que le nouveau schéma de circulation se caractérise fréquemment par un niveau piézométrique plus élevé dans les zones aval. Ce sont donc les zones basses (comme les fonds de vallée) qui sont les plus sensibles à l'apparition de zones détremées ou de marécages.

Du fait des fluctuations saisonnières du niveau des nappes d'eau souterraine, les zones affectées par ce phénomène peuvent, à certaines périodes de l'année, s'assécher. Cet assèchement est facilité quand les couches de terrain constituant le proche sous-sol ont une bonne capacité drainante. *A contrario*, un proche sous-sol très peu perméable constitue un facteur de prédisposition au caractère pérenne de ce type de nuisance.

Les affaissements miniers, en particulier quand ils entraînent l'apparition de dépressions fermées en surface, favorisent ce phénomène.

Enfin, dans les zones où l'on se prémunit contre l'occurrence de telles nuisances en rabattant par pompage le niveau de l'eau souterraine, il convient d'analyser le risque de défaillance des stations de relevage qui pourrait conduire à l'apparition de zones humides, voire de plans d'eau dans des environnements non compatibles avec ce type de contraintes.

5.1.3 Inondation des sous-sols et points bas

Il arrive que la remontée de la nappe résultant de l'arrêt des pompes d'exhaure amène le niveau de l'eau à s'établir à très faible profondeur sous la surface du sol, sans toutefois atteindre celle-ci comme dans les cas décrits plus haut. Dans ce cas, les désordres ou nuisances potentielles concernent les ouvrages implantés partiellement ou totalement sous la surface du sol (caves, parkings, réseaux enterrés, tunnels, égouts, passages enterrés ou semi-enterrés...). Ceux-ci se retrouvent noyés, soit en permanence, soit une partie de l'année seulement, en fonction de leur profondeur et des fluctuations saisonnières du niveau de la nappe.

Les mécanismes à l'origine de ce type de désordre sont similaires à ceux décrits à propos de l'apparition des zones détrempées ou de marécages. La seule différence est que, cette fois, la remontée du niveau de la nappe n'atteint pas la surface du sol.

5.1.4 Modification du régime des cours d'eau

Les transferts d'eau entre les nappes et les cours d'eau existent à l'état naturel. Le sens de ces échanges dépend de la position relative des niveaux d'eau entre le cours d'eau et la nappe. Le cours d'eau draine la nappe lorsque le niveau de cette dernière est supérieur à celui du cours d'eau. Le cours d'eau recharge la nappe dans le cas contraire.

Les modifications du milieu induites par l'exploitation minière puis par sa fermeture (arrêt des pompes) peuvent modifier le sens et/ou le débit des échanges nappe – rivière. De manière schématique, les effets de ces modifications sur le régime des cours d'eau peuvent induire des désordres et nuisances de types opposés :

- un accroissement du débit moyen des cours d'eau et des débits de crue ;
- une diminution du débit d'étiage.

Ces deux phénomènes seront traités successivement. Notons que l'impact de la modification du régime des cours d'eau peut s'étendre bien au-delà du seul secteur concerné par l'exploitation minière et de ses abords immédiats. Il peut concerner la partie du bassin hydrographique située à l'aval du site minier.

5.1.5 Inondations brutales

Le phénomène d'inondation brutale résulte de l'émission soudaine d'un très fort débit d'eau ou de boue par un orifice en liaison avec un réservoir minier ennoyé. En fonction du débit et du volume rejeté, l'effet peut être plus ou moins dévastateur et aller d'une simple crue dans le lit d'une rivière à une vague déferlante au fort pouvoir érosif.

L'intensité du phénomène est liée au volume d'eau susceptible de se vidanger, aux caractéristiques hydrodynamiques de l'orifice d'évacuation et à la morphologie des terrains permettant l'écoulement en aval. Les conséquences sont, a priori, d'autant plus graves que le phénomène peut se développer dans un site où on ne l'attend pas et non adapté à l'évacuation d'une crue.

Les mécanismes initiateurs d'un tel phénomène peuvent résulter de plusieurs causes naturelles ou artificielles dont l'existence exige toutefois des configurations assez particulières.

La situation la plus fréquente est celle d'un réservoir minier perché en altitude qui s'est constitué à la suite d'obturations volontaires ou fortuites des orifices miniers topographiquement les plus bas qui en permettaient la vidange. La rupture d'un bouchon artificiel ou l'occurrence d'un déboufrage d'une galerie effondrée, ou d'un karst colmaté, peuvent alors rapidement conduire à des débits et des conséquences d'autant plus importants que la charge derrière le bouchon est élevée et que le réservoir est suffisamment volumineux pour que le phénomène persiste durant plusieurs jours.

Une autre situation peut résulter du déversement d'un réservoir karstique dans les travaux miniers entraînant une crue soudaine à leur exutoire.

On citera également le risque de vague déferlante en cas d'effondrement soudain de vides miniers ennoyés de grande dimension.

Enfin dans le cas d'une exploitation à ciel ouvert donnant lieu à un lac minier, ou encore d'une verse à résidus sous eau, il faut envisager la possibilité d'une instabilité mécanique entraînant le glissement d'une grande masse de matériaux au sein de la retenue, ou la rupture d'une digue avec, pour conséquences, le déversement d'une lame d'eau et de boue en aval de l'ouvrage.

5.2 EVALUATION DE L'ALEA « INNONDATIONS »

5.2.1 Intensité

Pour ce qui concerne le phénomène d'apparition de résurgences en surface, c'est le **débit des émergences** qui constitue le paramètre permettant de discriminer les classes d'intensité².

Le paramètre discriminant les classes d'intensité des apparitions de zones détrempées est la **hauteur de la tranche d'eau au-dessus du sol** associée à la permanence dans le temps du phénomène.

Le paramètre discriminant les classes d'intensité des inondation des sous-sols et points bas est la **profondeur minimale de la nappe** par rapport à la surface du sol, en tenant compte de la variabilité saisonnière de cette profondeur.

Pour les crues on parlera de **débit maximal de crue du cours d'eau** comme paramètre qui discrimine les classes d'intensité.

5.2.2 Probabilité d'occurrence ou prédisposition

Le facteur déterminant qui influe sur la prédisposition d'un site à voir apparaître de nouvelles émergences est l'établissement d'une cote d'équilibre de la surface piézométrique de la nappe au-dessus de la cote des points bas de la surface topographique. En présence de ce facteur déterminant, plusieurs autres facteurs peuvent alors favoriser la prédisposition d'un site à l'apparition de résurgences :

- l'existence d'indices d'anciennes sources situées, avant l'exploitation minière, à proximité immédiate ;

² La composition chimique du rejet joue également un rôle sur la nature des nuisances induites en surface. Toutefois, cet aspect étant traité dans la partie consacrée aux impacts environnementaux, ce paramètre n'a pas été retenu pour la qualification du présent aléa.

- l'existence d'ouvrages miniers débouchant au jour connectés au réservoir souterrain ;
- la présence d'hétérogénéités naturelles (zones à forte perméabilité, failles, fractures, conduits karstiques...) susceptibles de jouer un rôle de drains préférentiels.

Les facteurs de prédisposition favorisant l'apparition de zones détremées sont :

- la présence de points bas naturels de la topographie,
- l'existence de terrains peu perméables dans ces points bas,
- la présence de zones subsidentes liées en particulier à des affaissements miniers lents, actuels ou à venir, mais qui peuvent perdurer pendant de nombreuses années.

Les facteurs de prédisposition aux inondations des sous-sols et points bas à cet aléa sont :

- la situation dans les points bas de la topographie, éventuellement influencés par les affaissements miniers ;
- la présence de terrains perméables en surface qui ne freinent pas les remontées saisonnières de nappe et augmentent le débit à drainer éventuellement.

Les facteurs de prédisposition aux crues sont :

- l'extension de la plaine alluviale avec la présence d'une nappe peu profonde pouvant facilement déborder (phénomène susceptible d'être amplifié par la remontée de la nappe à l'arrêt des travaux miniers) ;
- la modification de la topographie du lit majeur sous l'effet d'affaissements miniers passés ou à venir ;
- les aménagements susceptibles de gêner la circulation des eaux qui ont pu se développer pendant la phase d'exploitation où le débit se trouvait réduit (voies de circulation, constructions, déversement de matériaux, non-entretien des berges) ,
- le mode de gestion de l'eau après fermeture de la mine amenant éventuellement à concentrer le drainage naturel des travaux miniers en un nombre réduit de points de rejet.

6. ALEA « EMISSION DE GAZ DE MINE »

Les effets qui résultent de la présence de gaz au sein des vieux travaux miniers sont généralement moins spectaculaires que ceux liés à la stabilité des terrains de surface ou ceux liés à la qualité des eaux d'exhaure. Cette problématique ne doit pourtant, en aucun cas, être négligée.

Le gaz de mine est le gaz présent dans les vides miniers résiduels. Il est composé d'un mélange de plusieurs gaz. Dans le cas de mines, il contient du grisou et certains constituants de l'air atmosphérique pouvant circuler dans le réservoir souterrain ou encore y ayant simplement séjourné. Il s'agit donc généralement d'une atmosphère appauvrie en oxygène, parfois totalement désoxygénée, contenant du dioxyde de carbone, d'origine naturelle ou produit par oxydation de la matière organique présente, d'azote, du méthane, du radon, etc.

La présence de gaz dans les anciens travaux miniers peut être le fait, d'une part, d'une concentration en gaz, dans les formations encaissantes, qui se libère dans les cavités du fait de la détente des terrains liée à l'exploitation et d'autre part, de la décomposition ou de l'altération d'ouvrages, matériels ou produits qui sont restés au sein des travaux.

Ce gaz peut migrer vers la surface par l'intermédiaire des terrains de recouvrement lorsqu'ils sont fracturés ou par les conduits préférentiels que sont les ouvrages débouchant au jour.

L'émanation des gaz à la surface peut se produire durant l'exploitation, mais également durant la phase d'ennoyage des vides après la fin des travaux, les gaz migrant vers la surface par effet de piston.

Après stabilisation hydraulique, le risque d'émanation de gaz, pour peu que sa concentration résiduelle dans les vieux travaux soit importante, résulte par exemple :

- d'une communication directe entre les vieux travaux et la surface (orifice minier, faille, fissure...). Il s'agit alors d'une émanation ponctuelle et concentrée de gaz de mine ;
- du transport de gaz dissous dans les eaux profondes au contact des anciens travaux, qui peut être relargué en surface ;
- de l'accumulation de gaz dans des espaces confinés ou semi-confinés (caves ou sous-sols, voire habitations ou bâtiments eux-mêmes, mais aussi réseaux enterrés, etc.) ;
- d'une mise en communication d'un piège à grisou avec l'atmosphère (par exemple réalisation de forages ou de travaux de génie civil à proximité de vieux travaux ...).

