



**Evaluation et cartographie des aléas
mouvements de terrain dans l'emprise
des concessions de Cinglais, Barbery,
Soumont et Perrières (Calvados)**

Bassin ferrifère de Normandie

DRIRE de Basse-Normandie

L. CAUVIN

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

9 novembre 2004

Evaluation et cartographie des aléas mouvements de terrain dans l'emprise des concessions de Cinglais, Barbery, Soumont et Perrières (Calvados)

Bassin ferrifère de Normandie

DRIRE de Basse-Normandie

9 novembre 2004

Ce document comporte 50 pages (hors couverture, figures, planches photographiques et annexes).

AUTRE PERSONNE AYANT PARTICIPE A L'ETUDE :

- Thierry DELAUNAY, ingénieur à AUXIRBAT, intervenant pour l'INERIS, avait réalisé la phase informative de cette étude.

	Rédaction	Vérification	Approbation
NOM	L. CAUVIN	J.-J. TRITSCH	C. TAUZIEDE
Qualité	Ingénieur à l'Unité Modélisation et Evaluation des Risques Géotechnique de la Direction des Risques du Sol et du Sous-sol	Ingénieur à 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.....	4
EVALUATION DES ALEAS « MOUVEMENTS DE TERRAIN »	5
PARTIE I : PHASE INFORMATIVE	
1. TRAVAUX REALISES.....	7
1.1 SUPPORTS CARTOGRAPHIQUES	7
1.2 DOCUMENTS TECHNIQUES CONSULTES	8
1.3 VISITES SUR SITE.....	8
2. CONTEXTE GEOGRAPHIQUE ET GEOLOGIQUE DU GISEMENT FERRIFERE DE SOUMONT.....	8
2.1 SITUATION ET TOPOGRAPHIE DU GISEMENT SYNCLINAL DE SOUMONT	8
2.2 GEOLOGIE.....	9
2.3 LA COUCHE DE MINERAI : COMPOSITION, PUISSANCE ET RESISTANCE.....	9
2.4 HYDROGEOLOGIE.....	10
3. HISTORIQUE DE L'EXPLOITATION MINIERE	11
3.1 LES CONCESSIONS.....	11
3.1.1 <i>Concession de Cinglais</i>	11
3.1.2 <i>Concession de Barbery</i>	11
3.1.3 <i>Concession de Soumont</i>	12
3.1.4 <i>Concession de Perrières</i>	12
3.2 FERMETURE DE LA MINE	12
3.3 TRAVAUX MINIERES ET METHODES D'EXPLOITATION	12
3.3.1 <i>Présentation des travaux miniers</i>	12
3.3.2 <i>Etendue de l'exploitation</i>	14
3.4 OUVRAGES DEBOUCHANT AU JOUR.....	14
3.4.1 <i>Les puits</i>	15
3.4.2 <i>Les descenderies et les galeries d'accès</i>	15
3.4.3 <i>Travaux miniers localisés à faible profondeur</i>	15
4. TRAVAUX EXECUTES POUR LA MISE EN SECURITE DU SITE.....	15
4.1 FERMETURE DES ORIFICES DEBOUCHANT EN SURFACE.....	15
4.2 SURVEILLANCE	16
4.2.1 <i>Surveillance sismique</i>	16
4.2.2 <i>Auscultation altimétrique</i>	16
5. DESORDRES LIES AUX ANCIENNES EXPLOITATIONS MINIERES.....	16
5.1 DESORDRES OBSERVES EN PHASE D'EXPLOITATION	16
5.2 EFFONDREMENTS LOCALISES SURVENUS APRES L'EXPLOITATION.....	18
6. ANALYSE SYNTHETIQUE DES RISQUES D'INSTABILITES POTENTIELS	19
6.1 EXPERTISES RELATIVES A LA STABILITE DE LA MINE DE SOUMONT.....	19
6.1.1 <i>Rapport R81/20 sur la stabilité générale des zones exploitées en chambres et piliers en semi-dressant (cf. [18])</i>	19
6.1.2 <i>Rapport R81/21 concernant le projet d'exploitation des étages 560-475 et 650-560 (cf.[19])</i>	21
6.1.3 <i>Rapport R89/19 sur la stabilité générale du flanc sud de Soumont (cf. [7])</i>	21
6.2 ANALYSE ET CARTOGRAPHIE DE L'EXPLOITATION MINIERE	23
6.3 SYNTHESE	24
6.4 APPORT DE LA RETROANALYSE SUR L'ANALYSE DES RISQUES DANS LES GISEMENTS FERRIFERES DE L'OUEST	24
6.5 ANALYSE DU RISQUE D'AFFAISSEMENT PAR MODELISATION NUMERIQUE.....	26
7. ETABLISSEMENT DE LA CARTE INFORMATIVE	27

PARTIE II : EVALUATION DES ALEAS

1. IDENTIFICATION DES ALEAS « MOUVEMENTS DE TERRAIN »	31
1.1 INTRODUCTION	31
1.2 LES DIFFERENTS ALEAS RETENUS.....	31
2. EVALUATION DES ALEAS DANS LE BASSIN DE SOUMONT	31
2.1 LES EFFONDREMENTS LOCALISES	32
2.1.1 <i>Effondrements localisés à l’aplomb des chantiers peu profonds</i>	32
2.1.2 <i>Effondrements localisés par rupture des têtes de puits</i>	36
2.1.3 <i>Effondrements localisés par éboulement de galeries isolées</i>	37
2.2 LES AFFAISSEMENTS	39
2.2.1 <i>Etat des travaux et nature des désordres</i>	39
2.2.2 <i>Facteurs de prédisposition et probabilité d’occurrence</i>	40
2.2.3 <i>Intensité de l’affaissement</i>	40
2.2.4 <i>Evaluation de l’aléa</i>	42
2.2.5 <i>Limites du zonage</i>	42
2.3 ELEMENTS INDIQUES POUR MEMOIRE SUR LA CARTE D’ALEA	43
3. CONCLUSIONS	44
BIBLIOGRAPHIE	47
LISTE DES ANNEXES	49

INTRODUCTION

CONTEXTE DE L'ETUDE

La Société des Mines de Soumont (SMS) a exploité, de 1907 à 1987, un gisement ferrifère sur les flancs nord et sud du synclinal de Soumont-Urville (Calvados), orienté globalement est-ouest sur plusieurs kilomètres. Ce synclinal se situe sur les communes de Bretteville-sur-Laize, Gouvix, Urville, Boulon, Saint-Laurent-de-Condé, Barbery, Saint-Germain-le-Vasson, Grainville-Longue, Moulins, Soumont-Saint-Quentin, OUILLY-le-Tesson, Potigny, Fontaine-le-Pin, Estrées-la-Campagne, Rouvres, Sassy, Epaney, Olendon et OUILLY-le-Tesson, Perrières, Bretteville-le-Rabet, à environ 25 km au sud-sud-ouest de Caen.

La présence d'exploitations minières réparties sur les sept concessions de Barbery, Cinglais, Estrées, Gouvix, Perrières, Soumont et Urville, aujourd'hui renoncées par arrêté ministériel, a conduit les Pouvoirs Publics à étudier l'opportunité de réaliser un Plan de Prévention des Risques Miniers (PPRM). Précisons que les Plans de Prévention des Risques Miniers ont été instaurés par la loi du 30 mars 1999.

Sur demande de la DRIRE de Basse-Normandie, Service Instructeur du dossier, GEODERIS a engagé la réalisation d'études et de cartographie concernant les aléas « mouvements de terrain » sur le territoire des vingt et une communes concernées. Dans cette optique, la DRIRE a confié à l'INERIS la finalisation des études préalables à l'élaboration de ce PPRM dans un premier temps sur les communes concernées par les exploitations situées sur le flanc sud du synclinal, le flanc nord faisant l'objet d'une seconde étude qui doit s'achever à la fin 2004. Le présent rapport ne concerne donc que les travaux miniers situés sur les quatre concessions de Cinglais, Barbery, Soumont et Perrières.

Ces 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 ».

La figure 1 représente la zone des vingt et une communes concernées par cette étude, en faisant apparaître les contours des anciens travaux miniers.

PHASE INFORMATIVE

Cette phase d'étude dite « phase informative » a permis de caler le plus précisément possible les plans de mine et de collecter un maximum d'informations afin d'identifier les phénomènes accidentels symptomatiques du contexte considéré. La démarche a comporté les phases suivantes :

- l'enquête préalable qui a permis de recueillir les documents disponibles spécifiques des sites étudiés (plans d'exploitation, archives minières, rapports, thèses, études géotechniques, cartes géologiques, etc.). Cette approche documentaire et cartographique a été menée auprès des organismes susceptibles de fournir des renseignements spécialisés : la DRIRE de Basse-Normandie, GEODERIS, le BRGM, les services techniques des communes concernées et d'autres personnes ayant des connaissances sur le sujet dont d'anciens mineurs ;

- les visites de terrain qui ont permis d'observer, les phénomènes d'instabilité recensés puis de les intégrer dans l'interprétation de l'ensemble des données collectées. Elles permettent également, d'une part, de relever les mouvements apparents (récents ou passés) qui n'auraient pas été répertoriés dans les archives disponibles et, d'autre part, de mettre à jour les plans.

Cette phase d'étude est finalisée dans la partie I du présent rapport. Son support est la carte informative au 1/5 000^{ème} jointe en annexe 1.

