

**Qualification de l'aléa fontis
Méthodologie pour le bassin ferrifère lorrain**

DIFFUSION :

DRIRE	J. GOELLNER, JF. LAIGRE, A. MARNET
Pôle après-mine	B. HELBLING
GEODERIS	JP. JOSIEN, R. HADADOU, D. MIDOT, S. TREBUCQ, E. EQUILBEY, C. FRANCK
Experts Fer	G. VOUILLE, J.P. PIGUET, C. DIDIER

Réf : GEODERIS E2006/320DE – 06LOR2500

Date : 01/09/2006

	Rédaction	Vérification	Approbation
NOM	JP. JOSIEN	C. FRANCK	R. HADADOU
Visa			

**Qualification de l'aléa fontis
Méthodologie pour le bassin ferrifère lorrain**

SOMMAIRE

1 – Contexte et objectifs..... 3

2 – Rappel sur l'aléa fontis..... 3

 2.1 – Description du fontis..... 3

 2.2 – Intensité de l'aléa 4

 2.3 – Prédisposition à la formation de l'aléa..... 4

3 – Quantification de l'aléa fontis dans le bassin ferrifère lorrain 5

 3.1 – Modélisation de l'aléa fontis..... 5

 3.2 – Intensité de l'aléa 6

 3.3 – Prédisposition de l'aléa..... 7

 3.4 – Qualification de l'aléa..... 8

4 – Validation de la méthode..... 8

 4.1 – Application à des fontis connus 8

 4.2 – Commune de Moyeuvre-Petite 9

 4.3 – Moyeuvre-Grande..... 10

 4.4 – Hayange 12

 4.5 – Ottange..... 14

5 – Traitement du risque 15

6 - Programme de travail..... 16

Mots clés :

1 – CONTEXTE ET OBJECTIFS

Compte-tenu de la surface du bassin ferrifère lorrain (1700 km²), la constitution des cartes d'aléa permettant l'enclenchement de la procédure de PPRM s'est faite sans quantifier l'aléa fontis selon tous les critères techniques nécessaires : dans un premier temps toute zone où pouvait être supposé un vide à moins de 50 m de profondeur a été considérée comme étant susceptible d'un aléa de type fontis. En effet, les études générales d'aléa étant menées sur plan uniquement, GEODERIS ne disposait pas à ce moment des données nécessaires pour évaluer le niveau d'aléa (hauteur et largeur des vides miniers, nature du recouvrement, état des travaux miniers, ...)

Le croisement des cartes d'aléa avec l'occupation de la surface fait apparaître des zones de risque où des enjeux sont menacés par les aléas. Dans le cas du fontis, de très importantes campagnes de reconnaissance sont entreprises pour préciser le risque. A l'issue des investigations, nous disposons des données permettant une réelle évaluation de l'aléa fontis. Des situations très différentes apparaissent alors en ce qui concerne les effets en surface. Une galerie de grande section à très faible profondeur peut évoluer vers de larges cavités susceptibles de dégâts structuraux sur des habitations alors qu'une galerie de faible section plus profonde ne pourra se traduire que par de faibles mouvements comparables à des tassements.

Les objectifs de ce rapport sont de proposer la méthodologie permettant de quantifier le niveau d'aléa fontis à partir des données acquises par les campagnes de reconnaissance et d'en déduire les mesures de traitement du risque attachées à chaque niveau d'aléa.

Dans une première partie seront rappelées la définition de l'aléa fontis et les recommandations du guide réalisé par le Ministère de l'Industrie et pour l'estimation du niveau d'aléa. Dans une deuxième partie, seront proposés les critères permettant d'estimer le niveau d'aléa, pertinents pour le bassin ferrifère lorrain. Une troisième partie présentera la validation de la méthode en l'appliquant aux différentes zones reconnues. Enfin, seront proposées les mesures de traitement du risque en fonction du niveau d'aléa.

2 – RAPPEL SUR L'ALEA FONTIS

De manière générale, un aléa est défini comme un phénomène redouté pouvant atteindre une certaine intensité donnée avec une certaine probabilité. Le niveau de l'aléa sera donc estimé à partir des facteurs déterminant son intensité d'une part et sa probabilité d'occurrence d'autre part. Pour les phénomènes géotechniques anthropiques ou naturels qui ne sont pas répétitifs, la probabilité d'occurrence est remplacée par la prédisposition du site à la réalisation du phénomène.

2.1 – DESCRIPTION DU FONTIS

Le fontis se constitue par la remontée progressive d'une cheminée à partir d'un vide souterrain. Lorsque cette cheminée est à proximité de la surface, elle débouche sous forme d'un "entonnoir" dont les dimensions sont fonction du vide disponible sous terre et de la nature des terrains de surface.

Deux circonstances sont susceptibles d'arrêter le phénomène de remontée de fontis :

- La stabilisation du vide souterrain ; c'est en particulier le cas lorsqu'un banc résistant, épais et non fracturé se trouve dans le recouvrement.
- L'autocomblement du vide par foisonnement des terrains dans la cheminée de remontée de fontis. Le phénomène s'arrêtera lorsque le volume foisonné de la cheminée sera égal au volume accessible dans la cavité et de la cheminée.

2.2 – INTENSITE DE L'ALEA

L'intensité de l'aléa caractérise sa dangerosité vis à vis des personnes et des biens ; ce sont les dimensions de "l'entonnoir" en surface qui vont évidemment déterminer ce niveau de danger. On modélise la cavité formée par le fontis en surface par un tronc de cône (fig. 1) défini par 2 paramètres : le diamètre et la profondeur.

Le guide PPRM propose de retenir le diamètre, plus facile à prévoir a priori, comme valeur caractéristique de l'intensité de l'aléa et donne des valeurs seuils indicatives (tableau ci-dessous). On verra ci-dessous que dans la modélisation du cratère de fontis en surface, le diamètre n'est plus significatif pour les petits fontis ; il est plus opératoire de retenir parallèlement des seuils sur la profondeur du fontis (tableau ci-dessous).

Classe d'intensité	Diamètre du cratère	Profondeur du cratère
Très limité	Effondrement auto-remblayé (profondeur centimétrique)	
Limitée	$\varnothing < 3 \text{ m}$	$l < 0,50 \text{ m}$
Moyenne	$3 \text{ m} < \varnothing < 10 \text{ m}$	$0,5 < l < 2 \text{ m}$
Elevée	$\varnothing > 10 \text{ m}$	$l > 2 \text{ m}$

Les paramètres qui influent sur l'intensité sont la profondeur du vide souterrain et l'épaisseur des terrains déconsolidés en surface.

2.3 – PREDISPOSITION A LA FORMATION DE L'ALEA

Pour classer la prédisposition à la formation de l'aléa, le guide PPRM retient 3 classes de paramètres :

- Présence des phénomènes analogues sur le site ou dans des configurations (géologie, conditions d'exploitation, ...) identiques.
- Paramètres liés à la prédisposition à la rupture de l'ouvrage souterrain : il s'agit principalement de la largeur de la galerie ou de la chambre et de la nature des premiers bancs (épaisseur, résistance, fracturation).
- Paramètres liés à la prédisposition à la remontée de l'instabilité jusqu'en surface : on retrouve ici la nature et l'épaisseur des bancs du recouvrement qui détermineront le coefficient de foisonnement ou la formation d'une voûte stable. Nous proposons d'y ajouter l'importance des circulations d'eau.

3 – QUANTIFICATION DE L'ALEA FONTIS DANS LE BASSIN FERRIFERE LORRAIN

Les analyses faites dans ce chapitre sont liées à l'environnement du bassin ferrifère lorrain et ne doivent pas être utilisées directement en dehors de ce bassin de risque.

3.1 – MODELISATION DE L'ALEA FONTIS

Pour estimer l'intensité de l'aléa, il faut prévoir les dimensions du cratère formé en surface ; on retient habituellement le fontis maximum qui se formerait lorsque la cheminée de fontis atteint les terrains non cohésifs en surface. On admet alors, dans la configuration la plus pessimiste, un comportement pulvérulent de ces terrains avec un angle de talus naturel de 45° et l'on assimile le cratère du fontis à un tronc de cône dont la profondeur sera égale à l'épaisseur des terrains de surface et le diamètre à $2(r + a)$, r étant le rayon de la cheminée de remontée de fontis (figure 1).

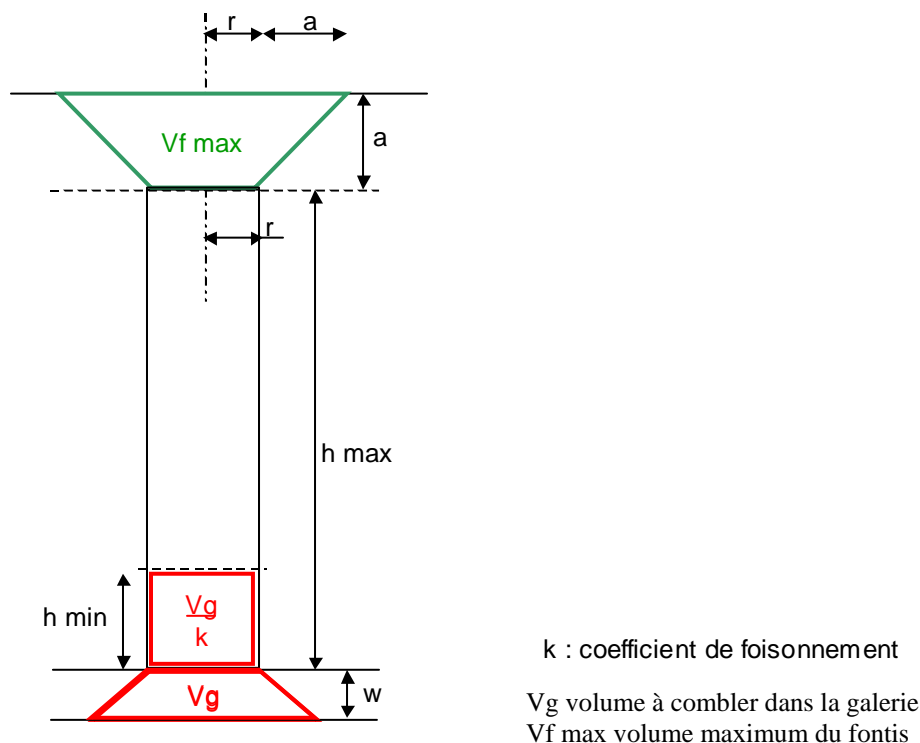


Figure 1 : modélisation de la formation d'un fontis

Cette estimation est extrêmement sécuritaire ; d'une part les terrains de surface ne sont pas pulvérulents et les angles du bord du cratère sont plus verticaux que 45° au moins lors de la formation soudaine du fontis.

D'autre part, ce fontis "maximum" ne peut se former que si la cheminée de remontée de fontis présente un vide suffisant pour l'accueillir.

L'annexe 1 montre que, dès que la profondeur des travaux miniers est suffisante, ce fontis maximum n'est possible que pour des géométries qui ne sont rencontrées qu'exceptionnellement : hauteur de vide de l'ordre de 10 m. Ce cas, sans préjuger d'autres critères, dont les caractéristiques géologiques des terrains sous jacents, pourrait par exemple correspondre à l'exploitation de deux couches en simultanée.

L'annexe 1 propose une modélisation de la cuvette de fontis tenant compte du volume disponible dans la cheminée de remontée. Elle garde une cuvette de même forme en tronc de cône avec des angles de 45° mais avec une profondeur compatible avec le volume disponible.

En fonction des dimensions du vide dans les travaux souterrains, deux hauteurs de recouvrement peuvent être déterminées :

- La hauteur (h max) telle que le volume foisonné de la cheminée soit égal au volume accessible du vide souterrain augmenté du volume de la cheminée
- La hauteur (h min) telle que le volume foisonné de la cheminée soit juste égal au volume accessible à des travaux souterrains.

On distingue alors les cas suivants selon la profondeur P du vide souterrain :

- $P \geq h \text{ max}$: le fontis est bloqué par autofoisonnement, il n'y a pas d'aléa
- $h \text{ max} > P \geq h \text{ min}$: les caractéristiques de la cuvette de fontis en surface ne dépendent pas de la hauteur de terrains non cohésifs en surface. Elles peuvent être approchées par les formules suivantes :

profondeur du cratère : $l = w k (1 - P/h \text{ max})$

diamètre du cratère $2 [r + w k (1 - P/h \text{ max})]$

avec w : ouverture du vide souterrain

k : coefficient de foisonnement

r : rayon de remontée de fontis

- $P < h \text{ min}$: la cheminée du fontis ne suffit pas à combler le vide souterrain. Dans ce cas, on retiendra en première approche (sécuritaire) le fontis maximum lié à l'épaisseur des terrains non foisonnants de surface ; ce fontis reste une limite également dans le cas précédent.

3.2 – INTENSITE DE L'ALEA

L'intensité de l'aléa sera qualifiée de limitée lorsque la profondeur du cratère est inférieure à 0,50 m. On préfère, dans ce cas, le critère de profondeur, car du fait de la forme choisie dans le modèle du cratère, le diamètre du fontis reste toujours supérieur au diamètre de remontée de fontis, égal à la largeur de la galerie (limité à 6 m).

C'est donc bien la profondeur qui sera alors caractéristique de la dangerosité.

Les zones où la modélisation donne une profondeur de fontis supérieure à 2 m seront considérées comme susceptibles d'aléa d'intensité forte. Dans ce cas, le diamètre est effectivement supérieur à 10 m pour les diamètres de remontée de fontis de 6 m. Pour les diamètres inférieurs le seuil de 2 m de profondeur du cratère est du côté de la sécurité par rapport au seuil de 10 m pour le critère de diamètre.

3.3 – PREDISPOSITION DE L'ALEA

La profondeur P du vide souterrain a été prise en compte en la comparant à la hauteur maximum de remontée de fontis.

Pour la largeur de la galerie, 3 classes ont été choisies à partir des observations de la tenue des toits dans les mines de fer de Lorraine : $L < 3 \text{ m}$; $3 \text{ m} \leq L < 5 \text{ m}$; $L \geq 5 \text{ m}$.

Les critères de fracturation du toit de la galerie et de venue d'eau ne sont pas toujours renseignables ; il faut que la galerie soit directement visitable. Ces critères qualitatifs ne seront pris en compte que s'ils sont disponibles.

La présence de phénomènes de fontis (actuels ou anciens) dans la zone sera un facteur important pour augmenter la sensibilité de celle-ci au phénomène de fontis. On tient compte également de l'existence hors zone à condition que l'environnement des chantiers soit similaire.

La densité de vide dans la zone est également un facteur de prédisposition : si l'aléa fontis est étudié sur une galerie, la présence de ce vide est attestée ; par contre dans le cas de vieux chantiers plus ou moins remblayés par des murs de pierre stérile ou dans les dépilages anciens, la présence de vide n'est que suspectée.