Après la fin de l'exploitation, lorsque la ventilation cesse, certains vides miniers peuvent ainsi présenter des concentrations élevées en gaz divers. Les rejets, francs ou diffus, remontant jusqu'en surface peuvent engendrer certains risques pour les personnes, les installations ou les biens à proximité immédiate. Parmi les principaux risques pour les personnes, on peut citer les risques :

- d'inflammation, car le méthane et ses homologues supérieurs constituent une partie majeure du grisou originel dans le bassin. Ces gaz forment dans certaines proportions volumiques (entre 5 et 15 % pour le méthane) un mélange inflammable avec de l'air ;
- d'asphyxie, car le gaz de mine s'accumule dans des endroits non ou mal ventilés et remplace l'air atmosphérique, créant ainsi un déficit d'oxygène ;
- d'intoxication du fait de la présence habituelle de CO₂ et/ou de CO, ou encore de la présence possible d'autres gaz toxiques (H₂S par exemple) pouvant être présents en quantité significative dans le gaz de mine.

Pour l'évaluation de l'aléa « émission de gaz » est similaire à celle utilisée pour l'aléa « mouvements de terrain ».

7. BIBLIOGRAPHIE

- [1] Décret no 2000-547 du 16 juin 2000 relatif à l'application des articles 94 et 95 du code minier, Art. 2-I du Chapitre Ier « Élaboration des plans de prévention des risques miniers » du Titre Ier « Dispositions relatives aux plans de prévention des risques miniers » ;
- [2] L'élaboration des Plans de Prévention des Risques Miniers - Guide méthodologique - Volet technique relatif à l'évaluation de l'aléa, INERIS DRS-04-51198/R01 PROJET n° 2, INERIS, BRGM, GEODERIS, ENSMP, IRSN, CSTB, en cours de réalisation à la date de rédaction du présent rapport ;

ANNEXE 2

**APPROCHE ANALYTIQUE DU PROBLEME
D'AUTOCOMBLEMENT DES GALERIES**

APPROCHE ANALYTIQUE DU PROBLEME D'AUTOCOMBLEMENT DES GALERIES

La présence d'horizons peu cohérents dans les terrains de recouvrement est propice à la formation de fontis qui résultent d'instabilités localisées du toit de la carrière qui ne peuvent arrêter leur propagation vers la surface à des configurations de voûtes stables et qui finissent par déboucher brusquement au jour en créant des "entonnoirs" dont les diamètres peuvent varier de quelques mètres à quelques dizaines de mètres.

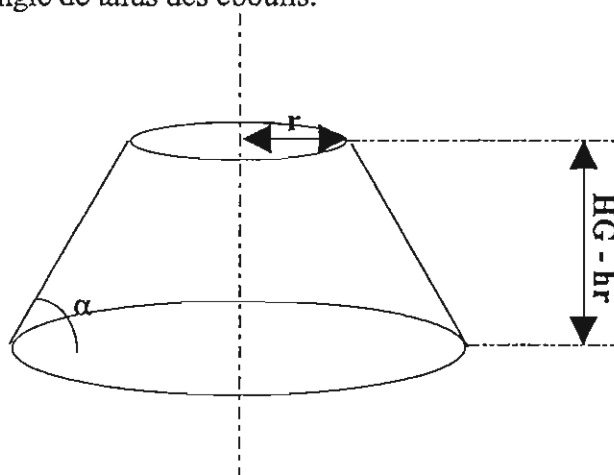
Les éboulis foisonnent et forment, au mur de la galerie sous-jacente (ou à la surface du remblayage), un cône d'éboulis qui se répand dans l'espace disponible, avec comme angle à la base, un angle de talus, variable selon le type de matériau considéré. La cheminée, remontant vers la surface, fait grossir le cône qui s'étale dans la galerie et s'élève vers le toit de la carrière.

Le cône se développe, lorsque cela est possible, jusqu'à atteindre le toit de la galerie et boucher la base de la cheminée de remontée. Le tas d'éboulis prend alors l'aspect d'un cône tronqué, d'une hauteur égale à celle du vide résiduel lorsqu'on la suppose remblayée partiellement. Son rayon au sommet est égal au rayon de la cheminée et son angle à la base égal à l'angle de talus des marnes.

1. Volume du cône tronqué V_1

On calcule, dans un premier temps, le volume de ce cône tronqué et pour simplifier le calcul, on travaillera en coordonnées cylindriques (ρ , θ , z). On utilisera les notations suivantes :

- r : Rayon de la cheminée de remontée.
- H_G : Hauteur de galerie non remblayée.
- h_r : Hauteur de remblayage (éventuelle).
- α : Angle de talus des éboulis.



Volume du cône tronqué permettant un autocomblement de la galerie et l'obturation de la base de la cheminée.

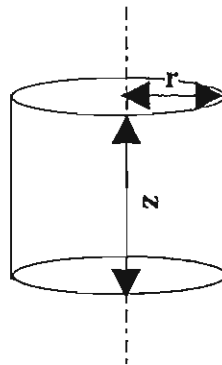
$$\begin{aligned}
 \iiint \rho \, d\rho \, d\theta \, dz &= \int_0^{2\pi} \left[\iint \rho \, d\rho \, dz \right] d\theta = 2\pi \iint \rho \, d\rho \, dz \\
 &= 2\pi \int_0^{H_G - h_r} \left[\int_0^{r(z)} \rho \, d\rho \right] dz && \text{avec } r(z) = r + z \cot g \alpha \\
 &= 2\pi \left[\int_0^{r+z \cot \alpha} \rho \, d\rho \right] dz = \pi \int_0^{H_G - h_r} \left[\rho^2 \right]_0^{r+z \cot g \alpha} dz \\
 &= \pi \int_0^{H_G - h_r} (r^2 + 2rz \cot g \alpha + z^2 \cot^2 g \alpha) dz \\
 &= \pi \left[r^2 z + rz^2 \cot g \alpha + \frac{z^3}{3} \cot^2 g \alpha \right]_0^{(H_G - h_r)} \\
 &= \pi \left[(H_G - h_r)r^2 + r(H_G - h_r)^2 \cot g \alpha + \frac{(H_G - h_r)^3}{3} \cot^2 g \alpha \right] \\
 &= \boxed{V_1 = \frac{\pi}{3} (H_G - h_r) \left\{ 3r^2 + (H_G - h_r) \cot g \alpha \left[3r + (H_G - h_r) \cot g \alpha \right] \right\}}
 \end{aligned}$$

2. Volume du cylindre de la cheminée V₂

On calcule ensuite le volume de la cheminée de remontée dans les terrains de recouvrement. Elle est considérée par défaut et de manière extrêmement conservatrice, verticale et parfaitement cylindrique de rayon r.

On utilisera la notation suivante :

z : Hauteur de la cheminée de remontée dans les marnes.



Volume du cylindre de la remontée de cheminée dans les marnes.

$$V_2 = \pi r^2 z$$

3. Volume du cône occupé par les piliers dans la galerie V_3

En fait, la galerie ne peut être considérée comme un milieu infini dans lequel le cône d'éboulis pourrait s'étendre sans interférer avec les piliers. A partir d'une certaine quantité éboulée, le bord du cône va atteindre les piliers voisins qui entourent la remontée de cheminée.

Généralement, une exploitation par chambres et piliers de est soutenue par des piliers parallélépipédiques verticaux, mais il existe des cas particuliers comme par exemple, les galeries trapézoïdales dans le gypse.

La hauteur de remblayage va donc influencer grandement sur la largeur de la galerie et, de ce fait, sur la distance séparant les piliers du cône d'éboulis. On définit par a^* la largeur de la galerie en fonction de la hauteur de remblayage :

$$a^* = a - 2 h_r \cot g \beta$$

Où la notation β correspond à l'angle des piliers pris par rapport à l'horizontale.

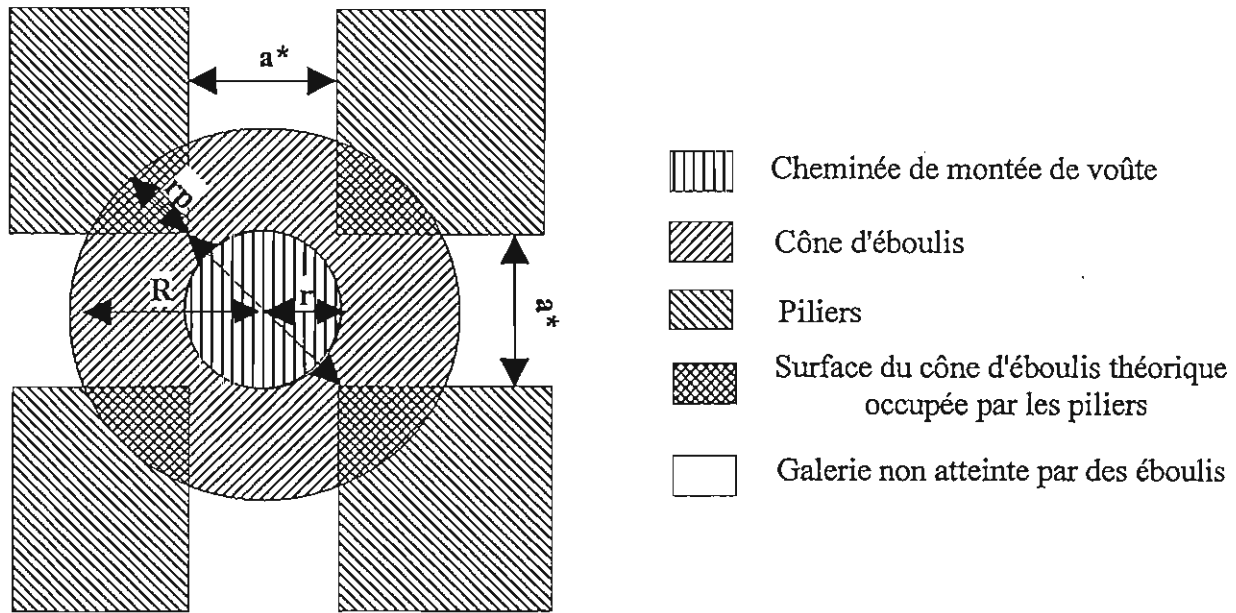
On calcule ensuite le rayon d'éboulis maximal pour que le cône n'atteigne pas les piliers, il s'agit du rayon du cercle, centré sur le centre du carrefour et tangent aux piliers voisins, rayon qu'on notera r_1 .

$$r_1 = a^* \frac{\sqrt{2}}{2} = \frac{a \sqrt{2}}{2} - h_r \sqrt{2} \cot g \beta$$

Il suffit alors de comparer cette valeur avec le rayon défini, au mur de la galerie remblayée, par le cône d'éboulis théorique, noté R .

$$R = r + (H_G - h_r) \cot g \alpha$$

Lorsque r_1 est supérieur à R , le cône d'éboulis s'étale dans la galerie sans être gêné par les piliers, sinon il faut en déduire que les éboulis atteignent les piliers et qu'une partie du volume du cône théorique est, en fait, occupé par les piliers. La figure ci-après décrit une vue, en plan, du mur de la galerie remblayée. Elle représente, avec un certain type de hachures, la section des piliers et, avec un autre type de hachure, le cercle défini par le cône théorique d'éboulis.