EVALUATION DES ALEAS « MOUVEMENTS DE TERRAIN »

A partir des informations acquises à l'issue de l'étape précédente, une analyse des aléas « mouvements de terrain » a été effectuée sur les différents types de phénomènes identifiés sur le site :

- Un découpage en zones homogènes établi selon les configurations d'exploitation et les aspects géologiques, géomorphologiques ou autres explicités dans ce document ;
- la détermination des phénomènes attendus en surface fondée sur les configurations identifiées et les désordres déjà observés ou prévisibles.

Elle a pour objectif de réaliser :

- une évaluation de l'aléa par type de désordre attendu, compte tenu de l'intensité et de la probabilité d'occurrence supposées ;
- une cartographie des aléas « mouvements de terrain » au 1/2 500^{ème} (annexe 1).

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

PARTIE I

PHASE INFORMATIVE

1. TRAVAUX REALISES

Les travaux ont été réalisés en collaboration avec la DRIRE de Basse-Normandie, le BRGM (Service Géologique Régional des Pays de la Loire) et GEODERIS qui ont mis à notre disposition les documents utiles au démarrage de l'opération.

1.1 SUPPORTS CARTOGRAPHIQUES

Les informations cartographiques relatives au site (fond et surface) sont disponibles à plusieurs échelles, entre autres :

- fond au 1/2 500^{ème} datant de 1989 sous format papier récupéré auprès d'USINOR en Lorraine ;
- surface au 1/10 000^{ème} ;
- orthophotoplan¹ informatisé avec une précision de l'ordre de 50 cm ;
- carte des incidents en surface au 1/10 000^{ème} ;
- IGN à 1/25 000^{ème}.

Afin d'obtenir un rendu suffisamment précis des informations et des futurs résultats, l'échelle de restitution choisie est le 1/5 000^{ème} (cartes informatives) et le 1/2 500^{ème} (cartes d'aléas). Cette échelle permet de rendre compte de façon lisible les informations les plus complètes (plans d'exploitation, ouvrages débouchant au jour, désordres de surface, etc.) et référençables sur l'orthophotoplan.

Pratiquement, le calage entre l'orthophotoplan et les plans d'exploitation a été assuré par GEODERIS sur la base d'une campagne au GPS différentiel réalisée par le BRGM (Rapport GEODERIS 2100-BN03-NT10-BM-CV, 2003). Les documents cartographiques dont nous disposons sont sous la forme d'un Système d'Informations Géographiques (SIG sous MapInfo) constitué de tables cartographiques associées à des données comprenant :

- les plans des travaux du fond scannés et géoréférencés en coordonnées Lambert I carto de Paris ;
- l'orthophotoplan géoréférencé en coordonnées Lambert I carto de Paris ;
- un Modèle Numérique de Terrain (MNT) de surface au pas de 20 m, à partir duquel ont été calculées les isovaleurs aux pas de 2,5 m et de 10 m ;
- le tracé des désordres reconnus en surface (effondrements localisés et fontis) ;
- les ouvrages débouchant en surface (puits et galeries) ayant servi au calage ;
- les limites des anciennes concessions minières ;
- le tracé d'anciennes fouilles reconnues.

¹ L'orthophotoplan correspond à la photographie aérienne informatisée, orthorectifiée et géoréférencée. Sa précision est de l'ordre de 50 centimètres. Elle est mise à disposition de GEODERIS par le Conseil Général du Calvados.

Les incertitudes de calage des plans miniers sur le cadastre sont définies par GEODERIS au niveau de leurs points de référence (ouvrages débouchant au jour). Sur l'ensemble de la mine, ces incertitudes n'excèdent pas 5 m. Pour atteindre cette précision, GEODERIS a dû découper le plan en deux avant de le géoréférencer. Du fait de ce découpage, GEODERIS estime une incertitude plus importante au niveau de la jointure des deux demi-plans et préconise ainsi une incertitude de calage de 10 m.

1.2 DOCUMENTS TECHNIQUES CONSULTES

L'exploitation des mines de fer de Soumont a été l'objet de nombreux rapports et articles. Les publications d'ordre général ont été recherchées et consultées depuis les fonds d'archives disponibles à l'INERIS. Les dossiers d'exploitation des anciennes mines de fer sont archivés à la DRIRE de Basse-Normandie.

Les documents consultés, archives, articles et rapports techniques sont mentionnés dans la bibliographie citée en fin de rapport.

1.3 VISITES SUR SITE

Des visites détaillées du site ont été effectuées en collaboration avec le BRGM et GEODERIS.

Elles ont eu pour objet :

- d'observer la nature et l'état des ouvrages débouchant au jour (galeries, descenderies et puits) ;
- d'observer et de caractériser les désordres anciens et, le cas échéant, nouveaux en surface liés à des affaissements miniers déjà connus ou non ;
- de rencontrer les représentants des collectivités locales afin d'obtenir des informations de proximité.

2. CONTEXTE GEOGRAPHIQUE ET GEOLOGIQUE DU GISEMENT FERRIFERE DE SOUMONT

2.1 SITUATION ET TOPOGRAPHIE DU GISEMENT SYNCLINAL DE SOUMONT

Les terrains des communes concernées par les anciennes exploitations ferrifères sont majoritairement constitués de terres d'élevage ou de cultures. Quelques fermes et hameaux se répartissent aux alentours des villages du flanc sud. La plupart des infrastructures et des activités minières sont regroupées sur le territoire des communes de Potigny, Saint-Germain-le-Vasson et Soumont-Saint-Quentin.

La topographie générale du site est peu marquée (+150 m NGF à Barbéry, +170 m NGF au sud de Saint-Germain-le-Vasson, +160 m NGF au centre de Potigny). Cette morphologie relativement plane est recoupée par deux vallées encaissées et boisées, d'orientation générale Nord-Sud à Nord-Est – Sud-Ouest. La première se situe à l'Ouest de la commune de Saint-Germain-le-Vasson (+98 m NGF au niveau du carreau du livet) et la seconde à l'Ouest de Potigny (+105 m NGF au niveau de la Brèche au Diable) où s'écoulent respectivement la Laize et le Laizon.

2.2 GEOLOGIE

Le minerai de fer exploité sur le flanc sud du synclinal de Soumont s'intègre dans le bassin ferrifère de l'Ouest de la France constitué du bassin de Normandie (région Caen-Domfront et de May-sur-Orne) et du bassin d'Anjou-Bretagne (région d'Angers-Rennes) (Figure 2)

Le minerai de fer exploité à Soumont est un minerai oolithique carbonaté, siliceux et phosphoreux d'âge silurien (paléozoïque), d'origine sédimentaire détritique, issu du démantèlement de la chaîne précambrienne.

Dans la région de Soumont, il s'intègre dans un ensemble dont le mur est formé de schistes noirs puis des Grès armoricains et le toit d'une succession de bancs de schiste et de grès, dits schistes noirs, puis des Grès de May-sur-Orne (Figure 3). Cet ensemble d'âge primaire est plissé en formant un synclinal orienté approximativement Est-Ouest (axe principal d'azimut 105° N) dont la profondeur maximale est de l'ordre de 1 000 m.

Une série argilo-calcaire liasique, surmontée d'une série de calcaires jurassiques tabulaires (Bajocien et Bathonien) recouvre, en stratigraphie discordante, les formations primaires du synclinal. Les terrains superficiels des plateaux est et ouest bordant la vallée de la Laize sont formés de dépôts d'argiles à silex tertiaires (épaisseur maximale 5 m) qui recouvrent les calcaires jurassiques ou directement le Primaire. L'ensemble de ces formations atteint 50 m d'épaisseur entre la descenderie de Bray-en-Cinglais et le puits d'Aisy n° 2 puis décroît vers l'Ouest et l'Est jusqu'à son érosion respectivement dans les vallées de la Laize et du Laizon (Figure 4).

Les données provenant du BRGM (carte géologique cf. [4] et archives de la Banque de Données du Sous-Sol), ainsi que celles issues des observations de terrain et du Modèle Numérique de Terrain ont permis d'établir une carte d'isopaques de la couverture jurassique. Les courbes ont été tracées à un pas de 10 m d'épaisseur depuis l'affleurement (0 m) jusqu'à 50 m. Toutefois, elles ont été représentées sur la carte informative (Annexe A) par des lignes en pointillé afin de ne pas leur conférer une précision trop importante compte tenu de la précision des données précitées (précision de l'ordre de 10 m).

Par ailleurs, deux grandes familles de failles subverticales, respectivement de direction 60° N et 160° N et de faible rejet, découpent le massif.

Dans les secteurs où la densité de fracturation était importante, les zones furent peu ou pas exploitées, notamment dans le secteur de la faille d'Aisy de direction 60° N qui présente un décrochement de 60 m. Ces failles sont, toutefois, assez espacées individualisant ainsi des panneaux réguliers et exploitables de plusieurs centaines de mètres.

2.3 LA COUCHE DE MINERAI : COMPOSITION, PUISSANCE ET RESISTANCE

La couche de minerai de fer sur le flanc sud du synclinal de Soumont-Urville est caractérisée par :

- un pendage général voisin de 30° à 35°. Dans la partie ouest du gisement, il varie entre 45° et 60° ;
- des zones de plis en S à la jonction des panneaux. Le pendage varie entre 30° et 50° mais peut y atteindre localement 90° ;
- une épaisseur exploitée, sur une seule couche, variant de 3 mètres, au minimum dans les champs pentés d'environ 30°, à 6 m dans la zone des plis et du champ penté à 50°.

La teneur en fer du minerai exploité variait entre 36 et 40 % (minerai brut), ou entre 45 et 50 %, après grillage. Le minerai se présentait sous deux faciès différents :

- sous la forme d'hématite, au contact des calcaires jurassiques, le minerai étant altéré (oxydé) et peu résistant. La limite inférieure de ce faciès altéré varie, suivant les secteurs, de 20 à 55 m sous le contact des calcaires jurassiques ;
- le minerai carbonaté sain et résistant, en dessous du minerai à hématite.

