



Bassin ferrifère de La Ferrière-aux-Etangs

Etude préliminaire à la réalisation d'un Plan de Prévention des Risques Miniers sur le territoire des concessions de La Ferrière-aux-Etangs et de Mont-en-Gérôme

Phase informative et évaluation des aléas « mouvement de terrain »

GEODERIS

X. DAUPLEY, C. LOISEAU

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

7 janvier 2005

Bassin ferrifère de La Ferrière-aux-Etangs

Etude préliminaire à la réalisation d'un Plan de Prévention des Risques Miniers sur le territoire des concessions de La Ferrière-aux-Etangs et de Mont-en-Gérôme

Phase informative et évaluation des aléas « mouvement de terrain »

GEODERIS

Personnes ayant participé à l'étude

Simon Loiseau, Stagiaire à la Direction des Risques du Sol et du Sous-sol

7 JANVIER 2005

Ce document comporte 56 pages (hors couverture, figures et annexes).

	Rédaction	Vérification	Approbation
NOM	X. DAUPLEY	C. DIDIER	C. TAUZIEDE
Qualité	Ingénieur à l'Unité Modélisation et Evaluation des Risques Géotechnique de la Direction des Risques du Sol et du Sous-sol	Responsable de l'Unité Modélisation et Evaluation des Risques Géotechnique de la Direction des Risques du Sol et du Sous-sol	Directeur des Risques du Sol et du Sous-sol
Visa			

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION	4
CONTEXTE DE L'ETUDE	4
PHASE INFORMATIVE	5
EVALUATION DES ALÉAS « MOUVEMENTS DE TERRAIN »	5
1. TRAVAUX RÉALISÉS.....	7

PARTIE I : PHASE INFORMATIVE

1.1 SUPPORTS CARTOGRAPHIQUES	7
1.2 SYSTÈME D'INFORMATION GÉOGRAPHIQUE	8
1.3 INCERTITUDES DE CALAGE.....	8
1.4 AUTRES INCERTITUDES OU ERREURS RELATIVES AUX PLANS MINIERES	8
1.5 DOCUMENTS TECHNIQUES CONSULTÉS	9
1.6 VISITES SUR SITE.....	9
2. CONTEXTE GÉOGRAPHIQUE ET GÉOLOGIQUE DU GISEMENT FERRIFÈRE DU SYNCLINAL DE LA FERRIERE-AUX-ETANGS.....	10
2.1 SITUATION ET TOPOGRAPHIE DES SECTEURS EXPLOITÉS	10
2.2 GÉOLOGIE.....	11
2.3 GISEMENT.....	12
2.4 HYDROGÉOLOGIE.....	14
3. HISTORIQUE ET EXPLOITATION MINIÈRE DE LA FERRIERE-AUX-ETANGS.....	16
3.1 HISTORIQUE ET OSSATURES	16
3.2 MÉTHODES D'EXPLOITATION ET CONFIGURATIONS	17
3.2.1 Les anciennes fouilles ou minières	17
3.2.2 Les travaux souterrains	18
3.3 OUVRAGES DÉBOUCHANT AU JOUR.....	20
4. DESORDRES EN SURFACE LIÉS A L'EXPLOITATION MINIÈRE	24
4.1 DÉSORDRES RECENSÉS DE TYPE EFFONDREMENT LOCALISÉ.....	24
4.2 RETOUR D'EXPÉRIENCE SUR LE CAS D'AFFAISSEMENT DE 1967-1968.....	28
5. ÉTABLISSEMENT DE LA CARTE INFORMATIVE	29

PARTIE II : EVALUATION DES ALEAS "MOUVEMENTS DE TERRAINS"

6. IDENTIFICATION ET PRÉVISION DES ALÉAS SUR LE SECTEUR DE LA FERRIÈRE-AUX-ETANGS.....	31
6.1 LES ALÉAS OBSERVÉS SUR LE SYNCLINAL DE LA FERRIÈRE-AUX-ETANGS.....	31
6.2 PRÉVISION DES ALÉAS : APPORT DE LA RETROANALYSE.....	32
6.3 ANALYSE DU RISQUE D'AFFAISSEMENT PAR MODÉLISATION NUMÉRIQUE	35
6.4 ANALYSE DU RISQUE D'EFFONDREMENT GÉNÉRALISÉ	35
6.5 LES DIFFÉRENTS ALÉAS RETENUS.....	37
7. EVALUATION DES ALÉAS DANS LE BASSIN DE LA FERRIÈRE-AUX-ETANGS	38
7.1 LES EFFONDREMENTS LOCALISÉS	38
7.1.1 Effondrements localisés par rupture du toit des chambres ou de piliers.....	38
7.1.2 Effondrements localisés de puits ou de montages.....	40
7.1.3 Effondrements localisés par éboulement de galeries isolées.....	42
7.2 LES AFFAISSEMENTS	43

7.3 LES ALÉAS TASSEMENT ET GLISSEMENT ASSOCIÉS AUX MINIÈRES 49

8. CONCLUSIONS 50

BIBLIOGRAPHIE 52

LISTE DES ILLUSTRATIONS ET ANNEXES..... 54

LISTE DES CARTES 56

INTRODUCTION

CONTEXTE DE L'ETUDE

Le synclinal paléozoïque de La Ferrière-aux-Etangs, orienté sensiblement nord-ouest – sud-est, a fait l'objet, de 1901 à 1970, sur son flanc sud-ouest, d'une exploitation du minerai de fer. La zone exploitée se situe, du nord-ouest au sud-est, respectivement sur les concessions de la Ferrière-aux-Etangs et Mont-en-Gérôme et s'étend, sur moins de 6 km, depuis le village de la Ferrière-aux-Etangs en direction du sud-est. Ce secteur est situé entre les villes de La Ferté-Macé au Sud et Flers au Nord (Orne).

L'essentiel des travaux d'exploitation a concerné la concession de La Ferrière-aux-Etangs. Les travaux souterrains de la concession de Mont-en-Gérôme sont d'extension limitée et n'ont été réalisés qu'à partir des travaux souterrains de la concession de La Ferrière.

Des travaux de recherche, très limités, ont été menés au début du XX^{ème} siècle au lieu-dit La Fonte, en dehors de la zone principale de travaux, 4 km au nord-ouest du bourg de La Ferrière-aux-Etangs.

Tableau 1 : Concessions minières ayant exploité le gisement de fer du synclinal de La Ferrière-aux-Etangs

Concession	Superficie (ha)	Date d'institution	Date d'arrêt des travaux	Derniers titulaires	Date de renonciation
La Ferrière-aux-Etangs	2407	1901	1970	Société des Hauts Fourneaux, Forges et Aciéries de Denain et d'Anzin (jusqu'en 1971) Société des Mines de fer de Segré (à partir de 1971)	1988
Mont-en-Gérôme	1970	1903	1970	Société des Mines de Douaria (jusqu'en 1947)	Demandée sans suite en 1983

Début 2004, GEODERIS a demandé au BRGM et à l'INERIS la réalisation des études préalables à l'élaboration d'un Plan de Prévention des Risques Miniers (PPRM)¹ relatif à l'ancienne exploitation du fer dans le synclinal de La Ferrière-aux-Etangs. Pour ce faire, les travaux ont été menés en deux étapes : la première, effectuée par le BRGM et l'INERIS, concerne l'établissement de la phase informative, la seconde, prise en charge par l'INERIS, traite de l'évaluation de l'aléa « mouvements de terrain ».

Les figures 1 et 2 situent l'emprise des travaux miniers concernés par l'évaluation des aléas mouvements de terrain sur les concessions de La Ferrière-aux-Etangs et Mont-en-Gérôme. Le secteur des travaux de recherche du lieu-dit La Fonte est, quant à lui, précisément localisé sur les encadrés de la carte informative en annexe A.

¹ Les Plans de Prévention des Risques Miniers 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, fixe les modalités d'application du chapitre I de cette loi.

PHASE INFORMATIVE

Cette phase d'étude dite « phase informative » a eu pour objectif, d'une part, de caler le plus précisément possible les plans de mine et, d'autre part, de collecter un maximum d'informations visant à identifier les phénomènes de ruptures potentiels et les aléas redoutés. La démarche a comporté les phases suivantes :

- une enquête préalable qui a permis de recueillir les documents disponibles, spécifiques des sites étudiés (plans d'exploitation, archives minières, rapports, études géotechniques, carte géologique, etc.). L'approche documentaire et cartographique a été menée auprès des organismes susceptibles de fournir les renseignements utiles : GEODERIS, qui a centralisé les documents détenus par la DRIRE Basse-Normandie et les Archives Départementales de l'Orne, le BRGM, la Mairie de La Ferrière-aux-Etangs. Quelques personnes susceptibles d'apporter des informations relatives à la mine ont également été interrogées ;
- des visites de terrain qui ont permis de caler les plans miniers à partir des ouvrages débouchant au jour, de donner des valeurs d'incertitude sur le positionnement des contours des exploitations par rapport à la surface et d'observer, à l'échelle des sites, les phénomènes d'instabilité recensés en les intégrant dans l'interprétation de l'ensemble des données collectées. Elles ont permis également de relever les mouvements apparents (récents ou passés) qui n'auraient pas été répertoriés dans les archives disponibles (procès verbal ou plan) et de mettre à jour la localisation des dégâts de surface sur la carte informative ;
- la réalisation d'une cartographie « informative » au 1/5000^{ème}, synthétisant ces travaux. (annexe A)

Cette phase d'étude est finalisée dans la partie I du présent rapport.

EVALUATION DES ALÉAS « MOUVEMENTS DE TERRAIN »

A partir des informations acquises à l'issue de la phase d'étude précédente, une analyse des aléas « mouvements de terrain » a été effectuée pour identifier les différents phénomènes de type mouvements de terrain susceptibles de survenir sur le site. Les deux principales étapes de la démarche ont consisté à procéder :

- à un découpage des travaux en zones homogènes, établi d'après les plans d'exploitation et l'analyse des configurations géologiques ou géomorphologiques ;
- à la détermination des phénomènes attendus en surface, fondée sur les configurations identifiées et les désordres déjà observés ou prévisibles et à la prévision de leur occurrence potentielle.

Cette analyse a eu pour objectif de réaliser :

- une évaluation de l'aléa par type de phénomène (ou désordre) attendu, compte tenu de leur intensité et de la prédisposition des sites considérés ;
- une cartographie des différents aléas « mouvements de terrain » au 1/5000^{ème} (annexes B, C et D).

Cette phase d'évaluation des aléas est finalisée dans la partie II du présent rapport.

PARTIE I
PHASE INFORMATIVE

1. TRAVAUX RÉALISÉS

Les travaux ont été effectués à partir de supports cartographiques réalisés par le BRGM. Les informations complémentaires ont été obtenues grâce aux documents centralisés et mis à notre disposition par GEODERIS (issus des archives de la DRIRE Basse-Normandie et des archives départementales de l'Orne) et aux visites de terrain.

1.1 SUPPORTS CARTOGRAPHIQUES

Les informations cartographiques (fond et surface) ayant servi de sources à la réalisation des plans (cartes informatives et cartes d'aléas) ont été recherchées par le BRGM à partir des documents d'archives disponibles à différentes échelles et à différentes époques (M. Loislard, BRGM/RP-53242-FR, avril 2004, [1]). On retiendra principalement les documents suivants :

- 2 plans d'ensemble au 1/2500^{ème} des travaux du fond des concessions de La Ferrière-aux-Etangs et de Mont-en-Gérôme. Ces plans mentionnent les ouvrages au jour visibles ;
- 10 plans au 1/1000^{ème} de détail des travaux du fond. Ceux-ci ont été retenus pour la numérisation. Ils sont les plus détaillés et précis disponibles².

Ces 12 plans sont datés de 1970, soit à la date de l'arrêt définitif de l'exploitation. Ils constituent donc les éléments cartographiques les plus complets existant sur les travaux souterrains dans le secteur étudié.

- 1 plan au 1/1000^{ème} de 1903 positionnant les travaux de recherche de la Fonte
- orthophotoplan : une démarche engagée par GEODERIS auprès de la DRIRE Basse Normandie a permis d'obtenir l'autorisation d'utiliser l'orthophotoplan acquis par le Conseil Général de l'Orne. Il s'agit du document de base utilisé pour le report des travaux miniers.

Le scannage et le calage des plans d'exploitation sur l'orthophotoplan ont été assurés par le BRGM [1] et mis à notre disposition en vue de la réalisation de la carte d'aléa.

La précision des plans souterrains disponibles les plus détaillés et les plus complets (plans au 1/2500^{ème} pour la moins bonne) et l'excellente qualité du support cartographique de la surface (orthophotoplan) permet de retenir le 1/2500^{ème} comme échelle de travail. Tous les calages, repositionnements, géoréférencements ont donc été effectués sur des plans à cette échelle. Pour des raisons pratiques de lecture des plans papier, la carte informative et les cartes d'aléas reportées en annexe de ce rapport sont toutefois restitués à l'échelle de 1/5000^{ème}, la précision de travail étant conservée dans le SIG joint par ailleurs sous forme numérique.

² Certaines parties de plan trop sombres ont nécessité un travail de restauration dans les parties les moins lisibles.

1.2 SYSTÈME D'INFORMATION GÉOGRAPHIQUE

Les documents « sources » dont nous disposons sont sous la forme d'un Système d'Information Géographique (SIG sous MapInfo) constitué de tables cartographiques associées à des données comprenant :

- l'ensemble des travaux : plans au 1/1000^{ème} scannés et assemblés sur lesquels sont visibles les galeries et travers bancs, les chambres et les piliers résiduels et les anciennes fouilles au jour. Des cotes fond et jour sont également visibles. Ces plans sont géoréférencés en Lambert II carto de Paris ;
- les niveaux d'exploitation principaux (galeries de niveau) vectorisés (à partir des plans au 1/1000^{ème}) ;
- les courbes de niveaux de surface vectorisées (cadastre numérisé de la commune de La Ferrière-aux-Etangs complété par digitalisation des courbes des cartes topographiques de l'IGN en dehors de cette commune) ;
- les anciennes fouilles reconnues ;
- les limites des communes ;
- les limites des anciennes concessions minières ;
- le tracé des désordres reconnus en surface (effondrements localisés et fontis, zones affaissées) ;

1.3 INCERTITUDES DE CALAGE

Les incertitudes de calage des plans miniers sur l'orthophotoplan sont définies dans le rapport du BRGM [1].

On considère que l'orthophotoplan ne génère pas d'incertitudes significatives intrinsèques.

Pour les plans miniers, les écarts de calage entre les puits miniers et leurs coordonnées DGPS qui subsistent après redressement informatique avec le logiciel ERDAS sont :

- nuls pour les Montage du Brûlé et n°8 situés respectivement aux extrémités nord et sud des travaux d'exploitation ;
- de 3 m au puits Pralon, ouvrage principal de la mine situé au centre de la zone exploitée.

1.4 AUTRES INCERTITUDES OU ERREURS RELATIVES AUX PLANS MINIERES

L'analyse des plans miniers au 1/1000^{ème} a mis en évidence quelques omissions dans le détail des travaux d'exploitation. Elles concernent :

- quelques zones de travaux exploités par tailles montantes pour lesquelles seuls les contours sont figurés. Ces zones sont distinguées des secteurs non exploités par l'esquisse des travaux matérialisée par le dessin des stots et piliers protégeant les voies de desserte, aval et surtout amont. Il s'agit notamment des travaux situés au sud du puits Pralon ;
- une partie des travaux les plus anciens (niveaux 250 à 175) situés au nord-ouest du puits Pralon et jusqu'au montage du Brûlé. Dans ce secteur, les plans au 1/1000^{ème} de 1970 ne figurent que les galeries de niveau. L'existence de travaux d'exploitation entre ces galeries de niveau est attestée par des plans anciens (non datés) au 1/1000^{ème} sur lesquels le détail des travaux est reporté.

Pour ces travaux précités, la carte informative précise, par un figuré hachuré, qu'il s'agit de zones exploitées.

Par ailleurs, malgré une apparente bonne précision des plans de mine, nous considérons nécessaire de conserver une marge d'incertitude qui intègre à la fois les erreurs de levé des plans miniers et les incertitudes de calage. Les erreurs de levé des plans miniers ont pu être appréciées ponctuellement à La Ferrière-aux-Etangs par confrontation de plans de plusieurs époques (secteur des galeries Saint-André et Saint-Robert). Les décalages observés sont compris entre 5 et 10 m au plus. Dans la mesure où les écarts de calage constatés par le BRGM sont très faibles voire négligeables, nous retiendrons une incertitude globale, appliquée à l'ensemble du domaine minier, de 10 m. Cette incertitude ne s'applique toutefois pas aux ouvrages dont l'emplacement est confirmé et qui ont été levés par DGPS par le BRGM.

1.5 DOCUMENTS TECHNIQUES CONSULTÉS

L'essentiel des documents techniques disponibles a été centralisé par GEODERIS et a pu être consulté sur place. Si la documentation technique est relativement importante sur les autres bassins ferrifères de l'Ouest (Soumont, May-sur-Orne ou Segré), celle de La Ferrière-aux-Etangs demeure limitée. Les informations les plus précises concernant l'historique et les méthodes d'exploitation se rapportent aux années 1900-1930 grâce aux procès verbaux de visite de mine. On retrouve ensuite quelques écrits synthétiques à l'époque de la fermeture de la mine et pour ce qui concerne postérieurement les problèmes occasionnés par le travers-bancs 220 (T.B. 220). Entre ces deux périodes, les écrits techniques relatifs au déroulement de l'exploitation sont limités.

Ce manque d'information est pallié par deux monographies très détaillées, l'une sur les gisements et l'exploitation du fer dans les mines normandes [7], l'autre sur l'exploitation de La Ferrière-aux-Etangs proprement dite [8].

Il demeure qu'il subsiste quelques lacunes d'informations, notamment sur les caractéristiques techniques des ouvrages débouchant au jour. Les cas du TB 220 et du puits Pralon, pour lesquels nous ne disposons d'aucune coupe technique, en sont des bons exemples.

L'ensemble des documents bibliographiques, articles, rapports, archives et notes diverses est mentionné dans la bibliographie citée en fin de rapport.

1.6 VISITES SUR SITE

Plusieurs visites détaillées du site ont été effectuées par le BRGM, l'INERIS et GEODERIS en 2004, à l'occasion des recherches informatives.

Les visites sur le terrain ont eu pour objet :

- de confirmer certaines informations relatives à l'exploitation, tirées des documents d'archives (position d'ouvrages, détails de plans, etc.) ;
- d'observer la nature et l'état des ouvrages débouchant au jour (entrées de galerie, puits et montage), chaque fois que cela fut possible ;
- de rechercher, d'observer et de caractériser les anciens dégâts de surface cités dans les documents ou figurant sur des plans et, le cas échéant, les nouveaux, liés à des instabilités minières récentes.

2. CONTEXTE GÉOGRAPHIQUE ET GÉOLOGIQUE DU GISEMENT FERRIFÈRE DU SYNCLINAL DE LA FERRIERE-AUX-ETANGS

2.1 SITUATION ET TOPOGRAPHIE DES SECTEURS EXPLOITÉS

Les concessions de La Ferrière-aux-Etangs et de Mont-en-Gérôme s'alignent selon un axe nord-ouest – sud-est à égale distance des villes de Flers au nord-ouest et La Ferté Macé au sud-est (figure 1).

La concession de La Ferrière-aux-Etangs s'étend sur une superficie de 2407 ha. Elle intéresse le territoire de 10 communes : La Ferrière-aux-Etangs, Dompierre, Banvou, Le Châtellier, Messei, Saint-André-de-Messei, Saires-la-Verrerie, Bellou en Houlme, Champsecret et La Coulonche.

Pour la concession de Mont-en-Gérôme, d'une superficie de 1970 ha, les communes concernées sont La Coulonge, La Ferrière-aux-Etangs, La Sauvagère, Saint-Michel-des-Andaines, Juvigny-sous-Andaines et Champsecret.

Les travaux miniers souterrains ne concernent qu'une faible étendue de terrain (moins de 250 ha) relativement à la superficie totale des deux concessions (4377 ha) (figure 1). Ils forment une bande de moins de 5 km de longueur pour une largeur n'excédant pas 700 m. Ils se situent à l'intérieur du périmètre des deux seules communes de La Ferrière-aux-Etangs et de La Coulonche. Au nord-ouest de la concession de La Ferrière, les travaux de reconnaissance de la Fonte intéressent le territoire de la commune de Banvou.

Par la suite, dans ce rapport, on dissociera la zone d'exploitation en deux secteurs, nord et sud, tel que présenté sur la figure 2. Cette séparation correspond à celle usuellement retenue par les anciens mineurs et qui se justifie par la présence d'une faille qui redresse le gisement vers le Nord.

Dans ce secteur du bocage normand, les reliefs sont relativement prononcés et marqués par les structures du synclinal paléozoïque de La Ferrière-aux-Etangs (figure 6). Les barres gréseuses qui le constituent (grès armoricain et grès de May), orientées selon un axe NW-SE, culminent à 280-290 m NGF. La barre de grès armoricain, sur laquelle est implanté le vieux village de La Ferrière-aux-Etangs, constitue l'assise du synclinal. Elle domine les dépressions plus ou moins marécageuses situées à l'ouest (secteur de la Cité de la Haie et des anciens fours) et qui constituent les points bas de tout le secteur étudié, aux alentours de 210-220 m NGF (figure 2).

Le réseau hydrographique est peu développé. Il est constitué du ruisseau de la Mousse qui draine les terrains du secteur sud et de celui de Monnière qui draine le secteur Nord. Ces deux ruisseaux s'écoulent d'abord vers le nord-ouest, au sein et selon l'axe du synclinal, dans la légère dépression formée par la formation des schistes du Pissot (également appelés schistes d'Angers), encadrée par les deux barres gréseuses puis, à la faveur de décalages structuraux de la barre du grès armoricain, continuent leur parcours vers l'ouest en dehors du synclinal.

Comme le montre l'orthophotoplan (annexe A), le site de l'ancienne mine de fer est faiblement urbanisé. Le secteur sud ne concerne quasiment exclusivement que des terres d'élevage et de forêt et quelques bâtiments ou habitations (secteur des lieux-dits les Minières, la Fieffe et puits Pralon). Le secteur nord intéresse, dans sa moitié sud des terres d'élevages et quelques fermes, alors que sa moitié nord se localise à l'aplomb de nombreuses habitations à l'est et au sud du vieux village de La Ferrière-aux-Etangs.

2.2 GÉOLOGIE

Le gisement ferrifère du synclinal de La Ferrière-aux-Etangs s'intègre dans l'ensemble des bassins ferrifères de l'Ouest de la France, constitués du bassin de Normandie (région Caen-Domfront) et du bassin d'Anjou-Bretagne (région Angers-Rennes et de Segré) (Figure 3).

Le synclinal de La Ferrière-aux-Etangs est, avec celui de Saint-Clair-de-Halouze qui le prolonge vers le nord-ouest, une digitation du synclinal de Mortain-Domfront-l'Hermitage (figure 5). Ces structures paléozoïques, les plus méridionales du bassin bas-normand, ont été plissées à l'époque hercynienne. Elles ont en commun, dans cette région, l'absence de leur flanc nord, tronqué par des failles bordières qui les mettent en contact soit avec des massifs granodioritiques (cas de La Ferrière-aux-Etangs) ou avec les schistes du Briovérien.

La structure du synclinal et la nature lithologique de son substratum et des terrains qui le composent peuvent être appréciés grâce à la carte structurale et à la coupe géologique schématique présentées respectivement en figures 5 et 6 :

- le synclinal de La Ferrière-aux-Etangs a une orientation générale N 140° E, peu commune à celle des autres unités de la région. Le plongement de son flanc sud, vers le nord-est, varie de 25° à 45°. Il est affecté localement d'accidents décrochants d'orientation plus ou moins transverse à son axe et dont le plus important délimite les deux principaux secteurs exploités (figure 2) ;
- dans le secteur du village de La Ferrière-aux-Etangs et jusque dans le hameau du Gué-Plat, le synclinal repose en discordance sur les schistes précambriens (Briovérien) (figure 6) et est limité à l'est par le massif granodioritique de La Ferté-Macé. Vers le sud, le synclinal est encadré par deux massifs granitiques. Au nord de la concession de La Ferrière-aux-Etangs, dans le secteur du Bois de Messei, le synclinal disparaît complètement. A l'extrême nord de la concession, au lieu-dit La Fonte où ont été pratiqués début XX^{ème} siècle des travaux de reconnaissance, réapparaît une ébauche de structure synclinale très faillée qui correspond en fait à la terminaison sud-est du synclinal de Saint-Clair-de-Halouze ;
- Schistes du Briovérien. Il s'agit de la formation sur laquelle reposent en discordance les formations paléozoïques qui forment le synclinal de La Ferrière-aux-Etangs. Elle est composée d'alternances de siltites et d'argilites finement litées, plissées à l'époque cadomienne, puis plus ou moins métamorphisées au contact des intrusions granitiques. La carte géologique de Flers indique que la formation briovérienne dans le secteur du Gué Plat et de La Ferrière-aux-Etangs est métamorphisée en cornéennes, roche réputée mécaniquement résistante. La nature des terrains rencontrés aux abords du travers-bancs 220 (figure 6) et les nombreux fontis qui l'on affecté semblent indiquer cependant une nature plutôt schisteuse, voire argileuse, très altérée et beaucoup moins résistante dans ce secteur ;
- Grès armoricain : cette formation constitue l'assise du synclinal et le trait morphologique principal du secteur. La barre de grès, d'une épaisseur de 140-150 m, forme en effet un ressaut topographique marqué que l'on peut suivre dans le paysage du nord-ouest au sud-est et qui marque la bordure sud-ouest du synclinal. Elle est composée de quartzites très résistantes mais fortement diaclasées, localement exploitée ;
- au toit de la formation du Grès armoricain, on rencontre la formation des schistes du Pissot (autrement appelée en Anjou schistes d'Angers) dans laquelle se trouve interstratifiée la couche de minerai de fer :

- l'ensemble schisteux proprement dit, d'une épaisseur totale de l'ordre de 300 m est composé d'argilites et de siltites noires micacées ;
- la couche de minerai de fer de 2 à 5 m d'épaisseur se situe, dans les schistes du Pissot, entre 25 et 35 m au toit du Grès armoricain dans le secteur de La Ferrière-aux-Etangs et à 35 m dans la concession de Mont-en-Gérôme. Une description plus précise du gisement de fer est présentée dans le paragraphe suivant ;
- Grès de May. Trait morphologique également significatif dans le paysage, la formation des grès de May repose sur les schistes du Pissot et possède une épaisseur entre 80 et 100 m. Il s'agit de grès quartzitiques ou tendres souvent micacés ;
- on rencontre ensuite successivement, au-dessus des grès de May, la formation des schistes du Pont-de-Caen, composée d'argilites et siltites noires (puissance de l'ordre de 100 m) puis localement celle de la Tillite de Feugeurolles (25 à 35 m) et enfin une formation gréseuse de 70 m de puissance (Grès culminant) et les schistes siluriens qui constituent le cœur du synclinal. Ces dernières formations sont citées ici pour information. Elles demeurent suffisamment éloignées des zones de travaux pour ne pas avoir d'incidences sur l'exploitation et inversement pour ne pas être affectées par cette dernière.

L'ensemble des formations précitées est affleurant dans le secteur d'étude. Elles ne sont recouvertes que localement par des alluvions (vallées des ruisseaux de la Mousse et de Morinière) probablement peu épaisses compte tenu de l'importance des cours d'eau concernés.

2.3 GISEMENT

Le minerai de fer de La Ferrière-aux-Etangs est de nature essentiellement chlorito-carbonaté (oolithes de chlorites à ciment chlorito-carbonaté) contenant peu ou pas d'hématite. Les teneurs en fer accusent une décroissance du nord-ouest au sud-est (figure 4), de 47 à 50 % dans la zone nord de la concession de La Ferrière-aux-Etangs et 40 % à son extrémité sud, à 33 % au sud de la concession de Mont-en-Gérôme. Dans la zone exploitée, les mineurs distinguaient deux faciès, l'un gris bleuté au nord et l'autre rouge oxydé au sud.

Comme la teneur en fer, l'épaisseur de la couche de minerai décroît du nord vers le sud. Par recoupement de plusieurs sources d'information (notice de la carte géologique, documents généraux sur l'exploitation), on retiendra que, dans le secteur nord, la puissance de la couche varie de 3 à 5 m. Celle-ci diminue vers le sud et est comprise entre 2 et 4 m pour l'ensemble du secteur sud. Il n'est pas possible de faire une distinction plus précise à l'échelle du secteur d'exploitation, les plans ne mentionnant jamais l'épaisseur des travaux ou de la couche.

Au nord de la concession de La Ferrière-aux-Etangs, les travaux de recherche de La Fonte ont mis en évidence une couche de 1 m de puissance de pendage 70°. Le minerai est constitué d'hématite à 30-55 % de fer à cet endroit [18].