Vue de dessus, en plan, d'un carrefour de galerie avec une remontée de cheminée ayant donné naissance à un cône d'éboulis qui interfère avec les piliers voisins.

La figure met en évidence quatre ¼ de cercles hachurés dans les deux sens, c'est à dire appartenant à la fois au cône théorique d'éboulis et aux piliers. Ces ¼ de cercles ont un rayon r_p défini par :

$$r_p = R - r_1 = r + (H_G - h_r) \cot g \alpha - \left(\frac{a \sqrt{2}}{2} - h_r \sqrt{2} \cot g \beta \right)$$

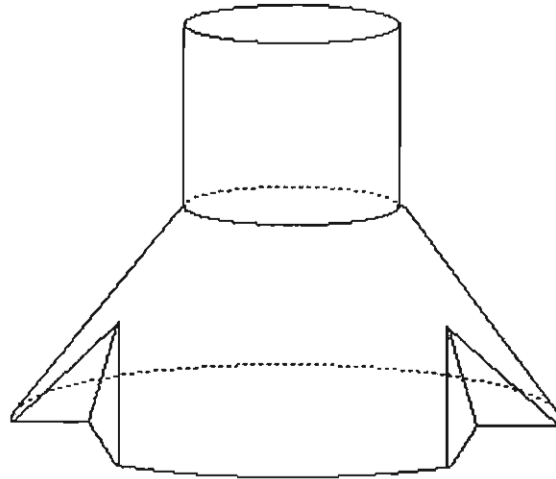
Une fois ce rayon établi, il reste à calculer le volume occupé par les quatre piliers. Pour l'estimer, nous aurons recours à une simplification analytique qui facilitera considérablement le calcul tout en jouant dans le sens de la sécurité. Elle permet, de plus, de faciliter considérablement le calcul car nous pourrions, dans ce cas, considérer que chacun des piliers occupe un ¼ de cône de rayon r_p et d'angle à la base α . Le volume occupé par les quatre piliers réunis va donc correspondre à celui d'un cône entier de rayon r_p et d'angle à la base α . On peut, alors, calculer aisément le volume recherché V_3 :

$$V_3 = \frac{\pi}{3} r_p^2 h_p = \frac{\pi}{3} \operatorname{tg} \alpha r_p^3 = \frac{\pi}{3} \operatorname{tg} \alpha \left[r + (H_G - h_r) \cot g \alpha - \frac{a \sqrt{2}}{2} + h_r \sqrt{2} \cot g \beta \right]^3$$

4. Volume foisonné nécessaire pour combler la galerie et la montée de voûte V_{mf1}

Le volume nécessaire pour boucher la base de la cheminée et combler toute sa hauteur est donc égal au volume V_2 , du cylindre qui remplit la cheminée de marnes, ajouté au volume V_1 du cône

théorique tronqué qui permet de boucher la base de la cheminée, auquel on retranche le volume V_3 occupé par les piliers.



Volume nécessaire pour combler la galerie et la remontée de cheminée, tout en tenant compte de l'influence des piliers voisins.

$$V_{mf1} = V_1 + V_2 - V_3$$

$$V_{mf1} = \frac{\pi}{3} \left\{ \begin{array}{l} 3 r^2 (H_G - h_r + z) + (H_G - h_r)^2 \cot g \alpha \left[3 r + (H_G - h_r) \cot g \alpha \right] \\ - \operatorname{tg} \alpha \left[r + (H_G - h_r) \cot g \alpha - \frac{a \sqrt{2}}{2} + h_r \sqrt{2} \cot g \beta \right]^3 \end{array} \right\}$$

5. Hauteur de remontée de cheminée nécessaire pour aboutir à un autocomblement.

Nous avons déjà établi, le volume de marnes éboulées nécessaire pour aboutir à l'autocomblement par foisonnement d'une remontée de cheminée de hauteur z . Il reste maintenant à déterminer pour quelle hauteur z , ce processus est possible compte tenu des caractéristiques de la carrière. On se servira alors du fait que le volume de marnes foisonnées dépend directement du volume éboulé c'est à dire de la hauteur de remontée de cheminée.

On utilisera la notation :

f_m : Coefficient de foisonnement des matériaux éboulés.

On en tire :

$$V_{mf1} = f_m \pi r^2 z$$

On égalise alors les deux différentes expressions de $V_{m\Gamma}$ pour en tirer z :

$$f_m \pi r^2 z = \frac{\pi}{3} \left\{ 3 r^2 (H_G - h_r + z) + [\dots] \right\}$$

$$\pi r^2 z (f_m - 1) = \frac{\pi}{3} \left\{ \begin{array}{l} 3 r^2 (H_G - h_r) + (H_G - h_r)^2 \cot g \alpha \left[3 r + (H_G - h_r) \cot g \alpha \right] \\ - \operatorname{tg} \alpha \left[r + (H_G - h_r) \cot g \alpha - \frac{a \sqrt{2}}{2} + h_r \sqrt{2} \cot g \beta \right]^3 \end{array} \right\}$$

$$z = \frac{1.}{3 r^2 (f_m - 1)} \left\{ \begin{array}{l} 3 r^2 (H_G - h_r) + (H_G - h_r)^2 \cot g \alpha \left[3 r + (H_G - h_r) \cot g \alpha \right] \\ - \operatorname{tg} \alpha \left[r + (H_G - h_r) \cot g \alpha - \frac{a \sqrt{2}}{2} + h_r \sqrt{2} \cot g \beta \right]^3 \end{array} \right\}$$

Cette expression littérale permet de calculer la hauteur de remontée de cheminée dans les marnes nécessaire à un autocomblement de l'instabilité. Lorsque la hauteur de remontée de cheminée atteint cette valeur, les matériaux foisonnés parviennent à combler la galerie et à remplir la cheminée. L'évolution est donc stoppée et le phénomène stabilisé.

Il reste à comparer cette valeur de z avec l'épaisseur du recouvrement. Si elle lui est inférieure, l'autocomblement est possible. Même lorsqu'un autocomblement de la galerie et de la cheminée est prévisible, la disparition des instabilités potentielles n'est pas assurée. Il peut, en effet, persister des risques susceptibles de venir perturber cet état d'équilibre. Parmi ceux-ci on peut citer : la rupture de la planche des terrains de recouvrement non remaniés et/ou l'altération du cône d'éboulis par des venues d'eaux

6. Extension aux exploitations par galeries isolées

Les risques de fontis ne sont pas propres aux exploitations par chambres et piliers. Ils peuvent également se développer dans tout type d'exploitation dès lors que la hauteur de recouvrement est suffisamment faible comparée à la hauteur de vide.

On peut donc étendre les calculs volumétriques aux cas des galeries quadrangulaires, trapézoïdales et elliptiques (ou semi-elliptiques).

Compte tenu de la géométrie particulière de ces galeries, le calcul aboutit à des intégrales qui nécessitent l'emploi de méthodes numériques pour être résolues.

ANNEXE 3

LE MODELE DE « L'AIRE TRIBUTAIRE »

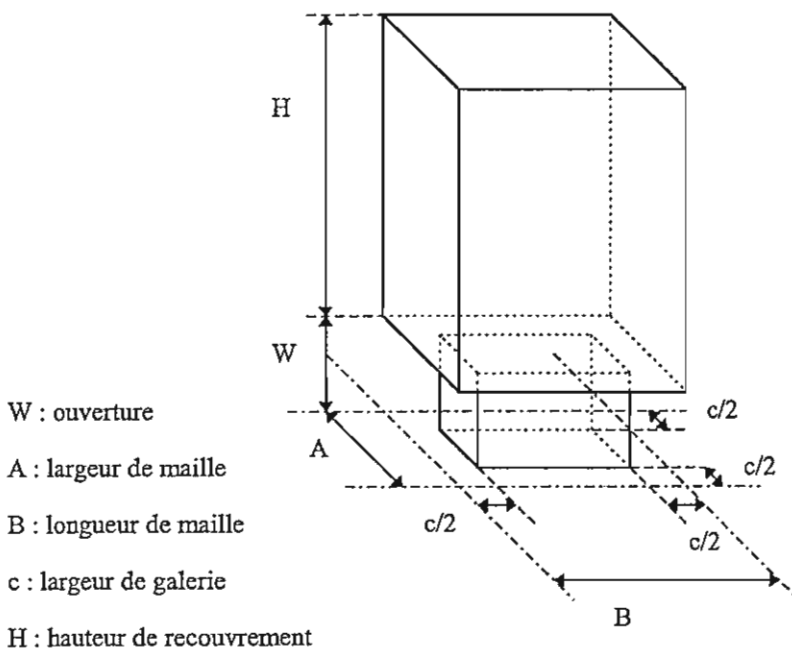
Théorie

Sur une zone de piliers, les sollicitations sont variables d'un point à un autre en fonction de la position du pilier par rapport au bord ferme, de la position à l'intérieur du pilier (contrainte horizontale de confinement) ou de la fracturation.

En moyenne, la contrainte verticale dans les piliers sur la zone peut être obtenue par le modèle simple de « l'aire tributaire » : il considère que chaque pilier supporte le poids des terrains qui le surplombent ainsi que la moitié des chambres qui l'entourent. La contrainte verticale moyenne appliquée par les terrains de recouvrement est donnée par l'équation suivante :

Soient H l'épaisseur du recouvrement mesurée depuis le sommet des piliers jusqu'à la surface du jour (profondeur en mètres) et γ le poids volumique des terrains de recouvrement.