Le soutènement des vides souterrains n'est pas un facteur retenu en ce qui concerne les cadres de bois et métalliques et le boulonnage ; ceux-ci ont, en effet, été mis en place dans les zones les plus fracturées et sont généralement déjà fortement dégradés. Par contre, on retiendra comme un facteur de prédisposition favorable le revêtement par maçonnerie de la galerie s'il est en bon état.

Quelques infrastructures importantes ont été bétonnées, ce qui ne permet pas au fontis de s'amorcer. Indépendamment des autres facteurs, on classera ces cas en aléa de niveau très faible pour uniquement garder la mémoire de l'existence d'un vide (pas d'utilisation inhabituelle de la zone).

La détermination de la prédisposition est faite par expertise en tenant compte des facteurs reconnus in situ selon le tableau ci-après :

Prédisposition	Largeur de galerie	Phénomènes semblables connus	Nature de recouvrement	Densité du vide	Fracturation du toit	Venue d'eau	Soutènement
Très sensible	$L \geq 5$ m	Oui	Peu résistant	Avéré	Mauvais	Importante	Cadre ou boulonnage
Sensible	$3 \text{ m} \leq L < 5$ m		Moyen		Moyen	Moyen	
Peu sensible	$L < 3$ m	Non	Résistant	Suspecté	Bon	Faible	Maçonnerie béton

3.4 – QUALIFICATION DE L'ALEA

Le niveau de l'aléa sera obtenu par croisement de son intensité avec sa prédisposition

Intensité	Prédisposition		
	Peu sensible	Sensible	Très sensible
Limitée	Très faible	Faible	Moyen
Modérée	Faible	Moyen	Fort
Elevée	Moyen	Fort	Très fort

L'aléa très faible peut être assimilé aux mouvements résiduels. L'aléa très fort est de même niveau que l'aléa effondrement localisé (rupture d'un ou de quelques piliers à faible ou moyenne profondeur).

4 – VALIDATION DE LA METHODE

On trouvera en annexe 2 le tableau des données ayant été utilisé dans ce chapitre ainsi que les cartes et plans.

4.1 – APPLICATION A DES FONTIS CONNUS

- Galerie des V1 à Thil (54)

Deux fontis très importants se sont produits à Thil sur une galerie exceptionnelle recreusée pendant la dernière guerre pour construire des fusées V1. La base de ces fontis est encore accessible au fond ce qui permet de connaître les caractéristiques du chantier.

Pour une ouverture de 6 m, une largeur de 12 m, et une profondeur de 25 m, le calcul donne un fontis de 5,3 m de profondeur et de 8,3 m de rayon pour des valeurs observées au jour (estimées sur photo) de 5 m et 9 m.

L'intensité est élevée et la prédisposition serait qualifiée de très sensible (largeur de la galerie supérieure à 5m, venue d'eau, recouvrement peu résistant).

L'aléa attaché à cette zone aurait donc un niveau très fort.

- Quartier Curel à Moyeuve Grande

Plusieurs fontis se sont produits dans le quartier Curel à Moyeuve-Grande au dessus de chantiers d'élargissement de 2,3 m d'ouverture et de l'ordre de 5 m de large. Ces fontis avaient de 1 m à 1,5 m de profondeur pour des rayons de l'ordre de 3 m. La prévision donnerait pour une profondeur de 6 m des fontis de 1,6 m de profondeur et de 4,1 m de rayon.

L'intensité serait qualifiée de modérée et la prédisposition de sensible (largeur galerie moyenne, toit de la galerie résistant, mais recouvrement peu résistant).

Le niveau d'aléa correspondant à ce cas serait de moyen.

- Rue des marronniers à Ottange

Deux fontis se sont produits sur la galerie du personnel (ouverture 3,0 m, largeur 3,5 m) sous minant à faible profondeur (5 à 8 m) la rue des marronniers à Ottange ; les fontis avaient une profondeur de 1,5 et 5 m pour des rayons de 1,25 et 2,35m. Du fait de la très faible profondeur, c'est le fontis maximum lié aux terrains non pulvérulents de surface qui aurait été retenu (profondeur 5 m, rayon 6,25).

(Le rayon est très supérieur à la valeur observée du fait des parois verticales et non pentées à 45°).

L'intensité est modérée pour le premier fontis et élevée pour le deuxième ; la méthode de prévision l'aurait évaluée à élevé. La prédisposition aurait été évaluée à sensible (largeur > 3m, venue d'eau moyenne, passage de faille dans la zone). L'aléa ressort donc avec un niveau fort.

Remarque : il est normal que pour des fontis observés, la prédisposition à l'aléa soit plutôt sensible (ou très sensible) que peu sensible. C'est en effet alors que l'occurrence du phénomène est la plus probable.

4.2 – COMMUNE DE MOYEUVE-PETITE

Tout le centre du village est sous-miné par une exploitation par chambres et piliers située à moins de 50 m de profondeur (zone A063-156-158A1).

L'ensemble des travaux étant ennoyé la reconnaissance s'est faite par sondages. Les galeries ont une ouverture de 3,5 m pour une largeur de 3 m ; la hauteur maximum de remontée de fontis de 35 m y compris l'épaisseur des terrains de surface non cohésifs estimée à 5 m.

Le recouvrement étant supérieur à 22 m, la profondeur d'un fontis attendu serait toujours inférieure à 2,1 m, d'où une intensité de l'aléa variant de élevée (sur une petite zone) à limitée en allant vers le nord à partir du puits de pompage (mairie).

La prédisposition a été évaluée à peu sensible du fait de la largeur limitée de la galerie, de la nature du toit et du recouvrement apprécié à partir des sondages et de l'ennoyage de la zone qui limite les circulations d'eau.

Une zone d'aléa de niveau moyen est donc retenue sur la partie la plus basse dans la vallée du Conroy (puits de pompage et mairie) et une zone d'aléa faible plus au nord.

4.3 – MOYEUVRE-GRANDE

Plusieurs zones ont été individualisées sur la commune de Moyeuivre-Grande correspondant à des localisations et des méthodes d'exploitation différentes.

- Moulin de la Frapouille (A156-158A1)

Le recalage des plans du fond par rapport à la surface a permis d'exclure les bâtiments concernés. Il n'y a donc plus de zone de risque associée. Le classement de la zone d'aléa a cependant été effectué.

Les travaux miniers sont constitués de galerie de 2,2 m d'ouverture sur 2,5 m de large en avant d'un défilage et du défilage correspondant (sur courte taille ou sur élargissement). Du fait de la faible taille des vides la remontée de fontis est limitée à 20 m (y compris terrain de surface).

Le recouvrement variant de 5 à 20 m, l'intensité de l'aléa varie de élevée à limitée entre la vallée au sud et le plateau.

La prédisposition est peu sensible du fait de la faible largeur de la galerie et de la nature des terrains.

Deux niveaux d'aléa ont été individualisés : un niveau moyen sur les galeries les moins profondes et un niveau faible sur les galeries les plus profondes et le défilage.

- Rue de la Délivrance (A158I1)

Il s'agit ici d'une galerie qui sous mine 2 bâtiments ; elle a été réouverte.

Les dimensions de la galerie sont de 2,5 m d'ouverture et 2,5 m de large. La hauteur maximum de remontée de fontis est de 22 m. Le recouvrement variant de 5 à 22 m, l'intensité de l'aléa varie d'élevée à limitée.

La prédisposition a été estimée à sensible malgré la faible largeur de la galerie du fait de la fracturation du toit et de venue d'eau observée mais non importante.

3 niveaux d'aléa sont donc rattachés à cette galerie de fort à faible selon l'épaisseur du recouvrement. Les bâtiments se trouvent dans une zone d'aléa en niveau moyen.

- Cité Wendel (A156-158-163-168 AM1)

Cette grande zone au centre de la ville est sous-minée par des travaux très anciens (minière). Il s'agit de petits chantiers remblayés par des murs de pierres triées au chantier.

Les vides résiduels ont pu être estimés à partir de quelques visites : ouverture résiduelle 1,5 m pour des largeurs de 1,2 m. La très faible taille de ces vides fait que le fontis ne peut remonter au delà d'une quinzaine de mètres et que pour un recouvrement supérieur à 5 m, une intensité élevée peut être exclue.

La prédisposition est peu sensible d'après l'ensemble des critères y compris la densité de vide dans la zone.

L'analyse conclut donc à ne conserver au-dessus des minières qu'une bande longeant le plateau en aléa fontis faible. Au-delà sur la cité Wendel, on gardera une zone de mouvement résiduel.

Trois galeries modernes ont été recreusées ensuite à travers cette zone. Les caractéristiques géométriques y sont plus fortes : ouverture et largeur de 2,5 m. La hauteur de remontée de fontis est donc plus élevée (20 m) et l'intensité également.

La prédisposition reste peu sensible, ce qui définit deux niveaux d'aléa moyen à l'extrémité des galeries et faible ailleurs.

- Franchepré (A158I1)

Le plateau situé à l'ouest de celui de la cité Wendel a été exploité également par minière au niveau des affleurements à l'est et au sud (sous le cimetière), l'exploitation a ensuite été menée par élargissements plus ou moins dépilés à partir des entrées de la mine de Franchepré. Les conditions sont très différentes entre ces zones.

- Partie minière (A158I1-1)

Les conditions sont très semblables à celles de la cité Wendel avec une ouverture résiduelle un peu plus forte (2 m) et une largeur identique. La remontée de fontis est limitée à 21 m et l'intensité varie de élevée (à proximité des affleurements) à très limitée. La prédisposition est peu sensible. L'intensité de l'aléa est donc moyenne sur le pourtour du promontoire et faible au-delà.

- Quartier de la Poudrière (A158I1-3).

La partie ouest à partir de l'entrée de la poudrière a été exploitée par élargissement puis redécoupée en laissant des piliers de minerai de faible dimension ou en soutenant par des piliers de pierres triées au chantier. Selon la profondeur de l'exploitation, les phénomènes suivants peuvent se produire.

- Pour la partie la plus profonde, les piliers résiduels sont en moyenne chargés à plus de 75 bars, un aléa effondrement brutal est retenu (zone A158K1)
- Pour des profondeurs plus faibles, la charge moyenne des piliers est inférieure à 75 bars permettant d'exclure l'effondrement général de la zone ; par contre du fait de l'hétérogénéité des tailles de piliers, les plus petits sont susceptibles de se rompre entraînant du fait de la profondeur inférieure à 50 m des effondrements localisés, effet assimilable à des fontis d'intensité très élevée.
- Dans les zones de profondeur inférieure à 25 m, on trouve des vides de 2 m de haut et de largeur 5 m (élargissement) ou 10 m (chambre) susceptibles de donner lieu à des fontis d'intensité moyenne à forte selon l'épaisseur du recouvrement qui varie de 5 à 25 m.

La prédisposition est évaluée à très sensible du fait de la largeur des vides et également de l'état avancé de fracturation des toits.

Il résulte un classement en niveau fort de l'aléa.

Sur l'ensemble du secteur de la Poudrière, 8 bâtiments sont concernés par des aléas fontis de niveau fort ou effondrement localisé.

- Au nord se trouve un quartier d'élargissage (A158I1(2)) soutenu par des piliers de pierres ; la largeur des vides est ramené à 2,5 m. La hauteur de recouvrement supérieure à 18 m est proche de la hauteur maximum de remontée de fontis (21 m). L'intensité de l'aléa est limitée (profondeur inférieure à 0,50), les conditions sont meilleures que dans la partie précédente en ce qui concerne la largeur des chantiers et l'état du toit ; la prédisposition est donc sensible et l'aléa est donc faible.

- Cité Lorraine (163A1)

Il s'agit de galeries d'infrastructure de 2 m d'ouverture et 3 m de large. La profondeur de remontée de fontis est de 15 m ; compte-tenu des hauteurs de recouvrement (5 à 15 m) l'intensité de l'aléa varie entre moyenne et faible. La prédisposition a été évaluée à sensible compte-tenu de la largeur moyenne de la galerie et de l'état moyen du toit.

Les niveaux de l'aléa sont donc moyen pour la partie basse et faible pour la partie haute (au sud).

4.4 – HAYANGE

La série ferrifère affleure en bas des coteaux ; les vallées découpent des zones exploitées par différentes mines.

- La Ceriseraie – mine de la côte d'Hayange (A156P1 (1)).

A partir des affleurements à l'ouest, on trouve les galeries d'infrastructure d'accès au gisement (comme la galerie de Bellevue au nord), des zones de traçage à partir d'une galerie de niveau, enfin des zones de dépilage sur élargissage ou sur courte taille. Les galeries ont pu être visitées et mesurées ; on a pu pénétrer dans quelques zones de dépilage qui ont révélé des galeries ou des élargissements non éboulés (A156QD1 (2), A156QD1 (4), A156QD1 (3)).

Les galeries ont des ouvertures généralement comprises entre 3 et 3,5 m et des largeurs comprises entre 2 et 3 m. Dans les traçages, l'ouverture peut être plus faible (2,5 m). Le tableau en annexe 2 donne les détails pour chaque partie de galerie.

L'intensité de l'aléa est généralement limitée ou moyenne, une valeur élevée n'est attendue que pour les galeries dont le recouvrement est le plus faible, c'est à dire l'extrémité débouchant des galeries d'infrastructure et la voie de niveau orientée nord sud et située à l'ouest (A156QE1, A156QE2).

La prédisposition est en général sensible ou peu sensible sauf pour quelques zones où l'état de fracturation du toit ou l'importance des venues d'eau ont entraîné un classement en très sensible : 156QB2 à proximité de la sortie de la galerie d'infra, 156QC1(2), 156QD(2), en bordure des dépilages.

En conclusion l'aléa est généralement d'intensité faible à moyenne ; 6 petites zones relèvent d'un aléa de niveau fort :

A56QB1, 156QB2 : entrée de la galerie d'infrastructure au nord est (1 bâtiment)

156QC1 (2) : galerie d'infra est ouest (1 bâtiment)

156QD1 (2), 156QE1 (1), 156QE2 : galerie de niveau nord-sud (1 bâtiment)

L'entrée de la galerie de Bellevue est classée en aléa faible car elle est bétonnée.

- Cité Bellevue – Mine de la côte Dupont (A156P1(2))

L'exploitation a été effectuée à l'est en couche grise en élargissage avec une reprise de piliers et remblayage par pierres sèches triées au chantier.

Aucune entrée n'a été trouvée dans ces zones. Au nord, la couche brune sous jacente a en plus été exploitée par élargissage.

Dans le cas de 2 couches exploitées, les calculs de remontée de fontis sont menés de la manière suivante :

- ✓ Calcul dans la couche inférieure

Remontée de fontis inférieure à l'épaisseur de l'intercalaire : pas d'influence

Sinon, si la couche supérieure est dépilée entièrement : on considère l'épaisseur de la zone foudroyée comme terrain non foisonnant (soit 2,5 fois l'ouverture de la couche supérieure).

Si la couche supérieure est remblayée : on considère l'épaisseur de la couche comme terrain non foisonnant.