Le tableau 2 présenté ci-après synthétise les résultats d'essais mécaniques réalisés en laboratoire en 1957 par le CEBTP [10]. Ceux-ci révèlent des propriétés mécaniques très bonnes dans l'ensemble mais également une forte anisotropie des propriétés liée au litage. Ces valeurs relativement élevées sont citées dans le mémoire annexé au dossier de renonciation de la concession de La Ferrière-aux-Etangs [16] dans lequel il est précisé également que « l'excellente tenue des terrains a permis d'exploiter des chambres de 100 mètres et même 200 m de longueur ». Les valeurs apparaissent plus élevées ici par rapport à celles du minerai de fer d'autres bassins (ex : 100 MPa à Segré [3]).

Il apparaît cependant que ce type de minerai est relativement sensible aux altérations physico-chimiques [18]. Il semble que cette altération ait été remarquée principalement dans le secteur sud³ de l'exploitation où le minerai oxydé est plus fréquent et devient pulvérulent après dégradation.

On ne dispose pas de données relatives aux propriétés des terrains encaissants. On sait, seulement, par certains écrits [18], que la couche de minerai est encadrée par quelques « centimètres et décimètres de grès et schistes gréseux ». Cet encadrement de niveaux plus résistants semble être réservé au secteur d'exploitation nord. Il est mentionné à cet égard que, dans le secteur sud, la couche n'étant pas « armaturée de grès au toit, la tenue du toit est mauvaise » et a nécessité des travaux de boulonnage.

Tableau 2 : Caractéristiques mécaniques du minerai de La Ferrière-aux-Etangs [16]

Minerai de fer de La Ferrière-aux-Etangs	γd (kN/m ³)	Rt (MPa)		Rc (MPa)		E (GPa)	
		Perpendiculaire au litage	Parallèle au litage	Perpendiculaire au litage	Parallèle au litage	Perpendiculaire au litage	Parallèle au litage
Moyenne (*)	35,5	7	12	200	80	1,1	1,2

(*) : de 2 à 10 mesures selon les essais réalisés

Les caractéristiques générales du gisement de La Ferrière-aux-Etangs sont présentées dans le tableau 3 suivant. Pour des informations plus détaillées concernant les variations du pendage de la couche dans les zones exploitées, on pourra se reporter à la carte des pendages établie après vectorisation des travaux du fond présentée en figure 7.

Tableau 3 : Caractéristiques générales du gisement de La Ferrière-aux-Etangs

	Qualité	Secteur nord		Secteur sud	
		Pendage	Epaisseur	Pendage	Epaisseur
Couche exploitée	Chlorito-carbonaté	45°	3 à 5 m	30°	2 à 4 m

³ Dans le texte de référence [18], on parle de minerai septentrional et méridional, termes que nous avons interprétés comme étant relatifs aux secteurs nord et sud de l'exploitation de La Ferrière.

2.4 HYDROGÉOLOGIE

Le contexte hydrogéologique a fait l'objet d'une attention particulière dans l'environnement du TB 220 (secteur du Gué Plat), à la suite des nombreux désordres qui l'ont affecté (fontis) et aux nuisances associées (inondations) ([11], [19], [20]). On dispose notamment, dans ce secteur, d'informations sur les niveaux piézométriques grâce à deux piézomètres réalisés par le Conseil Général de l'Orne, directement dans les travaux miniers et dans la formation des schistes du Pissot, et 7 réalisés par la DRIRE Basse Normandie dans les schistes briovériens. La position des piézomètres ainsi que les résultats de leur suivi pendant la période 2000-2003 sont présentés respectivement en figures 8 et 9.

A partir de ces travaux et de la connaissance du contexte géologique et minier, le contexte hydrogéologique actuel peut être défini par les points principaux suivants :

Aquifères en présence

Les constatations faites sur la nature et les communications des aquifères à partir des données piézométriques dans l'environnement du TB et du secteur de la Fieffe, présentées ci-après peuvent, avec une bonne confiance, être appliquées à l'ensemble du domaine exploité, compte tenu de la régularité des contextes géologiques dans cette zone.

- les Schistes du Pissot, relativement peu perméables, ne sont aquifères qu'en cas de fracturation importante. Le piézomètre PZ2 (CG) situé dans le secteur de La Fieffe (figure 7) est implanté dans cette formation. Le niveau piézométrique s'établit une dizaine de mètres au-dessus de celui du PZ1 (CG) qui communique avec les vieux travaux, soit 255 m NGF en moyenne ;
- le Grès armoricain, dur, compétent et fracturé, constitue l'aquifère local le plus important. Des échanges entre la nappe des grès et des formations schisteuses qui l'encadrent, au profit de ces dernières, sont vraisemblables et même probables. Un état descriptif des travaux d'exploitation (document provenant des archives de la DRIRE) mentionne que le Grès armoricain constitue une réserve d'eau considérable et sa rencontre avec les travaux du fond donne lieu à d'importantes venues d'eau. Le niveau piézométrique dans les grès n'est pas connu ;
- les cornéennes briovériennes. De leur altération, il résulte une formation assez argileuse et plutôt imperméable. L'existence de sources dans cette formation montre que celle-ci peut-être localement productrice. Les niveaux piézométriques sont connus au droit de la route départementale 825 (PZ1 à PZ6) et en deux endroits au Nord du TB 220 (PZ7 et PZ8). L'évolution des niveaux d'eau est la même dans tous les piézomètres. Elle suit d'ailleurs, avec des amplitudes beaucoup plus faibles, celle du réservoir minier (voir figure 8) ;
- aquifère minier. Celui-ci est constitué par le remplissage des vides miniers créés par l'exploitation de la couche de fer, intercalée dans les schistes du Pissot. Pendant toute la durée de l'exploitation, le travers-bancs 220 a servi de galerie d'exhaure à la mine. Après l'arrêt de la mine en 1970, le réservoir constitué par les anciens vides miniers s'est progressivement rempli et l'exhaure naturelle s'est installée par la voie du travers-bancs. **Pendant l'exploitation, l'exhaure globale de la mine était de 1700 à 2000 m³/jour, dont environ 200 m³/jour provenant des travaux situés au-dessus du niveau 221 m NGF [19].**

Aujourd'hui, le TB continue à drainer les eaux provenant de la mine mais selon un fonctionnement hydraulique relativement complexe lié aux différents travaux de fermeture [11]. L'eau de la mine s'écoule actuellement à la cote 227 m NGF par une surverse ménagée à l'entrée du TB après les travaux de fermeture. A l'autre extrémité du TB, dans les travaux miniers proprement dits, le niveau d'eau s'établit en moyenne à 245 m NGF au puits Pralon. On note que le niveau d'eau dans le piézomètre PZ1 (CG) qui communique directement avec les travaux s'établit quelques mètres plus bas par rapport à celui mesuré dans le puits, ce qui traduit soit une certaine compartimentation de l'aquifère minier, soit un écoulement.

La différence de cote entre le point d'exhaure, en arrière des structures de fermeture du TB et la nappe des travaux miniers mesurée au puits Pralon s'explique par un isolement, au moins partiel, entre l'orifice du TB (point bas de l'exhaure) et le réservoir minier. Cet isolement résulte des éboulements successifs ayant affecté l'ouvrage et qui réduisent la charge hydraulique le long du TB.

N'ayant pas d'autres points de mesure du niveau d'eau dans les travaux miniers, nous retiendrons la valeur moyenne de 245 m NGF comme niveau d'ennoyage des vides miniers sur l'ensemble du domaine exploité. Au gradient hydraulique près, lié à l'écoulement, cette globalisation doit être assez juste dans la mesure où la nature des travaux (nombreuses communications possibles par les différents niveaux) ne permet pas une compartimentation hydraulique efficace. Il faut d'ailleurs ajouter qu'aucun autre point d'émergence des eaux de mine n'est connu.

Remarque sur les variations des niveaux d'eau dans l'aquifère minier. Il faut distinguer les variations des niveaux d'eau liées à l'impluvium et qui suivent le cycle des saisons, de celles qui pourraient résulter d'une modification volontaire du point d'exhaure actuel par le TB 220 :

- dans le premier cas, la figure 8 permet de constater que le niveau d'eau, au cours d'une année, peut varier cycliquement de l'ordre d'une dizaine de mètres entre les altitudes 240 et 250 m NGF ;
- afin de résoudre les problèmes hydrauliques associés au TB dans le secteur du Gué-Plat, GEODERIS fera percer prochainement le barrage hydraulique mis en place en arrière de l'orifice de l'ouvrage. Ces travaux ont pour objectif de diminuer la charge hydraulique en arrière du barrage et par-là même « d'assainir » la zone en diminuant la charge hydraulique moyenne dans les terrains encaissants. Compte tenu des pertes de charge existant au sein du TB, liées aux éboulements successifs qui l'ont affecté, cette baisse de charge hydraulique ne devrait pas occasionner de variations significatives au sein des travaux miniers. Tout au plus, celui-ci ne serait que de 5 à 6 m.

3. HISTORIQUE ET EXPLOITATION MINIÈRE DE LA FERRIERE-AUX-ETANGS

3.1 HISTORIQUE ET OSSATURES

Le minerai de fer, qui affleure sur au moins 4 km depuis le sud du village de La Ferrière-aux-Etangs, fut exploité précocement, sans doute dès l'époque celtique, par des minières⁴ à ciel ouvert. Attesté depuis 1353, l'extraction alimentait les forges grossières situées sur l'étang de La Ferrière, appelé d'ailleurs « Etangs des Forges ». Puis le minerai ravitailla les grosses forges de Varenne jusqu'à leur fermeture en 1866 (extraits du panneau de présentation du circuit du fer – chemin des minières).

C'est en utilisant les traces encore visibles de ces anciennes minières que la Société Denain-Anzin entreprit les premières recherches en 1897. La demande en concession de la concession de La Ferrière-aux-Etangs fut accordée en 1901.

L'exploitation souterraine débute, au sud de La Fieffe, par le creusement de deux galeries de niveau, Saint-Robert vers le sud-est et Saint-André vers le nord-est (à faible profondeur, aux alentours de la cote 250 m NGF). Elles s'enfoncent à flanc de colline pour rejoindre la couche de minerai, immédiatement sous les anciennes minières.

En 1905, un travers-bancs de 600 m (TB 220) est creusé (figures 6 et 8) perpendiculairement à la couche de minerai. Il relie le point bas de la zone dans le secteur du Gué Plat, à la cote 221 m NGF, et les travaux d'exploitation initiés à partir des galeries pré-citées, à la cote de 225 m NGF. Il s'agira de l'ouvrage principal de la mine pendant toute la première moitié de l'exploitation, avant d'être suppléé en 1938 par la mise en service du puits Pralon pour exploiter les niveaux les plus profonds. Le TB 220 assurera, jusqu'à la fin de l'exploitation, l'exhaure minière.

Jusqu'à la fin des années 1930, l'exploitation va se développer, au sud et au nord des travaux initiaux, depuis les étages 250 et 220⁵ jusqu'aux étages 175 et 125, soit entre quelques mètres (sous les anciennes fouilles) et 150 m de profondeur environ. Ces travaux concernent les lieux-dits de La Fieffe et la Pillière, jusqu'au Brûlé au nord, et ceux des Minières jusqu'au Rond du Sapin au sud. En s'approfondissant, l'exploitation va être facilitée par le creusement des puits n°1 et n°2, mis en service en 1918 et 1923, qui permettent de desservir les niveaux inférieurs (figure 10).

La méthode d'exploitation principale mise en œuvre à cette époque est celle des tailles rabattantes ou chassantes avec piliers abandonnés sans remblais. A la fin des années 1920, les P.V. de visite de mine [13], indiquent la mise en œuvre de travaux par chambres magasins dans les zones relevées et par raclage (chambres montantes) en plus de celle initialement pratiquée. Des précisions sur les méthodes d'exploitation et leur dimensionnement sont données plus loin.

A la fin de cette période, la production est de 178 000 tonnes par an.

⁴ On parlera indépendamment de minières ou de fouilles pour ces travaux à ciel ouvert.

⁵ Les étages sont dénommés par leur altitude en m NGF pour les niveaux supérieurs. Les plans de mine sont annotés avec des indications en profondeurs, précédées d'un moins, lorsque l'altitude est inférieure à 0.

En 1930, débutent les travaux de forage du puits central qui s'appellera plus tard puits Pralon. Sa mise en service est assurée en juin 1939. Il dessert alors les niveaux 220 (-20 m), 125 (-115 m) et 25 (-215 m). Toute l'extraction se fait alors par cet ouvrage. Les puits n°1 et 2 sont abandonnés et servent d'aérage des chantiers.

A partir de cette époque, les méthodes d'exploitation mises en œuvre sont toutes des méthodes montantes, essentiellement des tailles montantes avec un dimensionnement variable et, localement, lorsque le pendage le permet, des tentatives de chambres magasins.

Pendant la période 1940-1944, l'exploitation est au ralenti. Elle s'arrête même totalement en 1944, ce qui occasionne un ennoyage partiel jusqu'au niveau 125.

En 1947, la concession de La Ferrière-aux-Etangs est agrandie. Elle passe de 1605 ha à 2407 ha.

L'exploitation continue à se développer pour atteindre son apogée en 1960, année où la production atteint 720 000 tonnes. Le puits Pralon est foncé jusqu'à 470 m de profondeur et dessert alors les niveaux situés à 300, 350 et 400 m de profondeur. A cette époque, l'exploitation de la concession au nord est presque terminée, après avoir sous-miné une partie du village de La Ferrière-aux-Etangs. Elle butte sur un système de failles qui interrompt la couche [8]. Une correspondance entre la Société des Mines de Denain et Anzin et l'Administration en 1958 fixe d'ailleurs les modalités d'exploitation de cette partie du gisement pour tenir compte des zones bâties [21].

Au cours de la dernière décennie d'exploitation, les travaux se sont concentrés au sud vers et dans la concession de Mont-en-Gérôme. Après deux vagues de licenciement en 1963 et 1967, la fermeture de la mine est officiellement annoncée en 1969 et devient définitive le 1er avril 1970.

L'exploitation du gisement de La Ferrière-aux-Etangs a produit au total 16 millions de tonnes de minerai de fer. La zone exploitée s'étend selon une bande de moins de 5 km de longueur du nord-ouest au sud-est, sur 500 à 700 m de large. L'emprise en surface des travaux souterrains représente une superficie de l'ordre de 250 ha.

3.2 MÉTHODES D'EXPLOITATION ET CONFIGURATIONS

3.2.1 Les anciennes fouilles ou minières

La période d'exploitation souterraine qui débuta au début du XX^{ème} siècle a été précédée, probablement depuis des temps très anciens, par une phase d'exploitation du gisement à ciel ouvert, le long de l'affleurement de la couche.

Il en résulte la présence, encore très visible dans le secteur de La Ferrière-aux-Etangs, de dépressions allongées appelées fouilles ou minières qui marquent la présence de l'affleurement de la couche.

Ces minières sont présentes depuis le sud de l'étang du village de La Ferrière-aux-Etangs et se rencontrent jusqu'au lieu-dit Les Minières (figure 10). Les plus proches du village ont été comblées. Leur existence est aujourd'hui attestée principalement par leur contour figuré sur les plans de mine. La carte informative présentée en annexe A positionne toutes ces minières recensées en distinguant leur caractère comblé ou non.

Les minières « ouvertes » ont entre 5 et 10 m de profondeur et présentent des talus pentés entre 30° et souvent plus de 45°. Leur emprise varie entre 15 et 20 m. Les bords de ces excavations forment un bourrelet par rapport au terrain naturel environnant correspondant à la mise en déblai des stériles de fouille. La figure 11 montre une vue caractéristique des ces minières à La Ferrière-aux-Etangs.

Localement, le fond des minières est marqué par des dépressions métriques coniques (minières au sud de la galerie Saint-Robert) dont l'origine doit être recherchée soit dans le percement volontaire, soit dans l'arrivée au jour de fontis initiés par des galeries ou chambres plus récentes venues sous-miner les fouilles. Ce constat, complété de l'analyse des plans des travaux souterrains et de celui des minières, nous permet de retenir que, là où existent des minières et des travaux souterrains, les travaux souterrains sont continus depuis les affleurements (le fond des minières). Nous ne considérerons donc pas, par la suite, l'existence de stots de protection entre les vieux travaux à ciel ouvert et les travaux souterrains.

Au sud-est, de part et d'autre du montage n°6, les minières deviennent nettement moins marquées. La photo présentée en figure 12 en donne un exemple. Les dépressions, très discontinues, n'excèdent guère 2 m. En prolongeant vers le sud, il n'existe plus de traces de minières.

3.2.2 Les travaux souterrains

Au cours des 70 ans de l'exploitation, 2 méthodes se sont succédé ; une première méthode d'exploitation par taille chassante ou rabattante puis, alors que les travaux d'exploitation s'approfondissaient, l'exploitation par tailles montantes (et quelques variantes) s'est généralisée.

Tailles chassantes ou rabattantes

Cette méthode d'exploitation a concerné les travaux réalisés dans le premier quart du XX^{ème} siècle, immédiatement sous les minières et jusqu'à 150 m de profondeur environ, au nord et au sud de La Fieffe. Ils se localisent depuis le secteur du Brûlé au Nord jusqu'à celui du Rond du Sapin au sud. Les figures 14 et 15 permettent de visualiser sur un extrait de plan de la mine et de façon schématique, les principes d'exploitation :

- la couche est découpée en étages par des galeries de niveau, distantes verticalement de 50 m ;
- entre ces niveaux, des panneaux de 150 à 200 m de longueur sont individualisés ;
- chaque étage est ensuite subdivisé en 3 ou 4 sous-étages.
- le défilage s'effectue ensuite en rabattant vers un plan incliné central (cas de la figure 15) ou en « chassant » à partir de cette voie centrale. Au passage, des piliers carrés de 3 m de côté sont laissés. La répartition des piliers à l'intérieur des tailles n'est pas régulière. Aucun remblai n'est mis en place ;
- il est indiqué dans les P.V. de visite de mine qu'un stot de 10 m de large est laissé au niveau des voies principales. L'analyse des plans de mine permet néanmoins de constater que celui-ci ne dépasse pas 3 m en général. Il est constitué d'un alignement de piliers allongés. Il est, par contre, systématiquement présent, pour chaque sous-niveau exploité au-dessus de la cote 220 m NGF. Dans ces conditions, en l'absence de piliers intermédiaires dans la taille, la portée des chambres dans le sens de la pente est de l'ordre d'une dizaine de mètres.

Le calcul des taux de défrètement, réalisés sur des zones représentatives de cette méthode d'exploitation, donne des valeurs élevées, de l'ordre de 90 %, pouvant atteindre localement 95 %.

Il n'est pas relaté de problèmes particuliers vis-à-vis de cette méthode dans les documents d'archives. Il est d'ailleurs mentionné que les piliers sont en excellent état et ne souffrent pas de la pression du toit. Ceci est lié probablement aux bonnes propriétés mécaniques du minerai.

Tailles montantes

Le principe général de la méthode, développée aux alentours des années 1930 consiste :

- à creuser, « en montant », le long de la ligne de plus grande pente, des tailles ou chantiers. Ces chantiers, une fois terminés, reliaient une voie de base (d'où le chantier était parti) à une voie de tête où il arrivait ;
- les voies de tête et de base, tracées au préalable dans le gisement, découpaient un panneau dont la largeur, dans le sens de la pente, varie de 50 à 150 m selon la pente et la relevée entre niveau ;
- chaque taille est séparée par une bande de piliers résiduels alignés dans le sens de la pente ;
- le minerai abattu s'écoulait gravitairement lorsque la pente le permettait ou le plus souvent, était raclé mécaniquement.

A La Ferrière-aux-Etangs, cette méthode est employée avec un dimensionnement variable selon les secteurs, ces variations étant conditionnées par les changements de pendage, l'irrégularité de la couche et les différences de tenue du toit.

Les figures 13 et 13bis illustrent les différents modes d'exploitation par tailles montantes à partir d'un extrait des travaux du fond du secteur nord. A l'échelle de l'ensemble des travaux de la concession, on retiendra les configurations suivantes :

- à l'extrême nord de la zone exploitée (sous le village de La Ferrière-aux-Etangs), les tailles montantes sont prises sur des relevées (différences d'altitude entre niveaux) de 60 m. Les chambres et les piliers laissés en place ont respectivement 6 à 7 m et 3 m de largeur. Le taux de défrètement des panneaux exploités est de l'ordre de 65 %. Chaque voie de base est protégée par un stot de 10 m. On notera que des bandes non exploitées de 20 à 30 m de large individualisent les panneaux sur toute la hauteur de la couche exploitée, contribuant à diminuer l'extension globale des surfaces exploitées d'une seul tenant. A cet endroit, le plan d'exploitation prévoyait de laisser un stot de protection vertical de 45 m pour protéger le village [21]. En réalité, l'analyse des plans de mine au 1/1000^{ème} montre que les chambres les plus proches de la surface se situent à environ 70 m de profondeur.

Cette configuration d'exploitation est rencontrée depuis le village en direction du sud jusqu'au secteur de la Pilière et au sud de La Fieffe, et dans la concession de Mont-en-Gérôme pour les travaux situés au Nord du Montage n°8 et sur l'ensemble du domaine exploité dans les zones les plus profondes ;

- deux variantes de dimensionnement par rapport à celle décrite juste avant peuvent être individualisées :

- panneaux avec des relevées entre niveaux de 100 m et taux de défruitement relativement élevés. Un des exemples de ce type de configuration est donné sur la figure 13. Cette zone de travaux est située au sud du puits n°2. Le taux de défruitement atteint ici 80 % par élargissement des chambres (7 à 8 m) et diminution de la largeur des piliers. Ce type de configuration, avec un taux de défruitement plus faible, de l'ordre de 75 %, est rencontré entre La Fieffe et le puits n°1 pour des travaux compris entre 150 et 250 m de profondeur ;
- panneaux avec des relevées compris entre 50 et 100 m et un taux de défruitement de l'ordre de 60 %. Cette configuration est réservée aux travaux situés au sud du puits n°1. Les bandes de piliers ont entre 4 et 5 m de large. Les chambres n'excèdent pas 6 m de large ;
- cas particulier des chambres magasins (figure 13). Nous donnons ici quelques informations concernant cette méthode, sachant qu'elle n'a été que très peu mise en œuvre à La Ferrière-aux-Etangs compte tenu du pendage modéré du gisement [22]. Le dimensionnement de ces chambres diffère d'ailleurs assez peu de celui des tailles montantes pratiquées sous le village : la relevée entre étage est de 50 à 60 m. Un stot de protection de 8 à 10 m est laissé le long de la voie de tête et de 5 m le long de la voie de fond. Les piliers abandonnés sont de forme polygonale. Le taux de défruitement estimé est de 80 %.

3.3 OUVRAGES DÉBOUCHANT AU JOUR

Les documents d'archives (plans, notes et rapports) ont permis de recenser un certain nombre d'ouvrages débouchant au jour dont la liste décrite ci-après peut être considérée comme exhaustive. La moitié d'entre eux a été repérée et positionnée avec précision par le BRGM [1]. Les autres sont désormais inobservables car masqués par les remaniements du sol et la végétation.

Les principales informations connues sur ces ouvrages sont regroupées dans les tableaux suivants (4 et 5). Les modalités de traitement de la plupart de ces ouvrages sont décrites dans un document d'archives daté de mars 1971 [24]. Pour les ouvrages principaux (TB 220 en particulier), les traitements réalisés sont plus récents et leurs caractéristiques sont tirées (ou déduites) de plusieurs documents ([11], [16bis], [17], [23]).

a) **Mine de La Ferrière-aux-Etangs**

Parmi les ouvrages débouchant au jour de la mine de La Ferrière-aux-Etangs, il faut distinguer les ouvrages principaux qui ont servi à l'extraction du minerai de ceux qui servaient essentiellement à l'aérage, appelé montages.

Les ouvrages principaux sont les suivants :

TB 220 (photos figures 18 et 19) : il possède une orientation E-W et une longueur de l'ordre de 600 m. Son orifice se situe à la cote 221 m NGF (cote de la sole de la galerie) et son extrémité amont, au débouché dans les anciens travaux miniers, à près de 225 m NGF. D'après les informations disponibles (plans, coupes et reconnaissances par forage), le travers-bancs a une section en fer à cheval de l'ordre de 10 m² (3 à 3,5 m de hauteur, pour 3 m de largeur). Il a servi, au début de l'exploitation, d'ouvrage principal pour l'extraction et pour l'exhaure. Cette dernière fonction a été maintenue jusqu'à l'arrêt de l'exploitation.

Le travers-bancs recoupe d'abord, sur ses 430 premiers mètres environ, les cornéennes altérées du Briovérien, puis la barre du Grés armoricain sur 150 m et enfin, sur la trentaine de mètres restants, les schistes du Pissot.

Les nombreux événements en surface, occasionnés par cet ouvrage (fontis, débouillage) et les nuisances associées (inondations récurrentes dans son environnement) sont décrits dans le chapitre 4. Les travaux de fermeture du TB, effectués à plusieurs époques, ont été conditionnés par les désordres qui l'ont affecté. Certaines ambiguïtés concernant la réalisation effective de certains traitements ont pu être en partie levées à la suite de travaux de reconnaissance effectués par GEODERIS en 2003 et 2004. La connaissance actuelle des travaux de fermeture effectivement réalisés à l'orifice du TB est résumée en figure 19 bis :

- en 1972, les archives mentionnent la réalisation d'un serrement hydraulique en béton armé, d'un mètre d'épaisseur, ancré à la base de la galerie et positionné à 4 m de l'entrée. En arrière de ce serrement, un regard bétonné (« trou d'homme ») a été implanté. Ce dernier assure maintenant, par surverse, l'exhaure des eaux de mine drainées par le TB⁶. Ce regard a été réouvert par GEODERIS en 2004. Après pompage de l'eau, le fond a été sondé et a révélé la présence de boue (peut-être en lieu et place des moellons). Ce serrement hydraulique dont on peut aujourd'hui admettre l'existence malgré le manque d'informations fiables dans les archives, a été complété, à l'orifice du TB, par un mur en béton armé ;
- en 1987, un renforcement du mur existant a été réalisé par un autre mur en béton armé et des piédroits. Des reconnaissances par forage au travers de cette structure, effectuées par GEODERIS en 2003, ont mis en évidence un radier de béton à la base du TB sur au moins 3,7 m ;
- 110 m en arrière de son débouché au jour, le TB passe sous la route communale n°4 de La Ferrière à Champsecret. Il est fait mention, dans les archives [16bis], d'un renforcement par des cadres et d'un remblayage complet. Un sondage, effectué en 2000 à cet endroit pour implanter un piézomètre, a permis de mettre en doute l'existence d'un tel traitement ou du moins son efficacité, du vide ayant été trouvé lors du percement de la voûte du TB. En 2003, une dalle de répartition a été mise en place par le Conseil Général de l'Orne afin de s'affranchir de désordres éventuellement occasionnés par le TB sur la route.

Les nuisances récurrentes occasionnées par le TB dans son environnement depuis une vingtaine d'années ont motivé la réalisation de plusieurs études afin de trouver des solutions pour les minimiser voire les supprimer totalement ([11], [12], [19], [20]). La solution envisagée, à court terme, est de percer le TB à sa base afin de diminuer la charge hydraulique globale en arrière du serrement. L'objectif est « d'assainir » les terrains encaissants du TB et d'éviter les problèmes d'inondation et de résurgence des eaux de mine qui affectent les habitations proches de l'ouvrage dans le secteur du Gué Plat.

Le puits Pralon

Le puits Pralon a été démantelé, pour partie, à la fermeture de la mine (figure 20). Il ne subsiste aujourd'hui que les structures en béton dont l'état actuel est relativement délabré. Le risque de chutes d'éléments de la structure (éléments en béton, verres brisés) est réel.

⁶ La résurgence s'effectue en fait de façon diffuse dans la zone correspondant à l'aplomb du regard bétonné ou légèrement en amont à une cote voisine de 227 m NGF.

Une scierie occupe maintenant l'emplacement du carreau du puits et une partie des anciens bâtiments de la mine.

Le puits Pralon, mis en service en 1939, a un diamètre de 4,5 m, une profondeur de 470 m et 6 recettes. Nous ne disposons pas de coupe du puits et ne connaissons pas la nature de son revêtement. Compte tenu de l'époque de sa construction, le revêtement est très probablement en béton. Les terrains traversés sont uniquement constitués par les schistes du Pissot.

Ce puits n'a pas été remblayé. Le niveau d'eau s'établit à une cote moyenne de 245 m NGF, soit à la profondeur de 25 m. Le P.V. de récolement [17] mentionne l'exécution d'une dalle en béton armé de 8000 kg/m² au droit du puits et de 500 kg/m² sur toute la surface du local correspondant. Cette dalle débord donc de plusieurs mètres par rapport à la section stricte du puits. Des réserves ont été aménagées dans la dalle du puits pour permettre l'introduction d'appareils ou de pompes.