Le poids du recouvrement induit une contrainte verticale $\sigma_v = \gamma H$,



soit pour un poids volumique moyen de 25 000 N/m³

$$\sigma_v = 25000 H_{\max} \text{ (en Pascal)} = 0,25 H_{\max} \text{ (en bar)}$$

Le poids du recouvrement doit être repris par les piliers ; la sollicitation moyenne σ_p dans le pilier est d'autant plus forte que la zone a été plus exploitée. Soit τ , le taux de défruitement égal au rapport entre la surface défruitée et la surface totale. La surface des piliers est égale à $(1 - \tau)$ d'où $\sigma_p (1 - \tau) = \sigma_v$.

Ainsi :
$$\sigma_p = \frac{\gamma H_{\max}}{1 - \tau} \text{ en bar}$$

La sollicitation moyenne varie donc proportionnellement à la profondeur de l'exploitation. En revanche, l'influence du taux de défrètement est de forme hyperbolique : plus le taux de défrètement est élevé, plus la sollicitation dans le pilier va être sensible à une variation de τ .

Application au cas des exploitations de bauxite de Villeveyrac

Les résultats de l'application de ce modèle « simple » au cas de Villeveyrac sont synthétisés dans le tableau ci dessous.

Les caractéristiques retenues sont celles mises en exergue par la phase informative. Les taux de défrètement varient de 30 % pour certaines zones de traçage mal localisées, jusqu'à 60-70 % voir exceptionnellement 80 % pour les zones exploitées. Les valeurs de poids de terrains de recouvrement retenues sont celles que nous avons retenu pour qualifier un recouvrement de marnes à passées gréseuses (les marnes ont de poids volumique de 0,018 à 0,021 MN.m⁻³ et les grès de 0,019 à 0,028 MN.m⁻³). Les simulations ci-après tiennent compte d'une hauteur de recouvrement de 50 mètres.

Il faut ensuite comparer ces valeurs de sollicitation à la résistance à la compression du minerai de bauxite constituant les piliers des exploitations (valeurs minimales de 60 bar). Il est possible de calculer un coefficient de sécurité correspondant au rapport entre la sollicitation dans les piliers et la résistance de la bauxite.

Les valeurs extrêmes correspondant aux taux de défrètement de 30 % et 80 % ne sont pas ou trop peu représentatives des exploitations de Villeveyrac pour être retenues.

Poids des terrains de recouvrement (en MN.m-3)	Taux de défrètement	Sollicitation dans les piliers (en MPa)	Coeff sécurité
0.02	30%	1.4	4.2
0.021	30%	1.5	4.0
0.022	30%	1.6	3.8
0.023	30%	1.6	3.7
0.024	30%	1.7	3.5
0.025	30%	1.8	3.4
0.02	40%	1.7	3.6
0.021	40%	1.8	3.4
0.022	40%	1.8	3.3
0.023	40%	1.9	3.1
0.024	40%	2.0	3.0
0.025	40%	2.1	2.9
0.02	60%	2.5	2.4
0.021	60%	2.6	2.3
0.022	60%	2.8	2.2
0.023	60%	2.9	2.1
0.024	60%	3.0	2.0
0.025	60%	3.1	1.9
0.02	65%	2.9	2.1
0.021	65%	3.0	2.0
0.022	65%	3.1	1.9
0.023	65%	3.3	1.8
0.024	65%	3.4	1.8
0.025	65%	3.6	1.7
0.02	70%	3.3	1.8
0.021	70%	3.5	1.7
0.022	70%	3.7	1.6
0.023	70%	3.8	1.6
0.024	70%	4.0	1.5
0.025	70%	4.2	1.4
0.02	80%	5.0	1.2
0.021	80%	5.3	1.1
0.022	80%	5.5	1.1
0.023	80%	5.8	1.0
0.024	80%	6.0	1.0
0.025	80%	6.3	1.0

Tableau 1 : Sollicitations dans les piliers pour une hauteur de recouvrement de 50 mètres et une résistance à la rupture des matériaux constituant les piliers de 6 MPa

ANNEXE 9

LISTE DES LOGICIELS UTILISES POUR L'ETUDE

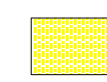
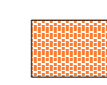

*Nota : imprimé émis et géré par DSE
Cette fiche est annexée au rapport.*

Direction opérationnelle : DRS Unité : MERG












Référence étude / CGR : 57693

Logiciel	Version	Fichier de configuration	Données de sortie/Résultats
<i>FONTIS.XLS</i>	<i>2.9</i>	-	<i>LES RESULTATS DU RAPPORT</i>

Aléa effondrement localisé :

-  Aléa faible
-  Aléa moyen
-  Aléa fort

Légende :

-  Entrée de galerie
-  Puits
-  Effondrement localisé ouvert
-  Effondrement localisé remblayé
-  Travaux de surface
-  Travaux souterrain connus
-  Travaux souterrain présumés
-  Affleurement de bauxite
-  Limite de concession
-  Limite de commune
-  Courbe topographique

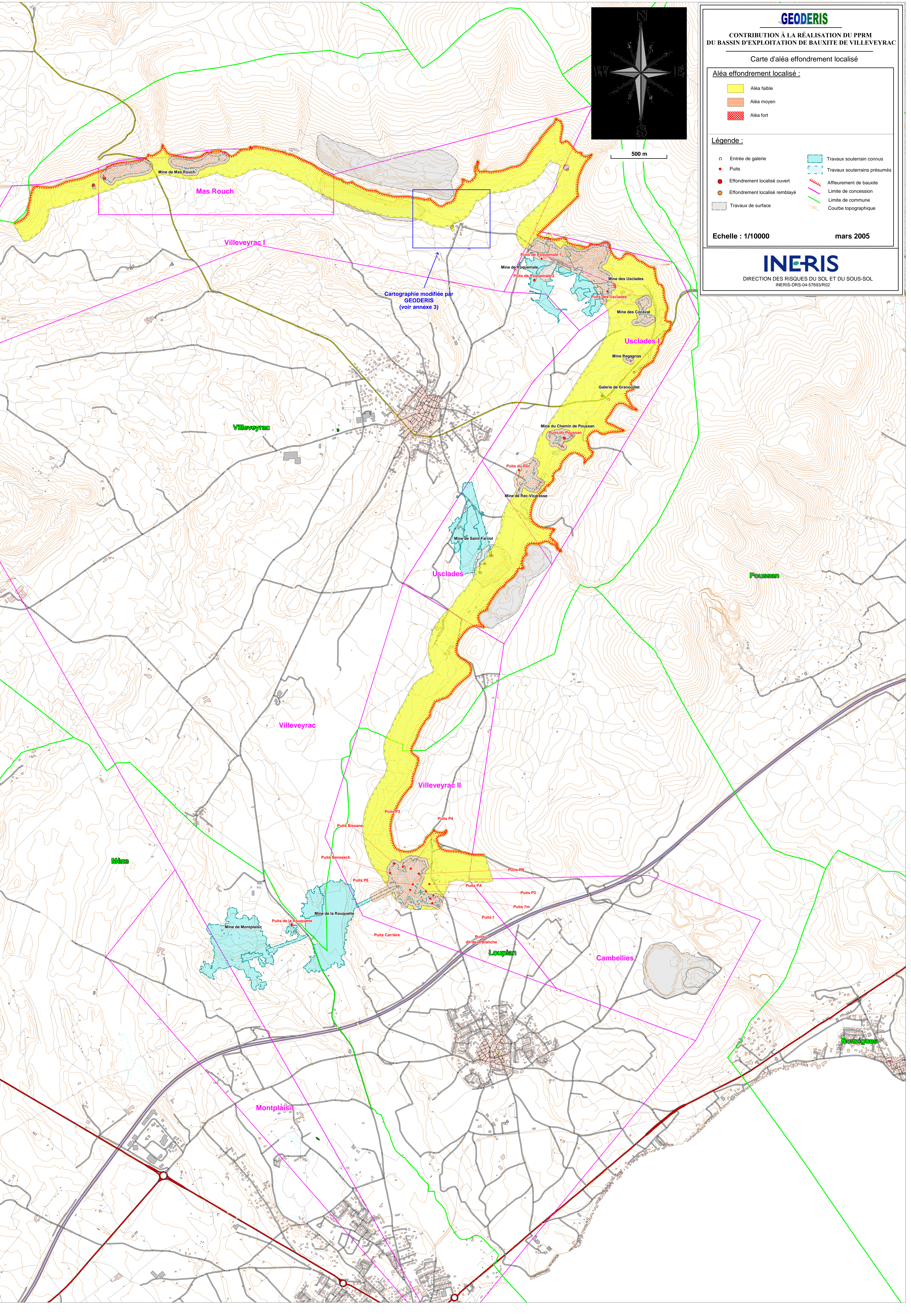
Echelle : 1/10000

mars 2005



500 m

Cartographie modifiée par
GEODERIS
(voir annexe 3)



Aléa affaissement :

- Aléa faible
- Aléa moyen

Légende :