S'il existe des galeries ou vides dans la couche supérieure : on effectue le calcul de remontée de fontis avec les caractéristiques de la couche supérieure en ajoutant le vide restant à combler de l'intercalaire.

- ✓ Enfin, on effectue les calculs dans la couche supérieure.

Compte tenu de la profondeur de la couche brune et de l'épaisseur de l'intercalaire, cette couche a ici peu d'effet sur l'aléa fontis.

Les ouvertures des galeries sont très variables entre 2 et 4 m généralement. Les largeurs de galeries sont faibles, très souvent de l'ordre de 2 m.

L'intensité de l'aléa, calculée sur chaque sous-zone en fonction de sa profondeur, est limitée ou moyenne sauf pour 11 cas correspondant principalement à des zones de sortie de galeries d'infrastructure à très faible profondeur.

La prédisposition est qualifiée de sensible ou peu sensible compte tenu de la faible largeur des galeries, de l'état de fracturation du toit bon à moyen et de l'importance des venues d'eau. Aucune zone de forte dégradation du toit n'a été relevée.

L'aléa est donc de niveau faible ou moyen selon la position par rapport à la pente du recouvrement. 6 zones d'aléa fort ont été trouvées :

- 156IV5 (3) : au nord passage d'une galerie d'infrastructure en couche noire à faible profondeur - 2 bâtiments
- 156IV8 (1) : au nord ouest sortie au jour de la galerie d'infrastructure - pas de bâtiment
- 156IV6 (1), 156IV6 (2), 156IV6 (3) : galerie et exploitation de la couche grise au nord ouest à faible profondeur - pas de bâtiment
- 156PB : au sud galerie d'infrastructure en couche grise à faible profondeur - pas de bâtiment

- Bois du chêne – mine de la cote de Fesche

Il s'agit de très vieux travaux exploités par petits chantiers (comme les minières) à partir d'une infrastructure arborescente. La hauteur des vides retrouvés est de 2,5 à 3 m avec des largeurs généralement inférieures à 2 m. Cette zone est traversée par 2 tunnels plus modernes qui ont pu être visités et mesurés : hauteur 5 m et largeur 3,5 m pour les travers bancs à l'ouest, hauteur 3,4 à 4,5 m et largeur 2,7 m pour le tunnel est.

Du fait des très faibles profondeurs d'exploitation, l'intensité de l'aléa peut atteindre le niveau élevé malgré la faible taille des vides souterrains.

La prédisposition est en général peu sensible du fait de la faible largeur des galeries, du bon état de leur toit et de l'absence de venue d'eau.

Trois zones d'aléa de niveau fort ont été retenues :

- 156RG2 : Galerie et chantier au sud à très faible profondeur – 1 bâtiment
- 156RG4 : Galerie au sud à faible profondeur – pas de bâtiment
- 156RL3 : Vieux chantier à très faible profondeur – pas de bâtiment

4.5 – OTTANGE

Dans l'étude de l'INERIS (DRS-06-72321/R08) fournie par l'Arbed pour préciser le risque de fontis sur Ottange, les 2 approches, autofoisonnement et stabilité de la voûte formée par les terrains ont été utilisées.

Certains travaux miniers ont des caractéristiques exceptionnelles pour le bassin ferrifère lorrain du fait de l'exploitation superposée ou en complexe de plusieurs couches : vide de 7 m d'ouverture et de 10 m de large.

L'approche par autofoisonnement donne des remontées de fontis qui peuvent largement dépasser 50 m selon le rayon choisi de la cheminée de remontée de fontis. L'INERIS propose de limiter en tout cas cette hauteur maximum à 70 m, ce qui correspond à l'expérience dans d'autres bassins de risque. L'intensité estimée par la modélisation de ces cas exclut, quelle que soit la profondeur, le niveau limité compte tenu de l'importance de l'ouverture.

De telles géométries d'exploitation n'ont été possibles que du fait de la bonne qualité géomécanique des terrains ; ceci justifie l'approche par stabilité des travaux. Un calcul géotechnique par éléments finis a été mis en œuvre par l'INERIS à partir des résultats de 2 sondages carottés. Les conclusions sont les suivantes :

Le modèle dit de référence montre que la stabilité du toit est assurée. Cette stabilité a été généralement confirmée lors de l'analyse paramétrique qui a révélé que la dégradation indépendante des différents paramètres ne la remettait pas en cause.

Cependant, si l'on dégrade simultanément les valeurs de plusieurs paramètres cruciaux (partie supérieure du recouvrement totalement pesante, portée de 9 m, $K_0 = 0,5$ déformations planes, etc...) pour la stabilité, il est possible de simuler la remontée d'instabilités jusqu'au toit des bancs supposés compétents et donc en surface.

Par conséquent, les résultats obtenus montrent que la stabilité du recouvrement est probablement assurée à long terme. En revanche, ils ne nous permettent pas d'exclure totalement la survenue d'un aléa de type fontis, même si la probabilité d'apparition d'un tel désordre nous semble faible.

L'approche par stabilité des travaux souterrains n'ayant pas totalement exclu la possibilité d'un fontis, nous proposons de retenir une prédisposition peu sensible. L'aléa dans ces zones serait alors selon la profondeur de faible ou moyen.

On retiendra une prédisposition sensible dans les configurations où les conditions du calcul ne sont pas réunies (zone de faille, proximité de défilage).

5 – TRAITEMENT DU RISQUE

Les précisions apportées au niveau d'aléa permettent de mieux définir le risque associé, donc de préciser les mesures compensatoires. Le niveau de risque est estimé par le croisement du niveau d'aléa et de la vulnérabilité des enjeux de surface. Pour un phénomène de type fontis, il est possible de classer les bâtiments selon le tableau ci-dessous. Pour les infrastructures routières, la vulnérabilité est fonction de la vitesse de circulation et de sa densité.

Vulnérabilité	Bâtiment	Infrastructure routière
Peu vulnérable	Bâtiment industriel, entrepôt, remise, garage	Voirie communale Route à faible circulation
Vulnérable	Maison d'habitation classique, petit collectif	Route nationale et départementale à forte circulation
Très vulnérable	Bâtiments spéciaux, immeuble de grande hauteur ou très élancé	Autoroute

Par croisement avec le niveau d'aléa, le niveau de risque est ainsi déterminé¹:

Vulnérabilité \ Aléa	Peu vulnérable	Vulnérable	Très vulnérable
Faible	Très faible	Faible	Moyen
Moyen	Faible	Moyen	Fort
Fort / Très fort	Moyen	Fort	Fort

Niveau de risque

¹ L'aléa très faible est assimilé à l'aléa "mouvements résiduels" et ne donnera pas lieu à détermination de zones de risque.

Un niveau de risque fort, peut mettre en danger la sécurité des personnes. L'aléa associé à ce risque aurait en effet soit une intensité élevée (profondeur supérieure à 2 m) soit une intensité modérée et une prédisposition très sensible (galerie très large, fracturation du toit, ...). En situation vulnérable, ou très vulnérable, ce type d'aléa peut s'accompagner de dégâts structuraux aux bâtiments. Dans ce cas, la surveillance est obligatoire ; sa fréquence sera adaptée à l'état de fracturation du toit.

Un niveau de risque faible ne pourrait présenter de risque pour la sécurité des personnes que de manière très exceptionnelle. La surveillance n'y est donc pas nécessaire, puisqu'il n'y aura pas de mesure à prendre avant l'apparition du phénomène.

Un niveau de risque moyen ne sera pas considéré comme mettant en cause gravement la sécurité des personnes, cependant une surveillance sera mise en place, chaque fois qu'elle est possible c'est à dire que le vide minier est réellement visitable soit par le fond (visite) soit par la surface (accessibilité par sondage). Ceci n'est pas le cas pour les petits vides aléatoires (minières, vieux chantiers remblayés, dépilages) ainsi que les travaux non accessibles par le fond avec des zones non accessibles en surface (forte densité d'urbanisation, forte pente, ...)

6 - PROGRAMME DE TRAVAIL

1) Les études en cours des zones de fontis seront conclues selon la nouvelle méthode :

- Moyeuve-Grande
- Moyeuve-Petite
- Hayange
- Nancy-Maxeville
- Villerupt

2) Les études terminées précédemment seront reprises selon la nouvelle méthode. Ceci se fera progressivement pour ne pas perturber trop fortement le programme en cours.

- Hussigny
- Thil
- Rehon
- Audun le Tiche
- Ottange

ANNEXES

ANNEXE 1

**MODELISATION D'UN FONTIS
CAS DU BASSIN FERRIFERE LORRAIN**

On considère une remontée de fontis de rayon r qui se développe au toit d'une galerie d'ouverture W (figure 1). La remontée de fontis est assimilée à un cylindre de rayon r et de hauteur h . Le volume des terrains qui s'éboule est égale à $\Pi r^2 h$.

1 – VOLUME DU FONTIS CREE EN SURFACE

- Dans un premier temps ces terrains vont en foisonnant combler le vide disponible dans la galerie. On définit ainsi une hauteur h_{\min} correspondant à ce moment. En utilisant la formulation qui a été introduite par l'INERIS dans son logiciel, et en appelant V_{galerie} le volume disponible, l'égalité du volume du cylindre foisonné et de V_{galerie} permet de calculer h_{\min} .

$$(\Pi r^2 h_{\min}) k = V_{\text{galerie}}$$

avec k le coefficient de foisonnement

- Le fontis peut ensuite continuer à remonter tant que le foisonnement des terrains ne permet pas de combler l'ensembles des vides (galerie + remontée de fontis)

$$(\Pi r^2 h_{\max}) k = V_{\text{galerie}} + \Pi r^2 h_{\max}$$

$$\Pi r^2 h_{\max} (k-1) = V_{\text{galerie}}$$

Indépendamment des autres données, h_{\min} est lié à h_{\max} par le coefficient de foisonnement.

$$\frac{h_{\min}}{h_{\max}} = \frac{k-1}{k}$$

Pour les mines de fer de Lorraine, k est généralement proche de 1,4 soit :

$h_{\min} = 0,3 h_{\max}$

- Si la profondeur P de la galerie (sans compter les terrains non cohérents de la surface) est supérieure à h_{\max} , le fontis ne peut pas déboucher au jour.
- Si la profondeur P est comprise entre h_{\min} et h_{\max} , le volume disponible pour former un fontis en surface est le volume du cylindre de remontée de fontis diminué de la part des terrains foisonnés restés dans la remontée de fontis soit :

$$V_d = \Pi r^2 P - \Pi r^2 (P - h_{\min}) k = \Pi r^2 [P - k (P - h_{\min})] = \Pi r^2 (k - 1) (h_{\max} - P)$$

On vérifie que pour $P = h_{\max}$ $V_d = 0$ (autocomblement)

Et que pour $P = h_{\min}$, $V_d = V_d_{\max} = \Pi r^2 h_{\min}$ (seule la galerie est comblée)

- Si la profondeur P est inférieure à h_{\min} , il reste du volume disponible dans la galerie (pour $P = 0$, $V_d = V_{\text{galerie}}$).

2 – DIMENSION DU FONTIS EN SURFACE

On considère habituellement que si le fontis débouche en surface, il se matérialisera selon un tronc de cône faisant l'angle de talus naturel sur l'épaisseur a des terrains non foisonnants en surface (fig. 1). On prend habituellement 45° pour l'angle de talus ce qui donne un fontis de diamètre $2(r + a)$ et de profondeur au moins égale à a .

Ceci est la dimension maximum du fontis qui peut se traduire ; elle ne sera atteinte que si le volume de ce fontis est inférieur ou égal au volume disponible V_d .

- Le volume maximum du fontis dépend du rayon r et de l'épaisseur a des terrains non foisonnants

$$V_f \text{ max} = \frac{\pi}{3} (r + a)^3 - \frac{\pi}{3} r^3 = \frac{\pi}{3} [(r+a)^3 - r^3]$$

Pour que ce fontis soit possible dès que P est supérieur à h_{min} , il faut que :

$$V_f \text{ max} \leq V_d \text{ max} = \pi r^2 h_{\text{min}}$$

(les terrains de surface sans cohésion sont considérés comme non foisonnants)

$$V_f \text{ max} \leq V_{\text{gal/k}}$$

Le tableau 1 donne pour différentes caractéristiques des sites habituellement rencontrés dans les mines de fer de Lorraine, les valeurs de volume maximum disponible dès que la profondeur P est supérieure à h_{min} . Ces valeurs sont toujours très inférieures au volume du fontis maximum correspondant à une épaisseur couramment admise ($a = 5\text{m}$). Ce n'est que pour des ouvertures de galeries de 10 m correspondant à l'exploitation de 2 couches que le fontis peut atteindre de telles dimensions.

w	r	h	hmax	Vgalerie	hmin	Vdmax	Vfontis
1	1	5	4.7	5.9	1.3	4.2	225.1
	1	10	4.7	5.9	1.3	4.2	1392.8
	2	5	3.7	18.4	1.0	13.1	350.8
	2	10	3.7	18.4	1.0	13.1	1801.2
	3	5	3.3	37.3	0.9	26.6	507.9
3	10	3.3	37.3	0.9	26.6	2272.4	
2	1	5	13.4	16.8	3.8	12.0	225.1
	1	10	13.4	16.8	3.8	12.0	1392.8
	2	5	9.4	47.2	2.7	33.7	350.8
	2	10	9.4	47.2	2.7	33.7	1801.2
	3	5	8.0	90.7	2.3	64.8	507.9
3	10	8.0	90.7	2.3	64.8	2272.4	
3	1	5	25.9	32.6	7.4	23.3	225.1
	1	10	25.9	32.6	7.4	23.3	1392.8
	2	5	17.1	85.9	4.9	61.4	350.8
	2	10	17.1	85.9	4.9	61.4	1801.2
	3	5	14.1	159.3	4.0	113.8	507.9
3	10	14.1	159.3	4.0	113.8	2272.4	
4	1	5	42.3	53.1	12.1	37.9	225.1
	1	10	42.3	53.1	12.1	37.9	1392.8
	2	5	26.8	134.4	7.6	96.0	350.8
	2	10	26.8	134.4	7.6	96.0	1801.2
	3	5	21.5	242.8	6.1	173.4	507.9
3	10	21.5	242.8	6.1	173.4	2272.4	
5	1	5	62.5	78.5	17.8	56.1	225.1
	1	10	62.5	78.5	17.8	56.1	1392.8
	2	5	38.3	192.6	10.9	137.6	350.8
	2	10	38.3	192.6	10.9	137.6	1801.2
	3	5	30.2	341.0	8.6	243.6	507.9
3	10	30.2	341.0	8.6	243.6	2272.4	
7	1	5	114.2	143.5	32.6	102.5	225.1
	1	10	114.2	143.5	32.6	102.5	1392.8
	2	5	67.2	337.9	19.2	241.4	350.8
	2	10	67.2	337.9	19.2	241.4	1801.2
	3	5	51.4	581.1	14.7	415.0	507.9
3	10	51.4	581.1	14.7	415.0	2272.4	
10	1	5	220.4	277.0	63.0	197.8	225.1
	1	10	220.4	277.0	63.0	197.8	1392.8
	2	5	124.9	627.8	35.7	448.4	350.8
	2	10	124.9	627.8	35.7	448.4	1801.2
	3	5	92.8	1049.7	26.5	749.8	507.9
3	10	92.8	1049.7	26.5	749.8	2272.4	

Tableau 1 : comparaison des volumes disponibles et des volumes de fontis maximum pour différentes caractéristiques de site
Calcul effectué pour des galeries rectangulaires avec un rayon de fontis égal à la moitié de la largeur de la galerie et un coefficient de foisonnement k = 1,4

- Dans la plupart des cas la dimension du fontis n'est donc pas liée à la hauteur a des terrains sans cohésion en surface mais seulement au vide disponible dans la colonne de remontée de fontis. On considère le fontis, comme précédemment, sous la forme d'un tronc de cône de hauteur 1 (avec $1 \leq a$) (figure2)

$$V_f = \frac{\pi}{3} [(r+1)^3 - r^3]$$

$$= \frac{\pi}{3} r^3 [3/r + 3r^2/r^2 + 1^3/r^3]$$

La figure 3 donne le volume du fontis rapporté à r^3 en fonction du paramètre l/r . Elle permet de déterminer le rayon du fontis ($r + 1$) en fonction de son volume.