Les puits n°1 et n°2

Ces deux ouvrages ont servi initialement pour l'extraction. Plusieurs descriptifs de l'exploitation mentionnent qu'il s'agissait de puits intérieurs (bures). Toutefois, il est mentionné que ces puits ont été reconvertis en aérage par la suite. De plus, le puits n°2 est toujours visible au lieu-dit La Blanchetterie, ce qui ne laisse pas de doute quant au caractère « débouchant au jour » de cet ouvrage. Il demeure un doute concernant le puits n°1 : aucun vestige n'est aujourd'hui visible à son emplacement supposé. Dans le doute, nous le considérerons comme ouvrage débouchant au jour.

Le puits n°2 n'a pas été remblayé. Les ouvertures de la structure en pierre qui l'enserme (figure 17) ont été murées. Des rails ont été scellés à sa partie supérieure.

On considérera le puits n°1 comme également non remblayé.

Les terrains traversés sont uniquement constitués par les schistes du Pissot.

Les Montages

Ils ont tous un débouché au jour dans les anciennes fouilles ou, lorsque celles-ci n'existent pas, à l'endroit supposé de l'affleurement de la couche. Dans ce dernier cas, le tableau 4 précise, quand cela est possible, la longueur de l'ouvrage depuis son débouché au jour jusqu'à sa rencontre avec les travaux souterrains, correspondant généralement aux niveaux exploités les plus superficiels.

Les traitements réalisés sur ces orifices sont très variables : comblement par des matériaux hétéroclites (cas du montage du Jardin du Brûlé), comblement au bulldozer ou mise en place de dalles béton. On notera que le montage de l'Hospice, comme le n°8, ont été obturés par une dalle avec la mise en place d'un tube servant d'évent. Il n'existe plus de trace de ce traitement à l'emplacement du montage de l'Hospice.

Tableau 4 : Inventaire, du Nord au sud, des ouvrages débouchant au jour - Mine de La Ferrière-aux-Etangs. (en gras, les coordonnées des ouvrages retrouvés et levés au GPSD, les autres sont issues du calage des plans mineirs)

Ouvrage	Coordonnées X, Y	Fonction	Date de fonçage ou mise en service	Diamètre ou section	Profondeur ou longueur (m)	Travaux de fermeture réalisés
Montage de Hospice	389417,57 2411109,09	Aérage		0,3 m ²	L = 130 m	Dalle béton armé + évent (réaménagé, non observable)
Montage du Champ Blanc	389661,14 2410559,97	Aérage		2,6 m ²		Ouverture murée + scellement de rails (visible)
Montage des Riautés	389653,81 2410362,8	Aérage		0,9 m ²		Dalle béton armé (non observable)
Montage du Jardin du Brûlé	389741,11 2410223,6	Aérage		8 m ²		Comblement avec gravats, carcasses véhicules (non observable)
Montage du Brûlé	389790,03 2410204,93	Aérage		1,3 m ²		Orifice muré avec ouverture 0,2 x 0,2 m (visible)
Puits n°2	390170,39 2410270,92	Extraction Aérage	1923	8 m ²	P = 131 m (2 recettes)	Ouvertures murées + scellement de rails (visible)
Montage de La Pillière	390162,95 2409704,38	Aérage	-	4 m ²		Comblement au bull (vestige visible)
Montage de secours	390202,59 2409607,11	Aérage		0,7 m ²		Orifice muré avec ouverture 0,2 x 0,2 m (non visible)
Puits Pralon	390411,79 2409427,24	Extraction	1939	4,5 m	P = 470 (6 recettes)	Dalle béton + trappes accès (visible)
TB 220	389192,9 2408876,2	Extraction – Exhaure	1905	3x4	L = 600 m	Tampons béton +serrement hydraulique probable (visible)
Puits n°1	390490,27 2408659,64	Extraction Aérage	1918	3,1	P = 150 m	Inconnus,(non visible)
Galerie Saint-André	389868,9 2409172,4	Extraction	1901	1,5x1,8		Inconnus (vestiges de l'ancien carreau)
Galerie Saint-Robert	389854,9 2409139,6	Extraction	1901	1,5x1,8		Inconnus, (éboulements à l'entrée)
Montage n°6	390565,88 2407814,71	Aérage		2,3		Comblement au bull, débouillage en 82 (visible)
Montage n°8	391136,65 2407214,26	Aérage		0,8	L = 30 m	Dalle béton armé + évent 2 m (visible)
Puits de La Lande	390939,94 2407422,66	Recherche				Inconnu (dépression à l'endroit supposé du puits)

Secteur de La Fonte

Le secteur de la Fonte a fait l'objet de travaux de recherche au début du XX^{ème} siècle et a vu la réalisation de deux ouvrages, le puits Saint-Jules et une galerie de recherche de 300 m de long. Ces ouvrages ont été recherchés en 2004 mais aucun vestige n'a été retrouvé.

*Tableau 5 : Inventaire des ouvrages débouchant au jour
(Travaux de recherche de la Fonte)*

Ouvrage	Coordonnées X, Y	Fonction	Date de fonçage	Diamètre ou section (m)	Profondeur ou longueur (m)	Travaux de fermeture réalisés
Puits Saint-Jules	386644,8 2413609,1	Recherche	<1903			Inconnus (non visible)
Galerie de recherche	387092,0 2413459,4	Recherche	<1903		300 m	Inconnus (non visible)

4. DESORDRES EN SURFACE LIÉS A L'EXPLOITATION MINIERE

Le dépouillement des documents d'archives et les observations sur site nous permettent de disposer d'un recensement a priori exhaustif des désordres apparus en surface après l'arrêt de l'exploitation avec un bon recoupement des informations. Pendant l'exploitation, nous ne disposons que de deux événements, sans aucune indication du caractère exhaustif de ces informations.

Deux types d'évènements en surface sont recensés dans l'environnement des travaux miniers de La Ferrière-aux-Etangs. Il s'agit de désordres de type effondrement localisé et un cas d'affaissement. Un certain nombre d'entre eux est illustré sur les figures 21 à 28.

4.1 DÉSORDRES RECENSÉS DE TYPE EFFONDREMENT LOCALISÉ

Les principales caractéristiques des effondrements localisés sont données dans le tableau 6 ci-après. Ils sont décrits plus précisément à la suite, en fonction de la nature des mécanismes à l'origine du désordre en surface.

*Tableau 6 : Inventaire des désordres survenus en surface
dans les concessions de La Ferrière-aux-Etangs et de Mont-en-Gérôme*

Localisation	Réf Carte info ^(*) .	Date	Recouvre- ment	Prof. Travaux	Dimensions diamètre (φ) ou Lxl Profondeur (h)	Nature ou observations
Proximité fouilles de la Digue (chemin des Minières)	1 (NV)	1906	Schistes du Pissot	6 m	φ = 5 m P = 5 m	Rupture du toit d'une chambre. Talutage du fontis à 45°. Bordure de l'ancienne fouille.
	2 (NV)	1906	Schistes du Pissot	12-13 m	4 x 3 m P = 8 m	Fouille comblée aujourd'hui
Chemin des Minières (dans champs au nord-est) position approximative	3 (NV)	1979	Schistes du Pissot	≅ 50 m	?	Pendage de la couche = 35 ° τ ≅ 90 %
Chemin des Minières En bordure est de la fouille	4 (V)	1982	Schistes du Pissot	18 m	φ = 4 m P = 2 m	Aplomb d'une taille exploitée au-dessus du niveau 250
La Fieffe	5 (V)	1974	Schistes du Pissot	13 m	φ = 8 x 12 m P = 4 à 5 m	Zone de fractures à l'intérieur d'une surface de 2 à 3 ha. Travaux concernés entre 0 et 140 m (60 m en moyenne) pendage 45°
Galerie Saint-André	6 (V)		Schistes du Pissot	< 10 m	φ = 2 m	2 fontis de même dimension 100 m en arrière de l'orifice
Galerie Saint-André	7 (V)		Schistes du Pissot	≅ 15 m	φ = 2 m	2 percements de même dimension au fond de la fouille – aplomb galerie
Montage n°6	8 (V)	1982	En couche		φ = 2 m	Débouillage du comblement Ouvert. Clôturé d'un grillage de 2 m de hauteur
Puits de la Lande Menue	9 (V)		Schistes du Pissot		φ = 3 m P = 1,5 m	Peut-être tassement du remblai du puits
TB 220	10 (NV)	1967- 2003	Cornéennes altérées du Briovérien	Quelques mètres à 25 m	φ = 1 à 7-8 m P = 2 à 3 m	Entre 15 et 20 fontis jusqu'à ce jour. Volume des effondrements entre 30 et 700 m³ [23]
TB 220⁷		1972			Coulée de boue due à une mise en charge hydraulique en arrière des éboulements du TB. Rupture du mur de fermeture	

(*) (V) : désordre visible sur le terrain, (NV) non visible

Cas des effondrements localisés liés aux travaux souterrains

⁷ Cet événement est classé par commodité dans les effondrements localisés bien qu'il s'agisse d'un phénomène de nature différente.

On notera au préalable que tous ces effondrements localisés se situent à l'aplomb des travaux d'exploitation réalisés dans le premier quart du XX^{ème} siècle par la méthode des tailles rabattantes, conduisant à des défruits très élevés du gisement. Dans ce secteur, le pendage des travaux est le plus souvent proche de 30° mais peut atteindre 45° comme c'est le cas à La Fieffe. Ils sont quasiment tous associés à des travaux souterrains situés au-dessus du niveau d'ennoyage.

Les documents très détaillés (plans et coupes, voir figure 21) des deux effondrements survenus en 1906, à proximité d'une ancienne fouille, permettent de les classer sans ambiguïté dans les phénomènes ayant pour origine la rupture du toit d'une chambre.

Les deux effondrements dits du chemin des minières, dont l'un est encore visible⁸, se situent à l'aplomb des mêmes types de travaux et sont également classés dans cette catégorie. Signalons que l'effondrement de 1979 est positionné très approximativement. Il est toutefois mentionné qu'ils seraient apparus à l'aplomb du niveau 220, situé à une cinquantaine de mètres de profondeur à cet endroit.

Le cas de l'effondrement de La Fieffe mérite une attention particulière dans la mesure où il constitue le cas d'effondrement le plus important en terme de dimensions et qu'à son occurrence, est associée l'apparition de fractures dans un périmètre étendu. Cet événement est à l'origine du détournement de la route VO n°5 qui était menacée. Les figures 22 à 24 permettent de préciser les dimensions et la position de cet effondrement.

L'effondrement est apparu en mai 1974 à l'aplomb des vieux travaux du quartier de Saint-André, au-dessus du niveau 250 m NGF, dont le pendage est estimé à 45° et la profondeur à 13 m. D'après son positionnement sur les plans de mine, et aux incertitudes de calage près, il se situerait à l'aplomb d'un pilier de 3 m de côté. Le taux de défruitement de cette zone est élevé, de l'ordre ou supérieur à 90 %.

Associé à cet événement, sont apparues progressivement pendant une période de 3 semaines [16], des fissures dont la cartographie est donnée sur la figure 24. Elles s'organisent en deux réseaux. Le plus important, constitué par des linéaments orientés globalement est-ouest, d'une centaine de mètres de longueur, s'étend vers l'est jusqu'à l'aplomb de travaux situés à 140 m de profondeur environ. D'autres fissures, d'extension apparemment plus réduite, ont été repérées sur la route VO n°5 jusqu'à une distance de 200 m de l'effondrement. Au total, l'ensemble de ces fissures s'inscrit dans un périmètre de 2 à 3 ha. Il n'est fait mention, dans aucun écrit, d'affaissement, ou tout du moins de déclivité, de la surface du sol associée à ces événements, ce qui rend difficile l'explication du mécanisme à l'origine de ces événements.

Il semble clair que l'effondrement de la Fieffe trouve son origine dans la rupture d'un pilier et/ou du toit d'une chambre. L'apparition des fissures semble cependant indiquer qu'une surface importante de travaux souterrains, située entre quelques mètres et 140 m de profondeur, se soit éboulée dans les semaines qui suivirent. Dans ce cas, l'éboulement des travaux au fond a occasionné localement, là où les travaux étaient les moins profonds, un effondrement localisé et, à l'aplomb des travaux les plus profonds, un phénomène de type affaissement qui n'aurait été perçu que par les fissures.

⁸ On suppose qu'il s'agit de celui situé entre la route et l'ancienne fouille, à proximité du croisement du lieu-dit Les Minières.

Il est possible aussi qu'une partie des fissures constatées par la suite, en particulier celles situées sur la route soient antérieures et indépendantes des événements en question. Dans ce cas, seules les fissures les plus proches de l'effondrement seraient liées à l'événement. La zone de travaux affectée au fond serait alors plus réduite, les fissures n'étant que la répercussion d'un phénomène dynamique associé à l'effondrement.

Compte tenu des informations en notre possession, nous retiendrons la première hypothèse comme étant la plus probable.

Signalons enfin que cette zone de désordres se localise en bordure sud de la faille qui décale et redresse le gisement vers le nord et dont l'orientation est proche de celle du réseau principal de fissures. Cette situation peut être à l'origine de porte-à-faux de bancs au toit ou d'une simple fragilisation de celui-ci, affaiblissant la stabilité d'ensemble des travaux.

Cas des effondrements localisés liés à la rupture d'un ouvrage de communication au jour

Le TB 220 est à l'origine, à lui tout seul, depuis 1967 et jusqu'en 2003, de l'apparition de 15 à 20 fontis à son aplomb. D'après une coupe longitudinale du TB, retrouvée dans les archives [23], les volumes des fontis apparus au jour sont en moyenne de 30 à 40 m³, correspondant à des diamètres de 3 à 4 m pour des profondeurs équivalentes. Ce plan mentionne également un effondrement plus important de 600 à 700 m³ non loin du contact Grès armoricain-cornéennes. Tous ces fontis ont été comblés au fur et à mesure de leur apparition. Ils ont en commun d'être apparus dans la portion du TB situé à moins de 25 m de profondeur et dans les cornéennes ou schistes altérés du Briovérien. Il faut noter qu'aucun fontis n'est apparu à l'aplomb de la route VO n°4. Celle-ci est de toute façon maintenant protégée par la dalle de répartition.

Associée au TB, il faut signaler la coulée de boue survenue en 1972 qui s'épancha jusqu'à l'emplacement de l'ancienne piscine. Elle résulte de la rupture de l'ancien mur d'obturation et de la brutale mise en mouvement des matériaux éboulés dans la galerie par l'eau mise en charge en arrière de ces barrages artificiels. L'occurrence d'un tel phénomène au débouché du TB 220 peut maintenant être exclue, compte tenu de l'importance des renforcements réalisés sur le TB (serrement hydraulique, voiles de béton et pieds-droits).

Les autres effondrements localisés de type fontis sont apparus à l'aplomb de la galerie Saint-André ; 2 à proximité de son orifice à moins de 10 m de profondeur et deux en fond de fouille à une quinzaine de mètres de profondeur.

Enfin, deux cas de désordres associés à des puits ou montage sont recensés :

- celui du montage n°6 qui correspond apparemment à un débouillage en 1982 des matériaux de comblement mis en place au bulldozer lors des travaux de fermeture. Cet effondrement est protégé actuellement par un grillage de 2 m de haut (figure 26) ;
- le cas du puits de La Lande Menue. Il est constaté, à son emplacement probable (figure 25), une dépression de 1,5 m qui pourrait correspondre au tassement des matériaux de comblement.

4.2 RETOUR D'EXPÉRIENCE SUR LE CAS D'AFFAISSEMENT DE 1967-1968

Nous disposons d'un cas assez détaillé d'un événement ayant occasionné au jour un affaissement. Celui-ci s'est produit dans les années 1966-1967 dans le secteur situé au nord du puits n°1 et à l'est du chemin des Minières (secteur sud de l'exploitation). Ce cas est illustré en figure 28.

Les documents d'archives donnent des indications assez précises sur les phénomènes constatés au fond. Il a ainsi été cartographié l'évolution de l'extension du phénomène au fond sur les plans d'exploitation au 1/1000^{ème}. Les contours de couleur présentés en figure 28 représentent cette évolution. Il s'agit du constat visuel de mise en pression des piliers effectué par les mineurs à l'époque. L'enchaînement des événements est le suivant :

- un éboulement a pris naissance en 1966 dans les vieux travaux situés entre 200 et 250 m de profondeur dans une zone où le taux de défrèvement était de l'ordre de 80 %. Il s'est propagé vers l'aval, jusqu'à 300 m de profondeur, dans une zone en cours d'exploitation, s'arrêtant sur les stots de protection de la galerie mais écrasant partiellement le stot amont lorsque sa largeur était inférieure à 10 m [25]. Cette zone, concernée par l'éboulement, doit correspondre aux contours bleu ciel et orange de la figure 28. Elle correspond à une zone de travaux de 150 m de diamètre environ ; il est fait mention à la fin de l'année 1966-début 1967 d'une zone affectée de 2 ha, correspondant à une zone pseudo circulaire de 160 m de diamètre ;
- un calcul des sollicitations des piliers de cette zone avec la méthode de l'aire tributaire, conduit à définir une résistance mécanique limite des piliers à court terme comprise entre 25 et 31 MPa (le poids spécifique des terrains est pris égal à 25 kN/m³) ;
- ces désordres au fond se sont répercutés au jour en provoquant un affaissement vertical maximal de 30 à 40 cm [25]. Il s'agit des seules indications dans les archives concernant les caractéristiques de cet affaissement. Une visualisation actuelle de la zone supposée concernée permet de confirmer l'occurrence de l'affaissement. La morphologie de la surface du sol est en effet assez caractéristique. Sur la base de ces constatations, nous avons cartographié grossièrement la zone affectée (voir figure 28 et annexe A) ;
- au cours des mois qui suivirent, les mises en pression des piliers s'étendent, perpendiculairement au pendage de la couche et en remontant, jusqu'à des profondeurs de l'ordre d'une centaine de mètres dans les vieilles tailles rabattantes du début du siècle (contours vert, rouge et bleu de la figure 28). L'extension maximale atteinte par le phénomène de mise en pression est de l'ordre de 15 ha.

On retiendra que cet affaissement a été initié dans les travaux de tailles montantes avec un taux de défrèvement de l'ordre de 80 %. Dans cette zone, le pendage de la couche n'excède pas 35° et sa puissance, faute d'indications plus précises, doit être comprise entre 2 et 4 m, valeurs extrêmes pour le secteur sud. Les effets au jour sont visibles à l'aplomb, et légèrement décalés vers le sud-est, des travaux éboulés entre 200 et 250 m de profondeur. D'après ces observations, il semble que l'éboulement des travaux situés à plus de 250 m de profondeur n'ait pas eu de répercussions perceptibles en surface.

Il faut signaler enfin que, dans l'environnement de cette zone affectée par les éboulements et les mises en pression des piliers, les plans de mine localisent des zones anciennes éboulées pour lesquelles nous n'avons aucune indication sur l'apparition au jour de désordres. Deux d'entre elles sont bien identifiées sur les plans au 1/1000^{ème} (non représenté sur la figure 28) ; la première a pour dimensions 30 m par 60 m et se situe entre 140 et 190 m de profondeur environ. La seconde se situe entre 100 et 140 m de profondeur et correspond à un panneau de 20 m par 90 m.

5. ETABLISSEMENT DE LA CARTE INFORMATIVE

La carte informative synthétise de façon visuelle l'ensemble des connaissances acquises sur le site (informations documentaires, relevés de plans et observations sur le terrain). Celle-ci est présentée en annexe A à l'échelle 1/5000^{ème}. Elle comprend :

- l'orthophotoplan ;
- les limites de communes ;
- les limites de concessions ;
- la topographie de surface ;
- les travaux du fond scannés à partir des plans au 1/1000^{ème} ;
- les fouilles (minières) avec une indication du caractère remblayé ou non de celles-ci ;
- les désordres au jour connus, actuellement visibles ou répertoriés dans les archives (zone affaissée, effondrements ouverts ou remblayés) ;
- les ouvrages débouchant au jour (galeries, montages ou puits) en précisant s'ils ont été retrouvés ou non.

Pour des raisons pratiques, les travaux de la Fonte sont présentés en encadré sur la carte informative.

PARTIE II

EVALUATION DES ALEAS « MOUVEMENT DE TERRAIN »

6. IDENTIFICATION ET PRÉVISION DES ALÉAS SUR LE SECTEUR DE LA FERRIÈRE-AUX-ETANGS

La présente étude d'évaluation et de cartographie des risques miniers, menée sur les concessions de La Ferrière-aux-Etangs et de Mont-en-Gérôme, ne concerne que les aléas géotechniques de « mouvements de terrain », liés aux exploitations minières souterraines ou à ciel ouvert. Elle n'aborde pas les autres risques miniers tels que les émanations de gaz, par exemple, ou les impacts environnementaux sur la qualité des eaux et des sol.

6.1 LES ALÉAS OBSERVÉS SUR LE SYNCLINAL DE LA FERRIÈRE-AUX-ETANGS

Les informations recueillies sur les désordres associés à l'exploitation minière dans les concessions de La Ferrière-aux-Etangs et de Mont-en-Gérôme, synthétisées au chapitre 4 de la phase informative de ce rapport, permettent d'établir, sur l'ensemble de la zone d'étude, une classification plus précise des phénomènes, fondée sur l'aspect (observations) et l'origine supposée (mécanismes de rupture). Nous le reprenons de façon plus synthétique ici.

Les désordres recensés en surface, à l'aplomb des secteurs exploités des concessions de La Ferrière-aux-Etangs et de Mont-en-Gérôme, présentent les caractéristiques générales suivantes :

- on recense entre 25 et 30 désordres dont 15 à 20 sont imputables au seul TB 220 (on ne dispose pas d'un recensement précis des événements associés à cet ouvrage) ;
- un cas d'affaissement est relaté. Tous les autres sont à classer parmi les effondrements localisés avec toutefois une nuance pour le cas de La Fieffe qui associe probablement deux effets (effondrement localisé et affaissement à caractère relativement brutal) ;
- si l'on met à part le cas du TB 220 qui est spécifique car situé en dehors de la zone d'exploitation proprement dite et dans des terrains encaissants spécifiques (cornéennes altérées), les désordres recensés se localisent tous à l'aplomb des travaux du secteur sud. Ils sont principalement situés à proximité des fouilles (anciennes minières) et à l'aplomb des travaux à faible profondeur correspondant à l'exploitation par tailles rabattantes réalisées au début de l'activité minière souterraine ;
- compte tenu de leur localisation, la plupart des désordres sont associés à des travaux situés au-dessus du niveau d'ennoyage de la mine ;
- aucun effondrement localisé en gouttière, phénomène relativement spécifique des gisements de Segré ou May-sur-Orne, n'a été observé ici.
- de même, aucun effondrement généralisé à caractère brutal n'est signalé dans la zone.

La typologie des désordres est la suivante :

a) Effondrements localisés de type fontis

Ce type d'effondrement de forme pseudo-circulaire présente des dimensions jugées ici moyennes à forte pour de tels phénomènes (4-5 m de diamètre en général à 8-12 m dans un cas). 6 cas sont identifiés. Ils se situent à l'aplomb de travaux à faible profondeur (<20 m) à l'exception d'un cas associé à des travaux dont la profondeur serait de l'ordre de 50 m. La position de ce dernier est très approximative.

L'origine de ce type de phénomène est la rupture du toit des chambres d'exploitation (effondrements de 1906) ou d'un pilier (cas probable du fontis de La Fieffe), avec un développement en « remontée de cloche de fontis » sur des hauteurs de recouvrement d'une vingtaine de mètres, exceptionnellement 50 m (tableau 6).

Tous ces désordres sont apparus à l'aplomb des travaux exploités par tailles rabattantes et fortement défuités dans le secteur compris entre La Fieffe au nord et la ferme des Minières au sud.

b) Effondrement localisé par éboulement d'une galerie

On en recense entre 15 et 20 à l'aplomb du TB 220. Ils sont apparus au jour pour des épaisseurs du recouvrement comprises entre quelques mètres et 25 m. La plupart d'entre eux ont un diamètre de l'ordre de 2 à 4 m pour une profondeur équivalente.

Les autres cas concernent la galerie Saint-André pour des épaisseurs du recouvrement n'excédant pas 15 m.

Pour ce type de phénomène, les mécanismes en jeu sont la rupture des éléments de soutènement et du toit de la galerie et la progression d'une cloche de fontis dans le recouvrement, mécaniquement peu résistant (schistes ou cornéennes altérés).

c) Effondrements localisés liés aux montages ou aux puits

Des travaux de fermeture ont tous été réalisés sur les orifices au jour des montages. Il s'est agi soit de la mise en place d'une dalle ou mur ou du comblement au bulldozer par des remblais. Dans ce dernier cas, un effondrement localisé par débouillage des remblais est recensé (montage n°6).

Il n'y a pas de désordres recensés associés aux anciens puits d'exploitation.

A l'emplacement du puits de recherche de La Lande Menue, on constate une dépression dont l'origine peut-être le tassement des matériaux ayant servi à le combler.

d) Affaissement

Il existe un cas d'affaissement clairement identifié et décrit dans les archives, survenu en 1967-1968, à l'aplomb du secteur sud. Il résulte de l'éboulement au fond des travaux réalisés par tailles montantes avec un taux de défruitement de l'ordre de 80 %. L'affaissement constaté au jour apparaît associé aux travaux éboulés entre 200 et 250 m de profondeur, dans une zone où le pendage de la couche est de 35° pour une ouverture possible comprise entre 2 et 4 m.

A cet événement, on associera les désordres associés à l'effondrement de La Fieffe. Les fractures observées en surface du sol après l'effondrement sont, à notre sens, révélatrices d'un mouvement d'ensemble de la surface de type affaissement, à caractère relativement brutal qui n'aurait pas été perçu à l'époque. Les travaux concernés ont ici un pendage moyen de 45° et se situent entre une dizaine et 140 m de profondeur.

6.2 PRÉVISION DES ALÉAS : APPORT DE LA RETROANALYSE

Une analyse des risques à caractère prévisionnel ne peut reposer sur la simple observation (ou recherche documentaire) des désordres survenus dans le passé. Elle doit également considérer les possibilités de réalisation d'autres phénomènes non encore observés mais envisageables dans le long terme, au vu des configurations d'exploitation.

La rétroanalyse, par une recherche plus globale des connaissances étendue à l'ensemble des bassins de risque appartenant à un même contexte, comme ceux des gisements ferrifères de l'Ouest, et non plus limitée au seul bassin de La Ferrière-aux-Etangs, peut permettre d'améliorer la prévision.

Ce travail a déjà été réalisé dans le cadre des études géotechniques de mouvements de terrain menées précédemment sur les gisements ferrifères synclinaux de Soumont, May-sur-Orne et Segré. Ceux-ci présentent de fortes analogies géologiques et d'exploitation avec celui de La Ferrière-aux-Etangs ([3], [4], [9]). Leurs principales caractéristiques sont synthétisées dans le tableau récapitulatif ci-après (tableau 11).

Ces gisements sont pentés, situés à des profondeurs très voisines (entre 20 m et 500 m ou 600 m) et recèlent une ou deux couches de faible ou moyenne puissance (globalement 2 à 5 m, localement plus).

Le gisement de La Ferrière-aux-Etangs se distingue par un pendage moyen de la couche plus faible (25°- 45°) par rapport à ceux rencontrés dans les autres gisements.

A quelques variantes près, les méthodes d'exploitation sont sensiblement les mêmes. On note que les chantiers les plus anciens ont été exploités par courtes tailles au pendage désignées également « dépilages » et par tailles chassantes ou rabattantes. A La Ferrière-aux-Etangs, une partie non négligeable de l'exploitation a été opérée par cette méthode, possibilité offerte par le pendage modéré de la couche. Par la suite, on a systématiquement appliqué la méthode des tailles montantes ou des tailles chassantes mécanisées pour les chantiers peu pentés (pendage inférieur de l'ordre de 30°) et la méthode des chambres magasins pour les chantiers pentés à très pentés (pendage de l'ordre ou supérieur à 50°).

Les désordres observés dans ces différents bassins sont, pour l'essentiel d'entres eux, de nature et d'origine comparables (essentiellement des effondrements localisés par rupture de couronne ou du toit des chambres, des déboussages de puits ou cheminées, des fontis dus à des éboulements de galeries). On note l'absence d'effondrement localisé lié à la rupture de couronne à La Ferrière-aux-Etangs.

Les cas d'affaissement sont peu nombreux et ne sont rencontrés que sur deux sites ; ceux de Soumont (1961,1965 et 1966) et de La Ferrière-aux-Etangs. Ils sont liés à l'existence d'éboulements importants au fond. De tels éboulements ont également été observés à May-sur-Orne, mais sans répercussion en surface.