A titre indicatif, on peut donner les valeurs de résistance à la compression uniaxiale suivantes (cf. [18]) obtenues en différents points de la mine :

- minerai : 115 MPa ;
- toit de la couche : 134 MPa ;
- mur de la couche : 145 MPa.

2.4 HYDROGEOLOGIE

Le fonctionnement hydrogéologique local est assez complexe. De manière synthétique, avant l'exploitation minière, les formations géologiques renferment deux nappes permanentes en continuité hydraulique (Figure 5) :

- la première est localisée dans les calcaires jurassiques (aquifère du Dogger), dont le niveau moyen sur le secteur d'étude se situe entre les cotes NGF + 120 m et + 160 m (cf. [5]). Cette nappe s'écoule régionalement vers le Nord-Est mais, localement, dans les vallées, elle se vidange par l'intermédiaire de sources (résurgences à flancs de coteau) ;
- la seconde est liée aux Grès armoricains sous-jacents, ces derniers présentant une perméabilité de fracture. Ils sont directement alimentés par la nappe des calcaires sous lesquels ils sont en contact discordant. Dans les vallées où les grès affleurent, les rivières, telles que la Laize et le Laizon, apportaient également une faible alimentation.

Durant l'exploitation, l'exhaure se faisait par pompage à partir du puits du carreau de Soumont. Après consultation des archives, il apparaît que le débit d'eau extrait était relativement faible (environ 350 m³/h) et que ce pompage n'entraînait pas le tarissement des puits situés aux alentours. Le gisement ferrifère est ceinturé de schistes peu perméables (au mur et au toit). Cette configuration pourrait correspondre à un système quasiment clos dans lequel les venues d'eau, de faible débit, se faisaient par percolation aux travers des schistes, le plus souvent par des fractures peu à non colmatées.

Toutefois, par ce pompage, le banc de schistes au mur du gisement était mis en charge et fortement sollicité par la pression hydraulique de la nappe des Grès armoricains sous-jacents. Ainsi, certains éboulements consécutifs à l'exploitation étaient accompagnés d'une rupture du banc de schistes qui entraînait des « coups d'eau » de débit élevé et ennoyait une partie de la mine.

L'arrêt des travaux miniers et du pompage des eaux d'exhaure a provoqué le remplissage des galeries jusqu'à la cote NGF + 97 m, altitude de la descenderie du Livet, premier exutoire vers la Laize de la nappe du primaire. Dans les secteurs où le recouvrement jurassique est présent, la cote de l'aquifère du Dogger peut atteindre l'altitude NGF de + 160 m. La présence des vides miniers a eu pour conséquence de modifier légèrement le contexte hydrogéologique local, les anciennes galeries minières offrant un drainage préférentiel. Ainsi, localement et surtout là où le rabattement est le plus important (en

bordure de vallée), ce drainage peut conduire à un dénoyage de la nappe des calcaires pouvant expliquer l'actuelle absence de source à l'interface des formations mésozoïques et paléozoïques.

3. HISTORIQUE DE L'EXPLOITATION MINIERE

Le minerai du bassin normand était connu depuis plusieurs siècles. Les zones d'affleurement, en l'absence des calcaires jurassiques au-dessus, semblent avoir été le siège d'exploitation dès le Moyen-Age. A ces endroits, le minerai était relativement altéré (tendre et riche en fer) et facilement exploitable. Ensuite, c'est à la fin du XIX^{ème} siècle que l'exploitation souterraine a commencé.

3.1 LES CONCESSIONS

La mine de fer de Soumont, située sur le flanc sud du synclinal de Soumont-Urville, concerne quatre concessions². On distingue d'est en ouest les concessions de Cinglais (1165 ha), Barbery (902 ha), Soumont (854 ha), et Perrières (146 ha) (figure 1).

A l'origine, la demande de la DRIRE de réalisation du PPRM concernait uniquement les concessions de Soumont et Barbery représentant la majorité des travaux. Toutefois, il existait quelques travaux de recherche sous les concessions de Cinglais et Perrières en continuité avec ceux de Soumont et Barbery. Ainsi, sur proposition de GEODERIS, acceptée par la DRIRE, les concessions de Cinglais et Perrières furent également traitées.

3.1.1 Concession de Cinglais

La concession de Cinglais a été instituée par décret du 9 février 1921 à la Société des Mines de Cinglais. D'une superficie de 1165 ha, elle s'étendait sur les communes de Bretteville-sur-Laize, Boulon, Saint-Laurent-de-Condé et Barbery. En 1960, cette concession a été amodiée au profit de la SMS qui, en 1973, absorbe la Société des Mines de Cinglais et devient donc concessionnaire de Cinglais.

La renonciation de la concession de Cinglais a été acceptée par arrêté ministériel du 25 mai 1992.

3.1.2 Concession de Barbery

La concession de Barbery a été instituée par décret du 16 août 1900 à M. A. Monod et s'étendait sur 902 ha sur les communes de Fontaine le Pin, Saint-Germain-le-Vasson, Grainville-Longue, Moulins et Barbery. En 1926, cette concession a été une première fois mutée à la Société Nouvelles Mines de Barbery puis en 1939, une seconde fois, au profit de la SMS qui exploitera la mine jusqu'à sa fermeture en 1989.

La renonciation de la concession de Barbery a été acceptée par arrêté ministériel du 7 juillet 1999.

² A la demande de la DRIRE, ce rapport ne traite que les concessions du flanc sud du synclinal. Il est à noter que trois concessions couvrent le flanc nord : Gouvix, Urville, Estrées-la-Campagne. Seules les deux premières concessions citées ont fait l'objet de travaux d'exploitation.

3.1.3 Concession de Soumont

La concession de Soumont a été instituée par décret du 13 décembre 1902 en faveur de Melles M. et B. De Mecflet, H. De Mecflet, P. Tastemain, V. Mullois et A. Pouette., qui créent la SMS. En 1913, cette concession a été étendue à 854 ha et était ainsi répartie sur les communes de Soumont-Saint-Quentin, OUILLY-le-Tesson, Potigny, Fontaine-le-Pin, Saint-Germain-le-Vasson, Grainville-Langannerie et Estrées-la-Campagne. Elle fut également exploitée jusqu'à la fermeture de la mine en 1989.

La renonciation de la concession de Soumont a été acceptée par arrêté ministériel du 7 juillet 1999.

3.1.4 Concession de Perrières

La concession de Perrières a été instituée par décret du 9 août 1901 à R. Masse, qui a fait apport à la Société Métallurgique et Minière du Calvados (SMMC) le 5 décembre de la même année. D'une superficie de 1460 ha, elle s'étendait sur les communes de Rouvres, Sassy, Epaney, Olendon, Soumon-Saint-Quentin, Perrières et OUILLY-le-Tesson. En 1957, cette concession a été amodiée au profit de la SMS qui, en 1973, absorbe la SMMC et devient donc concessionnaire de Perrières.

La renonciation de la concession de Perrières a été acceptée par arrêté ministériel du 25 mai 1992.

3.2 FERMETURE DE LA MINE

La plus grande partie de l'exploitation était concentrée sur les concessions de Barbery et Soumont-Saint-Quentin.

Les productions annuelles varièrent de 1,5 million de tonnes/an de minerai au début des années 1970 à 1 million de tonnes/an à l'amorce de la fermeture. Il aurait été ainsi extrait plus de 50 millions de tonnes de minerai de fer depuis 1907. L'ensemble de la production était vendu à la Société Métallurgique de Normandie (SMN).

La mine connut son apogée dans les années 1970-1980 mais la concurrence des minerais de fer mauritaniens et suédois plus riches et beaucoup moins chers sur le marché international amorça la crise de la sidérurgie française et donc de la mine de Soumont, jusqu'à la fin des travaux, en août 1989.

L'exhaure fut maintenue jusqu'au deuxième semestre 1990, à partir de cette date, les infrastructures furent progressivement démontées. Parallèlement, les premiers travaux de récolement des ouvrages débouchant en surface furent mis en oeuvre.

3.3 TRAVAUX MINIERES ET METHODES D'EXPLOITATION

3.3.1 Présentation des travaux miniers

Afin d'éviter tout foudroyage, toute chute massive du toit et venues d'eau consécutives, la méthode générale d'exploitation retenue par la Société des Mines de fer de Soumont a été celle par des piliers ou bandes abandonnés. Cette méthode générale s'est déclinée, suivant la profondeur, la qualité du minerai ou le pendage du gisement, en plusieurs méthodes de différentes façons :

1. par piliers découpés à partir de galeries de niveau, technique surtout employée dans le minerai à hématite (exploitations les plus superficielles) ;
2. par rideaux de piliers découpés suivant la ligne de plus grande pente et séparés par des chambres assez larges (plus de 10 m) (Figure 6). Cette méthode dite « des tailles montantes » a été réalisée dans la plus grande partie du gisement. Elle consistait à creuser suivant la pente des chambres de 10 m de large sur une relevée verticale de 75 m environ. Des piliers de 5 m de large étaient refendus tous les 20 m pour faciliter l'aération et les accès aux autres chambres. Les quartiers comprenaient quatre chambres en exploitation décalées de 20 à 30 m et une chambre en préparation. Le phasage des travaux consistait en l'abattage du minerai puis son chargement par raclage dans les wagons à déversement latéral du roulage secondaire. Ces wagons étaient ensuite culbutés dans des accumulateurs distants de 1 km qui servaient de tampon entre le roulage secondaire et le roulage principal. Lorsque la puissance de la couche atteignait 4 m, la couche était abattue en deux fois ;
3. par la méthode dite des « tailles chassantes », réalisée en deux phases successives dites de « traçage » puis de « dépilage ». Cette méthode a été appliquée entre les niveaux 475 et 325 dans la zone du Livet, où le pendage était compris entre 33° et 38° et la puissance de la couche entre 5,5 et 6 m. La phase de traçage consistait au creusement de galeries horizontales de 6 m de large avec un aréage tous les 10 m en altitude ce qui laissait des piliers de 11 m selon la ligne de pente (Figure 7). Ensuite, les piliers étaient dépilés à 50 % environ pour respecter un taux de défruitement admissible ;
4. par élargissement des galeries de niveau (côté parement amont) (Figure 7) sans découper des piliers à partir de ces galeries comme dans l'hématite. Cette méthode a été appliquée dans les zones les plus profondes (au-delà de 475 m) ;
5. par la méthode dite des « chambres magasins », en abandonnant chaque extrémité des chambres et des piliers disposés dans la ligne de plus grande pente afin de garantir la stabilité des épontes, même après vidange des chambres (Figures 8 et 9). Cette méthode a été utilisée dans les secteurs où le pendage de la couche de minerai exploitable était d'au moins 50°.