Remarque : on néglige le volume du cylindre de hauteur $(l - a)$ qui s'éboule dans le volume disponible en même temps que se forme le fontis de hauteur l . Ceci va dans le sens de la sécurité comme le fait de ne pas compter l'épaisseur des terrains non cohérents dans la hauteur maximum de remontée de fontis.

Le rayon du fontis sera obtenu par l'égalité de son volume au volume disponible $V_f = V_d$

$$\frac{\pi}{3} r^3 [3l/r + 3l^2/r^2 + l^3/r^3] = \pi r^2 (k - 1) (h_{\max} - P)$$

Pour utiliser cette relation de manière opérationnelle dans l'expertise des zones d'aléa fontis, nous allons rechercher une expression approchée simple des caractéristiques du fontis en fonction des paramètres disponibles.

Le fontis maximum possible sera obtenu pour la valeur maximum de V_d soit pour $P = h_{\min}$. Les rayons de fontis sont calculés dans le tableau 2 pour le cas où le rayon du fontis est égal à la moitié de la largeur de la galerie. Les valeurs reportées sur la figure 4 montrent que la profondeur du fontis est proche de la proportionnalité tant que l'ouverture est inférieure à 5 m. $l = 0,7 W$ d'où un rayon $r + 1 = 0,7 W$.

En prolongeant cette relation linéaire vers une ouverture de 10 m, on surestime de manière raisonnable la profondeur du fontis en se plaçant du côté de la sécurité.

Le rayon du fontis peut être inférieur à la demi-largeur de la galerie, c'est le cas en particulier des galeries supérieures à 6 m, où l'on considère que le rayon du fontis reste de 3 m. Le tableau 3 et la figure 5 donnent pour un rayon de remontée de fontis de 3 m, les valeurs du rayon en surface pour différentes ouvertures et largeur de galerie. Il apparaît que l'évolution avec l'ouverture se fait encore à peu près proportionnellement jusqu'à 5 m d'ouverture mais avec un coefficient plus fort. Pour des galeries de 10 m de largeur la profondeur du fontis est égale à l'ouverture (W).

Nous proposons de garder cette valeur pour l'ensemble des cas, y compris pour les galeries inférieures à 6 m de façon à tenir compte d'un fontis ne remontant pas sur l'ensemble de la largeur de la galerie d'où pour une profondeur P comprise entre h_{\min} et h_{\max} le fontis maximum aura une profondeur $l = W$ et un rayon $r + 1 = r + W$

- Evolution des dimensions du fontis avec la profondeur : lorsque la profondeur P de la galerie augmente, le volume disponible V_d diminue et s'annule pour $P = h_{\max}$.

$$V_d = \pi r^2 (k - 1) (h_{\max} - P)$$

$$V_d = \frac{V_d \max}{h_{\min}} (k - 1) (1 - P/h_{\max}) h_{\max}$$

$V_d = V_d \max k (1 - P/h_{\max})$

Le tableau 4 donne les dimensions du fontis en fonction de P pour différentes caractéristiques de la galerie. Les valeurs reportées sur les figures 6 et 7 montrent que la profondeur du fontis diminue lorsque P augmente. Si l'on compare les valeurs calculées avec l'approximation d'une valeur diminuant linéairement à partir de la valeur W pour $P = h \text{ min}$, cette approximation est peu éloignée et généralement du côté de la sécurité. On retiendra donc pour une profondeur P de la galerie d'ouverture, un fontis de profondeur $W k (1 - P/h \text{ max})$ et $r + W k (1 - P/h \text{ max})$ de rayon.

3 – CONCLUSION

Nous nous plaçons dans le cas où la remontée de fontis n'est pas stoppée par un banc résistant, la formation du fontis est gouvernée par le foisonnement des terrains.

La formation du fontis et ses dimensions dépendent des caractéristiques géométriques de la galerie et de la nature du recouvrement.

Soit une galerie de largeur L et d'ouverture W située à une profondeur P (non compris l'épaisseur des terrains non foisonnants en surface).

Le calcul du volume de vide disponible dans la galerie ($V \text{ galerie}$) permet de définir deux hauteurs au-dessus de la galerie.

- Une hauteur de remontée maximum de fontis correspondant au comblement par autofoisonnement ($h \text{ max}$)
- Une hauteur de remontée correspondant au comblement du vide dans la galerie laissant dans la colonne un vide disponible maximum pour la formation de fontis en surface ($h \text{ max}$)

Ces deux hauteurs sont liées par le coefficient de foisonnement $h \text{ min}/h \text{ max} = (k - 1) / k$

Les dimensions du fontis en surface sont habituellement calculées à partir de la formation d'un cône à 45° sur la hauteur des terrains non foisonnants : profondeur du fontis a/rayon du fontis $r + a$.

r étant le rayon de la cheminée de remontée de fontis égal généralement à la demi largeur de la galerie (limité à $r = 3 \text{ m}$).

Ces dimensions maximales ne sont souvent pas atteintes car le volume disponible dans la cheminée de remontée de fontis est inférieur au volume de ce cône tant que l'ouverture de la galerie est inférieure à 10 m.

Une formule approchée permet de calculer les dimensions du fontis en fonction de la profondeur P de la galerie.

- Si P est inférieur à $h \text{ min}$ du vide reste disponible dans la galerie et on peut garder les dimensions données par les terrains foisonnants
- Si P est compris entre $h \text{ min}$ et $h \text{ max}$ la profondeur du fontis est égale à $k W (1 - P/h \text{ max})$ et son rayon à $r + W k (1 - P/h \text{ max})$ dans le cas des mines de fer (coefficient de foisonnement $k =$ de l'ordre de 1,4).

Ouverture en m	Largeur 3 m Rayon fontis 1,5 m		Largeur 4 m Rayon fontis 2 m		Largeur 6 m Rayon fontis 3 m	
	Vd max	r + l max	Vd max	r + l max	Vd max	r + l max
1			13,1	2,7	26,6	
2	21,7	3,0	33,7	3,4	64,8	4,4
3	40,5	3,5	61,4	4,1	113,8	5,1
4	64,5	4,2	96,0	4,6	173,4	5,8
5	93,7	4,5	137,6	5,0	243,6	6,5
7			241,4	6,1	415,0	
10	316,7	6,8	448,4	7,6	749,8	9,0

Tableau 2 : Volume et rayon maximum du fontis en fonction des caractéristiques de la galerie. Cas d'un rayon de fontis égal à la demi-largeur de la galerie
coefficient de foisonnement 1,4
angle de talus de 40°

Ouverture en m	Largeur 3 m Rayon fontis 1,5 m		Largeur 4 m Rayon fontis 2 m		Largeur 6 m Rayon fontis 3 m	
	Vd max	r + l max	Vd max	r + l max	Vd max	r + l max
1			13,1	2,7	26,6	
2	21,7	3,0	33,7	3,4	64,8	4,4
3	40,5	3,5	61,4	4,1	113,8	5,1
4	64,5	4,2	96,0	4,6	173,4	5,8
5	93,7	4,5	137,6	5,0	243,6	6,5
7			241,4	6,1	415,0	
10	316,7	6,8	448,4	7,6	749,8	9,0

Tableau 2 : Volume et rayon maximum du fontis en fonction des caractéristiques de la galerie. Cas d'un rayon de fontis égal à la demi-largeur de la galerie
coefficient de foisonnement 1,4
angle de talus de 40°

Ouverture en m	Largeur 7 m Rayon fontis 3 m		Largeur 8 m Rayon fontis 3 m		Largeur 10 m Rayon fontis 3 m	
	Vd max	r + l max	Vd max	r + l max	Vd max	r + l max
1	40,0	4,0	41,0	4,1	41,0	4,1
2	100,4	5,0	107,2	5,0	113,1	5,1
3	179,0	5,9	195,1	6,0	216,6	6,2
4	275,3	6,6	303,6	6,6	347,3	6,9
5	388,9	7,5	432,1	7,5	504,0	7,8
7	667,4	8,4	748,4	9,0	892,9	9,3
10	1 212,4	10,5	1 368,9	10,8	1 661,3	11,7

Tableau 3 : Volume et rayon maximum du fontis en fonction des caractéristiques de la galerie. Cas d'un rayon de fontis inférieur à la demi-largeur de la galerie
coefficient de foisonnement 1,4
angle de talus de 40°

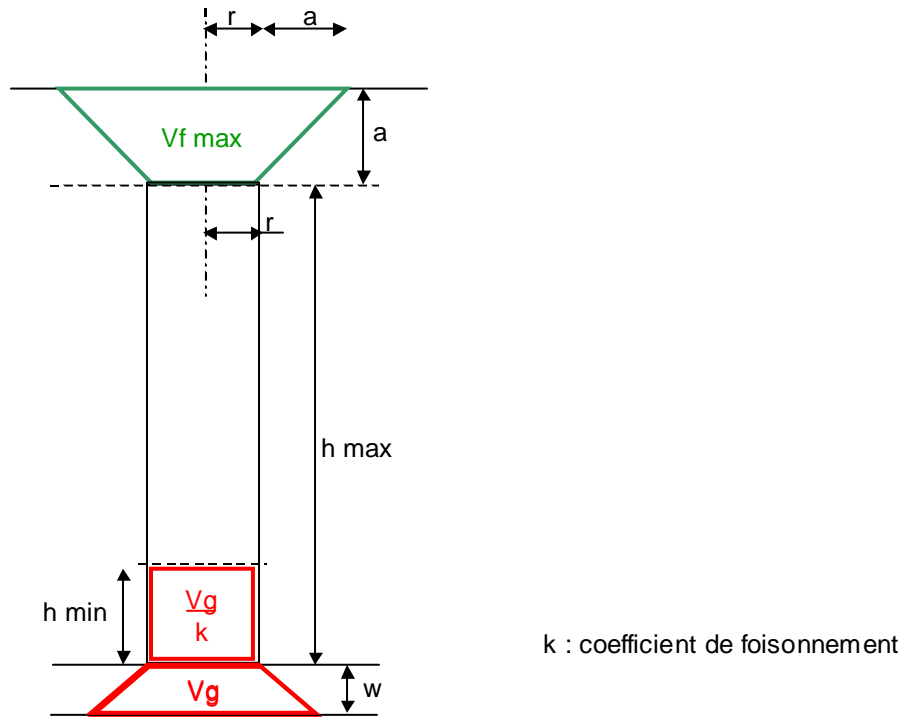


Figure 1 : modélisation de la formation d'un fontis

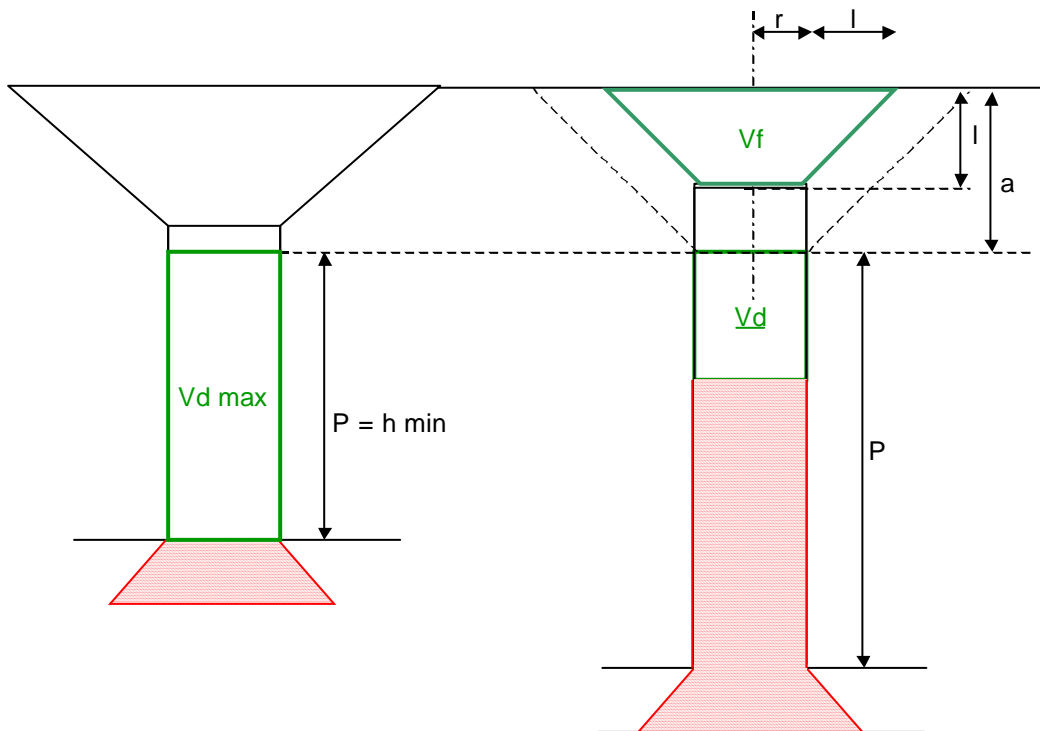
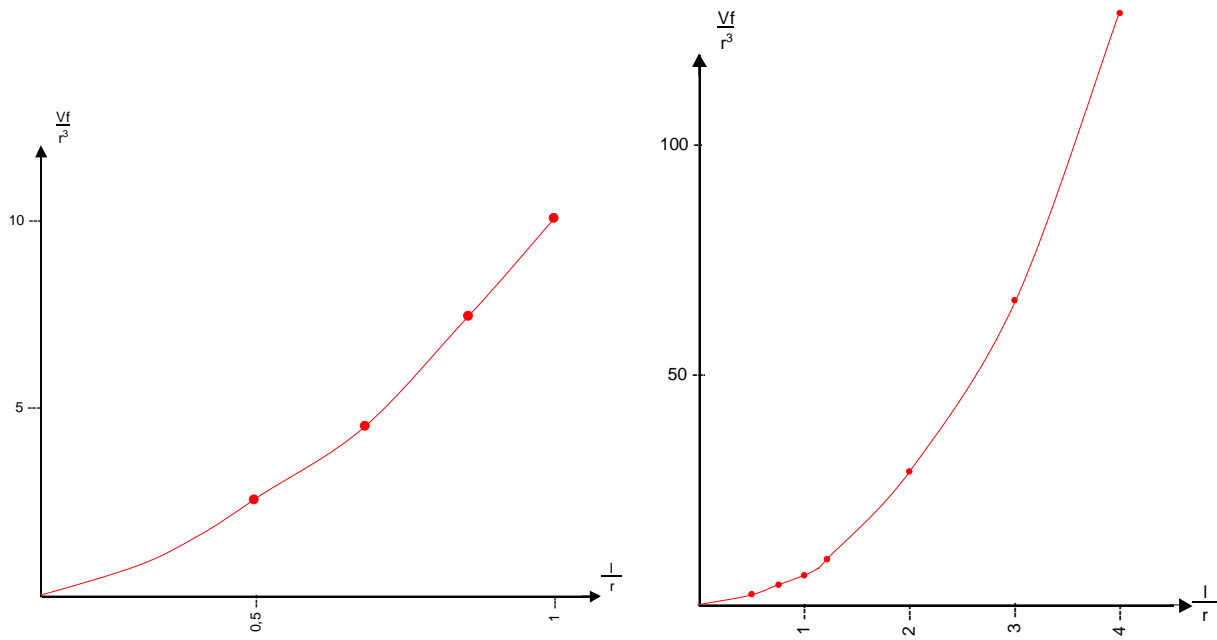