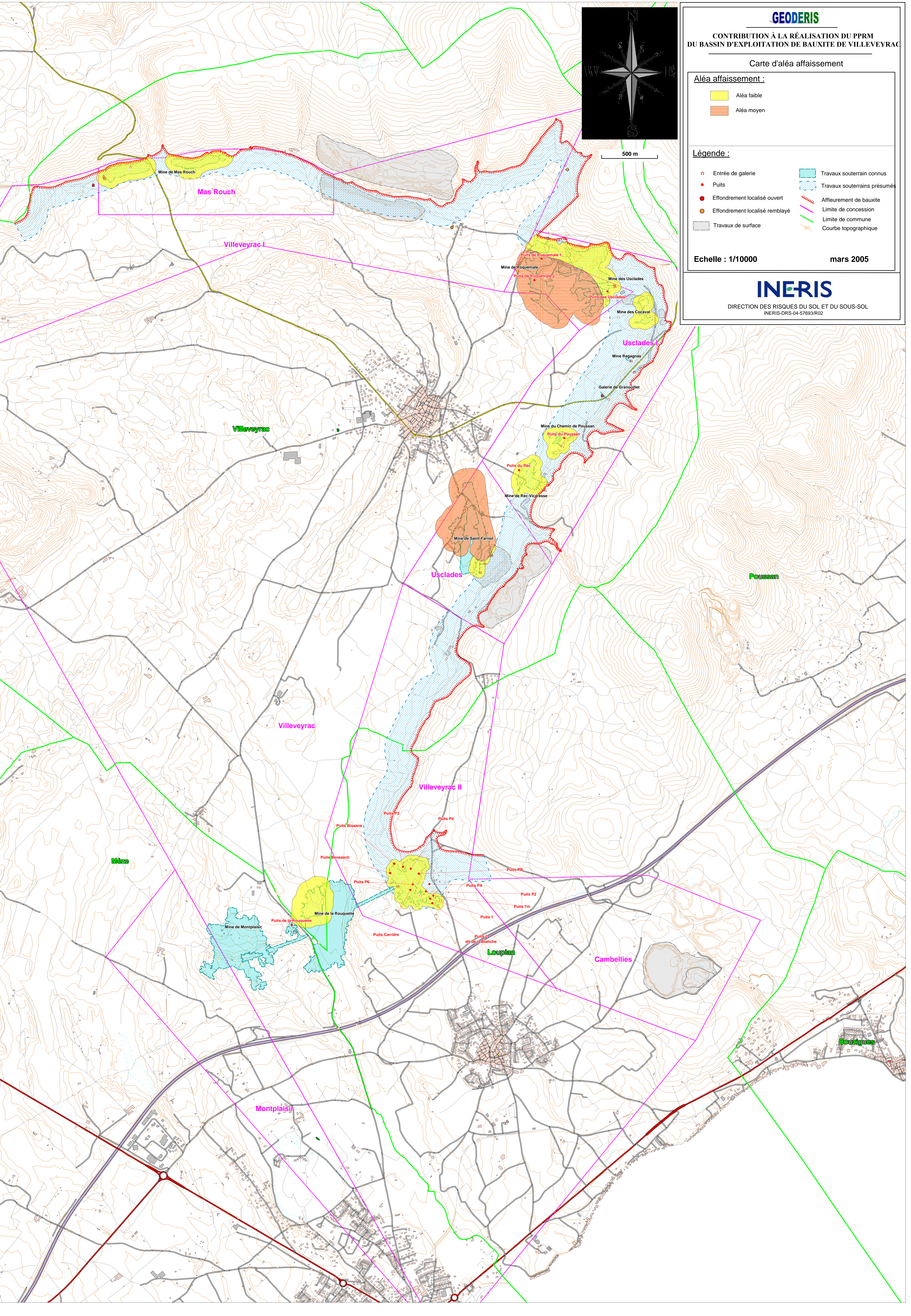
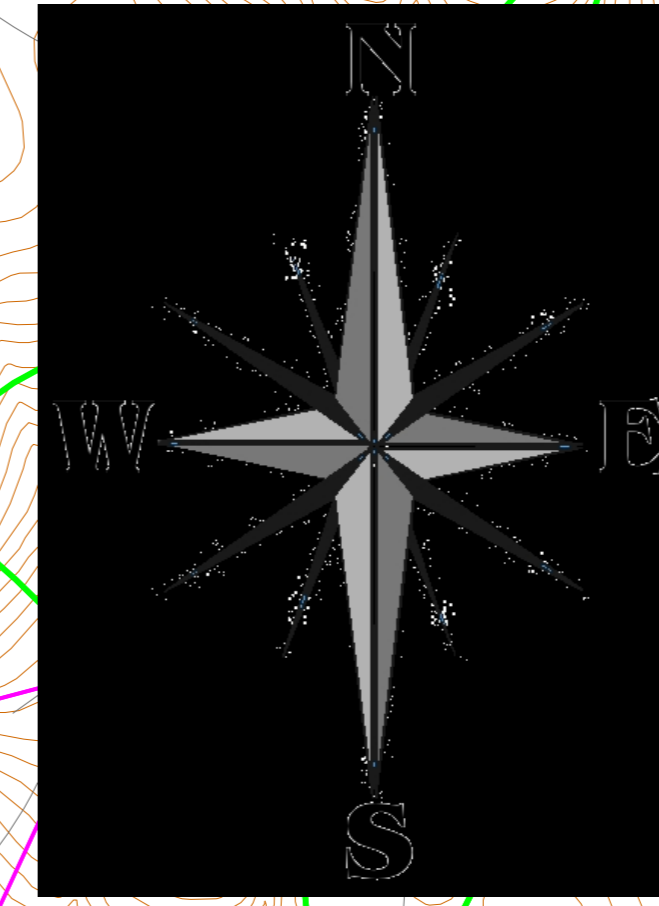
- Entrée de galerie
- Puits
- Effondrement localisé ouvert
- Effondrement localisé remblayé
- Travaux de surface
- Travaux souterrains connus
- Travaux souterrains présumés
- Affleurement de bauxite
- Limite de concession
- Limite de commune
- Courbe topographique

Echelle : 1/10000

mars 2005

INERIS

DIRECTION DES RISQUES DU SOL ET DU SOUS-SOL
INERIS-DRS-04-57693/R02



Aléa tassement :

Aléa faible

Légende :

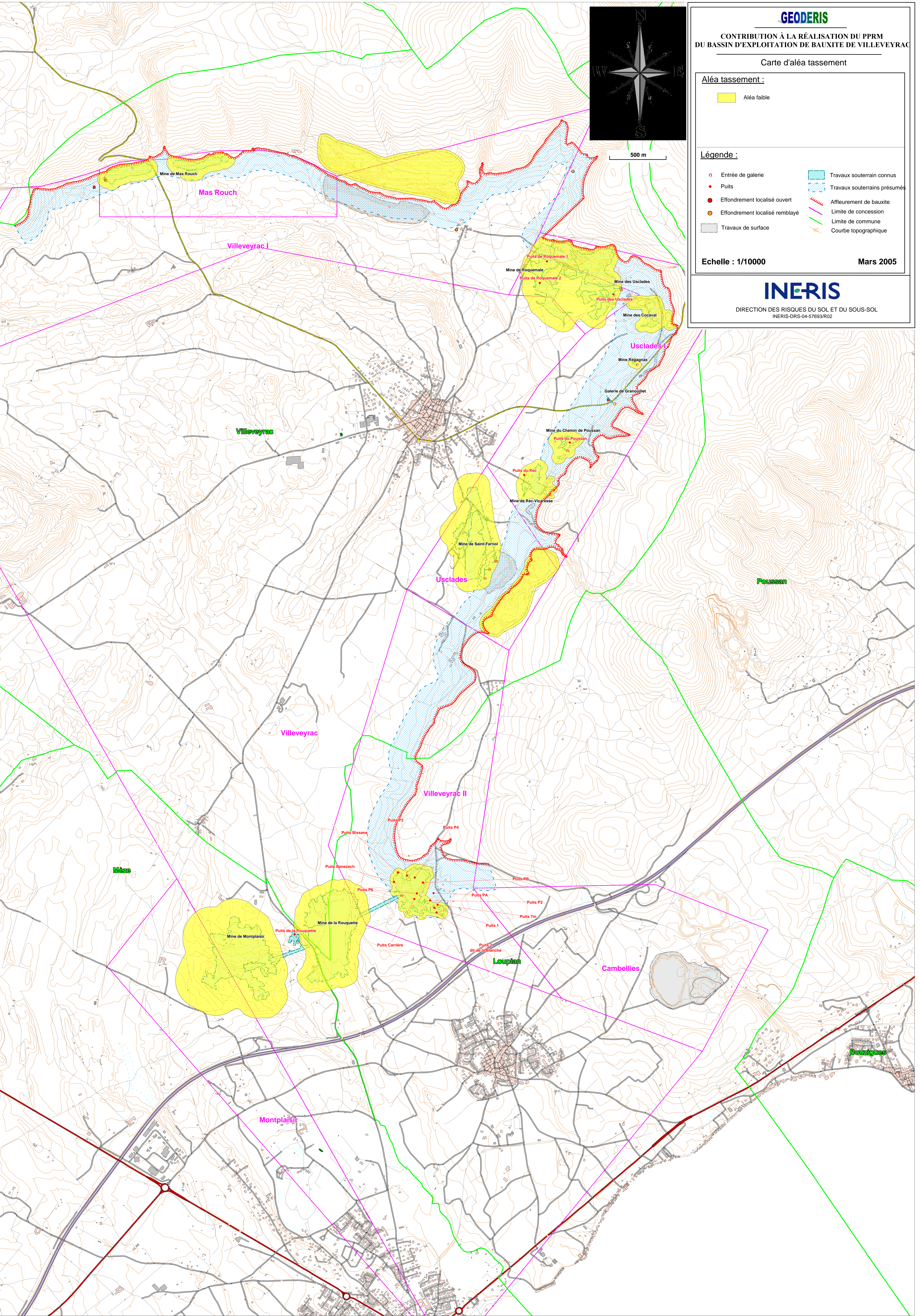
- Entrée de galerie
- Puits
- Effondrement localisé ouvert
- Effondrement localisé remblayé
- Travaux de surface
- Travaux souterrains connus
- Travaux souterrains présumés
- Affleurement de bauxite
- Limite de concession
- Limite de commune
- Courbe topographique

Echelle : 1/10000

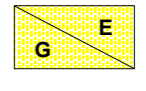
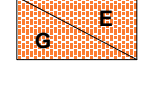
Mars 2005

INERIS






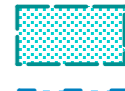





DIRECTION DES RISQUES DU SOL ET DU SOUS-SOL
INERIS-DRS-04-57693/R02



Aléa glissement de terrain :

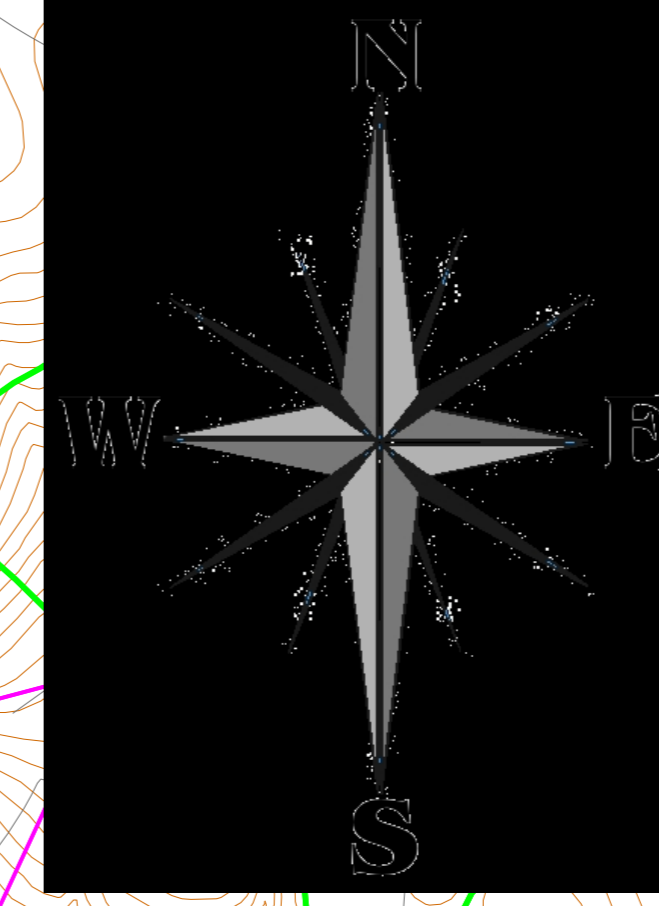
-  Aléa faible (G : Glissement , E : Eroulement)
-  Aléa moyen (G : Glissement , E : Eroulement)