Ces différents types d'exploitation ont été appliqués sur plusieurs panneaux accessibles depuis la surface par des descenderies (Figure 10), entraînant des taux de défruitement de 60 à 90 %. Leur désignation par niveaux correspond à la profondeur des voies depuis la surface prise par référence au carreau de Soumont (cote NGF est de +187,5 m) :

1. du niveau 95 jusqu'au niveau 42³ avec un taux de 85 à 90 % ;
2. du niveau 170 jusqu'au niveau 95 avec un taux de 85 à 90 % ;
3. du niveau 250 jusqu'au niveau 170 avec un taux de 75 à 85 % ;
4. du niveau 325 jusqu'au niveau 250 avec un taux de 70 à 85 % ;
5. du niveau 400 jusqu'au niveau 325 avec un taux de 65 à 75 % ;
6. du niveau 475 jusqu'au niveau 400 avec un taux de 65 à 75 % ;

³ correspond à l'épaisseur du recouvrement au droit du carreau de Soumont.

7. du niveau 560 jusqu'au niveau 475 avec un taux de 60 à 65 % ;
8. du niveau 650 jusqu'au niveau 560 avec un taux de 60 à 65 % .

3.3.2 Etendue de l'exploitation

Les principaux travaux miniers étaient concentrés sur les concessions de Soumont et de Barbery. En effet, tous ces niveaux ont été exploités sur plus de six kilomètres au « levant » et au « couchant », des niveaux les plus profonds n'ayant été que partiellement exploités au « couchant ».

Les travaux ont aussi empiété sur la concession de Cinglais à l'Ouest (sur environ 850 m) et celle de Perrières à l'Est (sur environ 2 500 m).

La concession de Cinglais n'a pas été exploitée depuis la surface mais a fait l'objet de travaux venant des concessions voisines de Barbery (galeries et quelques petits dépilages à 170 et 250 m de profondeur) et de Gouvix (flanc nord, galeries et quelques petits dépilages à 90 m de profondeur).

La concession de Perrières a fait l'objet de travaux à partir de galeries souterraines venant de la concession de Soumont. Ceux-ci concernaient les niveaux 170, 250, 325, 400, et 475 mais seul 1 km a été exploité de façon importante (principalement les niveaux 250 et 325). Par ailleurs, la concession de Perrières a été le siège de travaux de recherche menés depuis la surface par sondages et par 3 ouvrages plus importants :

- le puits des Quatre Vents foncé jusqu'à 70 m de profondeur avec un travers-bancs creusé à 64,7 m (d'après les archives) (puits relevé au GPS lors de la campagne réalisé par le BRGM en 2003) ;
- le puits des Feugres foncé jusqu'à 53 m de profondeur avec un travers-bancs creusé à 36 m (puits relevé au GPS lors de la campagne réalisée par le BRGM en 2003) ;
- la galerie Montboint creusée à flanc de coteau sur une longueur d'au moins 11 m.

Remarque : le puits des Feugres et la galerie de Montboint concerne des travaux de recherche sur le flanc nord et le puits des Quatre vents concerne le flanc sud. Ces ouvrages seront pris en considération dans l'étude des concessions du flanc nord.

3.4 OUVRAGES DEBOUCHANT AU JOUR

L'accès au fond se faisait par différents puits (d'Aisy n° 1 et 2, de Mesnil Aumont...) et descenderies (n° 1, n° 2, Bray-en-Cinglais, Livet...) localisés sur les concessions de Soumont et Barbery.

La mine de Soumont comprenait 22 accès aux travaux miniers depuis la surface dont 11 puits, 5 descenderies et 6 galeries sub-horizontales.

Treize accès sur vingt deux ont pu être observés. Les autres n'ont pas été retrouvés (recouverts de terre végétale, de taillis, etc.).

Le tableau de l'annexe B présente les caractéristiques de ces ouvrages et les dispositions prises pour leur mise en sécurité.

3.4.1 Les puits

Les puits sont difficilement observables sur le terrain. Seuls les puits des Trois Coins (accès n° 9 – Photographie 7) et de Saint-Germain (accès n° 12) ont été retrouvés. La localisation du puits du Fouay n'est que supposée après calage du plan d'exploitation (Photographie 9). La position exacte des puits d'Aisy n° 1 et n° 2 (accès n° 5 et 10 – Photographie 8) n'a pu être déterminée. Le premier, situé sur le carreau de Soumont, n'est plus visible mais pourrait être retrouvé depuis d'anciennes photographies. Le second est observable, mais son accès doit faire l'objet d'une autorisation de la part du propriétaire actuel de la parcelle.

Tous les autres puits ont été remblayés depuis plusieurs décennies et il n'en existe, aujourd'hui, plus de trace visible.

3.4.2 Les descenderies et les galeries d'accès

Les entrées des galeries et des descenderies sont systématiquement obturées par des remblais (Photographies 2, 3, 4 et 5).

Seule la descenderie routière du Livet, point d'exhaure des eaux de la mine, n'est pas obturée car elle est encore utilisée pour mesurer le niveau d'eau et effectuer des prélèvements à des fins d'analyse (Photographie 6).

Deux descenderies servaient à l'accès du personnel et/ou à l'extraction du minerai. Elles desservaient uniquement les travaux du flanc sud.

3.4.3 Travaux miniers localisés à faible profondeur

Outre les ouvrages débouchant au jour (puits, descenderies et galeries horizontales) cités précédemment, les travaux situés à faible profondeur sont conditionnés par la présence de la dalle calcaire sus-jacente. En effet, les travaux les plus superficiels correspondent :

- à la galerie dite de niveau 42 et/ou 60 (figure 13) ;
- à des secteurs où les travaux en taille montantes ont été poussés jusqu'à la limite du jurassique (exploitation proche du château de Barbery, hameau du Mesnil-Aumont, figures 11, 12 et 13).

Ainsi, pour l'ensemble de ces travaux, les profondeurs varient de 0 (au niveau des différents accès à la mine) jusqu'au Niveau 42 ou Niveau 60 en particulier au droit et à l'est du carreau de Soumont.

4. TRAVAUX EXECUTES POUR LA MISE EN SECURITE DU SITE

4.1 FERMETURE DES ORIFICES DEBOUCHANT EN SURFACE

La Société des Mines de Soumont a confié les calculs et le dimensionnement des travaux à la Société GEOSTOCK et au Centre de Géotechnique et d'Exploitation du Sous-sol de Fontainebleau (ENS des Mines de Paris). Les travaux de fermeture des derniers accès laissés ouverts dans le cadre de la surveillance ont été engagés par plusieurs entreprises entre le 1^{er} mai 1996 et le 22 janvier 1997.

La quasi-totalité des accès à la mine a été obturée et/ou remblayée (sauf la descenderie routière du Livet). La société SOCOTEC a réalisé le contrôle des fermetures maçonnées (annexe B). Les derniers travaux se sont déroulés en 1997. Le récolement de la fin des travaux de fermeture des accès de la mine de Soumont date du 3 avril 1998.

4.2 SURVEILLANCE

Dans le cadre des travaux de fermeture de la mine de Soumont et conformément à l'article 5 de l'arrêté préfectoral du 24 septembre 1991, la Société des Mines de Soumont a fait réaliser des travaux de surveillance du site minier concernant les zones dites « à stabilité douteuse » (cf. chapitre 5) durant la remontée de la nappe de l'étage 240 à l'étage 90.

4.2.1 Surveillance sismique

La Société des Mines de Soumont a confié à la Société GESTER (anciennement GEOSTOCK) la mise en place d'une surveillance de type microsismique (par forages depuis la surface). Cette surveillance a été réalisée du 26 juillet 1994 au 31 octobre 1997, la cote NGF de remontée de l'eau attendue de +98 m ayant été atteinte le 29 octobre 1996.

Durant cette période, la Société GESTER n'a détecté aucun indice d'instabilité lié aux anciens travaux miniers (cf. [3]). Les événements sismiques enregistrés ont été identifiés comme des événements de type « tirs de carrière » ou plus rarement de type « séismes naturels non localisés ».

4.2.2 Auscultation altimétrique

Le cabinet JOLY a été chargé de la réalisation d'une surveillance, par nivellement de terrain, d'octobre 1994 à décembre 1997.

Le rapport du géomètre-expert, Monsieur Raymond Clemenceau, ne signale aucun mouvement significatif durant cette période.