Figure 2 : dimension du fontis en surface



l/r	0,5	0,75	1	1,2	2	3	4
$\frac{Vf}{r^3}$	$\frac{19\Pi}{27}$	$\frac{279\Pi}{192}$	$\frac{7\Pi}{3}$	$\frac{9,648\Pi}{3}$	$\frac{28\Pi}{3}$	$\frac{63\Pi}{3}$	$\frac{124\Pi}{3}$
	2,49	4,57	7,33	10,1	29,4	66,2	129,9

Figure 3 : Volume du fontis en fonction de sa profondeur

$$\frac{Vf}{r^3} = \frac{\Pi}{3} \left(3 \frac{1}{r} + 3 \frac{l^2}{r^2} + \frac{l^3}{r^3} \right)$$

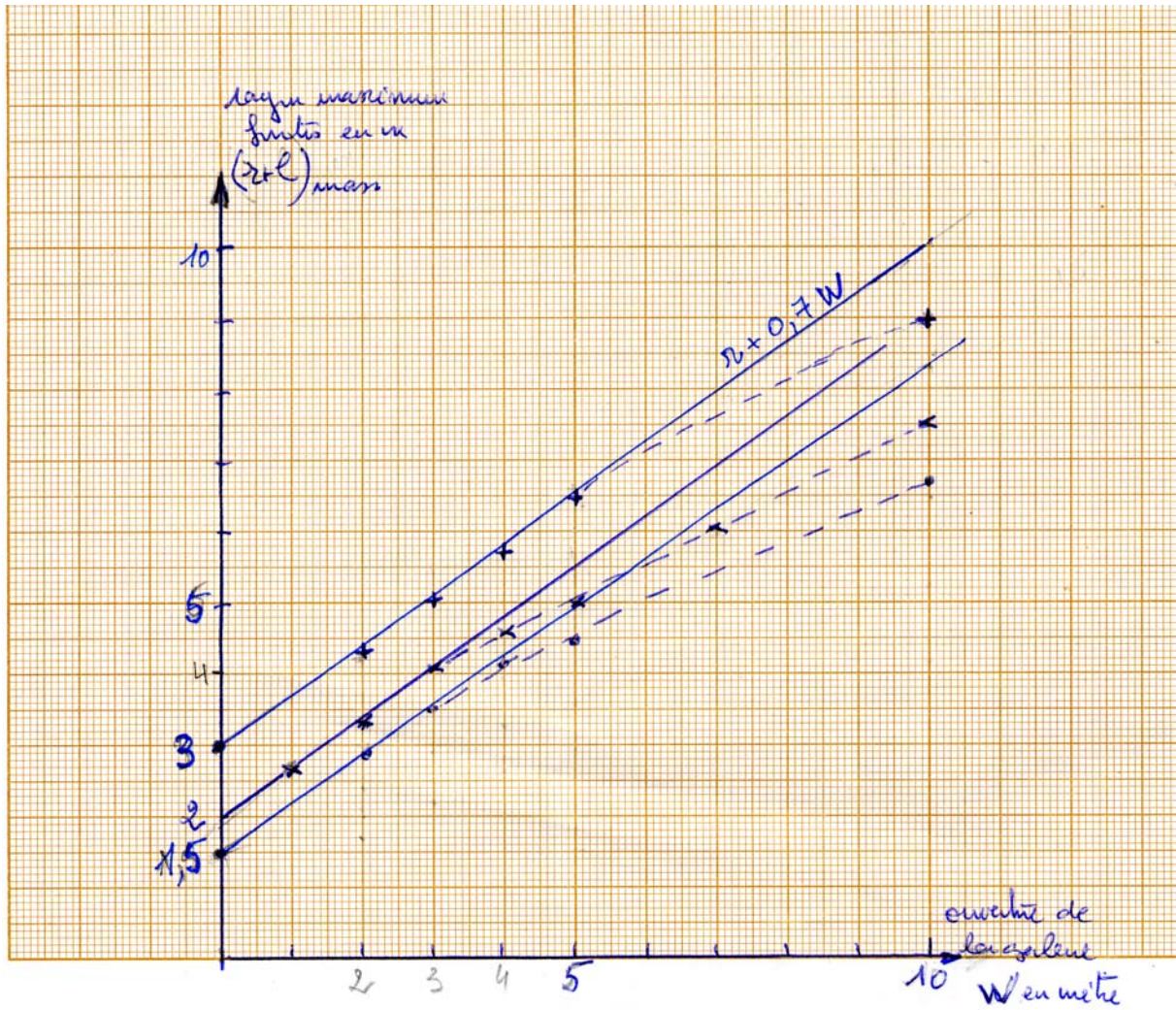


Figure 4 : Rayon maximum du fontis en fonction de l'ouverture de la galerie
Cas d'un rayon (r) de remontée de fontis égal à la demi-largeur de la galerie

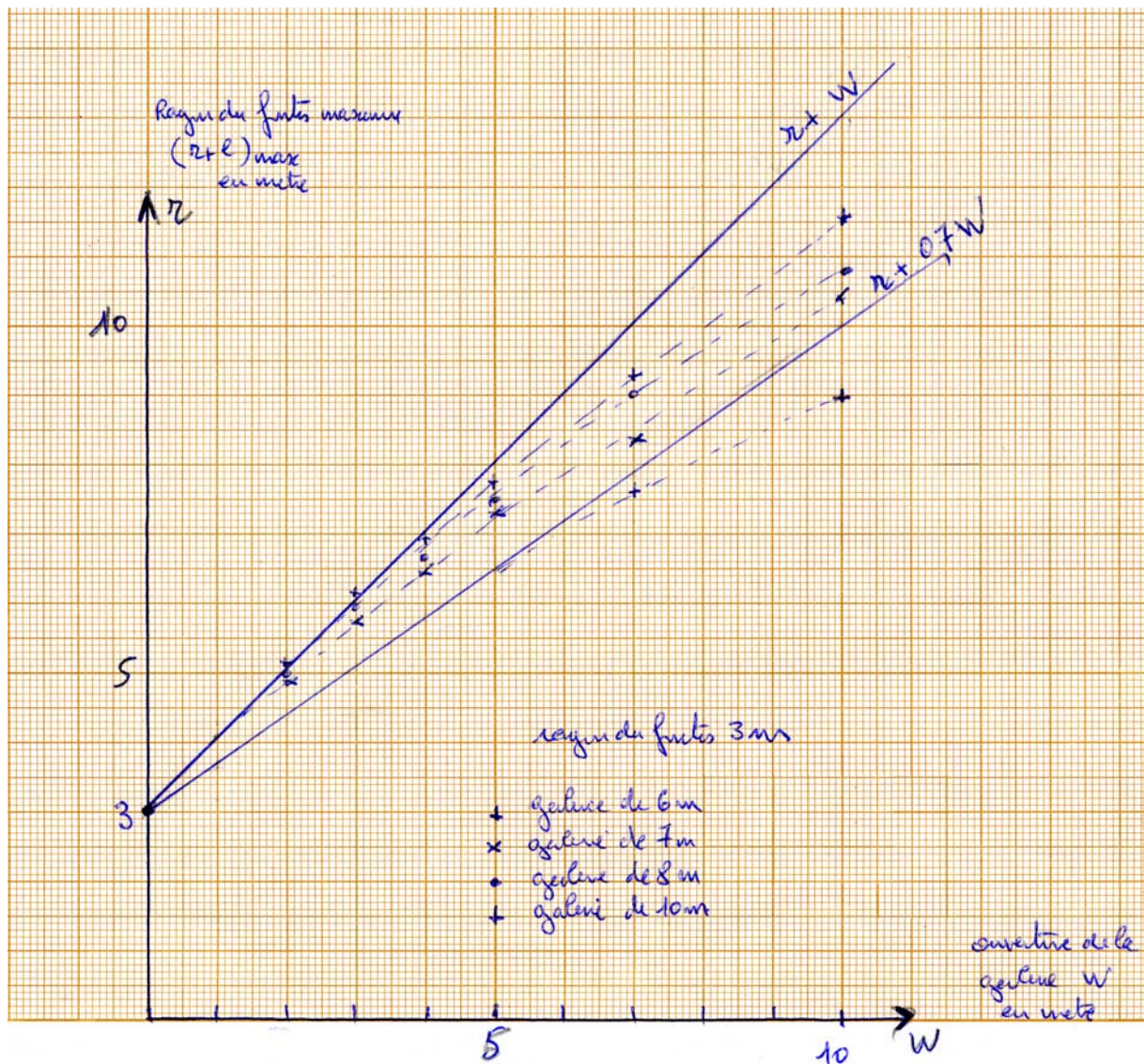


Figure 5 : Rayon du fontis maximum en fonction de l'ouverture de la galerie
Cas d'un rayon (r) de remontée de fontis inférieur à la demi largeur de la galerie

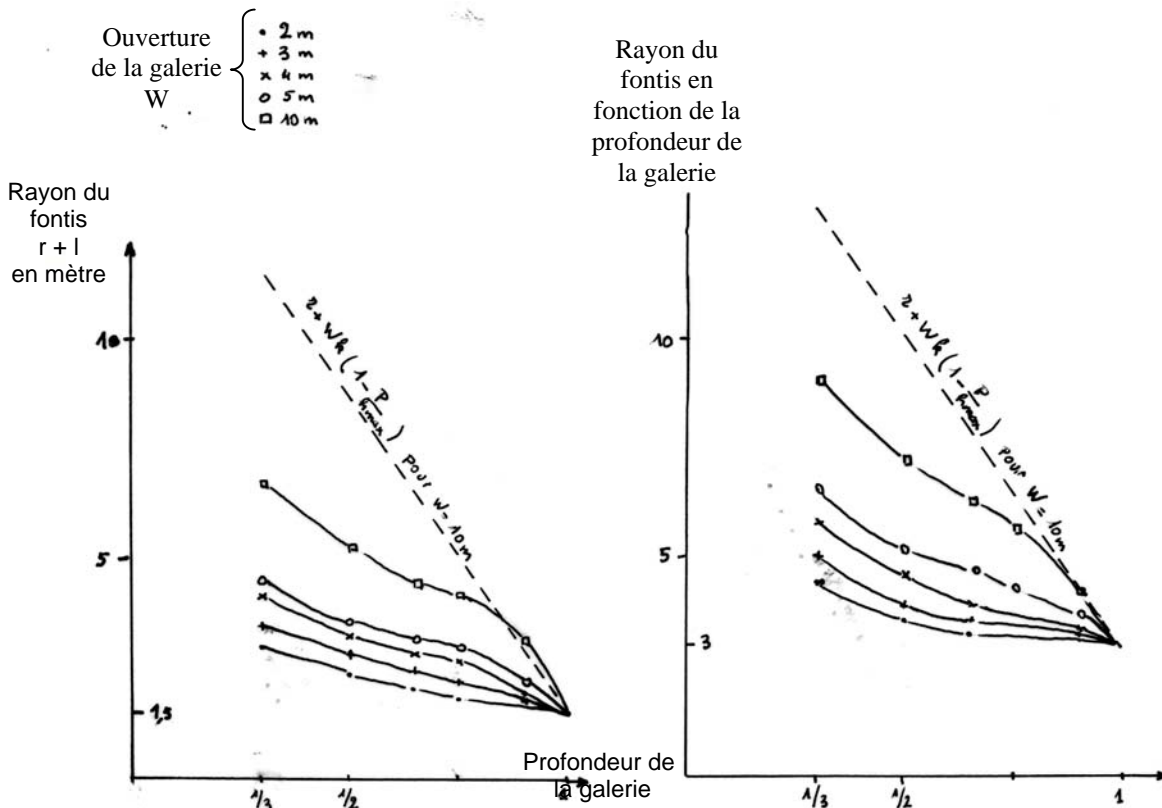


Figure 6 : Fontis de rayon 1,5 m
Galerie de largeur 3 m

Figure 6 bis : Fontis de rayon 3 m
Galerie de largeur 6 m

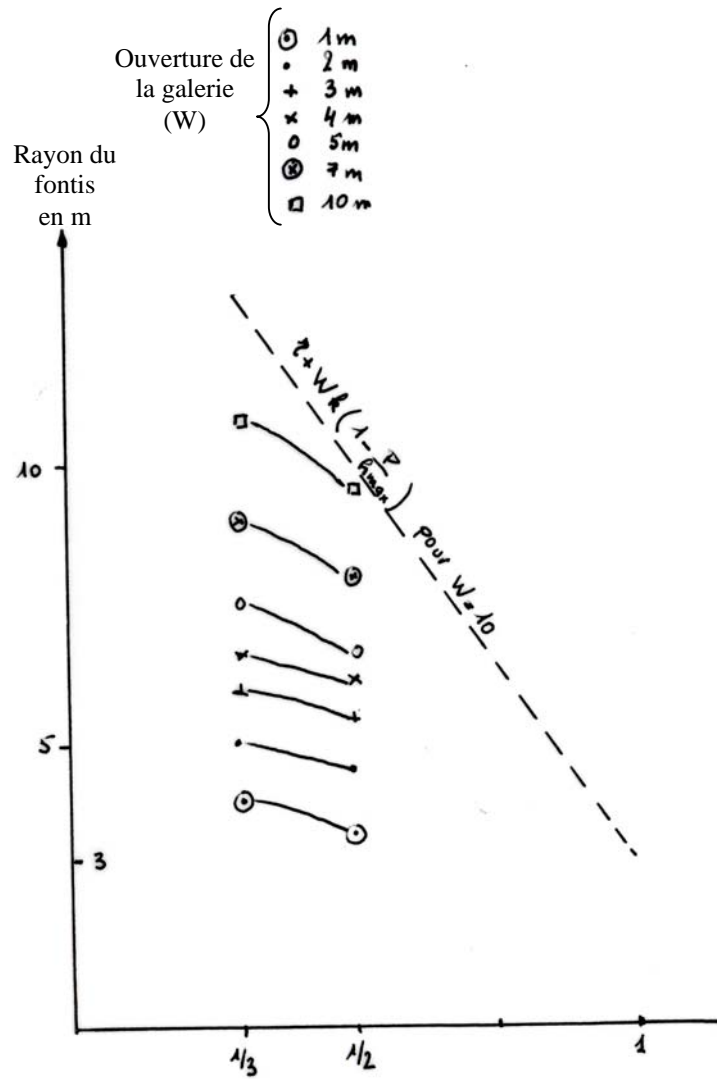


Figure 7 . Rayon du fontis en fonction de la profondeur de la galerie.
 Galerie de largeur 8 m
 Rayon du fontis 3 m