Légende :

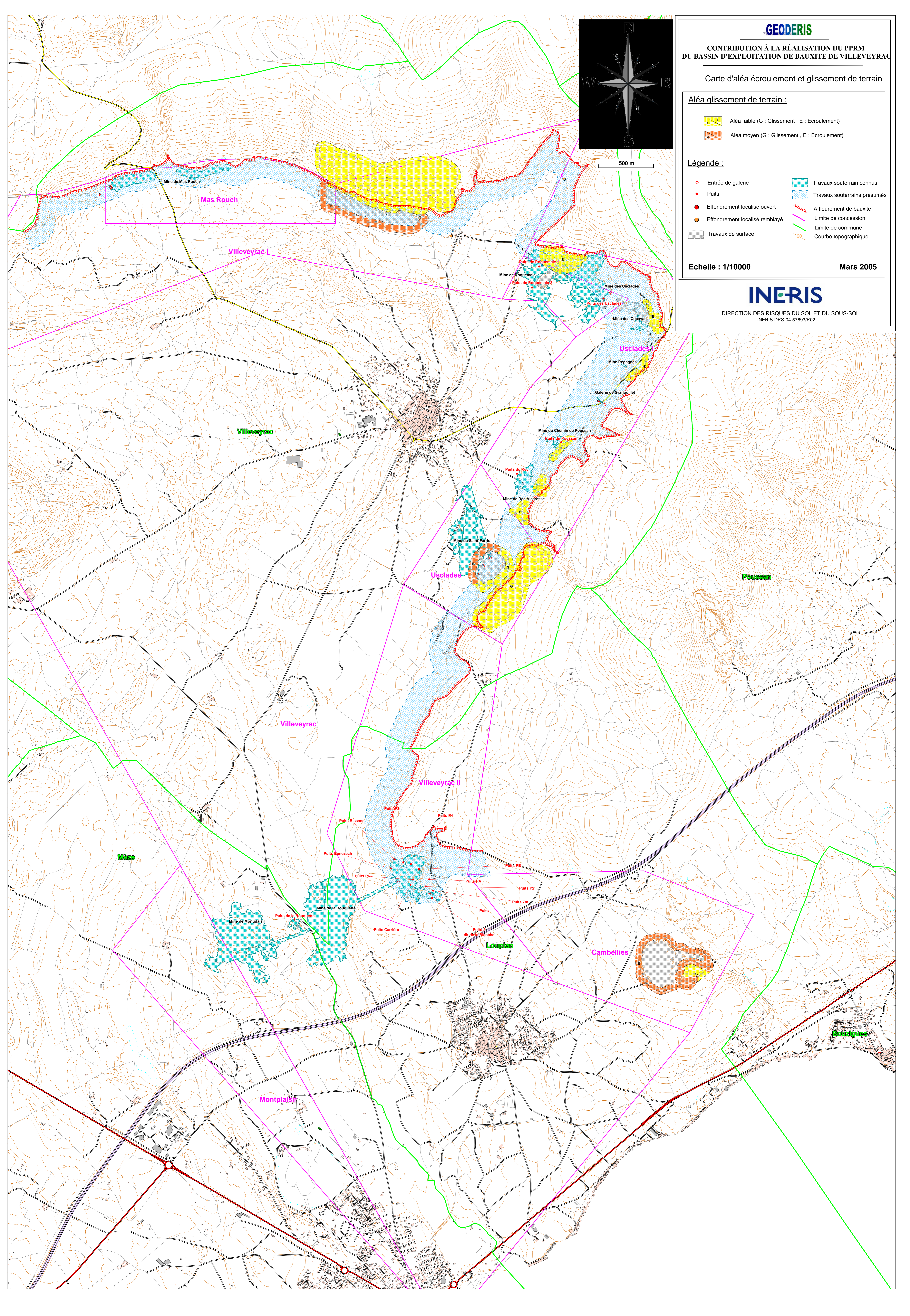
-  Entrée de galerie
-  Puits
-  Effondrement localisé ouvert
-  Effondrement localisé remblayé
-  Travaux de surface
-  Travaux souterrain connus
-  Travaux souterrain présumés
-  Affleurement de bauxite
-  Limite de concession
-  Limite de commune
-  Courbe topographique

Echelle : 1/10000

Mars 2005




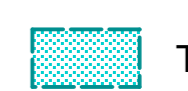








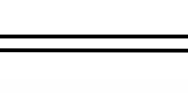
500 m



Aléa émission de gaz de mine :

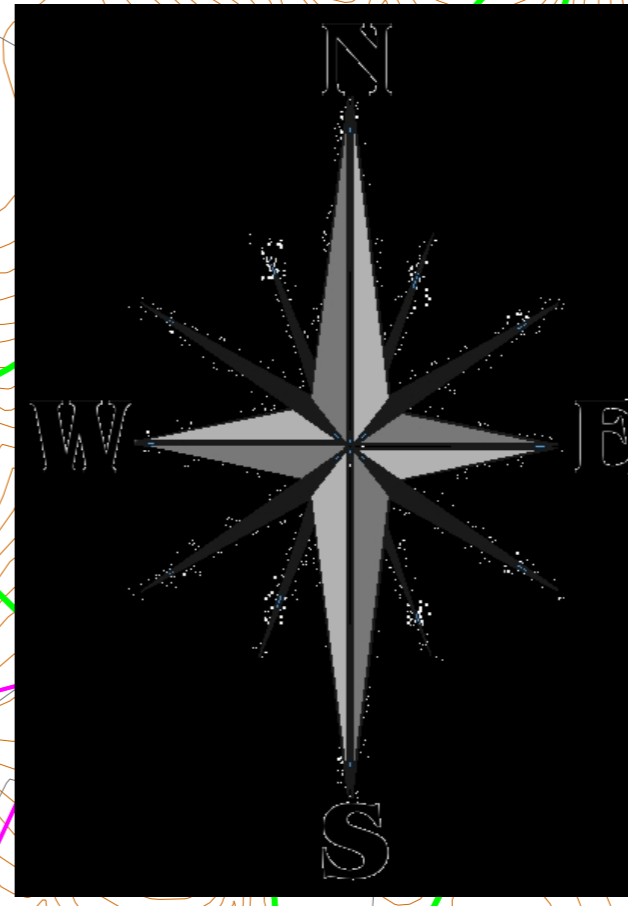
 Aléa faible

Légende :

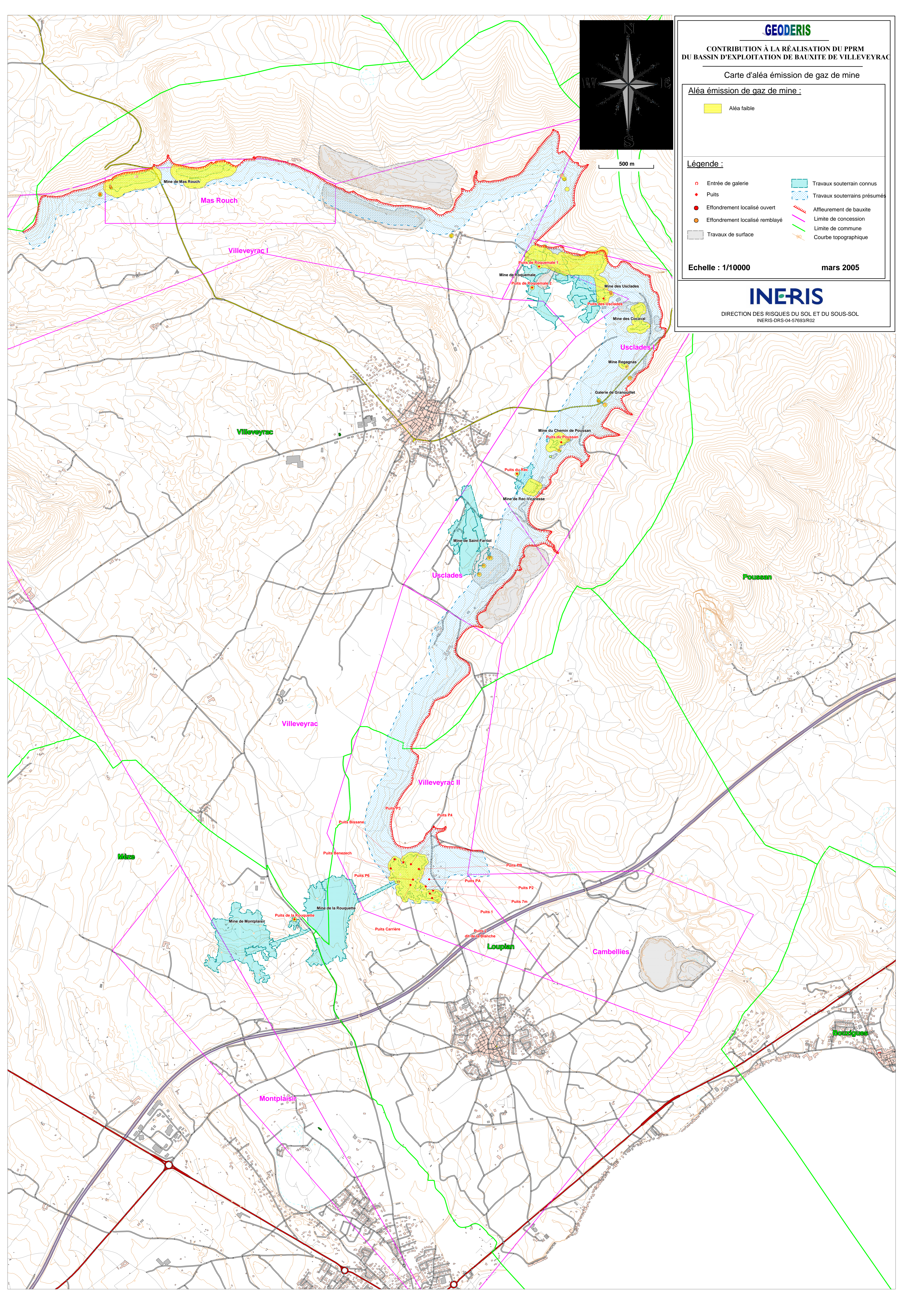
- | | |
|--|--|
|  Entrée de galerie |  Travaux souterrains connus |
|  Puits |  Travaux souterrains présumés |
|  Effondrement localisé ouvert |  Affleurement de bauxite |
|  Effondrement localisé remblayé |  Limite de concession |
|  Travaux de surface |  Limite de commune |
| |  Courbe topographique |