5. DESORDRES LIES AUX ANCIENNES EXPLOITATIONS MINIERES

Durant l'exploitation, plusieurs quartiers ont été affectés par des éboulements dont certains eurent comme répercussions en surface, des affaissements.

5.1 DESORDRES OBSERVES EN PHASE D'EXPLOITATION

Dans les zones de minerai à hématite :

Aux alentours de la descenderie de Soumont, des éboulements ont été recensés comme des chutes de « couronne » (Figure 14) au toit du minerai, au voisinage des calcaires jurassiques. Les chambres ont été comblées partiellement ou totalement, sans qu'il y ait remontée de cloche de fontis en surface à l'exception de certaines zones où le recouvrement était trop faible (zones des calcaires jurassiques érodés).

Dans les zones de minerai carbonaté (19 à 20 ha)

Les éboulements dans la zone de minerai carbonaté sont recensés et décrits dans le rapport de Messieurs Vouille et Tincelin de 1989 (cf. [7]).

- A l'est des descenderies du carreau de Soumont (« levant » sur les plans des travaux) :
 - 1929 : éboulement des niveaux 95 et 170 entre les plans 1 et 4 ($\tau = 86,3 \%$)⁴. Cet éboulement a engendré en surface un affaissement d'environ 4 ha avec la présence de crevasses en bordure de la zone affaissée ;
 - 1951 : éboulement en aval du précédent (niveaux 170 et 250 entre les plans 1 et 2 puis entre les plans 3 et 4, exploitation avec $\tau = 82 \%$). Il a été accompagné d'un coup d'eau le 9 septembre 1951 (1500 m³/h). Les secteurs éboulés (environ 1 ha) étaient répartis sur des surfaces réduites (70 m × 90 m en projection horizontale) et n'ont pas eu de répercussion.
- A l'ouest des descenderies du carreau (« couchant » sur les plans miniers) :

Trois éboulements se sont succédés dans le même secteur entre 1961 et 1966. Ce secteur (amont du niveau 250 entre les plans 2 et 3 puis niveaux 325 et 250) était exploité par taille montante avec un taux de défruitement moyen proche de 83 %. Ces effondrements, répertoriés dans le Tableau 1, ont engendré des affaissements en surface (environ 65 cm d'amplitude) et des fissures (20 à 40 cm de largeur) (figure 15).

Date et étendue en surface	Secteur effondré	Longueur et largeur effondrée	Type d'exploitation	Remarques	Angle d'influence
août-septembre 1961 (5 à 6 ha)	En amont du niveau 250 jusqu'au niveau 170	L =450 m (en direction horizontale)/ L=100 à 200 m	chambres et piliers entre 1935 et 1938 pendage = 30°	Effondrement soudain, s'accompagnant d'un effet de souffle Venues d'eau le 24 août 1961 (130 m ³ /h) et le 10 septembre 1961 (80 m ³ /h)	Angle aval d'environ 30° et angle amont d'environ 10° (mesures prises par Tincelin et Vouille depuis les fissures observables en surface)
mars 1965 (5,5 à 6 ha)		L =375 à 400 m (en direction horizontale)/ L=150 m		Effondrement progressif en continuité du précédent	
février-mars 1966 (3,2 ha)		L =125 m (en direction horizontale) en amont du niveau 250 et de 235 m (en direction horizontale) en amont du niveau 170/ l=110 à 150 m		Effondrement progressif en continuité de celui de 1965 Venue d'eau (200 m ³ /h) Reprise d'affaissement postérieure entraînant une cuvette de 2,5 m de profondeur	

Tableau 1 – Caractéristiques des effondrements survenus au « couchant » durant l'exploitation

La trace de la cuvette d'affaissement consécutif à l'éboulement de 1929 n'est plus visible aujourd'hui. Elle est située au droit de la bretelle d'entrée sur la route nationale n° 158, à la sortie du village de Potigny.

⁴ τ : taux de défruitement exprimé en %.

Les traces des cuvettes d’affaissement concernant la succession des éboulements de 1961, 1965 et 1966 sont visibles. Au cœur des champs cultivés, ces cuvettes sont localisées à environ 300 m au Nord-Est de l’entrée de la descenderie de Bray-en-Cinglais⁵ (accès n° 11 – Photographie 11). Les crevasses qui accompagnaient les affaissements ne sont aujourd’hui plus visibles. Elles ont été « naturellement » remblayées au fur et à mesure des exploitations agricoles.

La cuvette de 1966 est de loin la plus marquée dans le paysage (Photographie 12). Elle se caractérise, aujourd’hui, par un diamètre d’environ 100 m et une profondeur avoisinant les 2,5 m en son centre, soit 1,35 m de plus que la cuvette initiale (relevée à 0,65 m). En effet, cet affaissement a été l’objet d’une reprise dont l’origine est probablement liée aux phénomènes karstiques au sein des calcaires jurassiques (la région de Soumont est soumise à ce type de phénomène. Toutefois, des exemples de cuvettes similaires sur le secteur de Barbery et Saint-Germain-le-Vasson, sont attribuables à des anciennes extractions à ciel ouvert, de limons, de formations résiduelles à silex, voire de calcaire, et ne doivent pas être confondus avec les cuvettes d’affaissement.

5.2 EFFONDREMENTS LOCALISES SURVENUS APRES L’EXPLOITATION

La visite du site a permis de se rendre compte de la tenue des terrains dans l’axe des descenderies et des galeries d’accès à la mine.

Deux secteurs à fontis ont été identifiés :

- le premier secteur situé dans l’axe de la galerie de Saint-Quentin présente trois fontis (accès n° 1 en forêt – cf. annexe 1) dont les paramètres figurent dans le tableau suivant.

N° de fontis	Localisation	Diamètre	Profondeur estimée
1 – (Photographie 14)	70 m en horizontal de l’entrée de la galerie	7 à 8 m	4 à 5 m
2 – (Photographie 15)	20 m à l’Ouest du n° 1	4 m	2,5 à 3 m
3 – (Photographie 16)	18 m à l’Ouest du n° 2	3 m	2 à 2,5 m

Tableau 2 – Caractéristiques observées des fontis de la galerie de Saint-Quentin

Remarque : de par la forte pente du coteau où cette galerie a été percée, les remblais de stérile bouchant son entrée sont actuellement en cours de glissement. En effet, à 2 m au-dessus de l’entrée une loupe de glissement et des fissures ouvertes et soufflantes (air provenant de la galerie sous-jacente) sont en constitution. Bien que cet endroit précis ne présente aucun enjeu, il demeure un site touristique certainement fréquenté en période estivale (aire de pique-nique et d’escalade sur les grès armoricains en amont). Ainsi, il semble nécessaire qu’une surveillance visuelle de l’évolution de cet éboulement soit mise en place avant traitement.

⁵ L’entrée précise de cette descenderie n’est aujourd’hui plus visible. Toutefois, elle reste identifiable par un petit bosquet d’environ 50 m² en bordure du chemin d’accès aux champs.

- plusieurs fontis ont été répertoriés dans le second secteur, autour du puits de Fouay (accès n° 14). Plusieurs actions de comblement ont été réalisées jusqu'en 1991 ; toutes se sont soldées par une évolution réclamant un nouvel apport de matériaux. Il est à noter que le puits lui-même a été l'objet, dans le passé, d'un débouillage qui a entraîné l'apparition d'un fontis qui nécessita plusieurs comblements successifs. Actuellement, ces fontis présentent des diamètres de 3 à 4 m et des profondeurs de 1 à 2 m (Photographies 17 et 18). Masqués par la forêt, ces fontis sont aujourd'hui difficilement observables mais, à l'image des observations précédentes, leur évolution dans le temps est possible.

On notera que les deux séries de fontis se localisent dans les coteaux bordant les deux vallées où le recouvrement de calcaire jurassique est absent.

Par ailleurs, il faut mentionner que de légers tassements ont été observés par GEODERIS à proximité de l'emplacement du puits d'aéragage n° 1.

6. ANALYSE SYNTHETIQUE DES RISQUES D'INSTABILITES POTENTIELS

L'identification et l'évaluation des aléas sur le bassin ferrifère de Soumont fait appel aux connaissances acquises lors de la phase informative, en particulier l'observation des désordres .

Néanmoins, cette démarche, à caractère de prévision, ne peut pas s'appliquer que sur la simple typologie des phénomènes observés. Elle doit également analyser les conditions de réalisation d'autres phénomènes non encore observés mais envisageables (c'est-à-dire prévisibles), en s'appuyant également sur les expertises menées pour évaluer la stabilité du site.

Cette analyse peut, d'autre part, être complétée par une étude plus globale (par retroanalyse) qui considère non plus le seul bassin de Soumont mais l'ensemble des bassins de risque appartenant à un même contexte, comme ceux des gisements ferrifères pentés de l'Ouest.

Elle peut enfin être finalisée par une approche plus théorique, par la mise en œuvre de calculs sur modèle calés sur des exemples réels d'instabilité, qui permet de valider ou non la crédibilité de réalisation des phénomènes accidentels supposés.

6.1 EXPERTISES RELATIVES A LA STABILITE DE LA MINE DE SOUMONT

L'ensemble des études liées à la stabilité des mines de Soumont a été réalisé par Messieurs Vouille et Tincelin de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, Centre de Mécanique des Roches de Fontainebleau.

6.1.1 Rapport R81/20 sur la stabilité générale des zones exploitées en chambres et piliers en semi-dressant (cf. [18])

De manière générale, ce rapport fait la synthèse de l'étude de stabilité des étages supérieurs (jusqu'à 325 m de profondeur) de la mine de Soumont ainsi que les préconisations pour le dimensionnement de la future exploitation des étages inférieurs (au-delà de 325 m).