ANNEXE 2

ETUDE DE CAS
TABLEAU DES DONNEES UTILISEES

Secteur		Caractérisation des travaux miniers et du recouvrement						Prédisposition							Caractérisation du fontis				Intensité(s) attendue(s)			Niveau(x) d'aléa attendu(s)		
Ville	Localisation	Zone d'aléa fontis	Ouverture en m	Largeur en m	Recouvrement minimum en m	Recouvrement maximum en m	Terrains non foisonnant en m	Largeur	Etat de fracturation du toit	Venues d'eau	Nature du recouvrement	Phénomènes semblables connus à proximité	Densité de vide dans la zone	Prédisposition	Hmax en m	Rayon attendu maximal en m	Recouvrement minimal pour une intensité faible en m	Recouvrement maximal pour une intensité forte en m	réduite	modérée	élevée	faible	moyen	fort
Moyeuve Grande	Delivrance	A158M	2.5	2.5	5.0	25.0	2.5	faible	mauvais	moyen	résistant	non	galerie	sensible	18.6	4.2	18.4	10.2	oui	oui	oui	oui	oui	oui
	Franche Pré	A158M(3)	2.0	5.0	5.0	25.0	2.5	forte	mauvais	moyen	résistant	non	chambres et piliers	très sensible	9.5	4.5	10.3	5.0		oui	oui			oui
	Franche Pré	A158M(3)	2.0	10.0	5.0	25.0	2.5	forte	mauvais	moyen	résistant	non	chambres et piliers	très sensible	11.1	5.1	11.6	5.4		oui	oui			oui
	Franche Pré	A158M(1)	2.0	1.5	5.0	25.0	2.5	faible	bon	faible	résistant	non	très faible (miniére)	peu sensible	17.8	3.1	17.0	7.2	oui	oui	oui	oui	oui	
	Franche Pré	A158M(2)	2.0	1.5	18.0	25.0	2.5	faible	moyen	moyen	résistant	non	élargissement	sensible	17.8	1.1	17.0	7.2	oui			oui		
	Frapouille	A156_158A1	2.2	2.5	5.0	25.0	5	faible	bon	faible	résistant	non	galerie défilage	peu sensible	15.2	4.2	17.7	10.0	oui	oui	oui	oui	oui	oui
	Frapouille	A156_158A2	2.2	2.5	10.0	25.0	5	faible	bon	faible	résistant	non	galerie défilage	peu sensible	15.2	3.3	17.7	10.0	oui	oui	oui	oui	oui	oui
	Frapouille	A156_158A3	2.2	2.5	10.0	25.0	5	faible	bon	faible	résistant	non	galerie défilage	peu sensible	15.2	3.3	17.7	10.0	oui	oui	oui	oui	oui	oui
	Cité Wendel	A156_158_16_3_168AM (miniére)	1.5	1.2	5.0	20.0	2.5	faible	bon	faible	résistant	non	très faible (miniére)	peu sensible	12.1	2.2	11.7	2.9	oui	oui		oui		
	Cité Wendel	A156_158_16_3_168AM (galeries)	2.5	2.5	5.0	25.0	2.5	faible	bon	faible	résistant	non	galerie	peu sensible	17.6	4.2	17.5	9.9	oui	oui	oui	oui	oui	
Cité Lorraine	A163A1	2.0	3.0	5.0	15.0	2.5	moyen	moyen	faible	résistant	non	galerie défilage	sensible	11.3	3.6	11.8	5.6	oui	oui		oui	oui		
Moyeuve Petite		A063_156_15_8A1	3.5	3.0	22.0	33.0	5.0	moyen	bon	faible	résistant	non	galerie	peu sensible	30.4	3.6	32.3	22.8	oui	oui	oui	oui	oui	
Thil			6.0	12.0	27.0	27.0	2.0	forte	moyen	moyen	résistant	oui	galerie	très sensible	68.0	8.3	66.0	53.8			oui			oui
Moyeuve	Cité Curel	Quartier Curel	2.3	5.0	10.0	10.0	3	forte	moyen	moyen	résistant	oui	galerie	sensible	15.0	4.1	15.5	8.0		oui			oui	

*Zone de fontis
Communes de Moyeuve-Grande, Moyeuve-Petite, Cité de Curel et Thil*

Secteur		Caractérisation des travaux miniers et du recouvrement						Prédisposition						Caractérisation du fontis				Intensité(s) attendue(s)			Niveau(x) d'aléa attendu(s)					
Ville	Localisation	Zone d'aléa fontis	Ouverture en m	Largeur en m	Recouvrement minimum en m	Recouvrement maximum en m	Terrains non foisonnant en m	Largeur	Etat de fracturation du toit	Venues d'eau	Nature du recouvrement	Phénomènes semblables connus à proximité	Densité de vide dans la zone	Prédisposition	Hmax en m	Rayon attendu maximal en m	Recouvrement minimal pour une intensité faible en m	Recouvrement maximal pour une intensité forte en m	réduite	modérée	élevée	faible	moyen	fort		
Hayange	Cité Bellevue mine côte du pont	156IV1	2	2	12	30	4	faible	moyen ?	faible	peu résistant	non	étargissement remblayé	sensible	14.1	2.2	15.5	7.9	oui	oui		oui	oui			
		156IV4	2	2	12	30	4	faible	moyen ?	faible	peu résistant	non	étargissement remblayé	sensible	14.1	2.2	15.5	7.9	oui	oui		oui	oui			
		156IVS(1)	3	1.8	19	21	3	faible	moyen	moyen	peu résistant	non	galerie	sensible	29.5	2.8	28.9	18.2		oui				oui		
		156IVS(2)	3.5	2	21	23	3	faible	bon ?	moyen	peu résistant	non	galerie	sensible	22.6	2.0	23.3	16.2		oui				oui		
		156IVS(3)	4.0	2	23	32	3	faible	moyen ?	faible	peu résistant	non	galerie	sensible	45.0	4.1	44.0	31.8				oui	oui		oui	
		156IVS(4)	4.0	2	23	36	3	faible	moyen ?	faible	peu résistant	non	galerie	sensible	35.4	3.4	35.2	25.7			oui			oui		
		156IVS(5)	3	1.8	18	35	3	faible	bon	faible	peu résistant	non	galerie	sensible	29.5	2.9	28.9	18.2	oui	oui				oui	oui	
		156IVS(6)	3	1.8	20	35	3	faible	bon	faible	peu résistant	non	galerie	sensible	29.5	2.7	28.9	18.2	oui	oui				oui	oui	
		156IVS(7)	3	1.8	20	35	3	faible	bon	faible	peu résistant	non	galerie	sensible	29.5	2.7	28.9	18.2	oui	oui				oui	oui	
		156IV6(1)	2	2	8	25	3	faible	moyen ?	moyen ?	peu résistant	non	étargissement remblayé	sensible	14.1	2.8	14.5	6.9	oui	oui	oui			oui	oui	oui
		156IV6(2)	3	1.8	0	32	3	faible	moyen	faible	peu résistant	non	galerie	sensible	29.5	5.0	28.9	18.2	oui	oui	oui			oui	oui	oui
		156IV6(3)	2	2	19	46	3	faible	moyen	faible	peu résistant	non	étargissement remblayé	sensible	14.1	0.6	14.5	6.9	oui	oui	oui			oui	oui	oui
		156IV6(4)	3.5	2	29	39	3	faible	moyen ?	faible	peu résistant	non	galerie	sensible	35.4	2.3	34.7	23.7	oui	oui				oui	oui	
		156IV6(5)	3.5	2	24	39	3	faible	moyen ?	faible	peu résistant	non	galerie	sensible	35.4	3.0	34.7	23.7	oui	oui	oui			oui	oui	
		156IV6(6)	3.5	2	27	35	3	faible	moyen ?	faible	peu résistant	non	galerie	sensible	35.4	2.6	34.7	23.7	oui	oui				oui	oui	
		156IV6(7)	3.5	2	25	35	3	faible	moyen ?	faible	peu résistant	non	galerie	sensible	35.4	2.8	34.7	23.7	oui					oui		
		156IV8(1)	2.5	1.8	0	16	3	faible	moyen	moyen	peu résistant	non	galerie	sensible	21.6	4.4	21.5	12.1		oui	oui			oui	oui	
		156IV8(2)	4.3	2	16	35	3	faible	bon	faible	peu résistant	non	galerie	peu sensible	50.9	5.4	49.7	36.9				oui			oui	
		156PA1(1)	4.3	4	0	40	5	moyen	bon ?	faible ?	peu résistant	non	galerie	peu sensible	31.6	7.9	38.9	30.9	oui	oui	oui			oui	oui	
		156PA1(2)	5.1	4	22	27	5	moyen	bon ?	faible ?	peu résistant	non	galerie	peu sensible	42.1	3.2	45.0	38.9				oui			oui	
		156PA1(3)																								
		156PA4	3.5	3	30	35	5	moyen	bon ?	faible ?	peu résistant	non	galerie	peu sensible	27.0	1.9	29.2	20.8	oui							
		156PB	3	1.8	10	14	5	faible	moyen ?	moyen	peu résistant	non	galerie	sensible	29.5	4.3	30.9	20.2				oui				oui
		156PD(1)	2.3	2.4	4	24	5	faible	bétonné	faible	peu résistant	non	galerie	peu sensible	13.7	4.4	16.6	10.1	oui	oui	oui			oui		
		156PD(2)	3.2	2.4	12	18	5	faible	bétonné	faible	peu résistant	non	galerie	peu sensible	23.6	4.3	25.9	17.9	oui	oui				oui		
		156PE1	2	2	27	29	5	faible	moyen ?	faible	peu résistant	non	étargissement remblayé	sensible	29.5	1.7	29.1	13.1	oui					oui		
		156PE2	3	2	14	35	5	faible	bon	faible	peu résistant	non	galerie	peu sensible	27.3	3.8	29.0	19.1	oui	oui				oui		
		156PJ	3	1.6	16	25	3	forte	moyen ?	moyen ?	peu résistant	non	étargissement remblayé	sensible	21.0	4.6	21.5	13.9	oui	oui				oui	oui	
		156PS(1)	2.5	3.5	10	17	3	moyen	moyen	moyen	peu résistant	non	galerie	sensible	14.6	3.5	15.5	9.1	oui	oui				oui	oui	
		156PS(2)	2.5	3.5	16	17	3	moyen	moyen	moyen	peu résistant	non	galerie	sensible	14.6	2.1	15.5	9.1	oui					oui		
156GAC	4.4	2.5	27	29	4	faible	moyen	moyen	peu résistant	non	galerie	sensible	43.8	4.1	44.1	33.0				oui				oui		