A Soumont, les affaissements sont survenus suite à l'éboulement de travaux exploités par tailles montantes avec un taux de défruitement élevé de 85 %, entre 120 et 220 m de profondeur. La couche exploitée correspondante possède un pendage de 30° et une puissance de 3 m. L'affaissement maximal constaté au jour lors de l'apparition de l'événement a été de 65 cm. Cette configuration est très proche de celle qui a donné un affaissement à La Ferrière-aux-Etangs ($\tau = 80 \%$, profondeur 200-250 m, pendage 35° et ouverture entre 2 et 4 m).

*Tableau 7 : Analyse comparative de différents bassins ferrifères de l'Ouest
(gisements synclinaux des bassins ferrifères angevin-breton et normand) (modifié
d'après [3])*

		MAY-SUR-ORNE (14)	SOUMONT (14)	LA FERRIERE (61)	SEGRE (49)
Dates d'exploitation		1896 - 1968	1907 - 1989	1905 - 1970	1907 - 1984
Profondeur maximale		450 m	650 m	400 m	490 m
Méthodes d'exploitation		Dépilages et Tailles descendantes (avant 1925) Chambres magasins (1925-1968)	Tailles montantes Chambres magasins Tailles chassantes ou « dépilages » (type quartier Livet)	Tailles montantes Tailles rabattantes Chambres magasins (dressants)	Chambres magasins
Pendage	Flanc nord	70° à 90°	–	absent	60° à 90°
	Flanc sud	45° à 60°	30° à 60° 50° à 90° (plis)	25° à 45°	45° à 70°
Nombre de couches exploitées		1 (très localement 2, séparées par un intercalaire de quelques mètres au maximum)	1	1	2 (couches A et B, séparées par un intercalaire de 40 à 50 m, environ)
Puissance		3,5 à 4,0 m (localement : 6 à 7 m)	3 m (localement : 6 m)	3 à 4 m (localement : 5 m)	A : 1,5 à 5 m B : 1,5 à 6 m
Recouvrement jurassique discordant		0 à 60 m (calcaire jurassique)	0 à 50 m (calcaire jurassique)	absente	absente
Zone d'altération du minéral		20 à 50 m sous le contact jurassique	20 à 50 m sous le contact jurassique	inconnue	20 à 80 m
Types de désordres observés		Effondrements localisés (par rupture de couronne) Fontis (débouillage de puits ou cheminée) Eboulements au fond (6 dans le flanc sud, 2 dans le flanc nord)	Fontis (à l'aplomb de galeries proches de la surface) Affaissements (suite aux éboulements de 1929, 1951, 1961, 1965, 1966)	Effondrements localisés (par rupture du toit) Affaissement (1966-1967) Fontis (à l'aplomb de galeries proches de la surface)	Effondrements localisés (par rupture de couronne et du toit) Fontis (à l'aplomb de galeries) Fontis (débouillage de cheminée) tassement de remblais (puits)

6.3 ANALYSE DU RISQUE D'AFFAISSEMENT PAR MODÉLISATION NUMÉRIQUE

En première approche, le risque d'affaissement doit logiquement être retenu à La Ferrière-aux-Etangs dans la mesure où un tel phénomène s'est déjà produit dans ce bassin. Ceci est d'ailleurs conforté par l'occurrence de tels phénomènes à Soumont dans des configurations proches. Le risque d'affaissement peut, cependant, être précisé en fonction des différentes configurations d'exploitation, grâce à un travail de modélisation réalisé par l'INERIS en 2004 sur le processus d'affaissement dans les gisements ferrifères pentés de l'Ouest [9]. Ce travail permet d'évaluer les facteurs de prédisposition favorables ou non à sa réalisation. Les principaux résultats de cette étude sont synthétisés dans l'annexe 1 en fin de rapport. Ils seront mis à profit, en plus des retours d'expérience, pour évaluer, au cas par cas, l'aléa affaissement sur le site de La Ferrière-aux-Etangs.

6.4 ANALYSE DU RISQUE D'EFFONDREMENT GÉNÉRALISÉ

Les témoignages et recherches documentaires ne recensent aucun événement de type effondrement généralisé sur aucun de ces bassins étudiés (tableau 7) exploitant le minerai de fer.

Les mouvements de terrain de grande ampleur, observés sur ces différents bassins, sont : soit des effondrements du stot de protection de la surface dans le cas des chantiers subverticaux ou très pentés, soit des affaissements de la surface consécutifs à des éboulements du fond dans le cas des chantiers faiblement ou moyennement pentés.

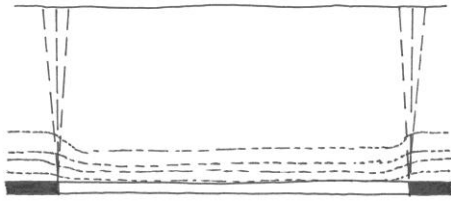
D'un point de vue général, les conditions d'apparition d'un effondrement généralisé peuvent être précisée pour les deux cas d'exploitation suivants :

a) Cas d'une exploitation en plateure

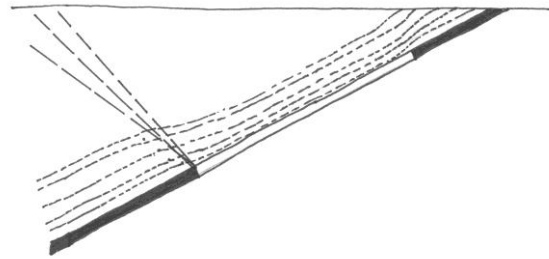
Dans le cas d'un chantier situé dans un gisement stratifié subhorizontal ou très peu penté, constitué de *bancs suffisamment raides*, les mécanismes du comportement des bancs du toit sont bien connus : les points de rupture par flexion ou par cisaillement se situent sensiblement dans un plan proche de la verticale reliant les bords du chantier à la surface. Le panneau est généralement sollicité de manière homogène, ce qui permet une libération rapide de l'énergie emmagasinée à la rupture, entraînant des effets dynamiques. Les zones de cisaillement se développent simultanément au droit des bords du chantier et concernent, en surface, un domaine bien défini. L'effondrement est dit « généralisé ».

b) Cas d'une exploitation pentée

Dans le cas d'un chantier penté (en supposant toujours les bancs raides), les points de rupture, par flexion ou cisaillement, se distribuent en s'éloignant du bord inférieur du chantier selon un angle sensiblement perpendiculaire au pendage des bancs. La zone de cisaillement ou de glissement potentiel, mobilisée en aval, devient beaucoup trop grande pour permettre un effondrement généralisé. Le mécanisme attendu est alors un mécanisme de flexion progressif, même si des ruptures locales sont possibles. Lorsque le pendage croît, le caractère instantané de la rupture devient peu probable. En devenant plus progressif, le phénomène d'effondrement fait place à un phénomène d'affaissement.



*Coupe d'un chantier en plateaux :
Lignes de rupture par cisaillement à
l'aplomb de l'exploitation*



*Coupe d'un chantier en gisement penté :
Lignes de rupture par cisaillement à
l'aplomb de l'exploitation*

Le caractère atypique d'une partie de l'exploitation de La Ferrière-aux-Etangs, conduite par tailles rabattantes avec un taux de défruitement très élevé, mérite cependant d'être discuté plus avant au regard du développement d'un tel phénomène.

Ce type d'exploitation a été mené, principalement dans le secteur sud, entre 0 et 150 m de profondeur. Une analyse classique de la stabilité des piliers par la méthode de l'aire tributaire conduirait à définir comme instable la plupart des travaux les plus profonds de cette zone⁹ (au-delà de 80 m environ). Toutefois, la méthode d'exploitation mise en œuvre permet de limiter l'occurrence d'un effondrement généralisé. En effet, l'exploitation par sous-niveaux, distants verticalement de 10 à 15 m environ, et la présence, la plupart du temps, d'un stot constitué d'une rangée de piliers de 3 m, en protection des voies de roulage, conduit à limiter l'extension des panneaux exploités, dans le sens de la sollicitation maximale, c'est à dire dans celui de la pente. Les chambres ont en général une portée de 10 à 15 m avec des piliers intermédiaires de 3 m de côté. Si l'on retient ce découpage, les panneaux susceptibles de s'effondrer sont donc largement sous-critiques. Les cas d'effondrement au fond recensés sur les plans d'exploitation, dans ce contexte particulier et pour lesquels aucun effet au jour n'est relaté, permettent, dans une certaine mesure, de confirmer cette analyse.

Si l'occurrence d'un effondrement généralisé semble pouvoir être exclue à La Ferrière-aux-Etangs, il demeure que cette configuration de travaux reste sensible à la rupture de piliers et du toit des chambres. De tels événements se traduisent au jour par des effondrements localisés à faible profondeur et éventuellement, si l'effondrement est de grande ampleur au fond, par un phénomène de type affaissement à caractère relativement brutal comme à La Fieffe.

Conclusion : Ces différents arguments permettent d'exclure, au vu des connaissances actuelles, le scénario d'effondrement généralisé à caractère spontané sur l'exploitation de La Ferrière-aux-Etangs.

⁹ On prend dans ce cas une résistance à long terme du minerai de fer égale au dixième de la résistance en compression simple (20 MPa à La Ferrière). Approche retenue par la modélisation [9].

6.5 LES DIFFÉRENTS ALÉAS RETENUS

A partir de l'ensemble des données de la phase informative et des cas de désordres connus à La Ferrière-aux-Etangs, un certain nombre d'aléas « mouvements de terrain », identifiés et/ou prévisibles, ont été retenus.

Les effondrements localisés

On distingue parmi ceux-ci :

- les effondrements localisés provoqués par la rupture du toit des chambres d'exploitation situés à faible profondeur. Ces effondrements, liés à l'exploitation des chantiers effectuée jusqu'à 50 m, se manifestent en surface par des cratères de forme circulaire de dimensions moyennes (jusqu'à 8-12 m de diamètre), de type fontis ;
- les effondrements localisés liés à la rupture d'anciens orifices miniers (puits et montages). Les répercussions en surface se traduisent par l'ouverture d'un fontis en forme d'entonnoir, généralement circulaire et de relativement faibles dimensions (fontis du montage n°6) ;
- les effondrements liés à l'éboulement de galeries d'accès situées à faible profondeur. Les répercussions en surface sont sensiblement comparables aux précédentes (fontis du TB 220 et de la galerie Saint-André).

Le cas d'effondrements localisés par rupture du stot de protection de la surface, n'a pas été retenu à La Ferrière-aux-Etangs. Les facteurs de prédisposition nécessaires à l'occurrence d'un tel phénomène ont été précisés pour le site de Segré [3] sur la base de plusieurs retours d'expérience : les effondrements sont apparus alors que la profondeur du toit de la couronne était inférieure à 40 m et pour un pendage de couche supérieur à 45°/50°. Ce type de configuration n'est pas rencontré à La Ferrière ; là où un stot de protection a été laissé (sous le village), celui-ci est de 70 m (presque 100 m au pendage) et le pendage de la couche de l'ordre de 40°. Ailleurs, le pendage de la couche est plus faible (35° ou moins) et, dans la plupart des cas, l'exploitation n'a pas laissé de stot de protection. Les travaux d'exploitation sont continus entre les anciennes fouilles et les travaux souterrains.

Les affaissements

Le phénomène d'affaissement a été retenu compte tenu du retour d'expérience de 1966-1967 à La Ferrière-aux-Etangs et de ceux recensés à Soumont dans des contextes très similaires. Les conditions d'occurrence de ce phénomène devront être analysées secteur par secteur dans la phase aléa.

Cas particuliers des anciennes fouilles ou minières

Non abordé jusqu'à maintenant dans ce rapport, le cas des anciennes fouilles (ou minières) doit cependant être considéré dans cette analyse et évaluation des aléas « mouvements de terrain ». Les dépressions qu'elles forment sont, en effet, les plus importantes de celles observées dans les bassins ferrifères de l'Ouest. Elles peuvent atteindre une dizaine de mètres de profondeur. Le caractère penté de leurs flancs (de l'ordre de 45°) associés à une nature relativement éboulue des matériaux qui les constituent (stériles miniers) nécessite de retenir le risque de glissement superficiel.

D'autre part, certaines de ces fouilles ayant été comblées par des remblais de nature inconnue, on retiendra, pour celles-ci, le risque de tassement.

7. EVALUATION DES ALÉAS DANS LE BASSIN DE LA FERRIÈRE-AUX-ETANGS

Les phénomènes accidentels retenus sont examinés ici de façon plus approfondie pour en déterminer l'intensité potentielle, la crédibilité de survenance et évaluer, ainsi, les niveaux d'aléas qui leur incombent. La méthode d'évaluation des aléas, extraite de [5], est présentée dans l'annexe I. Les résultats de l'analyse apparaissent sur les cartes des différents aléas.

7.1 LES EFFONDEMENTS LOCALISÉS

7.1.1 Effondrements localisés par rupture du toit des chambres ou de piliers

Les secteurs menacés du risque d'effondrement localisés à l'aplomb des panneaux proches de la surface affectent la quasi-totalité du gisement minier à proximité des affleurements de la couche de minerai.

Les aléas effondrement localisés sont cartographiés sur le plan à l'échelle de 1/5000^{ème} présenté en annexe B.

Nature des désordres et mécanismes de rupture

Les désordres observés ou mentionnés se présentent en surface sous la forme d'effondrements localisés de forme circulaire de type fontis, de dimension moyenne à grande (partie I § 4 et partie II §1.1).

Le mécanisme à l'origine de ce type de désordres est la rupture du toit au droit de la chambre et/ou d'un ou de quelques piliers, suivie d'une remontée de la cloche d'éboulement jusqu'à la surface, du type fontis.

Configurations d'exploitation

Les secteurs menacés du risque d'effondrement localisé se situent à l'aplomb de tous les chantiers miniers proches de la surface. Les chantiers concernés correspondent à ceux exploités par tailles rabattantes et chambres montantes dont aucun, comme c'était le cas général pour ce type d'exploitation, n'a fait l'objet d'un traitement des vides assurés lors de l'exploitation.

Nous retenons ces travaux depuis l'affleurement jusqu'à 50 m de profondeur. Les cas d'effondrements localisés, connus à La Ferrière-aux-Etangs, se situent tous dans cette gamme de profondeur. Aucun effondrement n'a été constaté à l'aplomb de travaux plus profonds. Les zones concernées sont étendues à l'emprise des fouilles ouvertes ou remblayées. Il est constaté, en effet, que, partout où ces fouilles existent, les travaux souterrains réalisés postérieurement sont venus les sous-miner.

Intensité du phénomène

La rétroanalyse, effectuée dans le cadre de la phase informative, a permis de caractériser l'importance de ce type de phénomène. Les diamètres des fontis apparus au jour, de 4 à 5 m, pour 3 des 4 cas où leurs dimensions sont connues, permettent de qualifier l'intensité du phénomène comme étant moyenne. Le cas de La fiefte est, quant à lui, classé dans les intensités élevées.

Facteurs de prédisposition

Tous les désordres de type effondrement localisé, par rupture du toit ou des piliers, sont apparus à l'aplomb des travaux effectués par tailles rabattantes et ayant conduit à des taux de défrètement élevés du gisement, en laissant des piliers de petites dimensions (3 m de côté) et des chambres de 10 à 20 m de portée. Cette configuration de travaux constitue le facteur de prédisposition principal pour que puisse s'initier un mécanisme de rupture et la progression dans le recouvrement d'une cloche de fontis.

Les conditions d'apparition au jour d'un fontis sont augmentées par le fait qu'il n'y a pas de bancs résistants dans le recouvrement susceptibles de stopper la progression d'une cloche d'éboulement. Les terrains de recouvrement sont constitués uniquement de schistes de résistance mécanique peu élevée, surtout lorsqu'ils sont altérés, ce qui est généralement le cas près de la surface. On peut d'ailleurs penser que la compétence mécanique des terrains à proximité des minières, et a fortiori sous celles-ci, est diminuée par la conjugaison des deux types d'exploitation.

Deux autres facteurs de prédisposition doivent également être mentionnés :

- les travaux concernés par ce type d'événement se situent à moins de 50 m de profondeur, soit, en fonction de la topographie, entre 220 et 270 m NGF dans les secteurs considérés. Ces cotes les positionnent dans la zone de battement de l'aquifère minier qui peut varier, au cours d'une année, de 240 à 250 m NGF (voir figure 9). Ces battements peuvent constituer un facteur aggravant en diminuant progressivement la résistance mécanique des piliers et/ou du toit des chambres ;
- dans le secteur de La Fieffe, la présence de la faille principale affectant le gisement, a pu jouer un rôle dans l'occurrence et surtout l'extension du phénomène, la zone étant naturellement fragilisée par cet accident.

En fonction de ces facteurs et de la densité des désordres observés, le site est qualifié de sensible à l'apparition au jour de fontis.

Pour les exploitations par tailles montantes ou chambres magasins, situées à moins de 50 m de profondeur, la prédisposition du site à l'apparition au jour de fontis est qualifiée de peu sensible compte tenu des taux de défrètement des travaux plus faibles (de 60 à 80 %) et de l'absence d'événements de type effondrement localisé recensé à l'aplomb de ces travaux.

Pour toutes les autres configurations d'exploitation, la prédisposition du site est considérée comme nulle ou très peu sensible.

Evaluation de l'alea : « effondrement localisé »

Les secteurs qualifiés ci-dessous sont potentiellement exposés au risque le plus sévère d'effondrement localisé par rupture du toit des chambres et/ou de piliers. Ils sont classés en **aléa moyen**. Il s'agit :

- des zones à l'aplomb des travaux exploités par chambres rabattantes à moins de 50 m de profondeur. Elles s'étendent depuis la fouille du Jardin du Brûlé au nord jusqu'au sud du montage n°6 ;

- zone à l'aplomb des chambres montantes dans le secteur des Riautes. Cette zone a été retenue en aléa moyen, bien que ne présentant pas les facteurs de prédisposition les plus élevés. Les travaux de ce secteur ont été réalisés par chambres montantes et chambres magasins présentant des taux de défrètement de l'ordre de 80 %. Les chambres ont été montées pratiquement jusqu'en surface, voire jusqu'en dessous des fouilles, aujourd'hui remblayées dans ce secteur. Cette configuration nous conduit à retenir ce site comme sensible au phénomène d'effondrement localisé et à considérer ainsi un aléa moyen sur la zone.

Sont classés en **aléa faible**, deux secteurs situés à l'aplomb des chantiers exploités par tailles montantes :

- zone à l'aplomb des tailles montantes au nord du montage du Champ Blanc. Il s'agit d'une configuration proche de celle des Riautes. Cependant, ici, le toit des chambres les moins profondes se situe à 50 m environ. La prédisposition est donc jugée peu sensible et l'aléa correspondant faible.
- zone au nord du montage n°8. Cette zone se situe dans une situation identique à celle du secteur du Champ Blanc. Pour les mêmes raisons, l'aléa retenu est faible.

Tous les autres secteurs sous-minés par les anciennes exploitations minières plus profondes sont considérés en **aléa négligeable** et ne sont pas, de ce fait, retenus. Ils ne sont matérialisés sur la carte des aléas que par une enveloppe correspondant à l'**emprise des travaux** pour garder en mémoire l'existence de l'exploitation souterraine.

Limites du zonage

On considère qu'un fontis peut se développer par rupture du toit à partir d'une profondeur inférieure à 50 m. Il peut progresser de manière sensiblement verticale jusqu'à la surface en prenant par « talutage » des bords une forme d'entonnoir (figure 29).

La « marge de sécurité » intègre les deux notions de « marge d'influence » qui matérialise la largeur potentielle de la zone d'effondrement et de « marge d'incertitude » qui matérialise les incertitudes cartographiques dues aux levés et assemblage des plans cadastraux ainsi qu'au report fond – surface des plans d'exploitation (figure 29). Celle-ci a été retenue égale à 10 m.

La *marge d'influence* est déterminée en considérant un angle de talus naturel moyen de 45° tracé à partir de la zone d'altération superficielle, estimée à 10 m de profondeur. Cette valeur est établie en s'appuyant sur les cas d'effondrement de 1906 pour lesquels l'emprise du cône d'effondrement est cartographiée. On constate que les cônes d'effondrement s'étendent de 10 m autour du cratère ouvert de l'effondrement.

La marge de sécurité sera donc égale à 20 m à l'aplomb de la bordure aval des travaux situés à 50 m de profondeur et à 10 m à l'amont (figure 29).

7.1.2 Effondrements localisés de puits ou de montages

Les montages sont des ouvrages de liaison entre les travaux souterrains et le jour assurant principalement la fonction d'aérage et de secours. Ils débouchent tous à l'aplomb des anciennes fouilles. Ces ouvrages sont au moins inclinés comme la couche du gisement et sont verticaux ou quasi verticaux lorsqu'ils débouchent au jour. Pour ces raisons, ils ont été classés avec les puits, les mécanismes à l'origine des effondrements localisés étant similaires.

Nature des désordres et mécanismes de rupture

Les effondrements localisés de puits non sécurisés ou insuffisamment bien traités (remblayage, renforcement, protection en surface, etc.) relèvent de deux mécanismes distincts : le débouillage des remblais (pour les puits remblayés) ou la rupture de la tête de puits (après rupture du cuvelage ou rupture de la dalle de protection, etc.).

Les désordres en surface correspondent à des effondrements circulaires coniques de type fontis de diamètre très variable : 2 à 3 m jusqu'à plus de 10 ou 15 m (§ 2.1 de l'annexe I).

Etat des puits et montages

L'inventaire des puits et montages, synthétisés dans les tableaux 4 et 5 (partie I), révèle que ceux-ci ont connu des modes de fermeture très différents :

- le puits Pralon, ouvrage principal de l'exploitation (5 m de diamètre), est simplement dallé. Il n'a pas été remblayé. On ne connaît pas l'état de son cuvelage. Le puits n°2 se trouve dans une situation identique et n'est pas dallé (des rails scellés en empêchent seulement l'intrusion). Nous ne connaissons pas l'état ni le traitement du puits n°1 qui n'a pas été retrouvé, ni celui du puits de recherche de La Fonte. Celui de La Lande Menue semble avoir été comblé puisqu'une dépression marque son emplacement probable (photo figure 25) ;
- les montages ont été soit comblés par des remblais au bulldozer ou dallés sans comblement préalable. Le montage n°6 qui a été comblé au bulldozer a débouillé et est actuellement ouvert (photo figure 26).

Evaluation de l'aléa

Les modes de fermeture mis en œuvre sur les ouvrages débouchant au jour, de type puits ou montage, ne permettent pas de garantir leur stabilité à long terme :

- pour le puits Pralon, la mise en place d'une dalle au-dessus du puits vide, même si celle-ci est correctement dimensionnée (large débordement de plusieurs mètres par rapport à l'emprise du puits), on ne peut pas exclure les risques de rupture du cuvelage et l'éboulement des bords du puits qui sont susceptibles de s'opérer à long terme par altération ou vieillissement. Cette possibilité doit être retenue d'autant plus que les terrains encaissants ne sont pas de nature très résistante (schistes du Pissot) et que nous ne disposons d'aucune information concernant l'état du cuvelage ;
- le puits n°2 est toujours ouvert et est foncé dans les mêmes terrains que le puits Pralon. On ne connaît pas l'état de ses structures de protection mais on peut penser qu'elles sont plus altérées que celles du puits Pralon, compte tenu de leur ancienneté. On admettra que le puits n°1 se trouve dans la même configuration ;
- les travaux de fermeture des montages par la mise en place d'une dalle ou d'un mur apparaissent relativement « légers ». S'ils permettent d'interdire l'accès aux travaux souterrains, au moins à court terme, ils ne sont pas de nature à garantir la stabilité à long terme de la tête de l'ouvrage et ceci, d'autant plus qu'ils débouchent à l'intérieur des minières, terrains réputés non résistants par nature (destructurés par l'exploitation et mise en remblai de stériles miniers) ;
- pour les ouvrages comblés (au bulldozer ou de manière inconnue), le cas de débouillage du montage n°6 justifie pleinement le jugement non pérenne de ce type de traitement.

Selon les critères mentionnés dans l'annexe (§ 2.1), l'intensité du phénomène redouté peut être jugée moyenne (effondrement localisé de plusieurs mètres de diamètre et à caractère spontané) pour tous les puits et montages. Ces ouvrages présentent une prédisposition sensible à l'apparition de phénomènes de type d'effondrement localisé, compte tenu de la nature des terrains encaissants et de leur mode de traitement non pérenne. Ceci conduit à classer en aléa moyen tous les ouvrages débouchant au jour de type puits ou montage.

On nuancera cependant ce classement, en retenant un aléa faible pour 4 ouvrages compte tenu des intensités limitées à très limitées des phénomènes redoutés. Il s'agit :

- des montages de l'Hospice et n°8 dont la section est très limitée, respectivement de 0,3 et 0,8 m² ;
- les puits de recherche de La Lande Menue et Saint-Jules pour lesquels seuls des tassements sont redoutés, comme cela est d'ailleurs visible pour le puits de La Lande Menue.

Limites du zonage

On admet globalement que les terrains de recouvrement peuvent avoir été déconsolidés par altération sur une profondeur de l'ordre de 10 m (valeur justifiée dans le cas des fontis). L'angle de cône moyen (angle d'influence) de l'effondrement est estimé à 45° (constaté également sur les cas de fontis).

Si l'on considère un recouvrement de 10 m de terrains déconsolidés, la zone « d'effet » potentiel (limite des effets possibles en surface autour du centre de l'ouvrage) forme ainsi un rayon « d'effet » égal à $R = r + 10$ m (r est le rayon du puits compris entre 1,5 et 2,2 m, les 10 m correspondant à la marge d'influence). Pour les ouvrages bien géoréférencés (ouvrages en gras dans le tableau 4), on peut négliger l'incertitude de positionnement et négliger, de ce fait, la marge d'incertitude. Pour les autres puits ou montages, non retrouvés mais dont le calage des plans miniers permet de les situer à quelques mètres près, nous appliquons en plus de la marge d'influence de 10 m, une marge d'incertitude de positionnement égale à 10 m. C'est le cas, en particulier du puits n°1.

Le schéma montrant la marge adoptée pour les puits et cheminées bien localisés est représenté sur la figure 30.

7.1.3 Effondrements localisés par éboulement de galeries isolées

La présence de galeries isolées situées à faible profondeur (en général des galeries d'accès en travers-bancs, des descenderies ou des galeries de reconnaissance) peut provoquer, en cas d'éboulement, des phénomènes d'effondrement localisé en surface qui s'apparentent aux fontis.

Dans le contexte de La Ferrière-aux-Etangs, on ne dénombre véritablement que 3 galeries isolées, le TB 220 et les premières galeries d'exploitation du gisement, Saint-Robert et Saint-André.

Les nombreux cas d'effondrement localisé survenus à l'aplomb du TB 220 et les quatre cas à l'aplomb de la galerie Saint-Robert permettent d'évaluer, de façon circonstanciée, l'intensité et la prédisposition du phénomène redouté :

- les fontis apparus à l'aplomb du TB 220 (entre 15 et 20) avaient tous des intensités limitées (≤ 3 m) à l'exception d'un plus important dont l'intensité est jugée moyenne (7 à 8 m de

diamètre estimé) (partie I, § 4.1). Ils sont apparus dans la portion du TB situé à moins de 25 m de profondeur et dans les cornéennes altérées du Briovérien. Compte tenu du nombre important de cas recensés et du caractère favorable à l'apparition au jour d'un fontis dans la formation altérée des schistes, la prédisposition du TB vis-à-vis du phénomène redouté est jugée sensible à très sensible, depuis son orifice jusqu'au contact schistes-grès. Elle devient négligeable lorsque le TB traverse la formation du Grès armoricain. Ce dernier constitue un ensemble suffisamment massif pour exclure la possibilité d'une remontée au jour d'un fontis (sans compter que la profondeur devient plus importante). On retient également une prédisposition négligeable à l'aplomb de la VC n°4, maintenant protégée par une dalle. En dehors de ces deux configurations, pour lesquelles l'aléa effondrement localisé n'est pas considéré, on retiendra un aléa moyen ;

- pour les deux autres galeries, l'intensité du phénomène redouté est jugée limitée, leur section étant faible (2 m de hauteur tout au plus d'après les documents d'archives, voir photo figure 18). Nous considérons une prédisposition sensible compte tenu des retours d'expérience sur une des deux galeries. Il faut ajouter que ces deux galeries cheminent à faible profondeur sous les minières, ce qui constitue une configuration favorable à l'apparition d'un fontis. Nous retenons pour cette configuration un aléa moyen, appliqué à l'aplomb de ces deux galeries, lorsqu'elles sont situées à moins de 30 m de profondeur, par analogie à ce qui est constaté pour le TB 220 ;
- la galerie de recherche de la Fonte étant dans une configuration similaire aux deux précédentes, un aléa moyen a également été retenu, depuis son orifice supposé (non retrouvé) jusqu'à 30 m de profondeur (estimation pour une galerie horizontale).