Tout d'abord, les auteurs rappellent et justifient la méthode d'exploitation par chambres et piliers abandonnés employée à la mine de Soumont.

Dans le cas de la mine de Soumont, ils concluent, d'après « *des lois empiriques* », que la méthode d'exploitation par foudroyage n'est pas réalisable dans les étages supérieurs.

6.1.1.1 Stabilité des étages supérieurs (170-95 ; 250-170 ; 325-250)

Concernant les étages 170-95 et 250-170, les affaissements de 1961 à 1966 seraient dus à la rupture de piliers entre les niveaux 170 et 250. Les éboulements consécutifs aux ruptures ont été arrêtés par des stots ou des piliers de largeur supérieure à 10 m. L'ouverture de ces niveaux variait entre 3 et 4,6 m. L'affaissement mesuré au jour en 1981 était de 0,65 m, il est maintenant voisin de 2,5 (uniquement pour la zone affaissée de 1966). Ces affaissements se sont produits 20 à 25 ans après l'exploitation de ces niveaux.

Concernant l'étage 325-250, aucun panneau ne s'est effondré à la date du rapport.

Suivant cette analyse, les auteurs concluent aussi que le taux de contrainte imposé aux piliers des étages 170-95 et 250-170 parvenus à l'effondrement dépassait légèrement la limite admissible. Ainsi, il a été décidé de mettre en oeuvre une surveillance par convergencemètres car 90 % de la surface des niveaux [170-325] ne s'étaient pas encore effondrés. Certaines stations ont montré que des zones étaient stables et que d'autres convergeaient. Les recommandations des auteurs ont été de laisser évoluer les mouvements car les affaissements attendus en surface seraient de faible amplitude et n'affecteraient que des zones non habitées.

Finalement, les auteurs soulignent la dégradation de la stabilité avec l'ennoyage mais considèrent que les constructions devraient être interdites à l'aplomb des zones des étages supérieurs.

6.1.1.2 Stabilité des étages inférieurs au niveau 325

La rétroanalyse des éboulements a permis de déterminer la résistance ultime, évaluée en connaissant les taux de défruitement des zones effondrées, leurs profondeurs, et la résistance élastique « *moyenne du minerai obtenue au laboratoire* » ($R_e = 51,6$ MPa). La résistance ultime a ainsi été évaluée à 38 MPa. Suivant cette valeur, les auteurs ont préconisé des taux de défruitement pour l'exploitation des étages inférieurs (exploités par la méthode des galeries élargies). Ces taux sont de 75 % pour l'étage 400-325 et de 70 % pour l'étage 475-400.

Durant et après l'exploitation de ces étages (9 ans au total), des convergencemètres ont été mis en place pour surveiller la stabilité des zones exploitées. Aucun mouvement significatif n'a été relevé. Les auteurs concluent à la stabilité « définitive » de ces étages.

6.1.1.3 Stabilité du stot de protection du village de Soumont

Les zones exploitées par petits piliers (de l'étage 475 à 170, et au-delà) sous le village de Soumont montrent des largeurs d'exploitation faibles (de 0,13H à 0,23H), soit très inférieures à la largeur ($L < 0,4H$) pour laquelle les auteurs indiquent qu'il n'y aurait donc pas lieu de suspecter une répercussion en surface.

De plus, ils soulignent que les taux de défruitement des exploitations à l'aplomb du village de Soumont, calculés en tenant compte des bandes fermes séparant les chantiers, sont « *nettement* » inférieurs aux taux limites préconisés (taux de sécurité) pour « *assurer la stabilité des piliers abandonnés* » (cf. tableau 3).

Etages	Taux de défruitement dans l'emprise des stots	Taux de défruitement de sécurité
325 – 250	52 %	80 %
400 – 325	54 %	75 %
475 – 400	58 %	70 %

Tableau 3 – Taux de défruitement des étages exploités sous le village de Soumont (cf. [18])

6.1.2 Rapport R81/21 concernant le projet d'exploitation des étages 560-475 et 650-560 (cf.[19])

Ce rapport souligne les éléments suivants :

- bilan de la campagne de mesures de contraintes in situ effectuée en 1979 où la contrainte verticale (σ_v) a été estimée à deux fois la contrainte horizontale (σ_h), soit $\sigma_h = 0,5\sigma_v$;
- réalisation d'un modèle aux éléments finis en déformations planes avec des caractéristiques géomécaniques provenant des essais de 1972 et avec l'hypothèse de $\sigma_h = 0,5\sigma_v$.

Les contraintes ont été ainsi analysées dans les piliers des différents étages. Les auteurs concluent à l'existence d'une surcontrainte (+ 2 %) affectant les zones les plus surchargées (étages supérieurs adjacents aux étages 560-475 et 650-560 nouvellement exploités). De plus, la simulation de l'effondrement de l'étage supérieur à 475 ne se ferait sentir que sur les deux étages sous-jacents.

Finalement, pour l'exploitation des étages en aval 475 dans des conditions optimales de sécurité, les taux de défruitement sont préconisés à 65 % pour l'étage 560-475 et de 60 % pour l'étage 650-560.

6.1.3 Rapport R89/19 sur la stabilité générale du flanc sud de Soumont (cf. [7])

Il s'agit du rapport le plus récent dont nous disposons sur l'état de la stabilité de la mine de Soumont. Ce rapport est résumé dans ce qui suit.

La rétroanalyse des effondrements du flanc sud a permis d'évaluer la résistance à la compression du minerai par la méthode de l'aire tributaire à :

- effondrement au levant (1929) : $R_c = \frac{\rho gh}{1 - \tau} = \frac{170 \times 0,026 \cdot 10^6}{1 - 0,863} = 32,3 \text{ MPa}$;
- effondrements au couchant (1961 à 1966) : $R_c = \frac{\rho gh}{1 - \tau} = 41,6 \text{ MPa}$ (exploitation entre 1934 et 1944).

Les auteurs présentant ensuite une synthèse des deux précédents rapports et leurs observations du fond concluent que si $\tau > 85 \%$ et si $L > H$, quelle que soit la profondeur H, il y a risque d'effondrement jusqu'en surface.

Par ailleurs, les auteurs soulignent le fait qu'aucune évolution (en terme de stabilité) n'a été remarquée sur 30 ans (1959-1989). Cependant, ils ont pris soin d'identifier des zones suspectes parmi celles qui ont été exploitées avant 1965 (avant qu'ils n'émettent régulièrement des avis sur la stabilité de la mine).

6.1.3.1 Zones hors stot exploitées par piliers abandonnés avant 1965

Les auteurs ont été guidés par les principes suivants pour établir leur diagnostic :

- *« dans toutes les zones pentées de 30° à 35° où les taux de défrusement réalisés engendrent sur les piliers résiduels une contrainte moyenne supérieure à 38 MPa (seuil retenu et recommandé pour les stots de protection des villages), les travaux souterrains sont susceptibles d'effondrement à terme » ;*
- *« pour que les éboulements constatés au fond puissent affecter la surface du jour, il faut que la superficie des ouvrages miniers concernés soit telle que le centre du plus grand cercle que l'on peut y inscrire soit situé à une profondeur inférieure ou égale au diamètre de ce cercle ».*

Ces règles leur ont permis de mettre en évidence quelques zones suspectes à l'extérieur des stots. Il s'agit notamment des zones suivantes :

- *« dans la zone située à l'Ouest du stot de Soumont entre ce stot et le plan 4 levant, limitée à l'aval par la galerie de niveau 240 et à l'amont par la limite supérieure des chantiers (vraisemblablement le contact avec l'hématite), le taux de défrusement est compris entre 80 et 90 % et on peut y inscrire un cercle de 230 m de diamètre car le stot de la galerie de niveau 170 a été tellement percé qu'il ne saurait constituer un obstacle à la propagation d'un éventuel éboulement » ;*
- *« les zones situées de part et d'autre de la descenderie de Soumont entre 170 et 95 sont dans une situation en tous points semblable à celle de la zone effondrée au levant vers 1929, leur stabilité à terme est donc improbable » ;*
- *« dans la zone située à l'Ouest de la faille d'Aisy et à l'Est des éboulements de 1961 entre le contact avec l'hématite et le niveau 240, le taux d'exploitation est compris entre 85 % et 90 % et, là encore, le stot de la galerie de niveau 170 est tellement exploité qu'il doit être englobé dans une zone éventuellement effondrable (un cercle de plus de 200 m de diamètre est inscriptible dans la zone considérée) » ;*
- *« enfin, d'un point de vue objectif, à la lecture des plans, rien ne différencie la zone située à l'Ouest de la descenderie de Bray en amont de 235, zone qui est encore debout, de la zone effondrée située à l'Est de cette même descenderie ; la stabilité à terme de la zone située en amont 235 entre la descenderie de Bray-en-Cinglais et la zone des plis n'est donc absolument pas assurée » ;*
- les auteurs ajoutent que *« la zone située entre les niveaux 170 et 240 d'une part, et les plans 1 et 2 levant d'autre part, accolée à la zone effondrée en 1951 pourrait éventuellement se remettre en mouvement et progresser vers le levant. La zone affectée pourrait parvenir alors à une dimension critique au point de toucher la surface ».*

Les auteurs ont ensuite dressé un bilan de l'influence de l'ennoyage de cette mine et établi plusieurs recommandations :

« Après ennoyage de la mine, les zones énumérées ci-dessus se retrouveront immergées jusqu'au niveau 100, c'est-à-dire sous une faible hauteur d'eau. L'effet bénéfique de soulagement dû au déjaugage sera donc modeste. En revanche, l'influence de l'eau sur les discontinuités affectant les piliers résiduels peut se traduire par une réduction des caractéristiques de frottement et ceci quelle que soit la hauteur d'eau. On peut donc supposer que le noyage de la mine accroîtra les risques d'instabilité des zones peu profondes que nous avons passées en revue dans ce paragraphe. Nous estimons donc, pour les raisons exposées ci-dessus, qu'il y a lieu d'interdire toute extension des zones urbanisables le long d'une bande limitée au Sud par l'aplomb de la limite des zones exploitées et au Nord par une ligne déduite de l'aplomb de la galerie de niveau 250 par une translation de 250 m vers le Nord-Est (pour tenir compte de l'angle d'influence aval d'un éventuel éboulement). De plus, il y aurait lieu d'éviter dans cette même zone le passage de canalisations (eau, gaz, fuel) et de nouvelles voies de circulation. »

6.1.3.2 Zones hors stot exploitées par piliers abandonnés après 1965

Le risque d'effondrement est minime pour les étages exploités après 1965. Il en est de même pour les zones exploitées avec la méthode « chambres et magasins » (les étages étant plus pentés, la contrainte moyenne dans les piliers est plus faible).