*Zone de fontis
Commune d'Hayange (1^{ère} partie)*

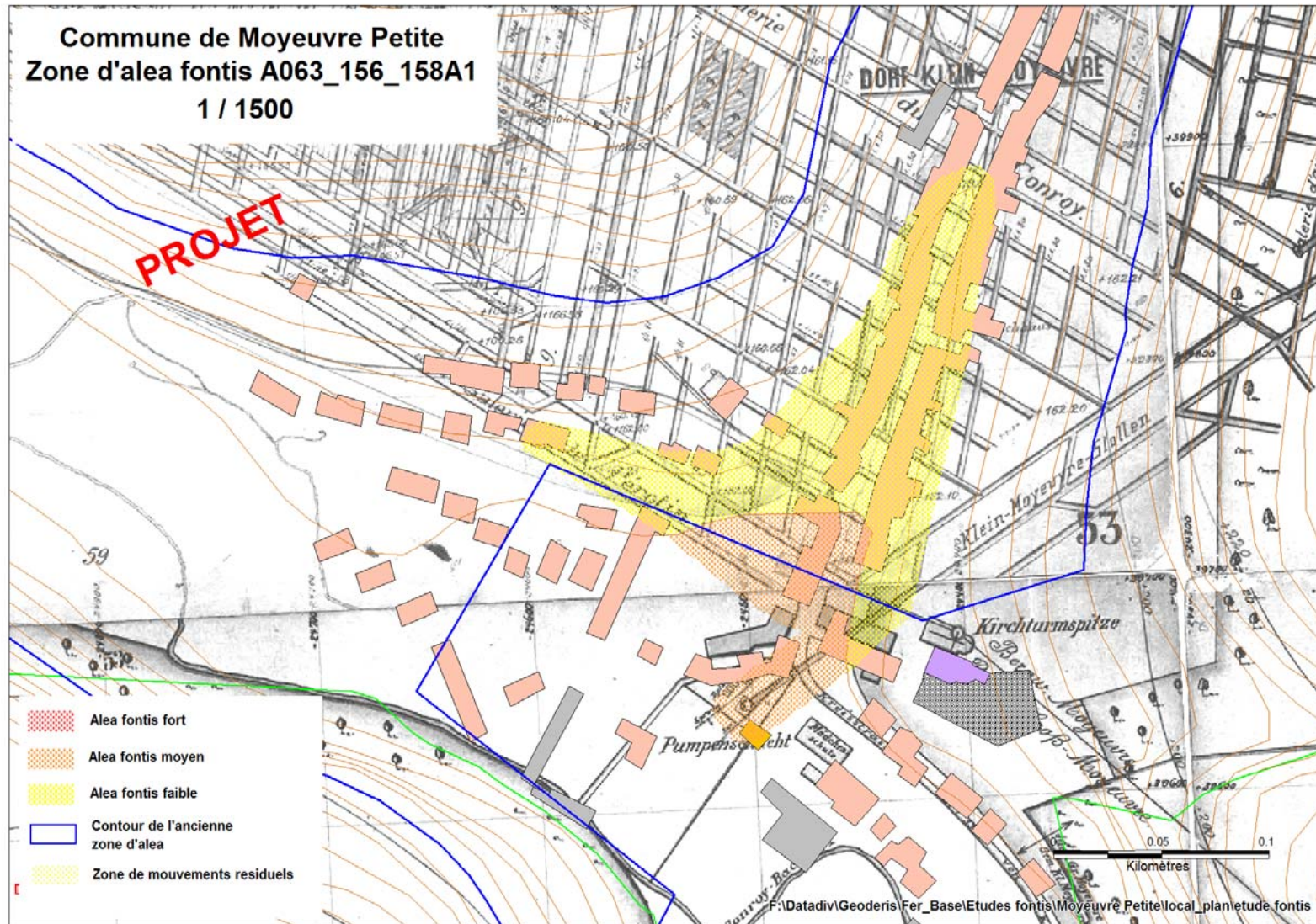
Secteur	Caractérisation des travaux miniers et du recouvrement							Prédisposition							Caractérisation du fontis				Intensité(s) attendue(s)			Niveau(x) d'aléa attendu(s)			
Ville	Localisation	Zone d'aléa fontis	Ouverture en m	Largeur en m	Recouvrement minimum en m	Recouvrement maximum en m	Terrains non foisonnant en m	Largeur	Etat de fracturation du toit	Venues d'eau	Nature du recouvrement	Phénomènes semblables connus à proximité	Densité de vide dans la zone	Prédisposition	Hmax en m	Rayon attendu maximal en m	Recouvrement minimal pour une intensité faible en m	Recouvrement maximal pour une intensité forte en m	réduite	modérée	élevée	faible	moyen	fort	
Hayange	La ceriseraie Mine de la côte d'Hayange	156GB1	3.2	2.7	0	32	4	faible	moyen	moyen	peu résistant	non	galerie	sensible	26.3	5.7	27.2	18.2	oui	oui	oui	oui	oui	oui	
		156GB2	3	3	7	16	4	moyen	mauvais	moyen	peu résistant	non	galerie	très sensible	22.3	5.0	23.6	15.4			oui			oui	
		156GB3	2.5	2.4-3	19	21	4.5	faible	moyen	moyen	peu résistant	non	galerie	sensible	16.8	2.0	18.9	11.7	oui			oui			
		156GB4	3.2	2.7	22	25	3.5	faible	bon	faible	peu résistant	non	galerie	peu sensible	26.3	2.6	26.7	17.7		oui			oui		
		156GC1(1)	3.2	2	22	28	4	faible	moyen	moyen	peu résistant	non	galerie	sensible	32.1	2.9	32.4	21.3		oui				oui	
		156GC1(2)	3.2	2	22	28	4	faible	moyen	importante	peu résistant	non	galerie	très sensible	32.1	2.9	32.4	21.3		oui					oui
		156GC1(2)	3	2.5	27	29	4	faible	moyen	faible	résistant	non	galerie	peu sensible	24.1	1.4	25.1	16.3	oui						
		156GC5	2.4	3	17	19	4	moyen	bon	moyen	résistant	non	galerie	peu sensible	25.6	3.1	25.6	13.9		oui			oui		
		156GD1(1)	3.2	2.2 à 3.5	25	30	3.5	faible	moyen	faible	peu résistant	non	galerie	peu sensible	24.7	2.1	25.4	16.8	oui				oui		
		156GD1(2)	2	2.7	18	28	3.5	faible	mauvais	faible	peu résistant	non	élargissement ouvert	très sensible	21.0	2.2	20.6	9.1	oui	oui				oui	oui
		156GD1(3)	3.4	6	21	24	3.5	forte	moyen	faible	peu résistant	non	"dépliage" non dépilé	sensible	18.8	3.3	20.2	14.1		oui				oui	
		156GD1(4)	2.4	2	20	25	3.5	faible	moyen	faible	peu résistant	non	"dépliage" non dépilé	sensible	19.9	1.6	20.4	11.2	oui				oui		
		156GE1(1)	3	3	9	15	3.5	moyen	bon	moyen	peu résistant	non	galerie	sensible	22.3	4.6	23.1	14.9			oui				oui
		156GE1(2) - 156GE1(4)	2.5	3	4	28	3.5	moyen	bon	faible	peu résistant	non	galerie	peu sensible	19.0	5.5	20.2	13.2	oui	oui	oui	oui	oui	oui	
		156GE1(3)	3	3.2	14	22	3.5	moyen	bon	faible	peu résistant	non	galerie	peu sensible	27.7	4.1	27.8	17.6		oui	oui	oui	oui	oui	
		156GE2	3	2.5	5	12	3.5	faible	mauvais	faible	peu résistant	non	galerie	sensible	24.9	5.1	25.3	16.2			oui				oui
		156GG1	3.5	2.5	27	35	3.5	faible	moyen	faible	résistant	non	galerie	peu sensible	32.1	2.5	32.2	22.1			oui		oui		
		156GH1	3	2	27	30	4	faible	moyen	faible	résistant	non	galerie	peu sensible	28.8	1.8	29.3	18.7	oui						
		156GH2	5	3.1	28	34	4	moyen	moyen	faible	résistant	non	galerie	peu sensible	50.4	5.1	50.7	39.6			oui			oui	
		156QHMA1	3.5	2.5	0	40	4	faible	bétonné	faible	résistant	non	galerie	très peu sensible	32.1	6.0	32.7	22.6	oui	oui	oui	oui	oui		
156QHMA2	2.5 à 4	2	18	21	4	faible	moyen	faible	peu résistant	non	galerie	peu sensible	47.0	2.8	46.7	33.7			oui	oui	oui	oui	oui		

*Zone de fontis
Comme d'Hayange (2^{ème} partie)*

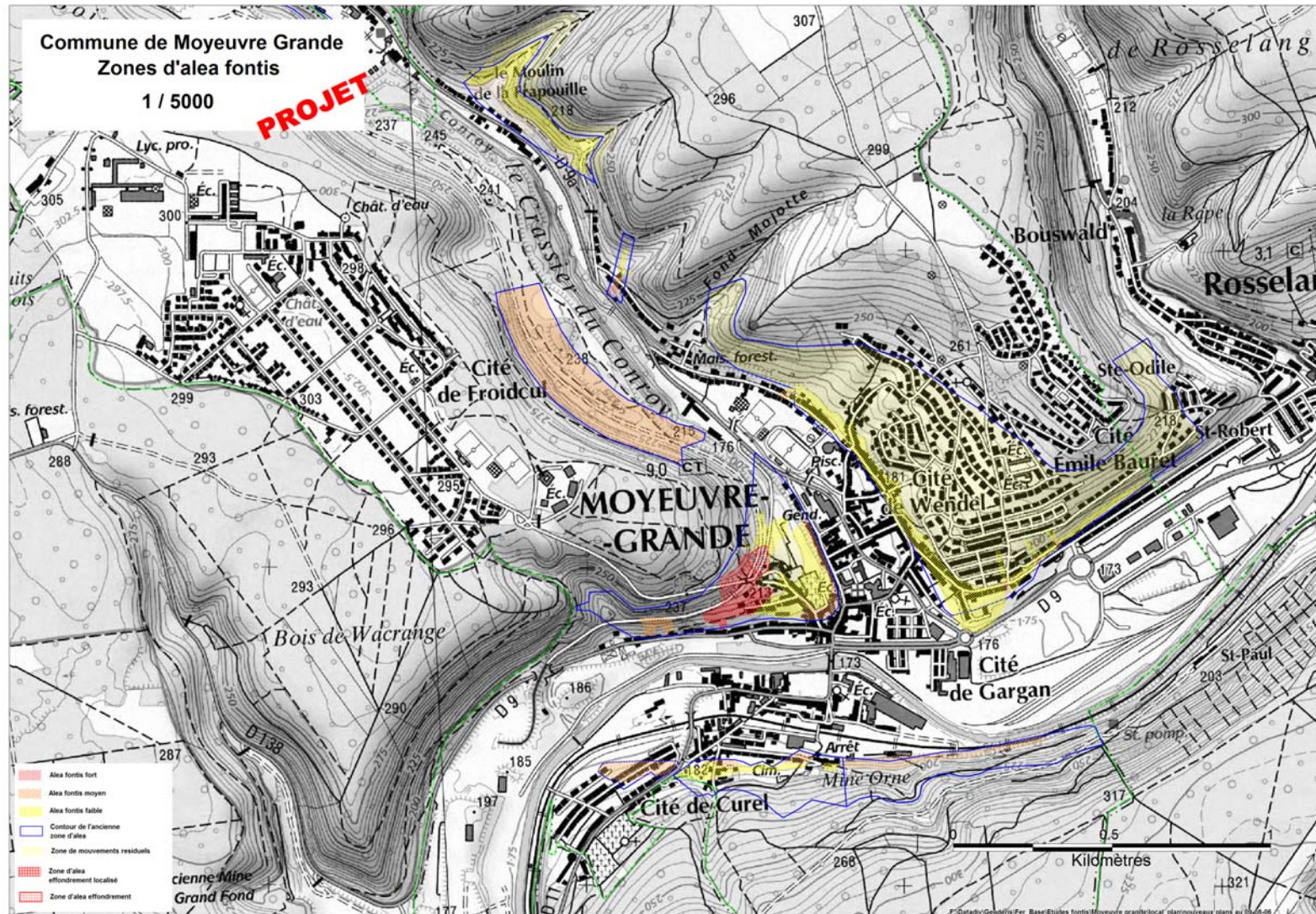
Secteur		Caractérisation des travaux miniers et du recouvrement						Prédisposition						Caractérisation du fontis				Intensité(s) attendue(s)			Niveau(x) d'aéa attendu(s)			
Ville	Localisation	Zone d'aéa fontis	Ouverture en m	Largeur en m	Recouvrement minimum en m	Recouvrement maximum en m	Terrains non foisonnant en m	Largeur	Etat de fracturation du toit	Venues d'eau	Nature du recouvrement	Phénomènes semblables connus à proximité	Densité de vide dans la zone	Prédisposition	Hmax en m	Rayon attendu maximal en m	Recouvrement minimal pour une intensité faible en m	Recouvrement maximal pour une intensité forte en m	réduite	modérée	élevée	faible	moyen	fort
Hayange	Bois des Chênes Mine de la côte de Fesche	156RA1	3.4	2.6	0	6	4	faible	très bon	très sec	peu résistant	non	galerie	peu sensible	29.8	5.9	30.6	20.9	oui	oui	oui	oui	oui	
		156RA2	4.5	2.7	6	50	4	faible	bon	très sec	peu résistant		galerie	peu sensible	46.4	7.2	46.6	35.2	oui					
		156RA3	2	2.7	11	20	3.5	faible	bon	faible	peu résistant	non	galerie	peu sensible	12.6	2.4	13.8	6.8	oui	oui		oui		
		156RB1	5	3.5	0	51	4	moyen	bon	faible	peu résistant	non	galerie	peu sensible	46.4	8.6	47.0	36.8	oui	oui	oui	oui	oui	
		156RB2	5	3.5	6	51	4	moyen	bon	faible	peu résistant	non	galerie	peu sensible	46.4	8.3	47.0	36.8	oui	oui	oui	oui	oui	
		156RB3	3.5	2.5	31	37	4	faible	bon	faible	peu résistant	non	galerie	peu sensible	32.1	2.0	32.7	22.6	oui	oui		oui		
		156RD1	3	1.8	0	24	3.5	faible	bon ?	faible ?	peu résistant	non	galerie	peu sensible	30.9	5.0	30.6	19.3		oui	oui	oui	oui	
		156RD2	2.5	2	24	30	3.5	faible	moyen	faible	peu résistant	non	galerie	sensible	21.1	1.1	21.5	12.2	oui	oui		oui	oui	
		156RD3	3	1.8	0	21	3.5	faible	bon ?	faible ?	peu résistant	non	galerie	peu sensible	30.9	5.0	30.6	19.3	oui	oui		oui	oui	
		156RG1	3	1.8	0	22	4	faible	bon ?	faible	peu résistant	non	galerie	peu sensible	30.9	5.0	31.1	19.8	oui	oui	oui	oui	oui	
		156RG2	2.5	2	0	29	4	faible	moyen ?	faible ?	peu résistant	non	galerie	sensible	26.0	4.4	26.2	14.7	oui	oui	oui	oui	oui	oui
		156RG3	3	1.8	0	7	4	faible	bon ?	faible	peu résistant	non	galerie	peu sensible	30.9	5.0	31.1	19.8			oui		oui	
		156RG4	2.5	2	7	27	4	faible	moyen ?	faible ?	peu résistant	non	galerie	sensible	26.0	4.0	26.2	14.7	oui	oui	oui	oui	oui	oui
		156RL(1)	2.5	2	14	24	4	faible	moyen	faible	peu résistant	non	très faible : très vieux chantiers (type minière)	peu sensible	29.0	3.2	28.1	25.1		oui	oui	oui	oui	
		156RL(2)	3	1.8	27	35	4	faible	bon ?	faible	peu résistant	non	galerie	peu sensible	30.9	1.9	31.1	19.8	oui	oui		oui		
		156RL(3)	2.5	2	6	31	4	faible	mauvais ?	faible	peu résistant	non	très faible : très vieux chantiers (type minière)	sensible	25.9	4.1	28.1	25.1	oui	oui	oui	oui	oui	oui
		156RO1	3	1.8	18	35	3.5	faible	moyen ?	faible	peu résistant	non	galerie	peu sensible	30.9	3.1	30.6	19.3	oui	oui	oui	oui	oui	
		156RO1	2.5	2	18	30	3.5	faible	mauvais ?	faible	peu résistant	non	très faible : très vieux chantiers (type minière)	sensible	21.1	2.1	21.5	12.2	oui	oui		oui	oui	
		156RO2	3	1.8	18	35	3.5	faible	moyen ?	faible	peu résistant	non	galerie	peu sensible	30.9	3.1	30.6	19.3		oui		oui		
		156RO3	2.5	2	25	32	4	faible	mauvais ?	faible	peu résistant	non	très faible : très vieux chantiers (type minière)	sensible	21.1	1.0	22.0	12.7	oui	oui		oui	oui	
156RO4	3	1.8	0	26	4	faible	bon	faible	peu résistant	non	galerie	peu sensible	30.9	5.0	31.1	19.8		oui	oui	oui	oui			
156RQ	4	3.5	1	1	0	moyen	dalle béton	faible	dalle béton	non	galerie	très peu sensible	32.0	7.0	29.1	20.2			oui	oui				