Limites du zonage

Le zonage de l'aléa se limite aux galeries situées à moins de 30 m de profondeur ou au contact grès-schistes pour le TB 220¹⁰ au droit desquelles on trace une bande de protection (de chaque côté de la galerie) déterminée par un angle d'influence de 45° tracé à sa base. En considérant que si la zone altérée du recouvrement est de 10 m, environ, mais qu'en dessous de 10 m, la cloche de fontis remonte verticalement vers la surface en se comblant progressivement, la hauteur de référence sur laquelle on prend l'angle d'influence est de 10 m. La largeur de la bande de protection est donc de 10 m, au maximum, de part et d'autre des bords de la galerie.

Pour le TB 220, très bien positionné, il n'a pas été rajouté de marge d'incertitude. Une marge de 10 m a, par contre, été ajoutée pour les deux autres galeries d'exploitation (Saint-Robert et Saint-André) et la galerie de recherche de la Fonte.

7.2 LES AFFAISSEMENTS

L'affaissement constaté à La Ferrière-aux-Etangs pendant la période d'exploitation et ceux survenus à Soumont pour des conditions d'exploitation assez proches, nous ont conduit à retenir l'affaissement comme un événement probable à l'aplomb des secteurs exploités de La Ferrière-aux-Etangs.

¹⁰ Dans ce cas, la profondeur de la galerie au niveau du contact grès-schistes se trouve être proche de 30 m.

Il s'agit ici d'évaluer quels sont les secteurs potentiellement menacés par ce phénomène. Pour ce faire, nous disposons :

- d'une étude réalisée par l'INERIS [9] qui définit les conditions d'apparition d'affaissement pour les gisements pentés ferrifères de l'Ouest. Cette étude est basée sur les retours d'expérience des affaissements constatés à Soumont et prend en compte et modélise les différentes configurations d'exploitation des bassins d'Anjou et de Basse-Normandie, à l'exception toutefois de celui de la Ferrière-aux-Etangs ;
- des retours d'expérience sur les cas d'affaissement.

Facteurs de prédisposition

L'étude théorique du processus d'affaissement dans les bassins ferrifères de l'Ouest (annexe, § 2.2) montre que les panneaux potentiellement menacés par le processus d'affaissement doivent répondre à l'ensemble des conditions suivantes :

- pendage compris entre 30° et 45° et un taux d'exploitation supérieur à 80 % ou pendage compris entre 45° et 55° et un taux d'exploitation supérieur à 90 %, pour ouverture des chantiers de 5 m ;
- largeur du panneau (L) supérieure à la profondeur moyenne (H) de celui-ci, prise en milieu de panneau, pour que l'affaissement se donne en totalité ($L > H$). En dessous ($L < H$), les affaissements diminuent progressivement et sont considérés comme imperceptibles à la largeur limite ($L < 0,4 H$) ;
- profondeur du panneau inférieure à 300 m.

A ces critères, il faut ajouter le cas d'affaissement de La Ferrière-aux-Etangs, qui permet de préciser, pour le site considéré, les conditions nécessaires pour l'apparition du phénomène :

- la zone exploitée, à l'origine de l'affaissement constaté en surface, se situe entre 200 et 250 m de profondeur. Le pendage des travaux est de l'ordre de 30°, l'ouverture est comprise entre 2 et 4 m et le taux de défrètement de 80 % ;
- le panneau qui s'est éboulé au fond devait avoir une centaine de mètres de diamètre. L'éboulement s'est propagé vers l'aval pour s'arrêter sur le stot de protection de la voie située à 300 m de profondeur ;
- la sollicitation sur les piliers du panneau qui s'est éboulé, calculée par la méthode de l'aire tributaire, en considérant la couche horizontale, serait comprise entre 25 et 31 MPa (selon la profondeur considérée). Cette valeur correspond entre 12 et 15 % de la résistance à la compression simple du minerai en laboratoire. On considérera ces valeurs uniquement à titre indicatif car la méthode de l'aire est peu adaptée à des gisements présentant des piliers pentés.

Zones d'exploitation non retenue pour l'aléa affaissement

Le tableau 8 donne les conditions d'exclusion de phénomène d'affaissement pour les gisements pentés ferrifères de l'Ouest.

Sur cette base, et sur celle des autres critères définis précédemment, nous avons exclu les zones de travaux suivantes¹¹ :

- tous les panneaux situés à plus de 300 m de profondeur. Ceux-ci, en plus de satisfaire au critère de profondeur, se trouvent être tous de dimensions très réduites comparées à la profondeur. Le rapport L/H est au plus égal à 0,3, ce qui permet d'exclure, même si le panneau venait à s'effondrer, l'apparition de mouvements perceptibles au jour. Ces secteurs concernés sont situés au sud et au nord du puits Pralon ;
- les panneaux exploités sous le village. Dans ce secteur penté à 45°, les taux de défrèvement sont de l'ordre de 65 %. En outre, les gros piliers barrière, de 20 à 30 m de large, délimitent des panneaux de dimensions sous-critiques (< 0,5), à l'exception d'un cas où les dimensions du panneau sont proches de la criticité ;
- les panneaux en aval des montages du Champ Blanc et des Riautes. Les panneaux les plus proches de la surface peuvent localement présenter des taux de défrèvement de l'ordre de 75 %. Les panneaux individualisés ont cependant des petites dimensions (30 m dans le sens de la pente) comparées à la profondeur moyenne d'une centaine de mètres. Précisons que, pour les travaux de cette zone situés à moins de 50 m de profondeur, un aléa effondrement localisé moyen a été retenu ;
- les panneaux exploités avec un taux de défrèvement de 60 % dans le secteur sud. Ceux-ci se situent entre 100 et 250 m de profondeur. Dans ce secteur, le pendage est en moyenne de 30°. Pour de tels taux de défrèvement et, en fonction de la profondeur, on remarquera, à titre indicatif, que les sollicitations sur les piliers seraient comprises entre 6 et 15 MPa, à comparer à la gamme de valeurs retenues dans le secteur qui s'est affaissé, de 25 à 31 MPa.

Tableau 8 : Critères d'exclusion de l'affaissement [9]

Conditions d'exclusion du processus d'affaissement (tableau 3 de l'annexe)		
Pendage	Taux de défrèvement ($\tau\%$)	Ouverture (w)
> 55°	$\leq 90 \%$	$\leq 4 \text{ m}$
	$\leq 85 \%$	$\leq 5 \text{ m}$
45° à 55°	$\leq 90 \%$	$\leq 3 \text{ m}$
	$\leq 80 \%$	$\leq 5 \text{ m}$
30° à 45°	$\leq 80 \%$	$\leq 3 \text{ m}$
	$\leq 70 \%$	$\leq 5 \text{ m}$

Les panneaux menacés par un éventuel affaissement

A l'exclusion de tous les secteurs définis précédemment, toutes les autres zones de travaux sont considérées comme susceptibles de générer des affaissements en surface.

Le tableau 9 donne les caractéristiques des panneaux pour lesquels l'aléa affaissement est considéré. Ces panneaux possèdent des caractéristiques qui entrent dans celles retenues par l'étude de modélisation ou s'en approchent et/ou sont proches du cas d'affaissement connu à La Ferrière-aux-Etangs. Il s'agit de :

¹¹ Pour retenir ou exclure les zones d'exploitation pour l'aléa affaissement, nous avons toujours considéré les ouvertures maximales des couches par section d'exploitation, faute de données plus précises.

- l'ensemble des travaux exploités entre 150 et 250 m de profondeur, au sud du puits n°2 et jusqu'au nord du puits Pralon. En plus de satisfaire au critère défini par la modélisation, en termes de puissance de la couche, de taux de défruitement et pendage, la méthode d'exploitation pratiquée ici, avec une relevée de 100 m entre niveau a délimité des panneaux de taille critique ;
- l'ensemble des panneaux exploités entre 125-150 m et 300 m au sud du puits Pralon et jusqu'au puits n°1, qui comprennent notamment la zone qui s'est éboulée à l'origine des affaissements en surface ;
- les travaux d'exploitation, identifiés panneaux 1 et 2 sud dans le tableau 9, situés entre 50 m et 200 m de profondeur, au nord du montage n°8. Si l'on compare les caractéristiques de ces panneaux aux valeurs des critères retenus par la modélisation, on constate que l'on se situe en limite des valeurs nécessaires pour retenir le phénomène d'affaissement ;
- tous les travaux exploités à faible profondeur par la méthode des tailles rabattantes ou chassantes, ayant conduit à des taux de défruitement très élevés de l'ordre de 90 %. Ils se situent entre quelques mètres et 150 m de profondeur, dans des secteurs où le gisement est penté à 30° en moyenne au sud de La Fieffe et, à 45° au nord.

Tableau 9 : Caractéristiques des principaux panneaux retenus pour l'affaissement

Mine de La Ferrière-aux-Etangs	Caractéristiques des panneaux								
Secteur	Quartier	Taux de défruitement	Pendage	ouverture	H	L/H	μ % (1)	ε (mm/m)	σ_p (2) MPa
Secteur Nord	Sud du puits 2	80 %	45°	3 à 5 m	200	0,9	3	1	25
Secteur Sud	Panneaux chambres rabattantes	90 %	30°	2 à 4 m	50	0,4 à 1	10	30	12,5
		90 %	30°	2 à 4 m	80	0,25 à 0,6	6,2	19	20
		90 %	30°	2 à 4 m	100	0,2 à 0,5	5	1,5	25
	Retour d'expérience	80 %	30°	2 à 4 m	200 à 250	0,5	2,5 à 2	4	25 à 31,5
	Panneau 1 sud	75 %	30°	2 à 4 m	180	0,7	2,7	0,75	18
	Panneau 2 sud	75 %	30°	2 à 4 m	80	1,2	6,25	1,35	8

(1) : calculé en retenant la formule $A_{\max} = 0,3 \cdot w \cdot \tau$ et $\mu_{\max} = \beta \cdot A_{\max} / P$ avec $\beta = 5$, variables définies au § suivant.

(2) : sollicitations calculées avec la méthode de l'aire tributaire, données à titre indicatif compte tenu du pendage du gisement.

Intensité de l'affaissement

Il est reconnu que les caractéristiques d'affaissement qui matérialisent les dégâts les plus dommageables pour les biens situés en surface sont les déformations différentielles horizontales et les mouvements de mise en pente du sol plutôt que l'affaissement maximal en lui-même. Le tableau 2 de l'annexe I donne des valeurs indicatives des déformations et pentes qui permettent d'évaluer l'intensité du phénomène.

On sait, à partir de la retroanalyse des affaissements de Soumont [4] que la valeur de l'affaissement maximal est de la forme :

$$A_{\max} = 0,3^{(12)} \cdot w \cdot \tau$$

avec :

- $A_{\max}$ = affaissement maximal
- w = ouverture exploitée (dans les quartiers exploités par chambres magasins)
- τ = taux d'exploitation (ou taux de défruitement),

On peut en déduire facilement les valeurs des déformations ($\epsilon_{\max}$) et pentes ($\mu_{\max}$) à partir des relations classiques suivantes :

$$\epsilon_{\max} = \alpha \cdot A_{\max} / P$$

$$\mu_{\max} = \beta \cdot A_{\max} / P$$

Où :

- $A_{\max}$ est l'affaissement maximal
- P , la profondeur moyenne du panneau
- $\alpha = 1,5$
- $\beta = 5$

Les coefficients α et β sont déduits des études en retour d'expérience effectuées sur les mines de fer de Lorraine et adoptés ici pour leur caractère sécuritaire.

Le tableau 9 donne les résultats obtenus sur différents secteurs retenus pour l'affaissement. On retiendra que ces valeurs sont indicatives et n'ont d'objet que de fixer des ordres de grandeur nécessaires à la réflexion.

En fonction de ces valeurs calculées, mais surtout du cas de retour d'expérience d'affaissement, mais aussi de celui de La Fieffe qui, à notre sens, est significatif d'un phénomène de type affaissement pour les travaux à faible profondeur, nous retiendrons que l'intensité du phénomène affaissement est :

- moyenne à forte pour les travaux exploités à faible profondeur par tailles rabattantes ou chassantes ;
- très faible à faible pour les travaux plus profonds et pour les panneaux 1 et 2 sud.

¹² En considérant un affaissement maximal de 0,4 à 0,5 m pour le cas de La Ferrière-aux-Etangs, on obtiendrait un coefficient de l'ordre 0,2.

Evaluation de l'aléa

Pour les travaux profonds, notamment ceux situés au sud du puits n°2, le cas connu d'affaissement nous incite à retenir une prédisposition sensible. L'intensité de l'affaissement attendue en surface étant très limitée à limitée, l'aléa correspondant est jugé faible.

Pour les travaux des panneaux 1 et 2 sud, l'aléa retenu est également faible. Il résulte d'un classement très limité à limité de l'intensité du phénomène redouté et d'une prédisposition peu sensible des configurations de travaux, dans la mesure où les caractéristiques de ces derniers sont à la limite des valeurs d'exclusion du phénomène.

Enfin, pour tous les travaux peu profonds, nous considérons que la prédisposition de ces configurations d'exploitation, vis-à-vis de l'affaissement, est la plus forte de l'ensemble du domaine exploité. Elle est jugée sensible au regard du taux de défrètement très élevé des chantiers et du cas du retour d'expérience de La Fieffe. L'intensité du phénomène redouté étant jugée modérée, l'aléa affaissement associé à ces travaux est classé en moyen.

Limites du zonage

Les limites matérialisant en surface la zone influencée par l'affaissement sont déterminées à partir d'un angle dit « angle d'influence », pris sur la verticale, qui relie l'extrémité du panneau, au fond, aux points de la surface où les affaissements, déformations ou pentes sont considérés comme imperceptibles ou nuls.

Le choix des valeurs de l'angle d'influence joue donc directement sur l'importance de la zone affectée et doit être pris avec précaution.

Pour évaluer l'aire de la cuvette d'affaissement en surface, si l'on considère le plus souvent, dans une couche située en plateure (pendage subhorizontal), un angle d'influence (γ) de l'ordre de 30° à 35°, en gisement penté (pendage supérieur à 20°), on est conduit à distinguer trois angles limites qui varient en fonction du pendage :

- l'angle limite (γ), dans la direction de chassage dont la valeur est égale à l'angle limite en plateure ;
- l'angle limite « amont », plus petit que l'angle γ ;
- l'angle limite « aval », toujours plus grand que l'angle γ ;

Au vu des données obtenues sur Soumont, on remarque que les valeurs des angles de rupture amont et aval mesurées (en moyenne respectivement de l'ordre de 7° et 30°), pour un pendage compris entre 30° et 40°, sont très proches des valeurs correspondantes des abaques des bassins houillers de Lorraine ou du Nord Pas-de-Calais^[13] (tableau 10, ci-dessous). On peut en déduire que les angles d'influence doivent être également très proches et prendre, pour le gisement de La Ferrière-aux-Etangs, des valeurs d'angle d'influence égales à 30° (côté amont) et 45° (côté aval).

^[13] PROUST A. : Etude sur les affaissements miniers dans le Bassin du Nord et du Pas-de-Calais. RIM, 1964

Tableau 10 : Valeurs données dans les abaques d'affaissement des bassins houillers du Nord Pas-de-Calais, de Lorraine et de la Sarre

Valeurs du pendage		0°	15°	25°	30°	40°	50°	60°
Angles de rupture donnant les limites de fracturation en surface	Angle amont	18	14	12	11	9	7	6
	Angle aval	18	22	25	27	30	33	36
Angles d'influence donnant les limites d'affaissement nul	Angle amont	35	32	30	30	30	28	27
	Angle aval	35	38	40	43	45	47	48

Précisons que l'angle d'influence aval est pris à la base des panneaux exploités « affaissables » et l'angle d'influence amont à la partie supérieure des panneaux.

Compte tenu de la démarche, somme toute assez sécuritaire, de détermination des angles d'influence d'affaissement, nous n'avons pas pris de marge d'incertitude sur les zones à risque d'affaissement.

La carte d'aléa affaissement est présentée à l'annexe C.

Eléments indiqués pour mémoire sur la carte d'aléa

L'enveloppe correspondant à l'emprise des travaux est reportée sur la carte des aléas pour garder en mémoire l'existence de l'exploitation souterraine, dans l'hypothèse où un ouvrage exceptionnel, sensible ou profond serait envisagé sur la zone d'étude. Naturellement, ici, la marge d'incertitude « moyenne » de 10 m correspondant aux erreurs possibles de calage cartographiques est appliquée comme limite de l'enveloppe.

7.3 LES ALÉAS TASSEMENT ET GLISSEMENT ASSOCIÉS AUX MINIÈRES

Les minières ou anciennes fouilles ont été décrites en phase informative et positionnées sur la carte informative en annexe A. Il a été distingué les minières ouvertes (non comblées) et les minières remblayées.

Les minières ouvertes peuvent atteindre une dizaine de mètres de profondeur. Les pentes de leurs flancs sont de l'ordre de 45°. Elles résultent de l'exploitation à ciel ouvert de la couche de minerai et de la mise en déblai des stériles. Depuis leur édification, on peut penser qu'un profil d'équilibre est atteint et que des phénomènes de glissement profond peuvent être exclus. Il demeure que des glissements superficiels peuvent survenir et sont localement observés. Ils sont liés à la nature relativement ébouleuse des matériaux qui constituent les talus. Compte tenu de l'intensité intrinsèquement limitée d'un tel phénomène, nous retiendrons un aléa glissement superficiel faible, appliqué à l'emprise de l'ensemble des minières ouvertes.

Pour les fouilles ayant été comblées par des remblais de nature inconnue, on retiendra un aléa tassement jugé faible, également pour le caractère intrinsèquement limité du phénomène considéré.

Ces aléas sont cartographiés en annexe D. On signalera qu'ils se superposent à l'aléa effondrement localisé classé en moyen pour les minières ouvertes.

8. CONCLUSIONS

La présente analyse a conduit à la définition et à l'évaluation de l'aléa pour les risques « mouvements de terrains » liés aux exploitations souterraines des concessions de La Ferrière-aux-Etangs et de Mont-en-Gérôme.

L'exploitation du gisement de fer de La Ferrière-aux-Etangs s'est déroulée en souterrain de 1901 à 1970. Elle a été précédée par l'exploitation de la couche à ciel ouvert sur les affleurements, dans des temps probablement très anciens.

L'ensemble des documents disponibles (archives écrites, plans) et les résultats des investigations de terrain ont été synthétisés dans la partie I de ce rapport. Cette synthèse a permis d'établir une carte informative au 1/5000^{ème} (annexe A) indiquant l'essentiel des informations nécessaires à l'évaluation des aléas.

Trois phénomènes principaux ont été retenus sur le site. Ils ont donné lieu à la réalisation de cartes d'aléa spécifiques (annexes B, C et D).

Le phénomène d'effondrement localisé. Il résulte de plusieurs mécanismes :

- la rupture des anciens travaux (toit et piliers des chambres) situés à faible profondeur (moins de 50 m). Justifiés par des cas d'effondrements connus sur le site, par la nature des travaux concernés (taux de défrètement très élevés) et par des facteurs aggravants tels que le battement de la nappe minière ou la nature des terrains, un aléa moyen a été retenu à l'aplomb des travaux exploités par tailles rabattantes ou chassantes. Dans certaines zones, exploitées par méthodes montantes avec un taux de défrètement plus faible, en limite des 50 m de profondeur, un aléa effondrement localisé faible a été retenu (nord du montage du Champ Blanc et sud du puits de La Lande Menue) ;
- la rupture de puits ou montage d'aérage par éboulement des terrains ;
- au niveau de l'orifice ou débouillage des remblais. Aucun ouvrage débouchant au jour n'a été traité de façon pérenne. Seuls des travaux d'obturation des orifices ont été réalisés (dalles, murs ou comblement de l'entrée). Selon la nature des travaux de mise en sécurité réalisés et l'importance des ouvrages considérés, un aléa moyen ou faible a été retenu.
- l'éboulement de galeries isolées proches de la surface (à moins de 30 m). Un aléa moyen a été retenu à l'aplomb des quelques galeries isolées existant à La Ferrière-aux-Etangs. Les nombreux retours d'expérience de fontis associés au TB 220 ont permis de justifier le niveau d'aléa retenu ;

Le phénomène d'affaissement

Ce phénomène a été retenu à La Ferrière-aux-Etangs pour plusieurs configurations d'exploitation, sur la base du travail de modélisation effectué par l'INERIS sur les gisements pentés ferifères de l'Ouest et en considérant les cas d'affaissement connus, dont un s'est produit à La Ferrière-aux-Etangs.

Un niveau d'aléa moyen a été retenu à l'aplomb des travaux souterrains exploités par tailles rabattantes, comme dans le cas de l'effondrement localisé. Pour les travaux plus profonds, exploités par tailles montantes avec des taux de défrètement de 75 à 80 %, un aléa faible a été retenu.

Le phénomène de glissement et de tassement

Pour tenir compte du caractère sensible au glissement superficiel des anciennes fouilles ouvertes, lié en particulier à la nature ébouleuse des matériaux qui les constituent, un aléa faible a été cartographié sur l'emprise des minières.

Dans le cas des fouilles remblayées, nous avons considéré que les matériaux de comblement pouvaient être sensibles au phénomène de tassement et nous avons cartographié, sur l'emprise de ces minières, un aléa tassement faible.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] LOISLARD M. (2004). Concessions des mines de fer de La Ferrière-aux-Etangs et de Mont-en-Gérôme (Orne). Eléments pour la réalisation de la carte informative. Rapport final. Réf. BRGM/RP-53242-FR d'avril 2004.
- [2] NOTICE DE LA CARTE GEOLOGIQUE à l'échelle 1/50 000-Feuille de Flers, 1983.
- [3] J.J. TRITSCH (2004) Bassin ferrifère d'Anjou – Bretagne. Etude préliminaire à la réalisation d'un Plan de Prévention des Risques Miniers sur le territoire des communes de La Chapelle-sur-Oudon, Sainte-Gemmes-d'Andigné, Segré, Chazé-Henry et Pouancé (19). Secteur dénommé Segré zone 2. Phase informative et évaluation des aléas « mouvements de terrain ». Réf. INERIS DRS-04-55971/R01PROJET du 26 octobre 2004.
- [4] J-J. TRITSCH, T. DELAUNAY (2004) : Evaluation et cartographie des aléas mouvements de terrain sur le bassin minier de May-sur-Orne. Rapport INERIS-DRS-04-48514/R02bis, 67 p., 25 juin 2004.
- [5] L'élaboration des Plans de Prévention des Risques Miniers. Guide méthodologique. Volet technique relatif à l'évaluation de l'aléa. Ouvrage collectif INERIS, BRGM, GEODERIS, ENSMP, IRSN, CSTB référencé DRS-04-51198/R01 projet n°2 du 30 juin 2004.
- [6] LES GISEMENTS MINIERES DE BASSE-NORMANDIE (1998) : Document DRIRE de Basse-Normandie Division Environnement Sous-sol, 1998.
- [7] UNIVERSITE INTER-AGES DE BASSE-NORMANDIE (2000). Les mines de fer normandes. Editions Cahiers du Temps.
- [8] LEFEVRE M.C. (1999). Le fer et La Ferrière-aux-Etangs. Editions Cahiers du Temps.
- [9] V. RENAUD (2004) : Contribution à l'analyse des conditions d'effondrement des gisements pentés des bassins ferrifères de Soumont, May/Orne et Segré (Calvados, Maine-et-Loire), rapport INERIS-DRS-04-50864/RN01, 49 p., 2004.
- [10] CEBTP (1957) : Résultats d'essais sur blocs de minerai de La Ferrière-aux-Etangs. Densité, porosité, vitesse du son, indice sclérométrique, compression, fendage, module de déformation.
- [11] DAUPLEY X., PINTE J.C. (2004) Mine de La Ferrière-aux-Etangs (61). Etude des scénarios de traitement des problèmes hydrauliques liés à la présence du Travers-Bancs 220. Rapport pour le compte de GEODERIS référencé INERIS DRS-04-52035/R01 du 5 février 2004.
- [12] DIDIER C. (1999) Avis technique sur les différents risques résiduels liés aux anciens travaux miniers situés sur la commune de La Ferrière-aux-Etangs. Rapport pour le compte de la DRIRE Basse-Normandie référencé INERIS DRS-99-25045/R01 du 20 décembre 1999.
- [13] Procès verbaux de visite de mine. 10 P.V de visite de la mine de La Ferrière-aux-Etangs daté de 1912 à 1931.
- [14] COLLIOT (1971). Rapport de l'Ingénieur des Mines du 12 février 1971 sur la demande mutation de propriété de la concession de mine de fer de La Ferrière-aux-Etangs.

- [15] DUCOIN D (1986). Rapport du 9 juin 1986 de l'Ingénieur Divisionnaire sur la demande de renonciation présentée par la Société des Mines de Fer de Segré de la concession des mines de fer de La Ferrière-aux-Etangs.
- [16] Société des Mines de Fer de Segré (1983) Mine de La Ferrière-aux-Etangs. Mémoire annexé au dossier de renonciation. Document référencé PM/FB du 20 décembre 1983.
- [16bis] Société des Mines de Fer de Segré. Mémoire complémentaire aux annexes du dossier de demande en renonciation à la concession des Mines de Fer de La Ferrière-aux-Etangs. Document non daté.
- [17] DUCOIN D (1987). Procès-verbal de recollement des travaux complémentaires de sécurité présentés par arrêté préfectoral du 2 février 1987.
- [18] ANONYME. Synclinal de La Ferrière-aux-Etangs et de Halouze. Extrait d'un document des archives de la DIRE Basse Normandie.
- [19] LANGEVIN Cl. et MATHON Ch. (1999) – Commune de La Ferrière-aux-Etangs (Orne) – Origine des venues d'eau constatées dans le secteur du Gué-Plat et risques associés à la présence du « travers-bancs 220 ». Rap. BRGM R40 713 d'août 1999.
- [20] MAZENC B. (2003) – Evaluation des écoulements aux alentours de la mine de La Ferrière-aux-Etangs (61). Document GEODERIS référencé 2500BN03-NT11-BM.
- [21] Société des Mines de Fer de DENAIN et ANZIN. Mines de fer de La Ferrière-aux-Etangs. Etude technique de la protection du village de La Ferrière. Document daté du 12/09/1958.
- [22] ANONYME. Méthode des chambres magasins à la mine de La Ferrière-aux-Etangs.
- [23] Société Industrielle et Minière de Segré (1973). Concession de La Ferrière-aux-Etangs. Travers-bancs 220. Coupes longitudinales et perpendiculaires du TB au 1/1000. Document daté du 9/11/1973.
- [24] Mesures de protection des percements du fond au jour. Liste des ouvrages concernés. Etat des travaux en mars 1971 selon lettre préfectorale du 25/09/1970. Document non référencé.
- [25] Dossier « Pressions de terrain » issue des archives de la DIRE Basse-Normandie comprenant des plans au 1/1000^{ème} de l'exploitation avec la cartographie des zones mises en pression, quelques écrits notamment :
- [26] RIFFAUD (1967). Mine de La Ferrière-aux-Etangs. Modification du programme d'exploitation à la suite des pressions de terrains affectant la zone Sud de la Mine. Note de l'Ingénieur des Mines du 18 mai 1967.