6.1.3.3 Zones de stot

Les auteurs constatent, après une visite au fond et à la lecture des plans de mine, que : *« Près de la descenderie de Soumont, un stot est en train de s'effondrer au niveau 95. Cela affecte deux maisons, les bâtiments du carreau ainsi qu'une route nationale ».*

6.2 ANALYSE ET CARTOGRAPHIE DE L'EXPLOITATION MINIERE

A la suite de la fermeture des travaux, l'Etat a demandé la réalisation d'une étude des zones à risque d'instabilité liées aux anciennes mines de fer de Soumont. Cette étude s'intégrait dans le cadre de l'application de l'article R111-3 du Code l'Urbanisme par le biais de l'article 4 de l'arrêté préfectoral du 24 septembre 1991.

Rendue le 22 décembre 1995, cette étude a été réalisée par la Direction Départementale de l'Equipement (DDE) du Calvados et figure dans le dossier de renonciation sous le titre « Plan de Prévention des Risques d'effondrement des terrains des anciennes mines de fer » (cf. [6]).

La DDE y définit trois types de zone (Figure 16) :

- Zone 1 : Zone de première catégorie, dite à « stots », considérée comme ne présentant pas de risque d'instabilité. Elle correspond aux secteurs exploités depuis 1967 (date à partir de laquelle les techniques d'extraction du minerai ont changé, offrant une meilleure stabilité) et aux secteurs exploités au-delà du niveau 250 ;
- Zone 2 : Zone de deuxième catégorie, dite « douteuse », liée à l'effet de remplissage en eau de la mine de Soumont. Elle correspond aux zones d'effondrement situées de part et d'autre de la descenderie du carreau de Soumont et aux chantiers dont la situation est comparable mais qui ne se sont pas effondrés. A signaler que ces secteurs ont été particulièrement surveillés durant l'ennoyage de la mine ;

- Zone 3 : Zone de troisième catégorie, dite « zone à risques de mouvements de terrain ». Elle correspond « aux secteurs au droit des galeries exploitées près de la surface où le risque de fontis ou d'effondrement est permanent ». Sur l'emprise des concessions concernées, il s'agit du secteur situé de part et d'autre des descenderies du carreau de Soumont (sur une distance de 750 m à l'Ouest et à l'Est et sur une largeur moyenne de 200 m) et des descenderies Est du carreau du Livet (sur une distance de 1 150 m et sur une largeur de 50 m).

Cette étude nous indique un certain nombre d'événements (désordres) redoutés liés aux vides laissés après l'exploitation. Toutefois, l'analyse des secteurs exploités et le tracé des zones instables ont été réalisés à une petite échelle (exemple de la carte rendue à l'échelle du 1/20 000), ce qui rend leur lecture difficile par manque de précision.

6.3 SYNTHÈSE

Les études entreprises dans tous ces rapports sont orientées sur la résistance des piliers et pour cela la méthode de l'aire tributaire a été adaptée au cas du pendage.

Les valeurs affectées à différents paramètres peuvent sembler peu sécuritaires dans le cadre d'une étude de stabilité à long terme :

- la valeur retenue de 38 MPa pour la contrainte moyenne nous paraît élevée notamment par rapport à la valeur calculée de 32,3 MPa sur la rétroanalyse de l'effondrement de 1929, première phase de rétroanalyse d'événements passés permettant de caler les paramètres et les seuils critiques ;
- la largeur critique pour qu'un éboulement des travaux miniers se répercute en surface est classiquement de $L/H \geq 0,4$ (cf. [18]). Toutefois, la valeur utilisée dans l'étude de stabilité générale de la mine de Soumont est de $L/H \geq 1$ (cf. [7]). Nous pensons que ce choix de cette valeur élevée est peu sécuritaire. En effet, des effondrements de secteurs de dimensions comprises entre 0,4 et 1 pourront se répercuter jusqu'en surface ;

6.4 APPORT DE LA RETROANALYSE SUR L'ANALYSE DES RISQUES DANS LES GISEMENTS FERRIFÈRES DE L'OUEST

L'analyse prévisionnelle des phénomènes accidentels est largement valorisée lorsque l'on procède à une recherche qui déborde le cadre strict du site et se place à l'échelle de l'ensemble du bassin de risque, voire de plusieurs bassins de risque, s'ils présentent de fortes analogies (ex : gisements ferrifères des synclinaux de Soumont, May-sur-Orne, La Ferrière-aux-Etangs et Segré).

Le tableau ci-après récapitule de façon très synthétique les principales caractéristiques des différents bassins étudiés.

	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, Tailles descendantes (avant 1925) Chambres magasins (1925-1968)	Tailles montantes Chambres magasins Tailles chassantes ou « dépilages » (type quartier Livet)	Dépilages Tailles montantes Tailles rabattantes Chambres magasins (dressants)	Chambres magasins	
Pendage	Flanc nord	85° à 90°	–	absent	80° à 90°
	Flanc sud	45° à 60°	30° à 60° 50° à 90° (plis)	25° à 45°	60° à 70°
Nombre de couches exploitées	1 (très localement 2)	1	1	2 (couches A et B)	
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	< 80 m	< 80 m	
Types de désordres observés	Fontis (rupture de couronne) Eboulements (6 dans le flanc sud, 2 dans le flanc nord) Débourrage de puits ou cheminée	Affaissements (éboulements de 1929, 1951, 1961, 1965, 1966) Fontis (à l'aplomb de galeries proches de la surface)	Fontis (rupture de couronne) Fontis (à l'aplomb de galeries proches de la surface)	Fontis (rupture de couronne) Débourrage de cheminée	

Tableau 4 : Analyse comparative de différents bassins ferrifères de l'Ouest

Comme on le constate sur ce tableau, les différents bassins présentent beaucoup d'analogies sur les aspects géologiques et d'exploitation. Ces gisements sont pentés, situés à des profondeurs très voisines (entre 20 et 500 ou 600m) et recèlent un ou deux veines de faible ou moyenne puissance (globalement 2 à 4 m, localement plus).

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 », puis par des tailles descendantes chassantes. Par la suite, on a systématiquement appliqué la méthode des tailles montantes ou des tailles chassantes mécanisées pour les chantiers peu pentés (pendage inférieur à 50°) et la méthode des chambres magasins pour les chantiers pentés à très pentés (pendage supérieur à 50°).

Les désordres observés dans ces différents bassins sont comparables (essentiellement des effondrements localisés par rupture de couronne, des débourrages de puits ou cheminées des fontis dus à des éboulements de galeries). Toutefois on note l'existence d'éboulements importants au fond, en phase d'exploitation, dans les exploitations de May-sur-Orne et de Soumont, en général sans répercussions en surface, à l'exception de Soumont. A Soumont, des désordres se sont manifestés en surface, pour certains éboulements seulement, par des phénomènes que l'on peut classer comme des affaissements plutôt que comme des effondrements généralisés : forme de cuvettes classiques à bords étalés, affaissement limité à 0,65 m environ, au départ, présence de fissures ouvertes mais absence de cassures franches de cisaillement (avec rejet). La figure 15 représente en coupe et plan les éboulements suivis d'affaissements en surface à la mine de Soumont, en 1961, 1965 et 1966.

Par contre les analyses documentaires ne recense aucun accident de type effondrement généralisé sur aucun de ces bassins exploitant le minerai de fer.

Les seuls effondrements généralisés connus dans ces bassins synclinaux de l'Ouest sont exclusivement le fait d'exploitations ardoisières dont les facteurs communs sont leur géométrie complexe et la présence de vides trop importants (Schwartzmann, 1991 ; Tritsch, 2000).

En conclusion, ces différents arguments permettent d'exclure, au vu des connaissances acquises, le scénario d'effondrement généralisé à caractère spontané sur les exploitations des mines de fer.

6.5 ANALYSE DU RISQUE D'AFFAISSEMENT PAR MODELISATION NUMERIQUE

Le bassin de Soumont est sujet, comme tous les autres bassins ferrifères de l'Ouest, aux phénomènes d'effondrements localisés de type rupture de couronne ou rupture de tête de puits.

La question que l'on peut se poser est de savoir si, en surface, les anciens travaux miniers peuvent être le siège de nouveaux phénomènes d'affaissement, tels que ceux de Soumont 1929, 1961, 1965 et 1966.