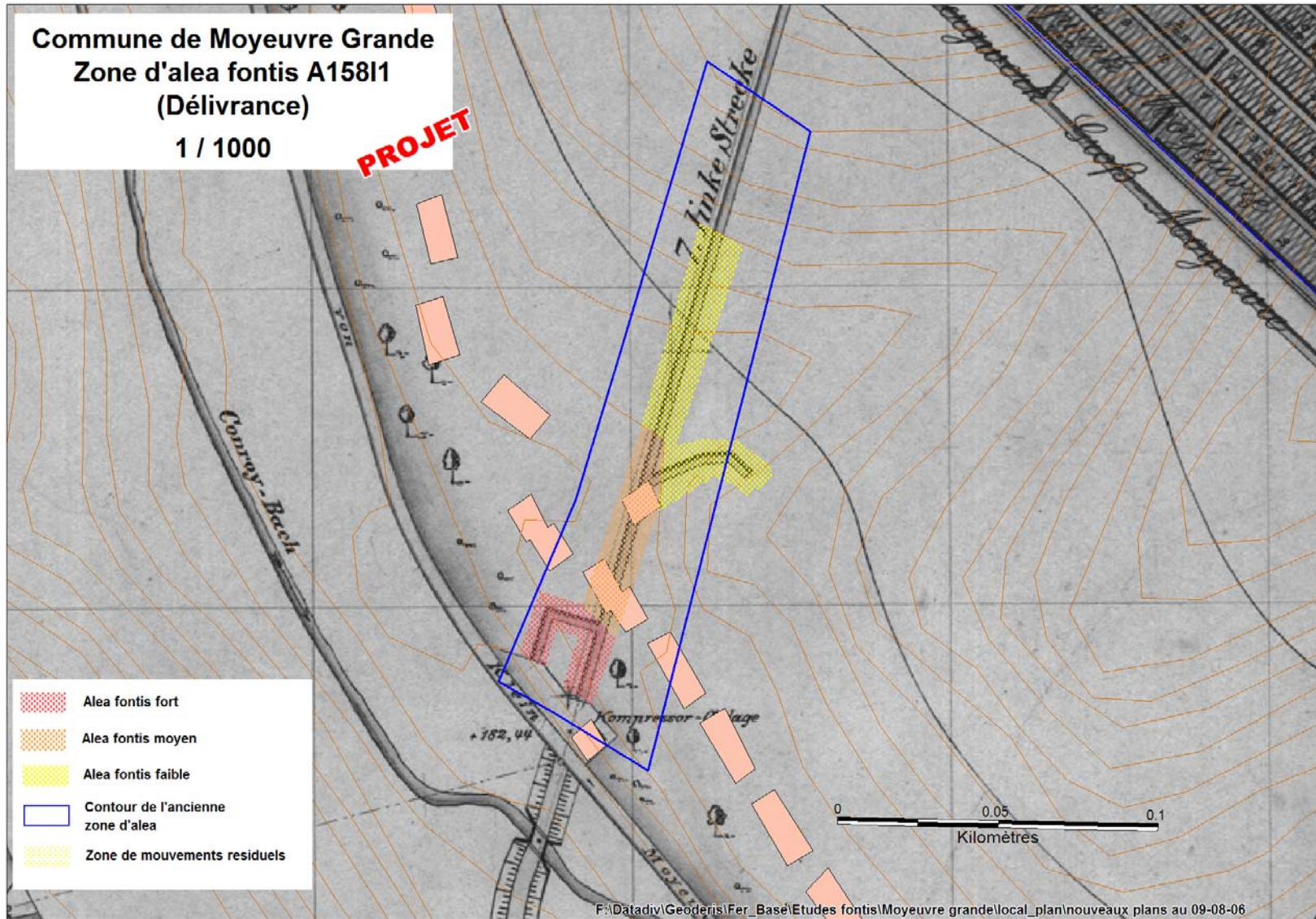
*Zone de fontis
Commune d'Hayange (3^{ème} partie)*

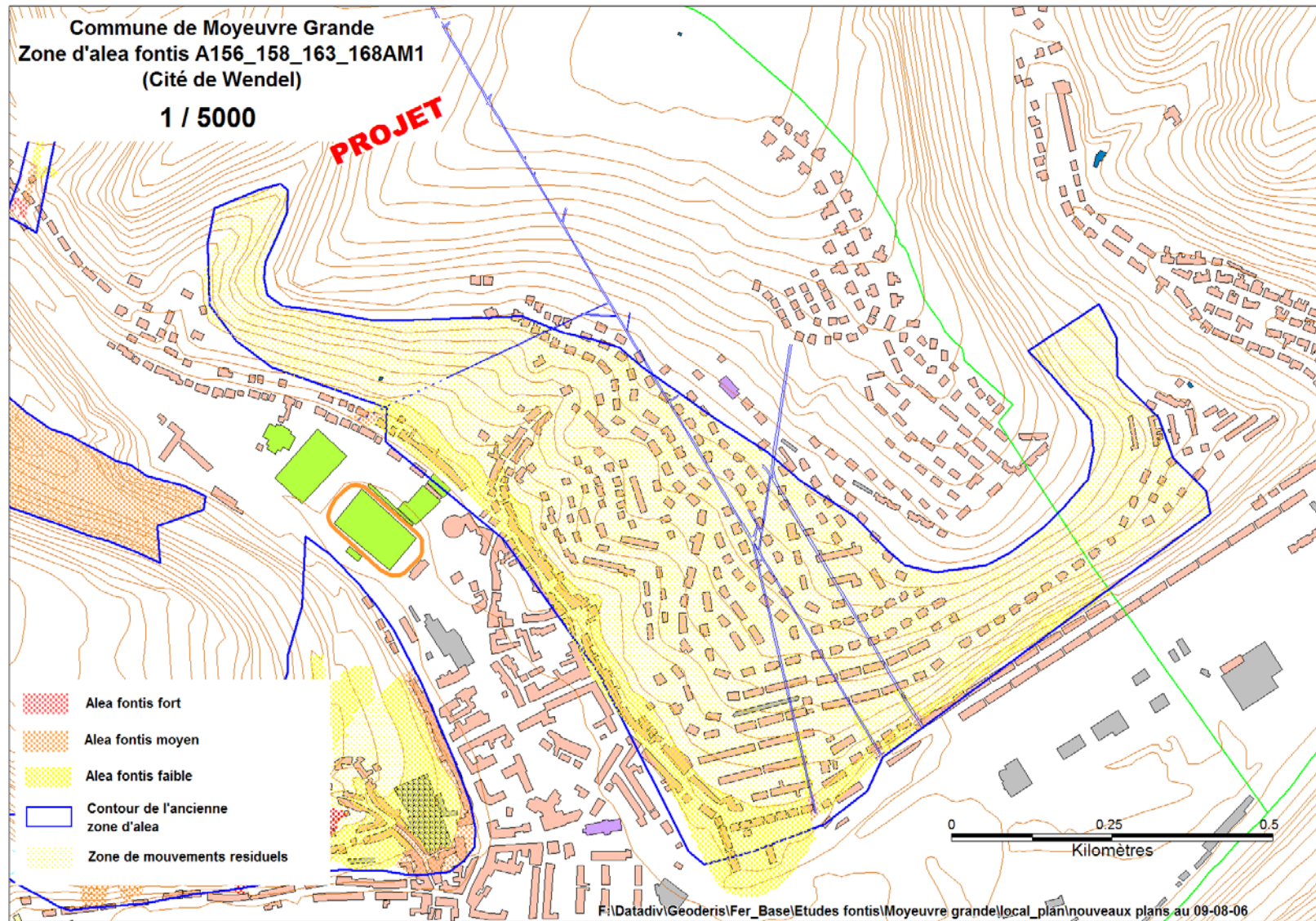
MOYEUUVRE-PETITE

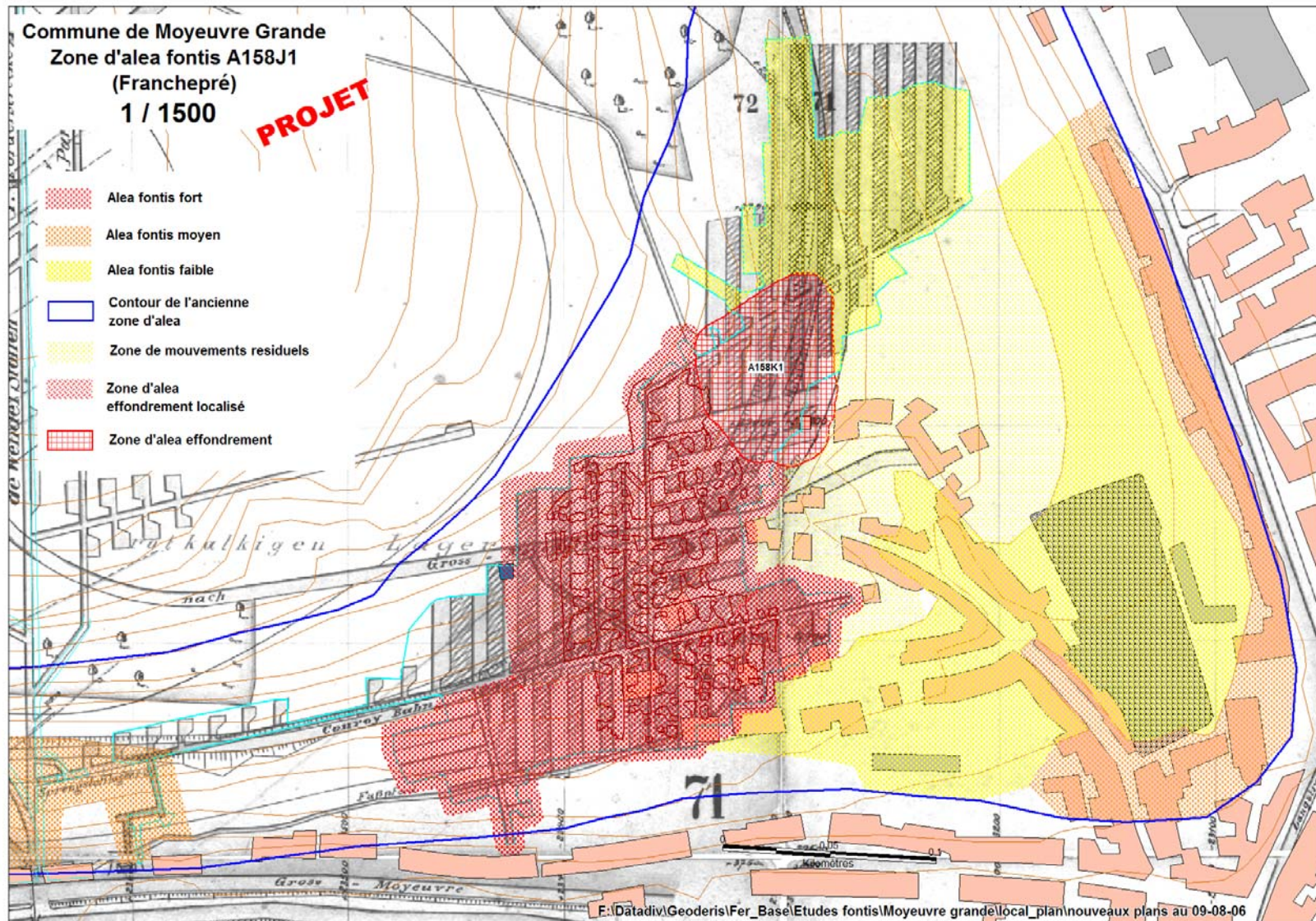


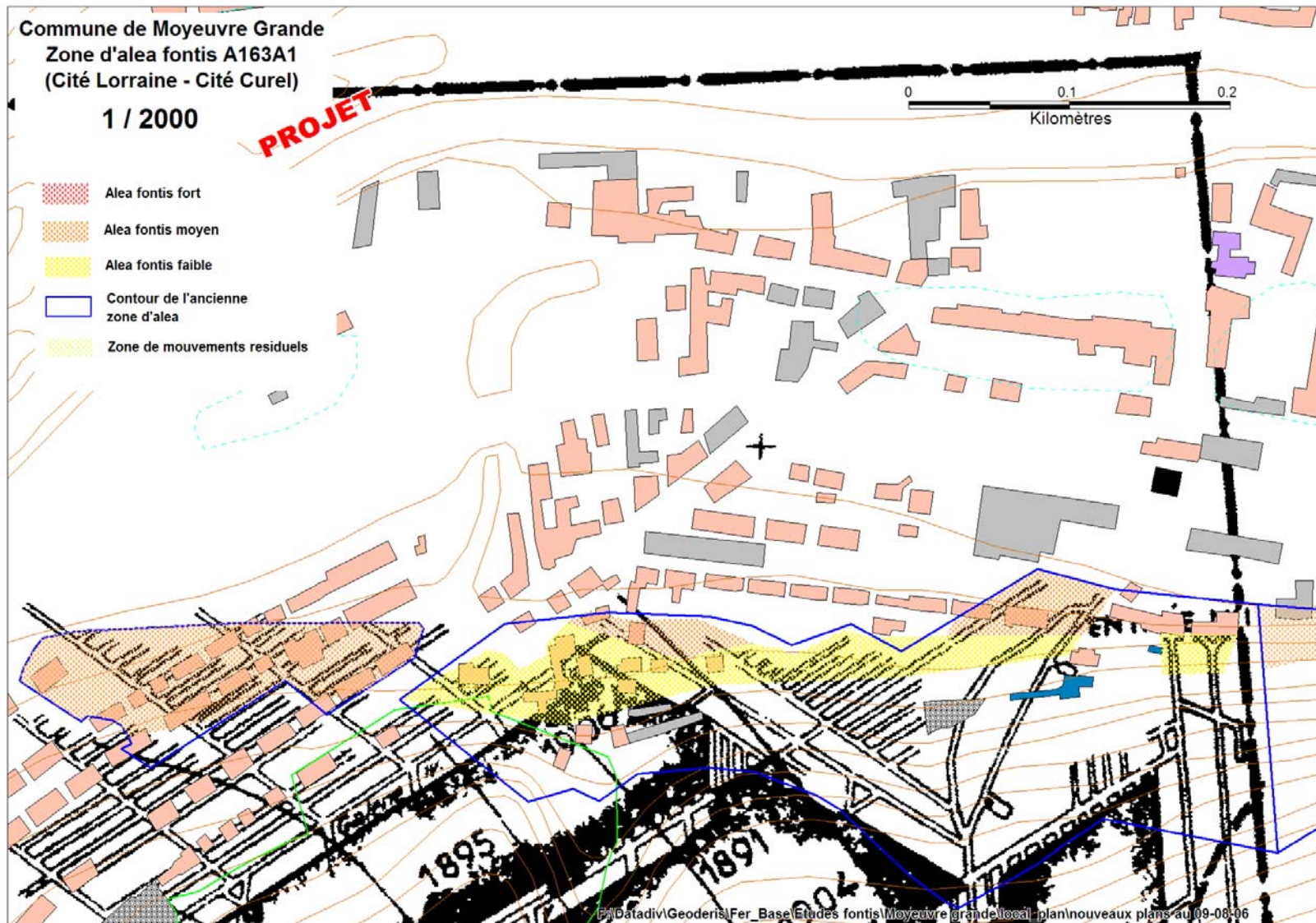
MOYEUVRE-GRANDE











HAYANGE