LISTE DES ILLUSTRATIONS ET ANNEXES

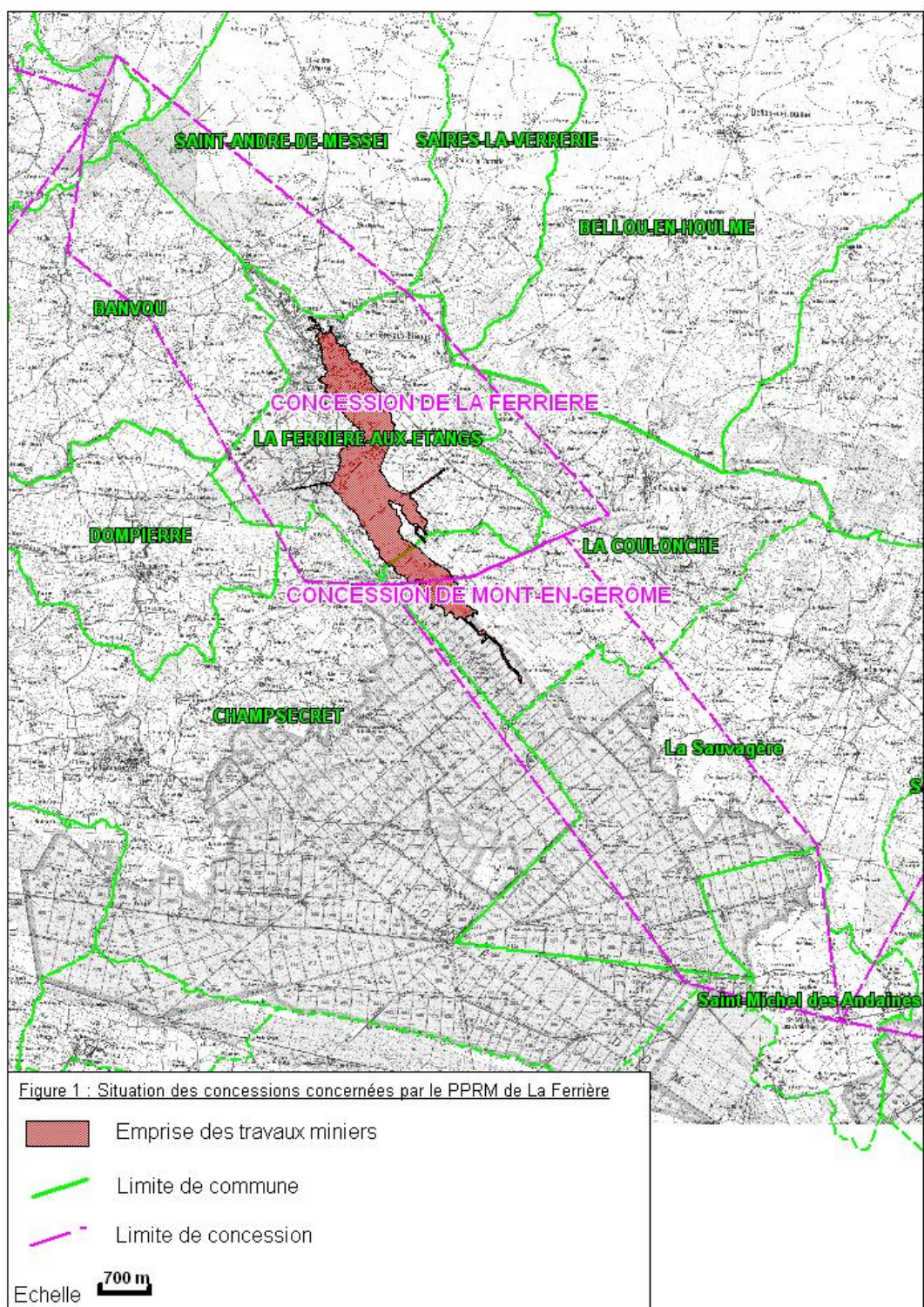
Repère	Désignation	Nombre de pages
	Figures	1 A4
Figure 1	Situation des concessions concernées par le PPRM de La Ferrière-aux-Etangs (plan au 1/7000 ^{ème})	1 A4
Figure 2	Situation des travaux miniers concernés par le PPRM de La Ferrière-aux-Etangs	1 A4
Figure 3	Carte de localisation des bassins ferrifères d'Anjou-Bretagne et de Normandie (d'après Varoquaux et Gérard, 1980)	1 A4
Figure 4	Localisation des concessions de La Ferrière-aux-Etangs et de Mont-en-Gérôme	
Figure 5	Carte structurale des synclinaux ferrifères ornaïs. Localisation des concessions étudiées	1 A4
Figure 6	Coupe géologique schématique de la formation ferrifère (d'après panneau d'exposition – commune de La Ferrière-aux-Etangs)	
Figure 7	Carte des pentes du gisement de La Ferrière-aux-Etangs sur l'ensemble des zones exploitées.	1 A4
Figure 8	Secteur du Gué Plat. Position du TB220 et des piézomètres ainsi que des principaux éléments géologiques, structuraux et hydrologique (tiré de [11])	1 A3
Figure 9	Suivi piézométrique dans le secteur du Gué Plat de décembre 2000 à octobre 2003 [11]. PZ1 à PZ9 piézomètres dans les schistes briovériens. PZ1 dans les schistes du Pissot. PZ2 dans les travaux miniers.	1 A4
Figure 10	Secteurs exploités en 1941. Minières (anciennes fouilles à ciel ouvert) et étages de la mine.	1 A4
Figure 11	Vue représentative de minières (anciennes fouilles à ciel ouvert) de La Ferrière-aux-Etangs.	1 A4
Figure 12	Probables anciennes fouilles au sud du montage n°6 (terminaison sud-est des minières de La Ferrière-aux-Etangs).	
Figure 13	Méthodes d'exploitation par tailles montantes et chambres magasins à La Ferrière-aux-Etangs (exemples dans le secteur Nord, Plan au 1/5000 ^{ème})	1 A4
Figure 13 bis	Méthode d'exploitation par « tailles montantes »	
Figure 14	Méthode d'exploitation par tailles chassantes/rabattantes à La Ferrière-aux-Etangs (Secteur Sud, Plan au 1/5000 ^{ème})	1 A4
Figure 15	Détail d'une exploitation par tailles rabattantes à La Ferrière-aux-Etangs (extrait de P.V. de visite [13])	1 A4

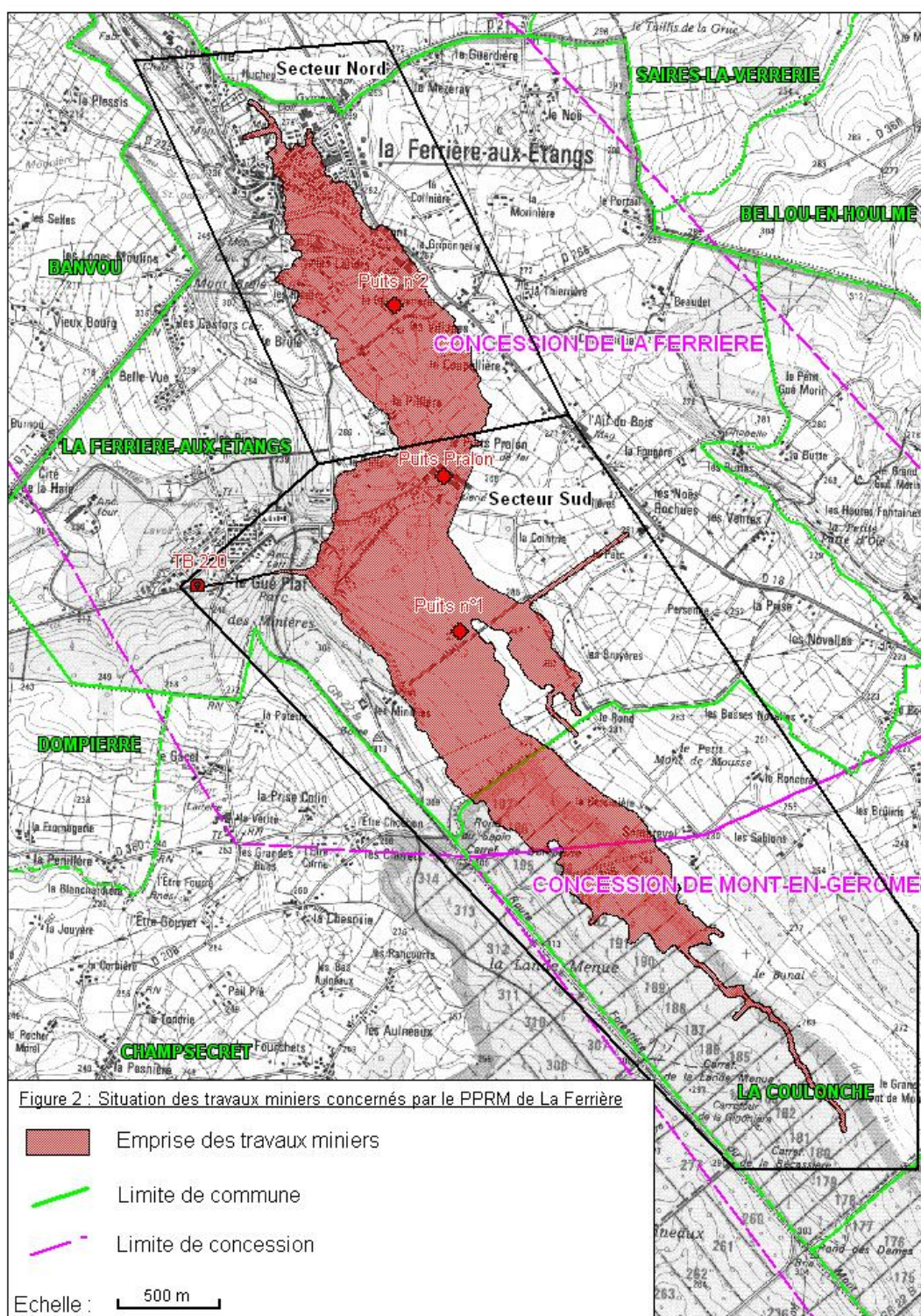
Repère	Désignation	Nombre de pages
Figure 16	Montage du Champ Blanc. Ouverture murée et scellement de rail en partie supérieure	1 A4
Figure 17	Puits n° 2 (ou puits de la Blanchetterie). Ouvertures murées et scellement de rails en partie supérieure.	
Figure 18	TB 220 du temps de l'exploitation (à gauche). Galerie d'extraction au début du siècle (probablement Saint-André ou Saint-Robert) (tiré de [8])	1 A4
Figure 19	Le TB 220 aujourd'hui	
Figure 20	Le puits Pralon lors de son démantèlement.	1 A4
Figure 21	Effondrements localisés de type fontis par rupture du toit (La Ferrière-aux-Etangs, effondrement de 1906, document d'archives, 1906)	1 A4
Figure 22	Effondrement de La Fieffe du 8 mai 1974. Position de l'effondrement par rapport aux travaux du fond (plan au 1/1000 ^{ème})	1 A4
Figure 23	Effondrement de La Fieffe. Situation actuelle.	
Figure 24	Effondrement de La Fieffe du 8 mai 1974. Position de l'effondrement et des fractures observées en surface du sol (plan au 1/1000 ^{ème} , Société Industrielle et Minière de Segré)	1 A4
Figure 25	Emplacement probable du puits de La Lande Menue	1 A4
Figure 26	Effondrement du montage n°6	
Figure 27	Exemple de fontis à l'aplomb du TB 220 (photo GEODERIS)	1 A4
Figure 28	Retour d'expérience sur l'affaissement de 1967/1968. En vert la surface d'affaissement constatée sur le terrain en 2004. En couleur, les constats de mise en pression des piliers au fond et leur évolution spatiale.	1 A4
Figure 29	Marge de sécurité appliquée pour le phénomène de fontis en couche faiblement pentée (30° à 45°)	1 A4
Figure 30	Définition de la marge de sécurité pour les puits	
Annexe I	Evaluation et cartographie des aléas	12 A4

LISTE DES CARTES

Repère	Désignation	Nombre de pages
Annexe A	Carte informative de l'exploitation de La Ferrière-aux-Etangs	1 plan A0
Annexe B	Carte d'aléa effondrement localisé (plan au 1/5000 ^{ème})	1 plan A0
Annexe C	Carte d'aléa affaissement (plan au 1/5000 ^{ème})	1 plan A0
Annexe D	Carte d'aléa tassement et glissement superficiel	1 plan A0

FIGURES





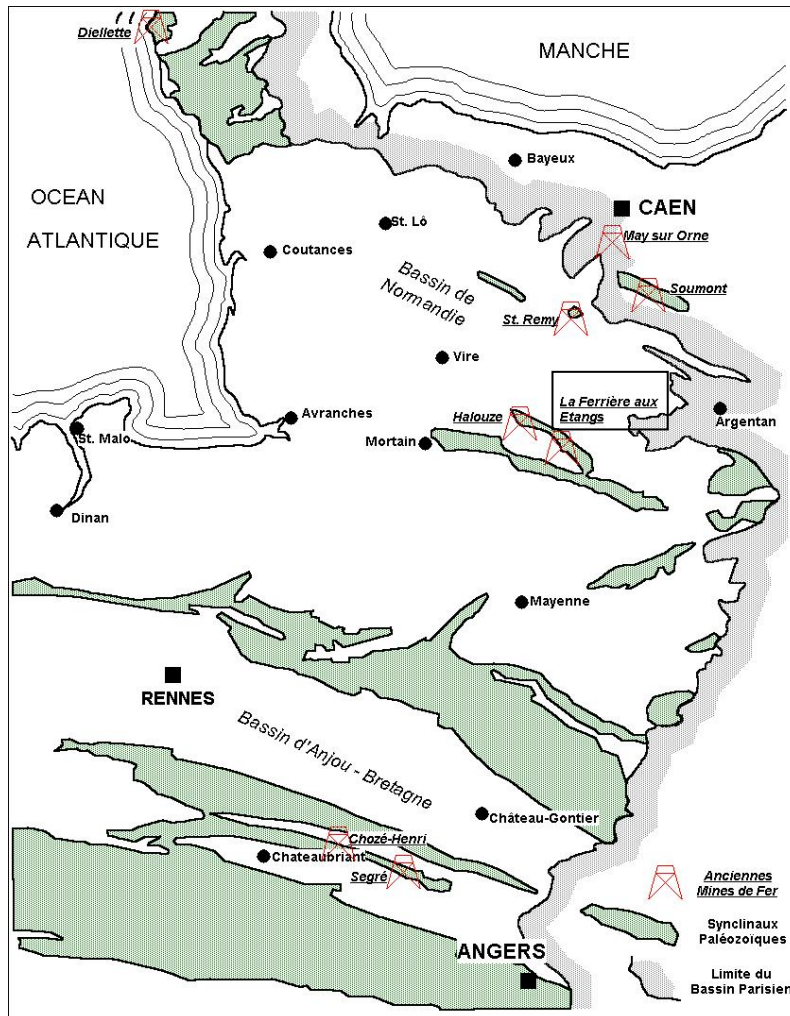


Figure 3 : Carte de localisation des bassins ferrifères d'Anjou-Bretagne et de Normandie (modifié d'après Varoquaux et Gérard)

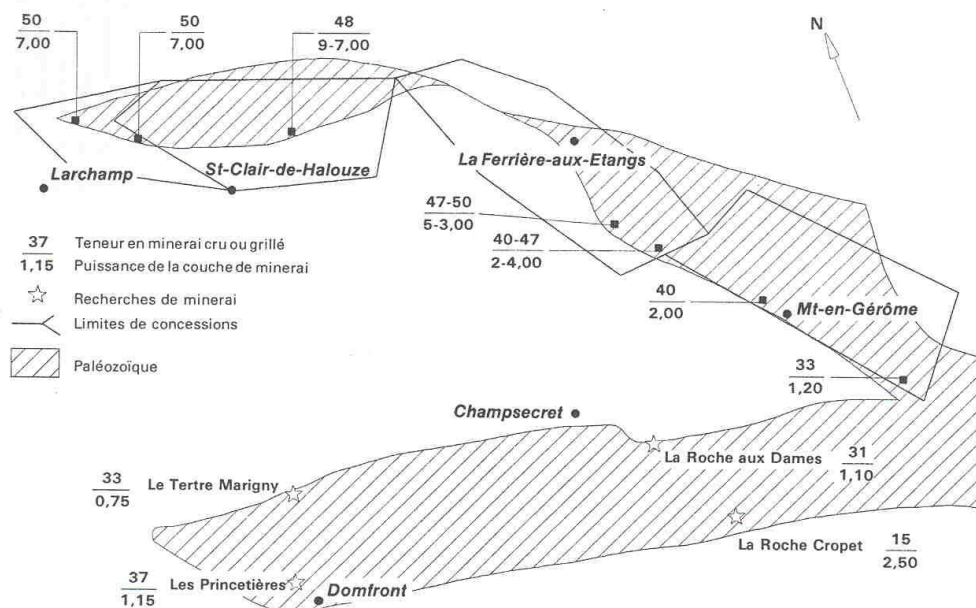


Figure 4 : Localisation des concessions de La Ferrière-aux-Etangs et de Mont-en-Gérôme [2]

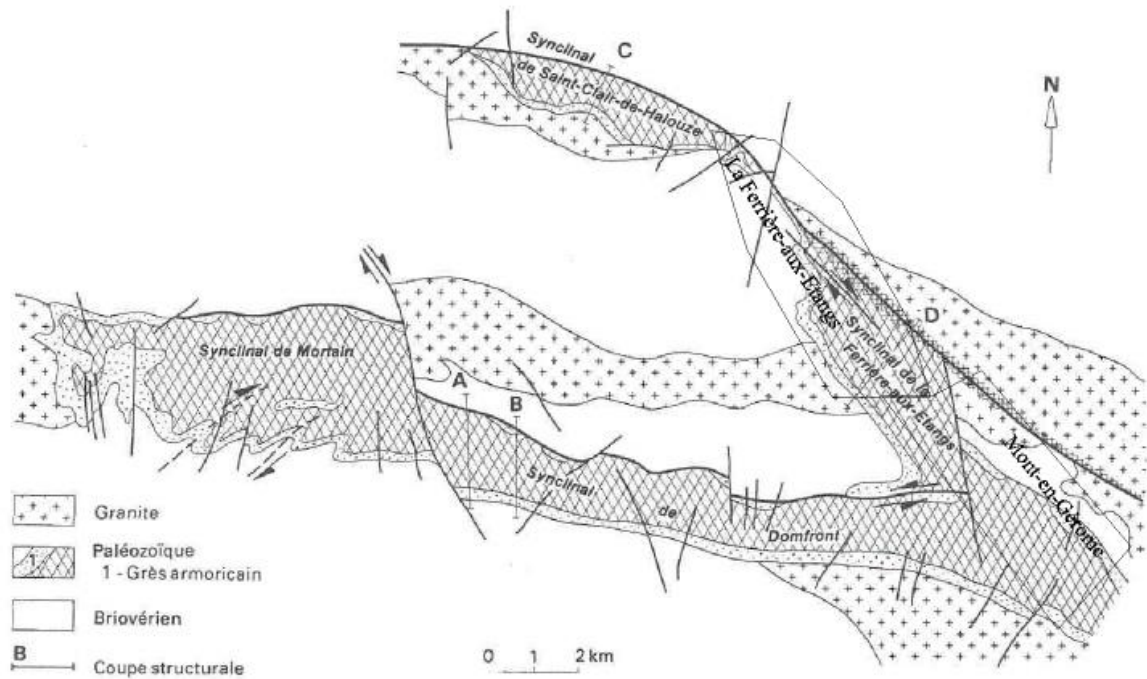


Figure 5: Carte structurale des synclinaux ferrifères ornaux. Localisation des concessions étudiées (d'après [2])

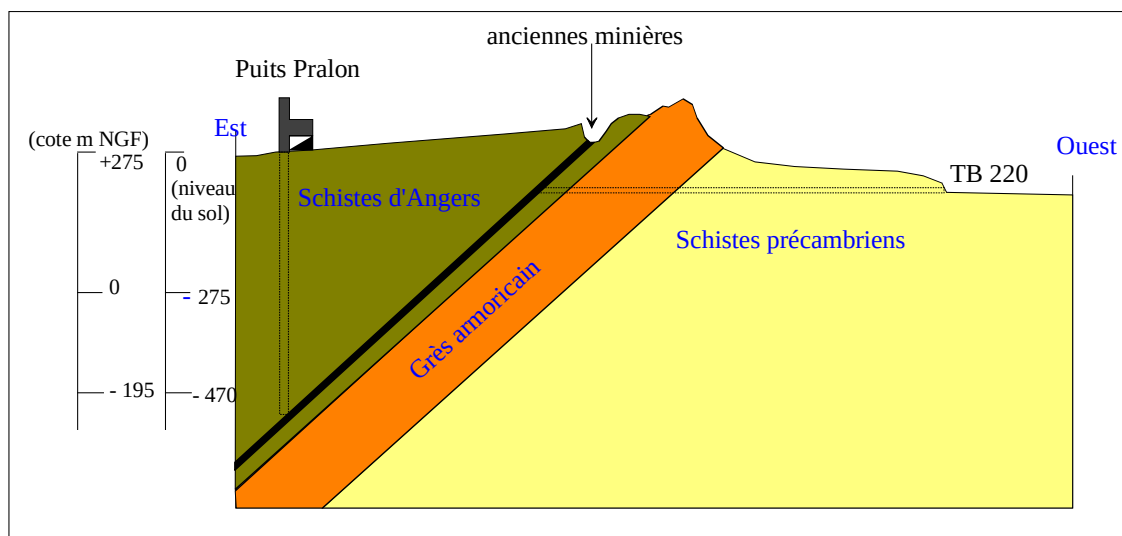


Figure 6 : Coupe géologique schématique de la formation ferrifère (d'après panneau d'exposition – commune de La Ferrière-aux-Étangs)

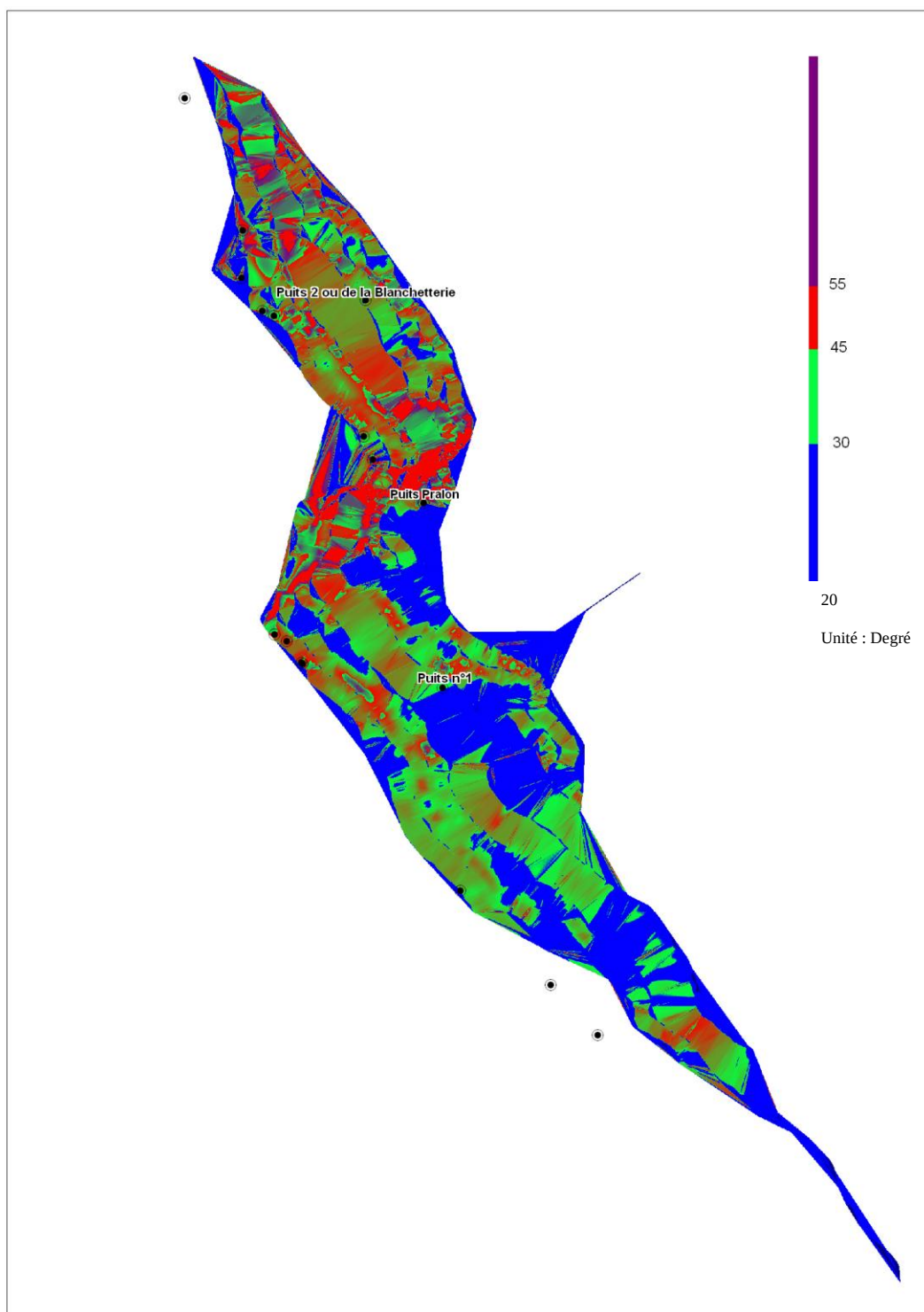


Figure 7 : Carte des pentes du gisement de La Ferrière-aux-Etangs sur l'ensemble des zones exploitées.

Figure 8 : Secteur du Gué Plat. Position du TB220 et des piézomètres ainsi que des principaux éléments géologiques, structuraux et hydrologique (tiré de [11])

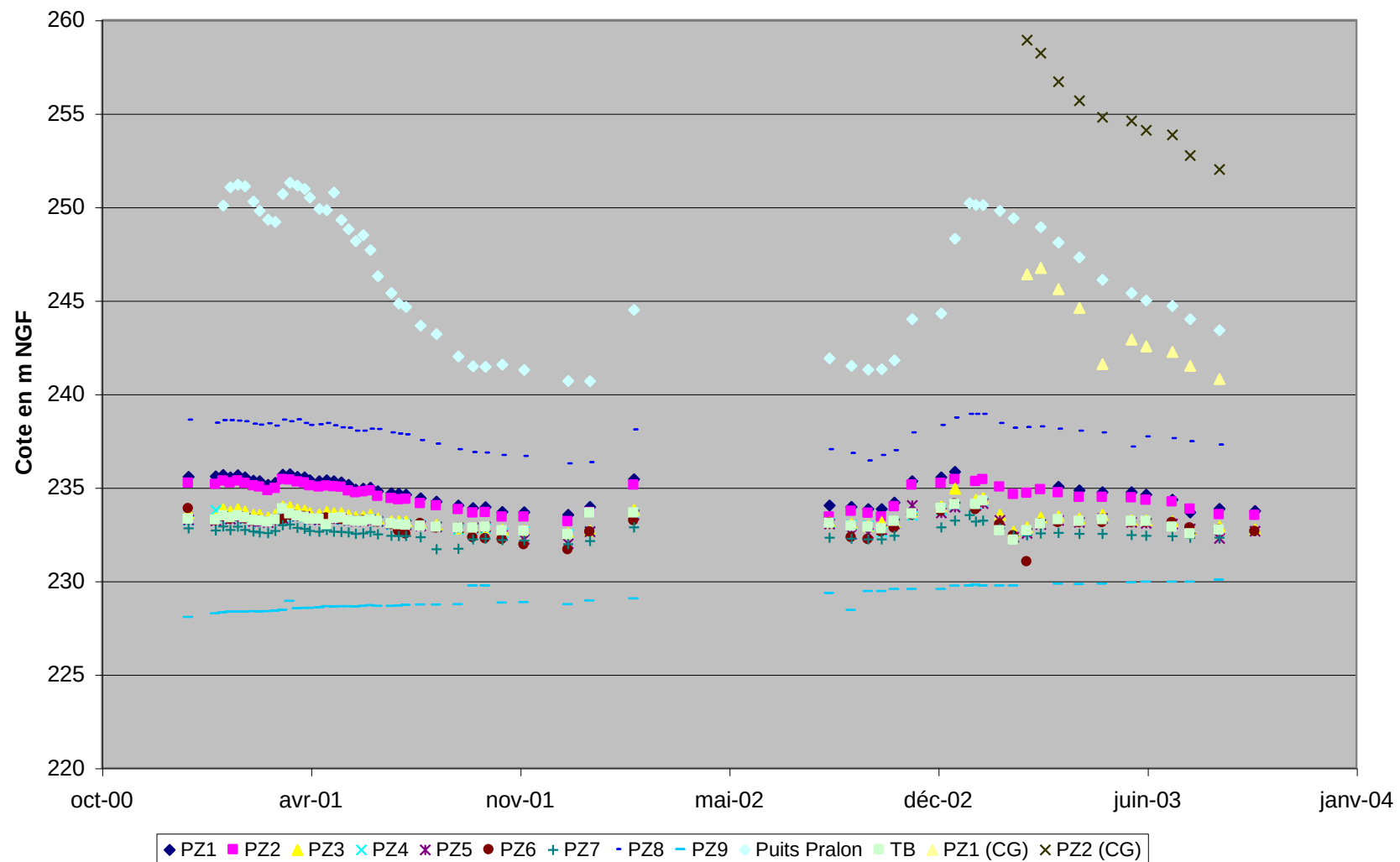
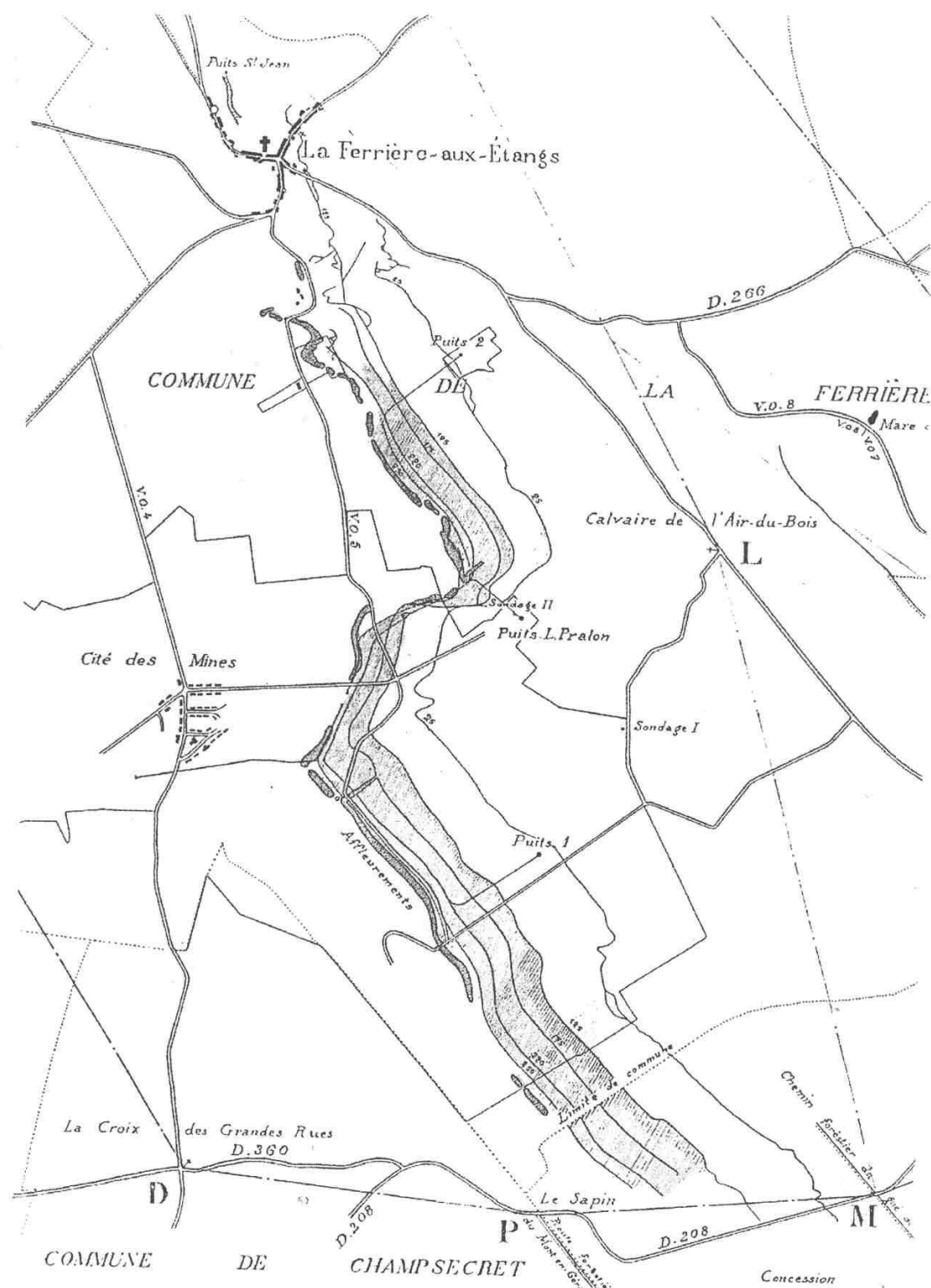


Figure 9 : Suivi piézométrique dans le secteur du Gué Plat de décembre 2000 à octobre 2003 [11]. PZ1 à PZ9 piézomètres dans les schistes briovériens. PZ1 dans les schistes du Pissot. PZ2 dans les travaux miniers.