Echelle : 1/10000

mars 2005



500 m



INERIS

Institut national de l'environnement
industriel et des risques

Parc Technologique ALATA BP 2 F-60550 Verneuil-en-Halatte
tél +33(0)3 44 55 66 77 fax +33(0)3 44 55 66 99
e-mail ineris@ineris.fr internet <http://www.ineris.fr>

ANNEXE 4

Cartes d'aléa

Aléa effondrement localisé :

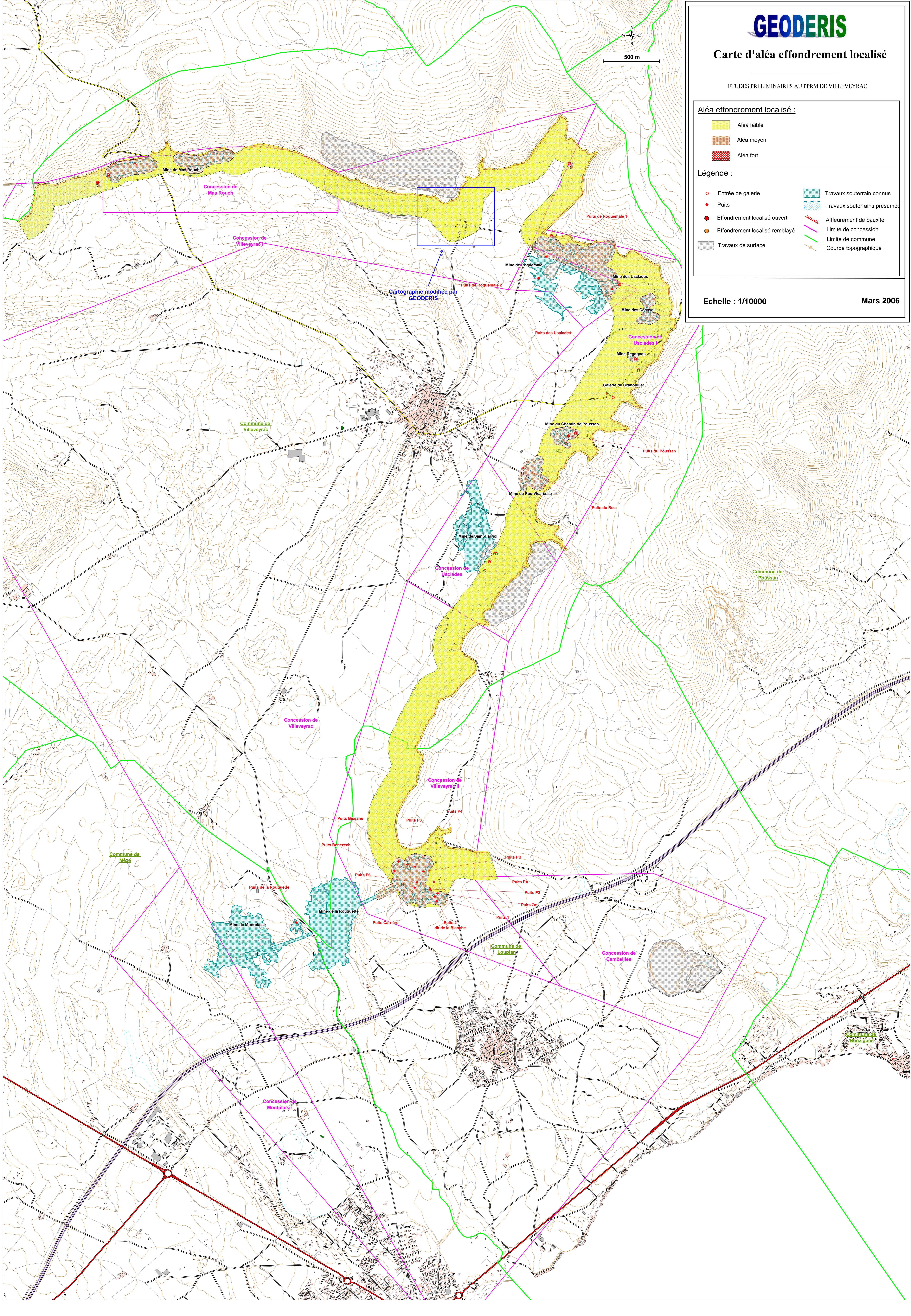
- Aléa faible
- Aléa moyen
- Aléa fort

Légende :

- Entrée de galerie
- Puits
- Effondrement localisé ouvert
- Effondrement localisé remblayé
- Travaux de surface
- Travaux souterrains connus
- Travaux souterrains présumés
- Affleurement de bauxite
- Limite de concession
- Limite de commune
- Courbe topographique

Echelle : 1/10000

Mars 2006



Aléa affaissement :

- Aléa faible
- Aléa moyen

Légende :

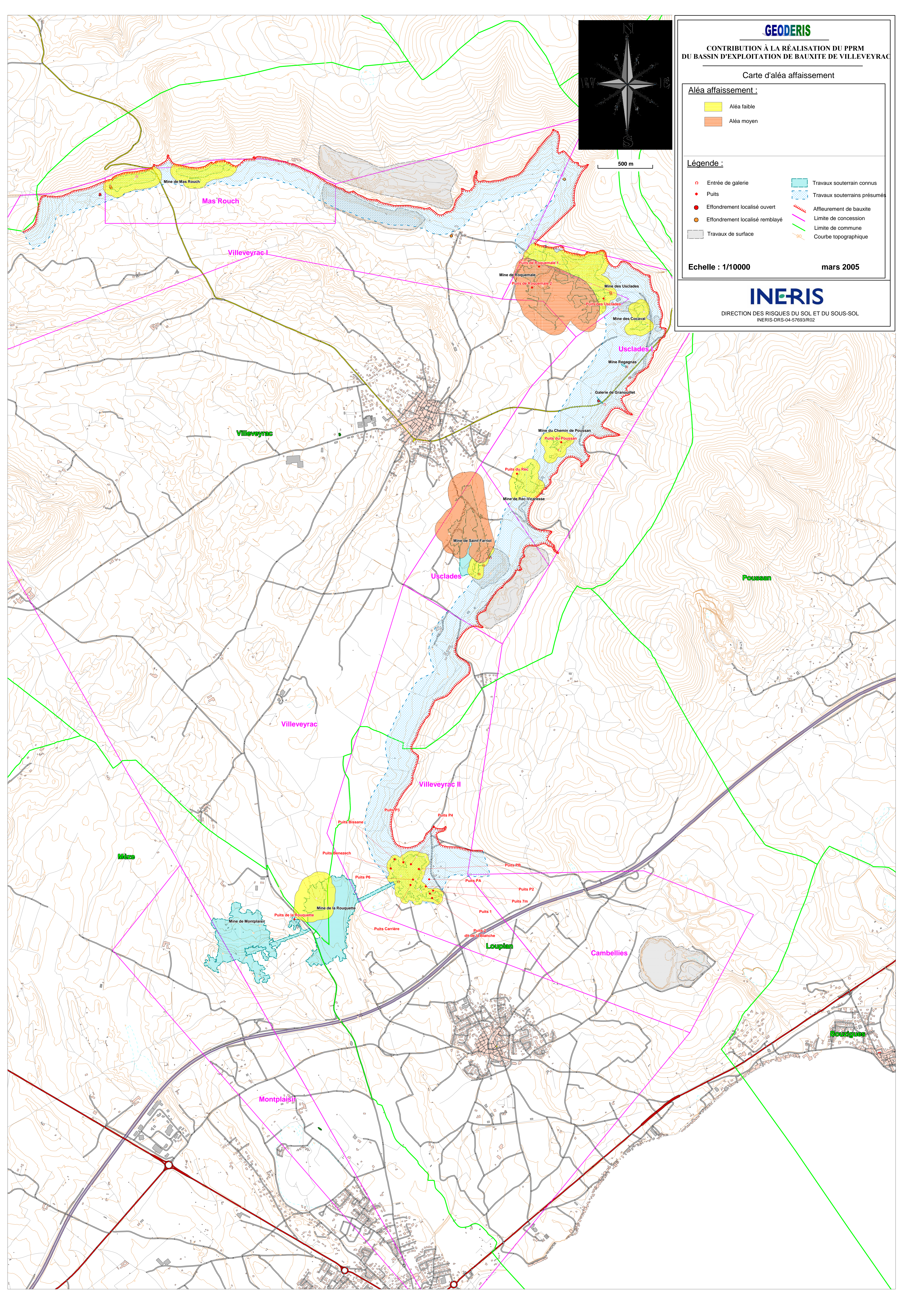
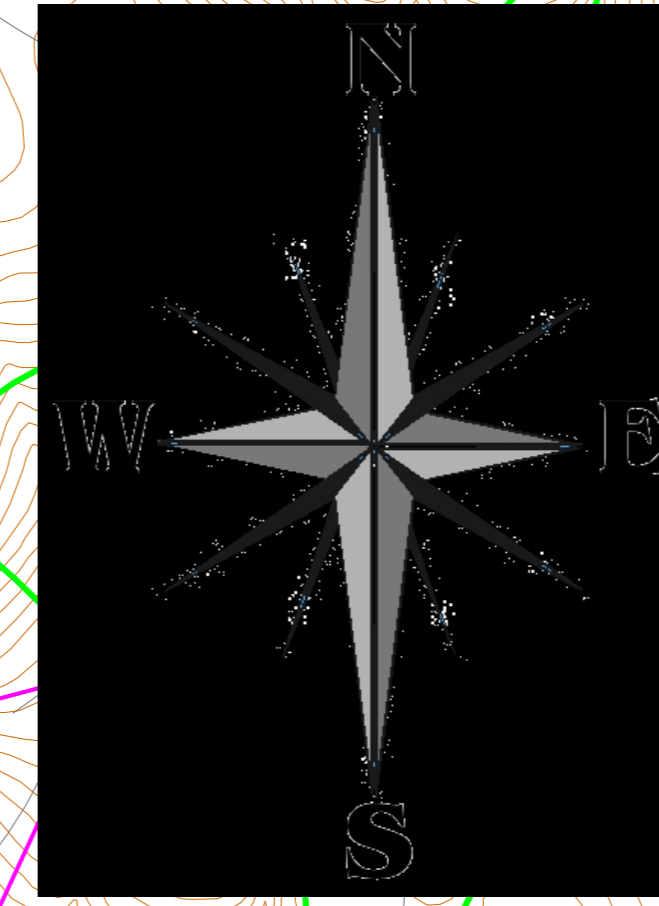
- Entrée de galerie
- Puits
- Effondrement localisé ouvert
- Effondrement localisé remblayé
- Travaux de surface
- Travaux souterrains connus
- Travaux souterrains présumés
- Affleurement de bauxite
- Limite de concession
- Limite de commune
- Courbe topographique