Minières et étages de la mine en 1941.

Figure 10 : Secteurs exploités en 1941. Minières (anciennes fouilles à ciel ouvert) et étages de la mine.



Figure 11 : vue représentative de minières (anciennes fouilles à ciel ouvert) de La Ferrière-aux-Etangs.



Figure 12 : probables anciennes fouilles au sud du montage n°6 (terminaison sud-est des minières de La Ferrière-aux-Etangs).

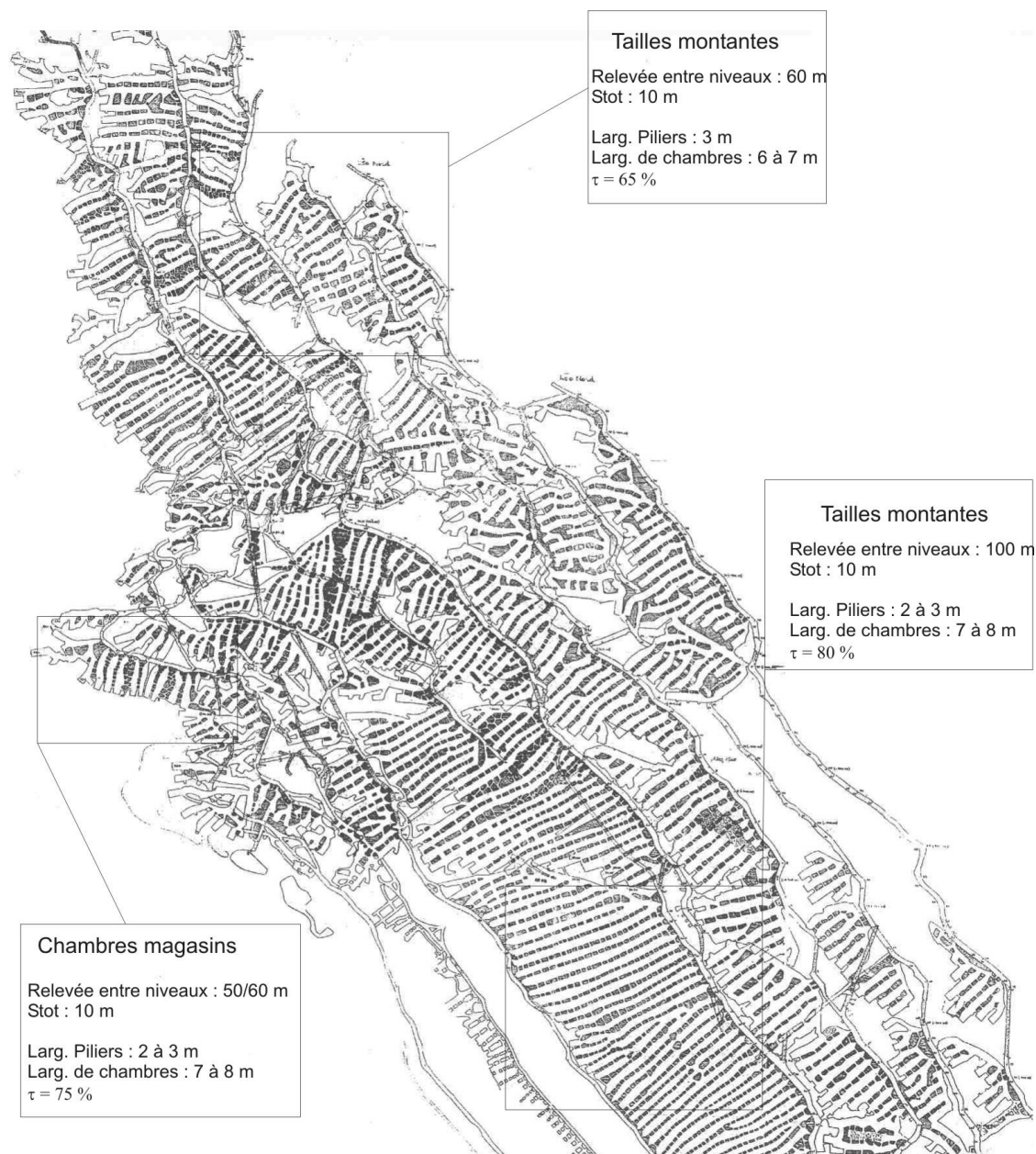


Figure 13 : Méthodes d'exploitation par tailles montantes et chambres magasins à La Ferrière-aux-Etangs (exemples dans le secteur Nord, d'après plan au 1/5000^{ème})

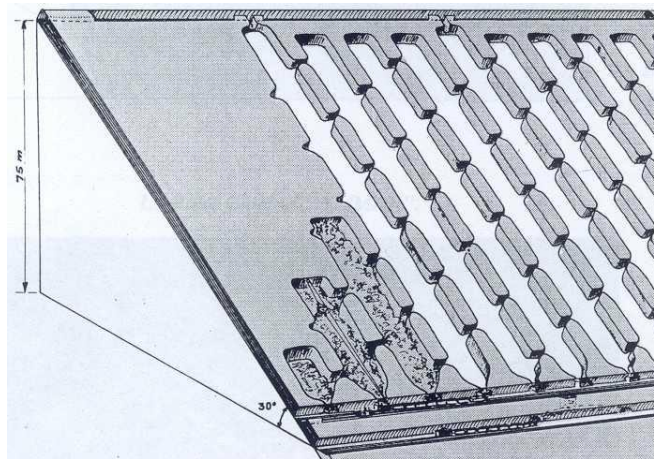


Figure 13bis - Méthode d'exploitation par « tailles montantes » (d'après Perrotte et Lidou)

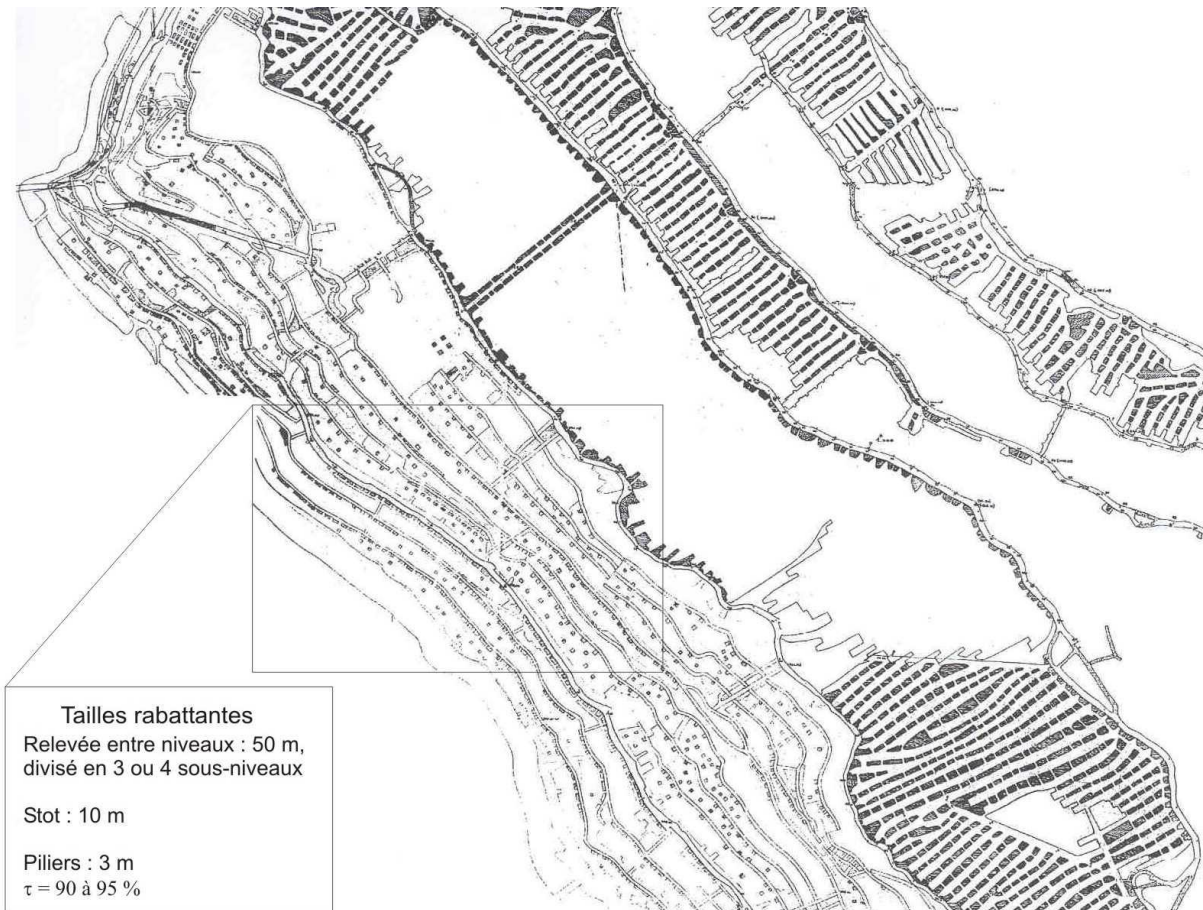


Figure 14 : Méthode d'exploitation par tailles chassantes/rabattantes à La Ferrière-aux-Etangs (Secteur Sud, Plan au 1/5000^{ème})

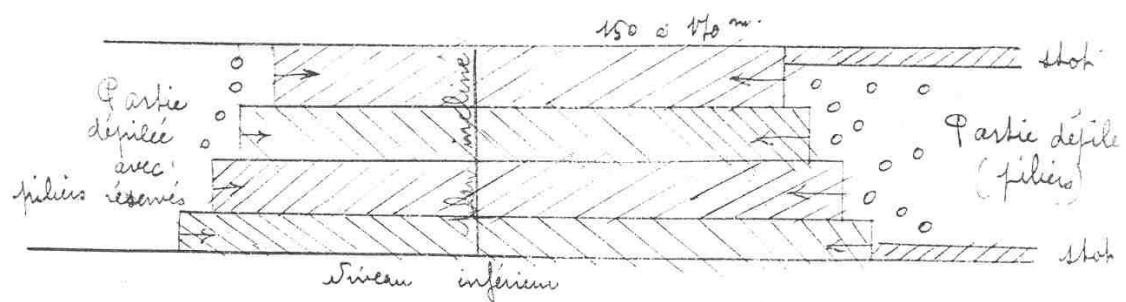


Figure 15 : Détail d'une exploitation par tailles rabattantes à La Ferrière-aux-Etangs (extrait de P.V. de visite [13])



Figure 16 : Montage du Champ Blanc.



Figure 17 : Puits n° 2 (ou puits de la Blanchetterie)



Figure 18 : TB 220 du temps de l'exploitation (à gauche). Galerie d'extraction au début du siècle (probablement Saint-André ou Saint-Robert) (tiré de [8])



Figure 19 : le TB 220 aujourd'hui.

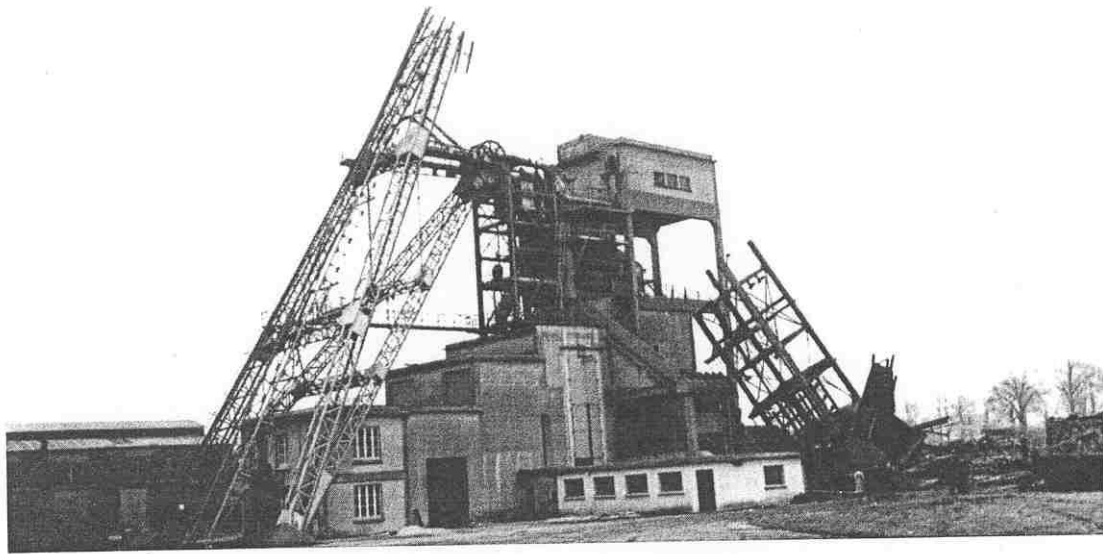
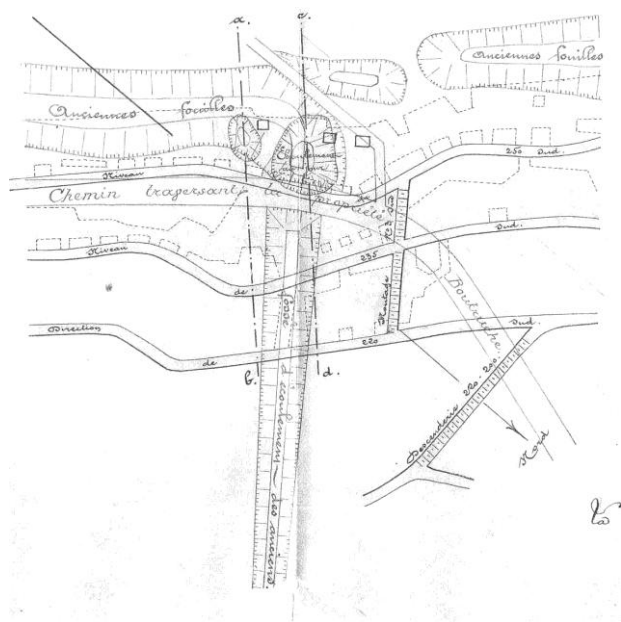
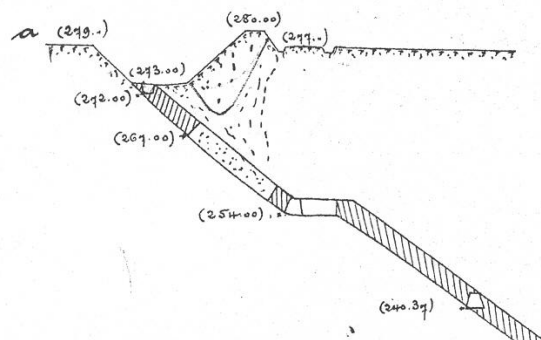


Figure 20 : le puits Pralon lors de son démantèlement. Ne subsistent aujourd'hui que les structures en béton.



Coupe verticale a-b.



Coupe verticale cd.

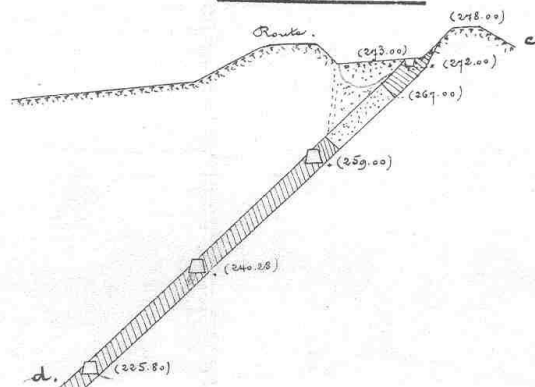


Figure 21 : Effondrements localisés de type fontis par rupture du toit
(La Ferrière-aux-Étangs, effondrement de 1906, document d'archives, 1906)

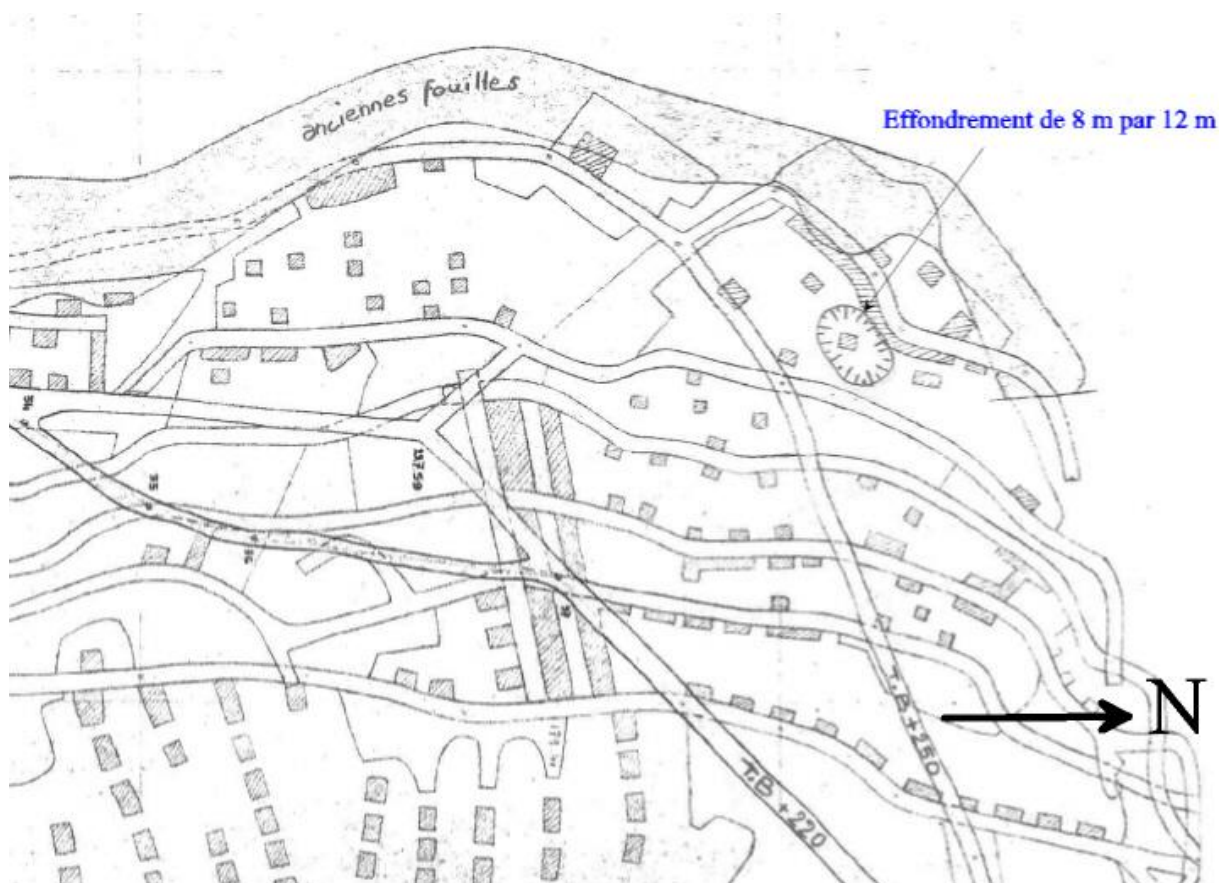


Figure 22 : Effondrement de La Fieffe du 8 mai 1974. Position de l'effondrement par rapport aux travaux du fond (plan au 1/1000^{ème})



Figure 23 : Effondrement de La Fieffe. Situation actuelle.

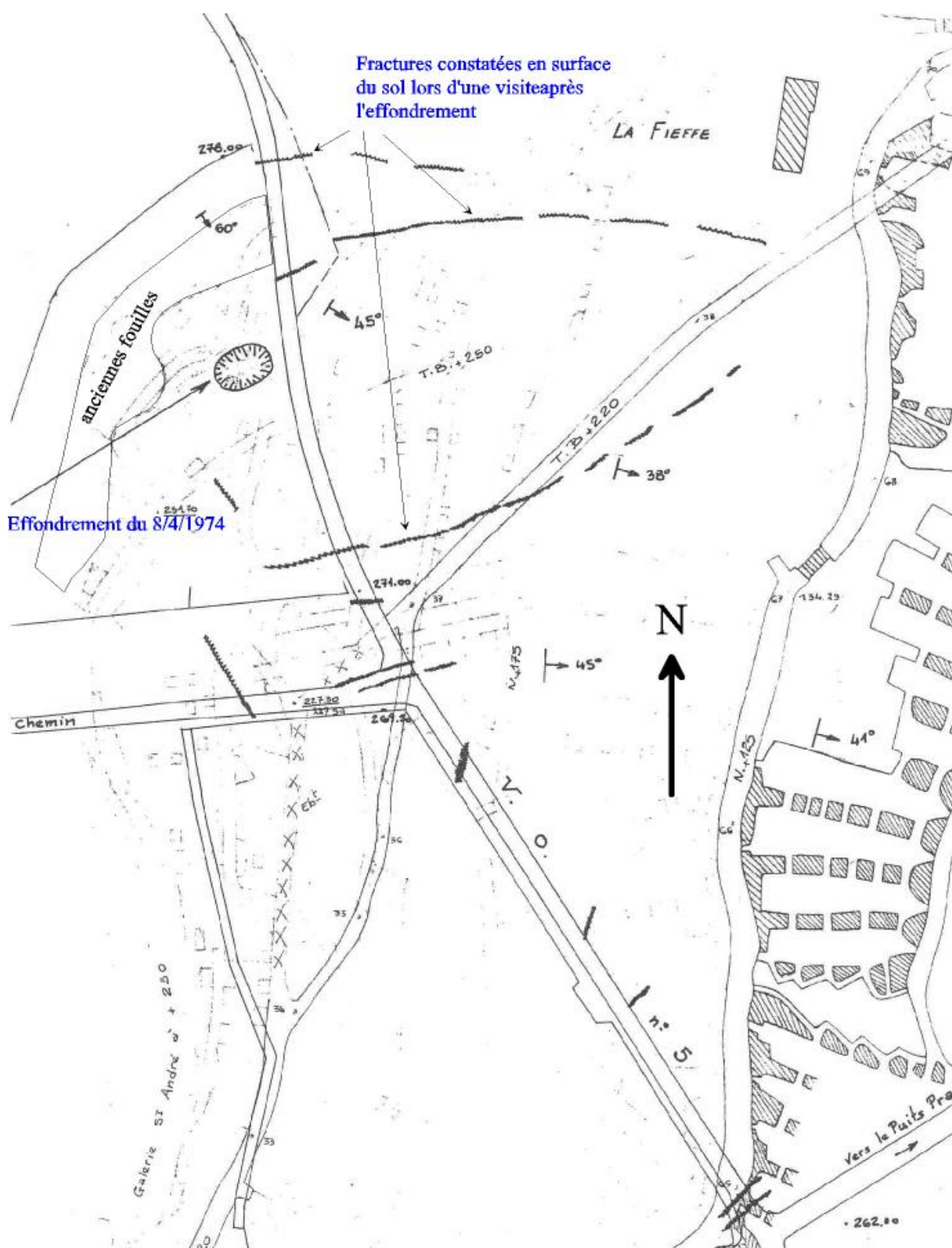


Figure 24 : Effondrement de La Fieffe du 8 mai 1974. Position de l'effondrement et des fractures observées en surface du sol (plan au 1/1000^{ème}, Société Industrielle et Minière de Segré)



Figure 25 : emplacement probable du puits de la Lande Menue.



Figure 26 : effondrement du montage n°6



Figure 27 : exemple de fontis à l'aplomb du TB 220 (photo GEODERIS)

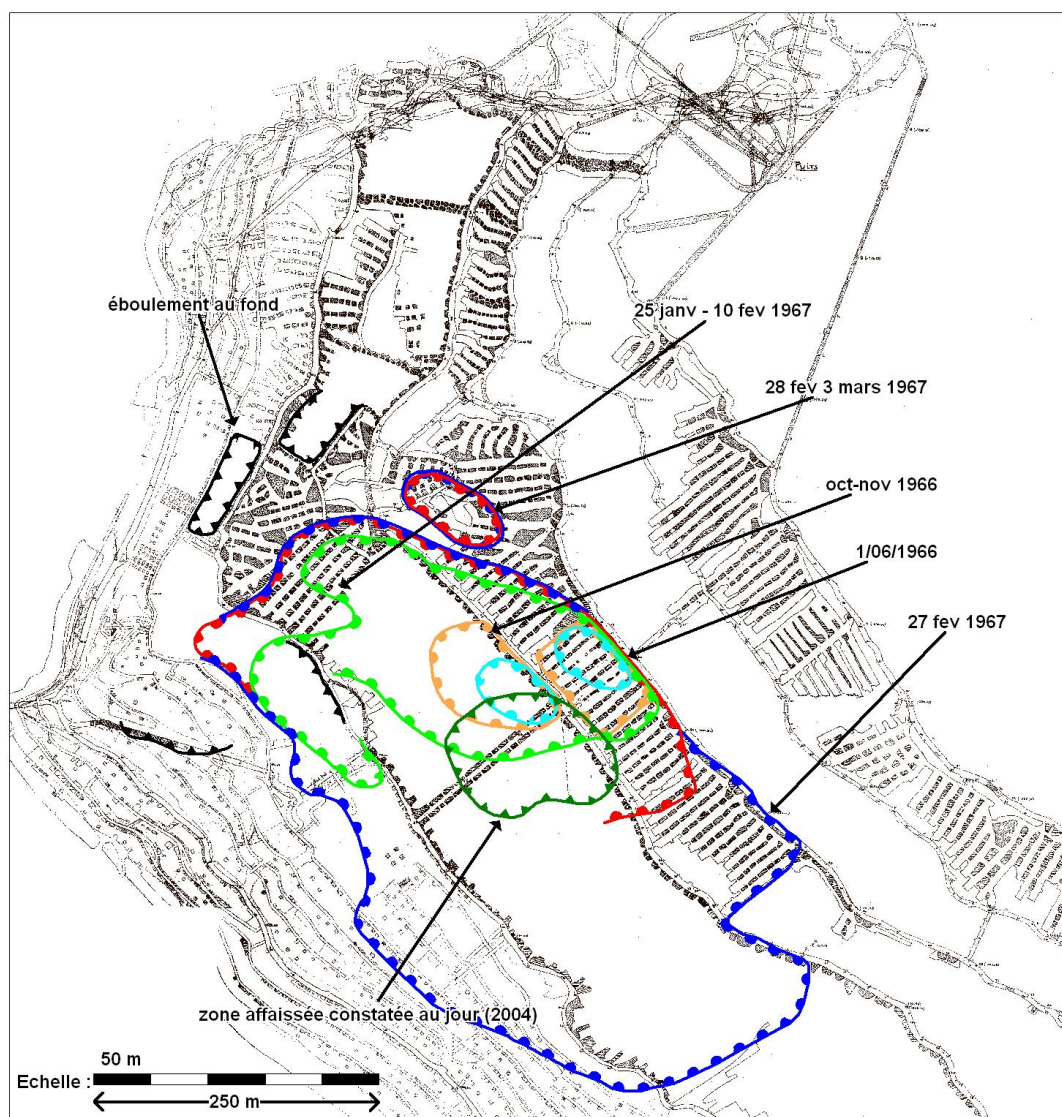


Figure 28 : retour d'expérience sur l'affaissement de 1967/1968. En vert la surface d'affaissement constatée sur le terrain en 2004. En couleur, les constats de mise en pression des piliers au fond et leur évolution spatiale.