Echelle : 1/10000

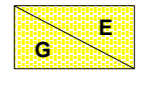
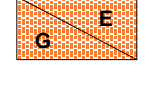
mars 2005

INERIS






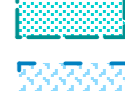





DIRECTION DES RISQUES DU SOL ET DU SOUS-SOL
INERIS-DRS-04-57693/R02



Aléa glissement de terrain :

-  Aléa faible (G : Glissement , E : Ecrolement)
-  Aléa moyen (G : Glissement , E : Ecrolement)

Légende :

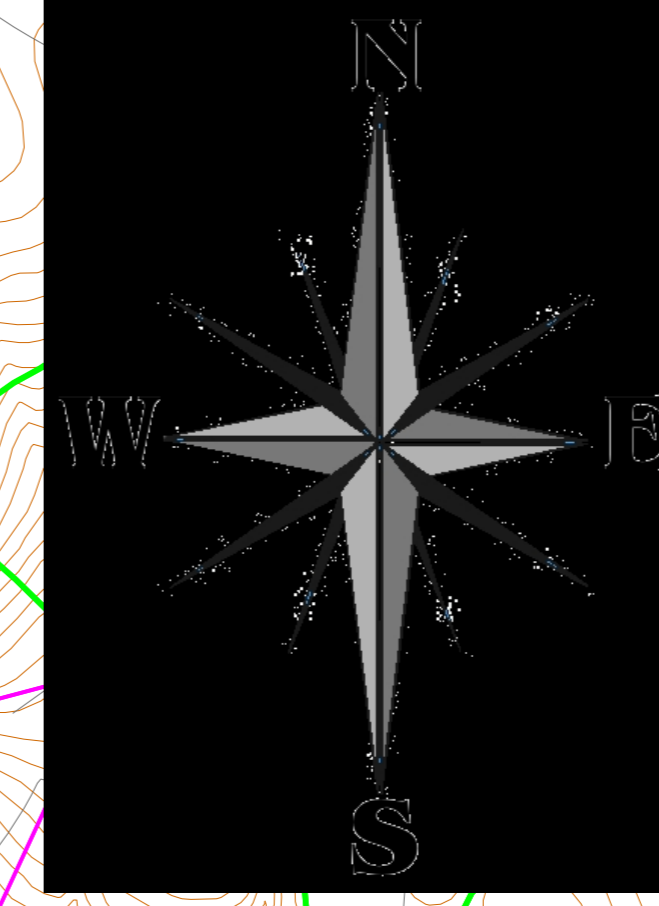
-  Entrée de galerie
-  Puits
-  Effondrement localisé ouvert
-  Effondrement localisé remblayé
-  Travaux de surface
-  Travaux souterrain connus
-  Travaux souterrain présumés
-  Affleurement de bauxite
-  Limite de concession
-  Limite de commune
-  Courbe topographique

Echelle : 1/10000

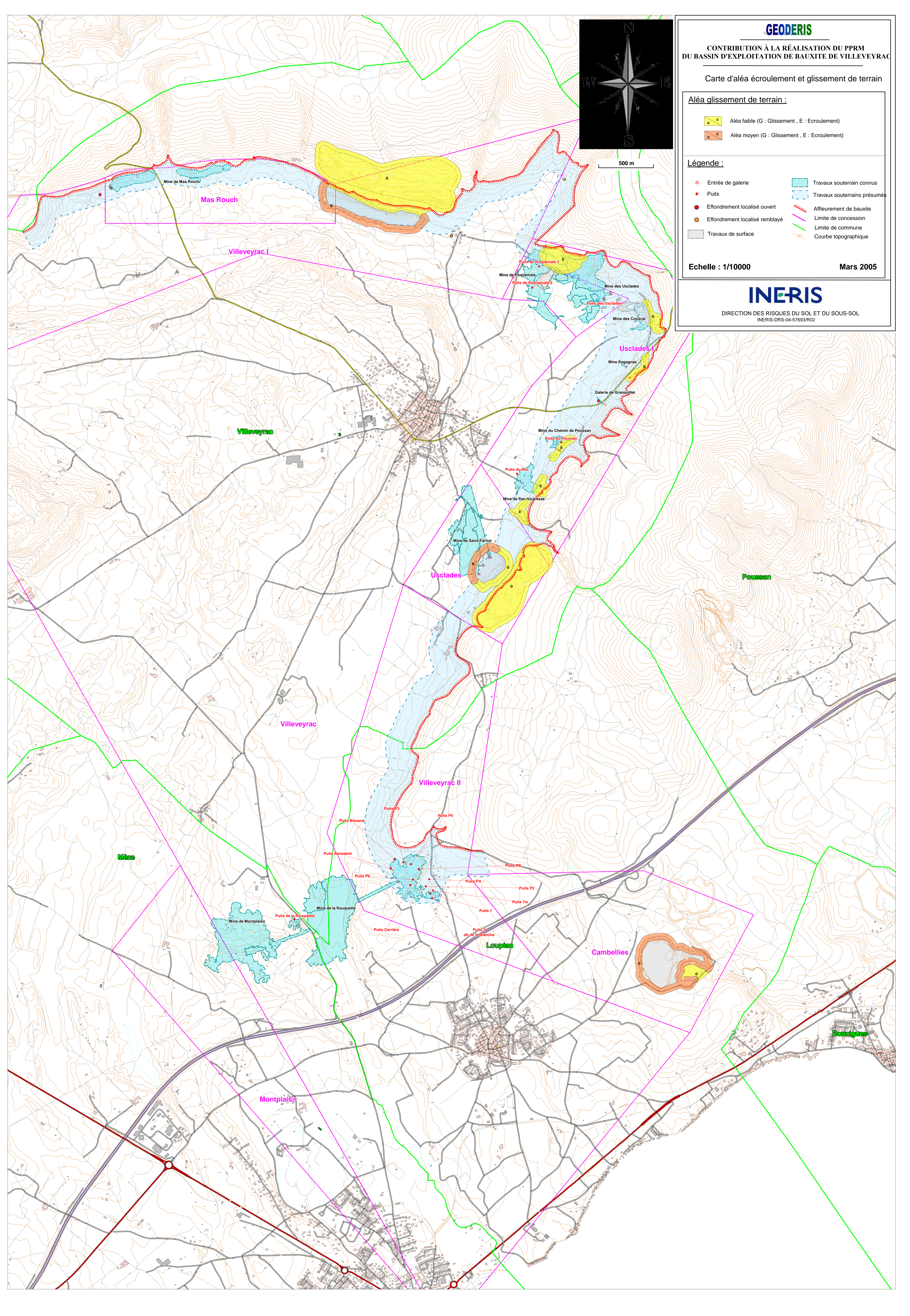
Mars 2005

INERIS

DIRECTION DES RISQUES DU SOL ET DU SOUS-SOL
INERIS-DRS-04-57693/R02



500 m



Aléa émission de gaz de mine :

Aléa faible

Légende :

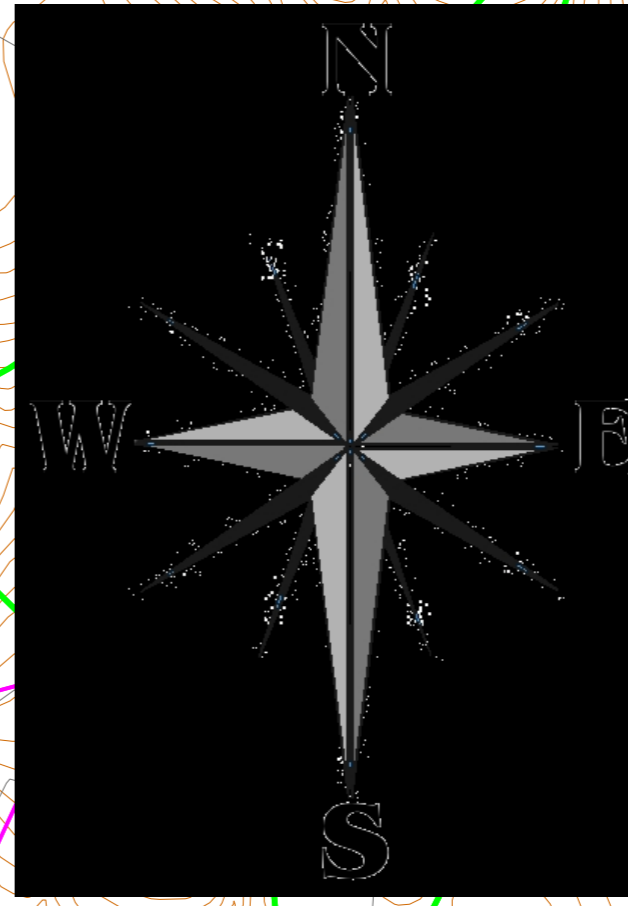
- | | |
|----------------------------------|------------------------------|
| o Entrée de galerie | Travaux souterrains connus |
| • Puits | Travaux souterrains présumés |
| ● Effondrement localisé ouvert | Affleurement de bauxite |
| ● Effondrement localisé remblayé | Limite de concession |
| ■ Travaux de surface | Limite de commune |
| | 90 Courbe topographique |

Echelle : 1/10000

mars 2005

INERIS

DIRECTION DES RISQUES DU SOL ET DU SOUS-SOL
INERIS-DRS-04-57693/R02



500 m