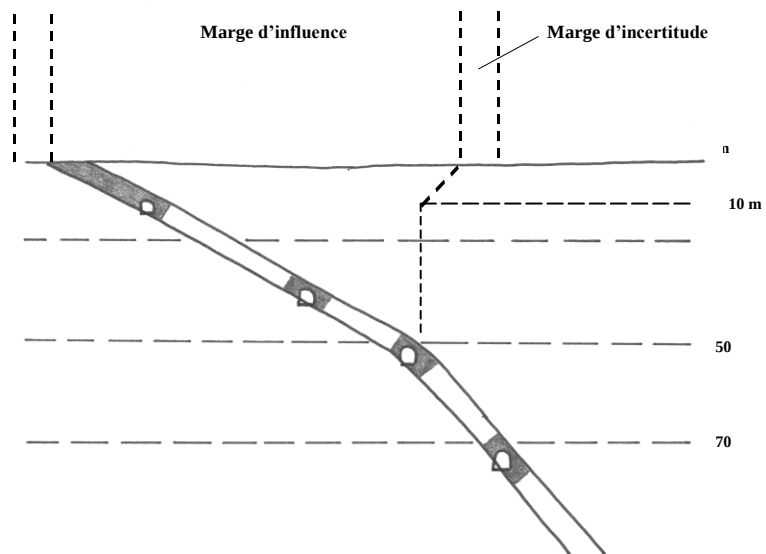


Figure 29: Marge de sécurité appliquée pour le phénomène de fontis en couche faiblement pentée (30° à 45°)

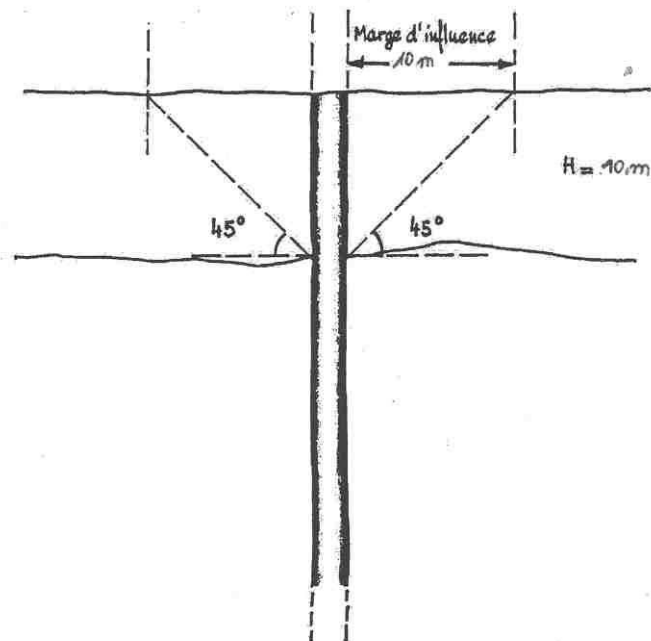


Figure 30 : Définition de la marge de sécurité pour les puits visibles

ANNEXE I

Evaluation et cartographie des aléas

Sommaire

1. Méthode d'évaluation des aléas.....	2
1.1 Principe	2
1.2 Qualification de l'intensité et de prédisposition des aléas.....	2
2. Description et évaluation des aléas.....	3
2.1 Les effondrements localisés.....	3
2.2 L'aléa « affaissement »	6
3. Zonage et cartographie des aléas	11
3.1 Limites et marge de sécurité	11
3.2 Cartographie de l'aléa	11

1. MÉTHODE D'ÉVALUATION DES ALÉAS

1.1 PRINCIPE

L'évaluation de l'aléa « mouvements de terrain » résultant de la présence de cavités souterraines a pour but d'identifier les zones susceptibles de mettre en péril, à terme, les personnes et les biens exposés en surface afin de les prendre en compte dans l'aménagement du territoire.

A partir des instabilités connues ou prévisibles, établies en fonction des configurations de site et d'exploitation, de leur évolution possible et des différents phénomènes accidentels attendus, on en déduit les « *aléas de référence* » correspondants. L'évaluation de ces **aléas** résultent classiquement du croisement de l'**intensité** ou de la gravité du phénomène redouté (dommages matériels ou de pertes humaines et des possibilité d'y remédier) par la **probabilité d'occurrence** qui lui est associée.

Quelle que soit la nature des événements redoutés, la complexité des mécanismes, la nature hétérogène du milieu naturel, le caractère très partiel des informations disponibles et le fait que de nombreux désordres, séquelles ou nuisances ne soient pas répétitifs expliquent qu'il est généralement impossible de raisonner sur la base de probabilités quantitatives (x % de risque de développement d'un désordre). On privilégiera donc une classification qualitative caractérisant une **prédisposition** du site à subir tel ou tel type de désordres ou nuisances. C'est donc cette notion de **prédisposition** (au détriment de la probabilité d'occurrence) qui sera retenue dans la suite du document.

La notion d'aléa de référence est utilisée ici en se plaçant dans une optique d'analyse à long terme. En effet, l'aléa de référence est défini comme « *le plus fort événement historique connu dans le site, sauf si une analyse spécifique conduit à considérer comme vraisemblable à échelle centennale, ou plus en cas de danger humain, un événement de plus grande ampleur* ».

1.2 QUALIFICATION DE L'INTENSITÉ ET DE PRÉDISPOSITION DES ALÉAS

Notion d'intensité

L'intensité du phénomène caractérise l'ampleur des répercussions attendues en cas de déclenchement d'un événement redouté. De manière à hiérarchiser les dégâts ou nuisances potentielles en cas de survenue du désordre, il est d'usage de définir quelques classes d'intensité (très limitée à très élevée), dont on s'attachera à définir le nombre et le contenu en fonction de la nature des mécanismes et phénomènes attendus sur le site.

Notion de probabilité d'occurrence et de prédisposition

A chaque aléa doit être également rattaché une « probabilité d'occurrence », ce qui n'est pas sans poser des difficultés dans la prévision des mouvements de terrains, phénomènes non périodiques (contrairement aux séismes ou aux inondations) qui font presque toujours appel à des approches de prévision déterministes.

Quelle que soit la nature des événements redoutés, la complexité des mécanismes, la nature hétérogène du milieu naturel, le caractère très partiel des informations disponibles et le fait que de nombreux désordres, séquelles ou nuisances ne soient pas répétitifs expliquent qu'il est généralement impossible de raisonner sur la base de probabilités quantitatives (x % de risque de développement d'un désordre). On privilégiera donc une classification qualitative caractérisant une **prédisposition** du site à subir tel ou tel type de désordres ou nuisances. C'est donc cette notion de **prédisposition** (au détriment de la probabilité d'occurrence) qui sera retenue dans la suite du document.

Pour limiter les confusions entre les classes d'intensité, de prédisposition et d'aléa, ***il est possible d'employer les qualificatifs suivants pour la prédisposition : très peu sensible, peu sensible, sensible, très sensible, à la place de très faible, faible, moyen, fort et très forte***

2. DESCRIPTION ET ÉVALUATION DES ALÉAS

2.1 LES EFFONDREMENTS LOCALISÉS

Définition et effets en surface

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 mais il n'est pas rare qu'elle atteigne une dizaine de mètres même si, dans la majorité des cas, elle se limite à quelques mètres. Dans le cas de gisements pentés, l'effondrement peut prendre la forme d'une gouttière ou d'une tranchée allongée dans la direction du plan de la veine.

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

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

a) Effondrement par rupture d'une tête de filon ou d'une veine pentée

Lorsque l'exploitation d'un filon ou d'une veine pentée s'est développée près de la surface, une rupture peut se développer par cisaillement le long des interfaces minéral - éponges ou encore par éboulement progressif de la couronne à un endroit où le minéral est souvent altéré (on parle alors de rupture du pilier couronne).

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 dans l'orientation de la veine. Si la largeur de l'effondrement n'excède ainsi que très rarement quelques dizaines de mètres, son extension longitudinale peut être plus importante dans le sens du filon ou de la veine.

b) Effondrement par débouillage de puits ou rupture de la tête de puits

Un ancien puits d'exploitation, mal traité (au niveau des recettes) ou mal remblayé (à l'aide de matériaux qui peuvent être remobilisés, notamment en présence d'eau), peut débouiller, 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 de l'épaisseur et des caractéristiques géologiques et mécaniques locales des terrains.

Par ailleurs, si la tête d'un puits non remblayé est foncée dans des terrains de moindre résistance ou meubles (remblais, sols, roche altérée, etc.), la rupture du cuvelage ou du dispositif de fermeture sous-dimensionné peut entraîner la migration de ces matériaux dans la colonne de puits.

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). Des effondrements de diamètre beaucoup plus grands sont tout à fait exceptionnels et correspondent généralement à la présence de sables bouillants proches de la surface.

Les travaux de traitement réalisés pour la mise en sécurité peuvent être un critère permettant de diminuer de façon substantielle, voire éradiquer, la prédisposition au débouillage ou à la rupture de la tête du puits. Par exemple, un bouchon autoportant réalisé en tête de puits, conformément à l'état de l'art, paraît être une solution efficace et suffisamment pérenne. En revanche s'il reste ouvert et est simplement recouvert d'une dalle bétonnée, la stabilité du puits n'est pas garantie contre les risques de rupture du cuvelage et des bords susceptibles de s'opérer à long terme par altération ou vieillissement (surtout si la largeur de la dalle est insuffisante).

c) Effondrement par rupture de toit ou éboulement d'une galerie d'accès : le phénomène de fontis

On parle de « fontis » lorsque le désordre qui affecte la surface résulte de la remontée au jour d'un éboulement initié au sein d'une excavation souterraine (galerie, chambre d'exploitation, etc.). Lorsque la voûte initiée par la rupture du toit de l'excavation ne se stabilise pas mécaniquement du fait de la présence de bancs résistants et 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 « autocomblement », la voûte peut atteindre la surface du sol.

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 (dans des gammes d'ouvertures classiques : 2 à 4 ou 5 m) n'étaient plus susceptibles de provoquer ce phénomène en surface.

Qualification de l'intensité

Le phénomène d'effondrement localisé est de nature à porter atteinte à la sécurité des personnes et des biens présents en surface.

C'est principalement le *diamètre de l'effondrement* qui va influencer sur les conséquences du phénomène vis-à-vis de la sécurité des personnes et des biens présents dans la zone d'influence du désordre. C'est donc ce paramètre que nous retenons comme grandeur représentative. La profondeur du cratère influe sur la dangerosité du phénomène mais, souvent délicate à prévoir, notamment pour ce qui concerne les fontis et les débousses de puits, elle n'est pas retenue a priori.

Parmi les principaux facteurs susceptibles d'influer sur la grandeur du diamètre de l'effondrement, on retient : la dimension des vides résiduels au sein des travaux souterrains (volume) ainsi que l'épaisseur et la nature des terrains constituant le recouvrement dont le rôle est prépondérant sur les dimensions de l'entonnoir d'effondrement en surface.

Classe d'intensité	Diamètre de l'effondrement
Très faible	Effondrements auto-remblayés à proximité immédiate de la surface (profondeur centimétrique)
Faible	$\varnothing < 3 \text{ m}$
Moyenne	$3 \text{ m} < \varnothing < 10 \text{ m}$
Forte	$\varnothing > 10 \text{ m}$

Tableau 1 : Classes d'intensité de l'aléa « effondrement localisé »

Qualification de la prédisposition

Quel que soit le contexte d'exploitation, deux critères fondamentaux gouvernent la prédisposition d'un site au développement d'effondrements localisés :

- l'existence d'anciens mouvements de type « effondrement localisé », encore visibles en surface ou décrits dans les archives ou encore leur survenance sur un site présentant des caractéristiques géologiques et d'exploitation similaires ;
- la présence de terrains déconsolidés en surface, notamment sur une grande épaisseur ;
- la profondeur des travaux.

Les principaux facteurs de prédisposition spécifiques aux phénomènes identifiés sur les gisements synclinaux angevin-breton et normands sont les suivants :

a) concernant le risque de rupture de tête de filon (rupture de couronne)

- dimensions et résistance des couronnes (épaisseur, présence d'extraction à ciel ouvert en sub-surface, degré d'altération, présence de failles ou d'accidents tectoniques, etc.) ;
- caractéristiques du gisement (pendage, nature des terrains encaissants, interfaces entre le filon et les épontes, etc.).

b) concernant le risque de débousses ou rupture de tête de puits

Les facteurs identifiés dépendent des deux mécanismes d'instabilité qui peuvent affecter une ancienne tête de puits :

cas de l'effondrement de la structure mise en place en tête d'un puits vide (cuvelage, plancher, voûte en briques, dalle, bouchon, etc) : caractéristiques de cette structure, altérabilité dans le temps, nature du cuvelage, nature résistance des terrains encaissants ;

- cas du débouillage d'un puits remblayé : conditions hydrogéologiques (remontée des eaux, battements de nappe), présence de galeries connectées au puits et non obturées par des serremments, ancienneté du remblayage, facteurs défavorables (vibrations, surcharges, variations du niveau de la nappe, etc.).

c) concernant le risque de rupture par éboulement d'une galerie à faible profondeur

La prédisposition d'un site au développement d'un fontis à l'aplomb dépend de la combinaison de deux processus : la rupture de l'ouvrage souterrain en lui-même et la remontée de l'instabilité jusqu'en surface.

Facteurs de prédisposition à la rupture de l'ouvrage souterrain :

- la largeur (ou portée) du toit des chambres ou des galeries concernées ;
- la nature et l'épaisseur des premiers bancs rocheux, l'existence de soutènement.

Facteurs de prédisposition du recouvrement conditionnant la remontée de fontis en surface :

- facteurs favorisant la stabilisation du phénomène par formation d'une voûte stable : présence de bancs homogènes suffisamment épais et résistants (par exemple : présence et surtout épaisseur des terrains jurassiques recouvrant les terrains primaires) ;
- concernant la stabilisation du phénomène par autocomblement : volume des vides résiduels disponibles au sein des vieux travaux, nature des terrains de recouvrement (épaisseur, comportement et coefficient de foisonnement).

Concernant les galeries minières isolées de dimensions classiques, le retour d'expérience semble montrer qu'au-delà d'une profondeur d'une cinquantaine de mètres, la probabilité de remontée de fontis jusqu'en surface devient négligeable.

2.2 L'ALÉA « AFFAISSEMENT »

Définition et effets en surface

L'affaissement se manifeste par un réajustement des terrains de surface induit par l'éboulement de cavités souterraines résultant de l'extraction du minerai. Les désordres, dont le caractère est généralement lent, progressif et souple, prennent la forme d'une dépression topographique qui présente une allure de cuvette, sans rupture cassante importante (des fractures ouvertes sont possibles dans la zone en extension, située sur la bordure de l'affaissement).

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 pentées (ou éventuellement filoniennes) profondes ayant laissé des vides résiduels importants après extraction.

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

Généralement, ce ne sont pas tant les déplacements verticaux qui affectent les bâtiments et infrastructures de surface, que les déformations du sol (déplacements différentiels horizontaux, flexions, mise en pente, etc.). 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).

a) Cas des exploitations en plateure (pendage < 20°)

Comme la plupart des autres phénomènes d'instabilité, les affaissements miniers ne se limitent pas au strict aplomb des contours de travaux souterrains. La limite extérieure de la cuvette d'affaissement en surface est déterminée par l'angle (« angle d'influence ») défini en profondeur par la droite verticale correspondant à la bordure souterraine de l'exploitation et la droite virtuelle matérialisant en surface le point où l'affaissement est considéré comme nul ou négligeable. En fonction de la nature, de l'épaisseur des terrains de recouvrement et de la présence d'accidents géologiques, l'angle d'influence varie classiquement entre une dizaine et une quarantaine de degrés en plateure.

Plus les travaux miniers sont profonds, plus la cuvette d'affaissement est étendue et étalée en surface. Toutes choses égales par ailleurs, les affaissements verticaux et les déplacements horizontaux diminuent aussi avec la profondeur d'exploitation.

Pour les exploitations totales par tailles foudroyées ou dépilage, la phase d'affaissement maximal intervient en suivant de peu la progression du front. Les déformations résiduelles induites après l'exploitation sont, en général, très limitées et les conséquences sur infrastructures de surface négligeables à nulles.

b) Cas des exploitations en gisements pentés (sédimentaires ou filoniens)

Les exploitations en couche pentée se caractérisent par une dissymétrie de la cuvette d'affaissement plus ou moins importante en fonction du pendage. L'existence d'un pendage influe, en effet, directement sur les valeurs des angles d'influence en amont et en aval (schéma ci-dessous).

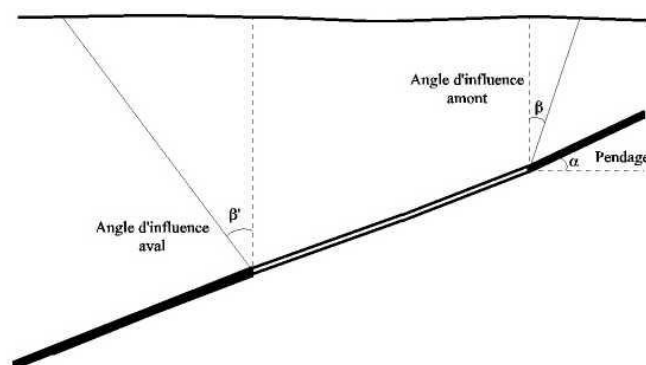


Schéma montrant la dissymétrie des angles d'influence amont et aval en gisement penté

Quand la profondeur d'exploitation devient importante, l'influence de l'angle aval se traduit généralement par une large extension de la cuvette d'affaissement mais, en contrepartie, par des amplitudes d'affaissement vertical et des déplacements différentiels horizontaux plus faibles. En revanche, coté amont les déplacements augmentent sensiblement.

Notons, par ailleurs, que contrairement aux exploitations totales par tailles foudroyées ou défilage, l'occurrence d'affaissements à l'aplomb d'exploitations par chambres et piliers abandonnés ou par chambres laissées vides (telles que les chambres magasins) dépend directement de la rupture des cavités (éboulement). Des phénomènes d'affaissement peuvent alors être initiés plusieurs années ou décennies après la fermeture des travaux si les structures souterraines sont suffisamment résistantes pour demeurer stables jusqu'à ce terme.

Qualification de l'intensité

Les caractéristiques qui matérialisent les dégâts les plus dommageables pour les biens situés en surface dus aux phénomènes d'affaissement progressif, sont généralement les déformations différentielles horizontales et les mouvements de mise en pente du sol. Nous retiendrons donc ces deux paramètres pour discriminer les classes d'intensité.

La définition des classes d'intensité s'appuie alors principalement sur la notion d'effets prévisibles sur les structures même si, au-delà de certaines valeurs de déformations, les désordres infligés aux bâtiments peuvent s'avérer de nature à mettre en péril la sécurité des personnes qui y résident.

Les principaux facteurs susceptibles d'influencer la valeur de ces deux paramètres sont essentiellement :

- la géométrie des travaux (largeur exploitée des panneaux) ;
- l'ouverture des chantiers souterrains (tailles) ;
- la méthode d'exploitation (taux de défrètement, etc.) ;
- le pendage des couches (au delà de 20° ou 30°) ;
- la profondeur des panneaux ;
- la nature des terrains de recouvrement, la présence de failles, la topographie de surface, etc.

Classe d'intensité	Mise en pente (en %)
Très faible	$0 < P < 1$
Faible	$1 < P < 3$
Moyenne	$3 < P < 6$
Forte	$P > 6$

*Tableau 2 : Classes d'intensité de l'aléa « affaissement »
(valeurs indicatives)*

Qualification de la prédisposition

Quel que soit le contexte d'exploitation, l'existence d'anciens mouvements de type « affaissement progressif » (encore visibles en surface ou décrits dans les archives) contribue souvent à augmenter la prédisposition qu'un site présentant des caractéristiques géologiques et d'exploitation voisines puisse subir, à l'avenir, d'autres phénomènes sensiblement similaires (retroanalyse sur les bassins de risques).

a) Exploitations menées par foudroyage

A l'aplomb d'anciennes exploitations totales foudroyées, il est admis que la phase d'affaissement résiduel perceptible en surface se limite aux quelques années suivant l'arrêt des travaux (de l'ordre de 5 ans, au maximum pour les mines de charbon ou de fer, à l'exception des mines de sel). Si cet arrêt est récent (moins de 5 ans pour certains bassins miniers), la probabilité de voir se développer un affaissement résiduel pourra être considérée comme réelle, dans le cas contraire, elle pourra être négligée (on se référera alors plutôt à un aléa « tassement » pour caractériser le devenir de la zone).

La prédisposition de l'aléa « affaissement progressif » à l'aplomb d'exploitations totales constitue donc une exception, en ce sens que l'existence d'anciens affaissements ne prédispose en rien un site à subir d'autres désordres sensiblement similaires à l'avenir.

b) Exploitations partielles menées par chambres et piliers

Contrairement aux exploitations foudroyées qui ont pour conséquence directe (voire pour objectif) de provoquer l'affaissement de la surface, les exploitations partielles par chambres et piliers abandonnés n'ont d'intérêt que de garantir la stabilité de la surface contre tout risque d'affaissement ou d'effondrement.

La prédisposition d'un site face au risque d'affaissement à l'aplomb d'anciennes exploitations par chambres et piliers abandonnés dépend donc de la combinaison de deux prédispositions : la rupture inopinée de l'ouvrage souterrain et le mode de comportement des terrains de recouvrement.

La prédisposition à la rupture de l'ouvrage souterrain, facteur essentiel du déclenchement du phénomène, repose principalement sur l'état des contraintes de sollicitation qui s'exercent sur les piliers (tributaires notamment du taux de défrètement et de la profondeur des travaux), des caractéristiques de résistance des piliers (résistance, mais aussi taille, forme, régularité, etc.) et d'autres facteurs tels que la sensibilité des matériaux à l'eau, la présence de failles, etc.

c) Exploitations pentées et filoniennes

Dans ce type d'exploitations, auxquelles se rattachent les mines de fer de l'Ouest, c'est principalement la stabilité des stots, dalles ou piliers laissés en place pour assurer la tenue des épontes qui gouverne la prédisposition d'une exploitation filonienne à subir des affaissements en surface. Pour évaluer la stabilité à long terme des terrains sous-minés, il convient de tenir compte principalement :

- des dimensions des panneaux ;
- du pendage des couches ;
- du taux d'exploitation (ou taux de « défrètement ») ;
- de l'ouverture (hauteur exploitée entre épontes) ;
- des propriétés de résistance des ouvrages miniers laissés en place.

Le processus d'affaissement a été étudié plus spécifiquement sur les gisements ferrifères pentés de l'Ouest, par modélisation numérique (Renaud, 2004)¹, afin d'évaluer les facteurs de prédisposition favorables ou non à sa réalisation.

Cette étude montre que le déclenchement du processus d'affaissement s'opère par rupture en cisaillement des bancs jusqu'à la surface dans certaines conditions particulières. Les configurations d'exploitation qui permettent le déclenchement (ou non) du processus de rupture sont la combinaison des trois facteurs suivants :

- le pendage des couches ;
- le taux d'exploitation (ou taux de « défruitement ») ;
- l'ouverture (hauteur exploitée entre épontes).

L'étude paramétrique réalisée dans le cadre de cette analyse montre que le processus d'affaissement peut être exclu dans les conditions suivantes :

Pendage	Taux de défruitement (τ %)	Ouverture (w)
> 55°	≤ 90 %	≤ 4 m
	≤ 85 %	≤ 5 m
45° à 55°	≤ 90 %	≤ 3 m
	≤ 80 %	≤ 5 m
30° à 45°	≤ 80 %	≤ 3 m
	≤ 70 %	≤ 5 m

Tableau 3 : conditions d'exclusion du processus d'affaissement (d'après Renaud, 2004)

L'influence de l'augmentation du pendage se manifeste par un déplacement des zones de rupture plus près de la surface (ou de l'affleurement) : plus on est penté, plus on affecte les terrains proches de la surface (points de ruptures ou points plastiques).

En plus de ces configurations d'exploitation, d'autres conditions doivent être prises en compte pour éventuellement minimiser l'aléa, comme :

- condition n° 1 : pour que l'affaissement se donne en totalité il faut que les dimensions des chantiers (largeur L) atteignent ou dépassent la profondeur (H) (soit : $L \geq H$), ce qui représente, dans le contexte de ces exploitations, une largeur au pendage de 250 à 290 m (profondeur inférieure à 220–250 m). En dessous ($L < H$), les affaissements sont d'autant plus limités et l'aléa plus faible ;
- condition n° 2 : on considère qu'il n'y a pas de répercussions en surface (affaissements non perceptibles) si le chantier présente une largeur $L < 0,4 H$;
- condition n° 3 : si la profondeur limite des travaux est supérieure à 250 - 300 m (en fonction de la géométrie des chantiers), on considère que les zones en rupture ont peu de chances d'atteindre la surface.

¹ V. RENAUD (2004) : Contribution à l'analyse des conditions d'effondrement des gisements pentés des bassins ferrifères de Soumont, May/Orne et Segré (Calvados, Maine-et-Loire), rapport INERIS-DRS-04-50864/RN01, 49 p., juin 2004.

3. ZONAGE ET CARTOGRAPHIE DES ALÉAS

3.1 LIMITES ET MARGE DE SÉCURITÉ

Marge d'influence

La représentation des contours délimitant les zones d'aléas s'établit en considérant, dans l'analyse, outre la zone sous-minée directement affectée par les travaux miniers, la zone située en bordure susceptible d'être influencée par l'évolution du désordre attendu. Cette dernière zone constitue la « marge d'influence » qui, depuis l'aplomb des travaux, s'étend jusqu'à une limite en surface matérialisée par l'angle d'influence des travaux miniers, qu'il s'agisse d'un effondrement localisé ou d'un affaissement.

Marge d'incertitude

La marge d'incertitude représente une limite supplémentaire qui matérialise les incertitudes cartographiques dues à la précision des levés, des points de référence, du fond de plan et de son échelle, de l'assemblage des plans cadastraux (lorsque ce travail est nécessaire) et surtout du report fond – jour des plans d'exploitation.

En fonction de la présence ou non de points de référence permettant un bon « calage » des plans (comme les puits repérés, par exemple), l'incertitude cartographique peut ne représenter que quelques mètres pour atteindre une dizaine de mètres, voire davantage, dans certains cas (manque de repères fond – jour). Pour simplifier, on retient classiquement, une marge d'incertitude de 10 à 20 m pour le zonage des effondrements localisés ou des affaissements et aucune marge de sécurité pour les ouvrages de surface bien repérés (puits, entrées de galeries).

Marge de sécurité

Dans le cas des effondrements localisés ou affaissements la marge de sécurité englobe donc la marge d'influence et la marge d'incertitude (sauf pour les ouvrages de surface parfaitement localisés).

3.2 CARTOGRAPHIE DE L'ALÉA

L'étape qui suit l'analyse consiste à reporter, sur un fond cartographique de la surface du sol, les différentes zones d'aléas en leur attribuant une couleur conventionnelle. On veille, en général, compte tenu des incertitudes évoquées précédemment, à lisser les contours des différentes zones.