L'étude de stabilité des gisements ferrifères pentés, menée par modélisation numérique montre que le déclenchement du processus d'affaissement s'opère par rupture en cisaillement des bancs jusqu'à la surface dans certaines conditions particulières (Renaud, 2004).

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 cette étude montre que le processus d'affaissement peut être exclu dans les conditions suivantes :

Pendage	Taux de défruitement ($\tau\%$)	Ouverture (w)
$> 55^\circ$	$\leq 90 \%$	$\leq 4 \text{ m}$
$45^\circ \text{ à } 55^\circ$	$\leq 90 \%$	$\leq 3 \text{ m}$
	$\leq 80 \%$	$\leq 5 \text{ m}$
$30^\circ \text{ à } 45^\circ$	$\leq 80 \%$	$\leq 3 \text{ m}$
	$\leq 70 \%$	$\leq 5 \text{ m}$

Tableau 5 : conditions d'exclusion du processus d'affaissement

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 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 n'ont pas de chances d'atteindre la surface.

Les travaux miniers du gisement de Soumont sont systématiquement placés dans les conditions suivantes :

- pendage compris entre 28° (est) et 80 à 90° dans les zones de pli en S avec un pendage moyen de 40° ;
- taux de défruitement généralement $\leq 85 \%$ mais localement 90% pour certains secteurs (chambres magasins ou taille montantes) ;
- ouverture comprise entre 3 et 5 m (localement 8 m).

Une analyse du processus d'affaissement s'impose donc pour examiner les possibilités de réalisation du phénomène et évaluer les niveaux d'aléas correspondants, en considérant, zone par zone, les caractéristiques et géométrie des différents panneaux.

7. ETABLISSEMENT DE LA CARTE INFORMATIVE

Par souci de cohérence et afin de synthétiser l'ensemble des informations disponibles, la carte informative est à l'échelle 1/5 000 (Annexe A). Elle comprend :

- le fond représenté par l'orthophotoplan ;
- les limites des concessions ;

- les limites de communes ;
- l'emprise au fond des travaux d'exploitation : cette cartographie a été réalisée à partir des plans scannés et géoréférencés en y ajoutant une marge de 15 m, liée à l'incertitude de calage des travaux (10 m) et à l'imprécision du dessin de 5 m. On notera que le rapport GEODERIS 2100BN03-NT10-BM-CV attribue une précision métrique au calage des plans de Soumont sur les différents points utilisées comme références. La valeur de 10 m a finalement été retenue d'expérience par l'INERIS de façon sécuritaire.
- la trace des anciennes fouilles observées ou indiquées sur les plans d'exploitation ;
- les ouvrages débouchant en surface (puits et entrées de galeries) comportant une indication d'observation et de traitement ;
- les désordres recensés et une indication de leur état ;
- le contour des zones affaissées et les éboulements au fond ;
- les courbes isopaques supposées (pas de 10 m avec une incertitude de l'ordre de 5 à 10 m) du recouvrement argilo-calcaire jurassique.

Les principales données acquises sur la mine de Soumont, lors de la phase informative, sont présentées dans la fiche synthétique suivante (tableau 6).

MINE DE SOUMONT (FLANC SUD)					
DONNEES DISPONIBLES		CARACTERISTIQUES			VALEURS
EXPLOITATION	Date	1907-1989			
	Type	Chambres et piliers	Chambres magasins	Tailles chassantes et galeries horizontales élargies	
	Eau	ennoyé			- 10 à 15 m/TN soit à +150 m NGF et exhauré à +97 m NGF
	Profondeur	de 0 à 300 m		de 300 à 650 m	
GEOMETRIE	Dimensions mine	largeur = 1,1 km et longueur = 15 km			
	Ouverture	3 à 6 m			
	Pendage	de 30° à 45°	de 45° à 60°	de 30° à 60°	
	Taux de défruitement	de 85 à 90% entre 0 et 170 m de 75 à 85 % entre 170 et 240 m de 70 à 85 % entre 240 et 325 m		de 65 à 75 % entre 325 et 475 m de 60 à 65 % entre 475 et 650 m	
	Failles	transversales et nombreuses			
GEOMECHANIQUE	Couche	2 types de minerai : - de 95 à 450 m minerai carbonaté - de 40 à 95 m minerai altéré (propriétés mécaniques plus faibles)			minerai carbonaté : Rc = 115,2 MPa Ru = 51,6 MPa
	Toit	alternances schistes/grès			Rc = 134,5 MPa toit immédiat Ru = 61,4 MPa au toit immédiat
	Mur	grès			Rc = 145,4 MPa et Ru = 68 MPa pour mur immédiat
	Recouvrement en discordance	calcaires de 0 à 50 m depuis l'Ouest ou l'Est vers le centre			acquisition en cours
DIVERS	Enjeux	Villages de Soumont et Saint-Germain-le-Vasson et quelques fermes			
	Plans disponibles	plan 1/2500			
	Affaissement et effondrement connus	Affaissements en 1929, <1940, 1951, 1961-1965-1966 + effondrements localisés par rupture de couronne proche de la surface ou débouillage de puits			En 1929 : effondrement entre -95 et -170 m avec taux= 80 % et Am = 1m En 1961-1965-1966, effondrements entre -120 et -250 m taux = 80-85 % et Am=0,65 m (40 ans après exploitation). Observation en 2003 d'une cuvette de 2,5 à 3 m de profondeur/TN (cf. Photographie1) (non mentionnée dans archives) au niveau de l'effondrement de 1966 = reprise d'affaissement et origine ?
	Surveillance	de 1994 à 1997 pendant l'ennoyage : surveillance microsismique et auscultation altimétrique - aucun indice d'instabilité et de mouvement de terrain relevé			

Tableau 6 – Fiche synthétique des données disponibles sur la mine de Soumont

PARTIE II
EVALUATION DES ALEAS

1. IDENTIFICATION DES ALEAS « MOUVEMENTS DE TERRAIN »

1.1 INTRODUCTION

L'étude d'évaluation et de cartographie des risques miniers menée sur le territoire des communes de Barbery, Moulines, Bray-en-Cinglais, Saint-Germain-le-Vasson, Soumont–Saint-Quentin, Fontaine-le-Pin, Potigny et Olendon ne concerne que les aléas géotechniques de « mouvements de terrain », liés aux exploitations minières (annexe E). 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 d'exhaure. Elle ne considère pas non plus les phénomènes naturels de type karstiques, phénomènes qui peuvent être présents sur le bassin de risque, ni ceux liés à la présence d'anciennes carrières souterraines.

1.2 LES DIFFERENTS ALEAS RETENUS

La phase informative a révélé sur les travaux miniers des flancs du synclinal du bassin de Soumont un certain nombre de phénomènes de mouvements de terrain observés ou considérés comme prévisibles (d'après les connaissances acquises et la retroanalyse effectuée sur d'autres bassins miniers très similaires). Les scénarios accidentels sont examinés plus loin de façon plus approfondie pour en déterminer l'intensité potentielle, la crédibilité de survenance et évaluer, ainsi, les niveaux d'aléas qui leur incombent.

Les phénomènes prévisibles identifiés sont les suivants :

- les phénomènes d'effondrements localisés provoqués par la rupture du stot de protection (couronne) des chantiers miniers situés à faible profondeur (anciens travaux du XIX^{ème} ou début du XX^{ème} siècles, exploités directement sous les terrains primaires ou jurassiques à moins de 60 m de profondeur, environ). Ces phénomènes peuvent se traduire en surface par des trous en forme de gouttières ou de tranchées qui suivent la couche à proximité de l'affleurement ;
- les phénomènes d'effondrements localisés de plus petites dimensions liés à la rupture d'anciens orifices miniers (puits et cheminées d'aération) ou des galeries d'accès à faible profondeur. Ces phénomènes se traduisent en surface par l'ouverture d'un fontis en forme de cratère ou d'entonnoir, généralement circulaire ;
- les phénomènes d'affaissement que l'on ne peut totalement exclure par référence aux évènements passés déjà observés sur le site.

On a considéré, toutefois, au vu des connaissances acquises, que les arguments développés par retroanalyse ou calcul numérique permettent d'exclure le scénario d'effondrement généralisé à caractère spontané sur les exploitations des mines de fer, en particulier sur le bassin de Soumont.

2. EVALUATION DES ALEAS DANS LE BASSIN DE SOUMONT

Les aléas de mouvements de terrain liés aux anciennes exploitations minières retenus dans le cadre de l'étude d'évaluation des risques miniers sur les communes concernés ont été recensés au § 1.2 (partie II).

2.1 LES EFFONDREMENTS LOCALISES

2.1.1 Effondrements localisés à l'aplomb des chantiers peu profonds

Ces chantiers, chambres, galeries de niveau sont situés sous un recouvrement dont la hauteur varie entre quelques mètres seulement et une cinquantaine de mètres.

Le caractère défavorable de ces travaux vis-à-vis de la stabilité de la surface, est non seulement lié à leur faible profondeur, mais aussi à leur découpage quelque peu anarchique, à leur ancienneté et à leur état général. souvent dégradé.

Les secteurs menacés de risque d'effondrement localisés à l'aplomb des chantiers les moins profonds (recouvrement de calcaire jurassique inférieur une trentaine de mètres et travaux poussés jusqu'à la limite du jurassique) pourraient seulement concerner :

- des chantiers réalisés en chambre magasin sur la concession de Barbery, proche du château (figure 11) ;
- des travaux situés au-dessus de la galerie de niveau 42 dans le secteur du carreau de Soumont (figure 13).

Il faut cependant noter qu'aucun phénomène de ce type n'a été répertorié à ce jour sur les concessions de la mine de Soumont.

2.1.1.1 Intensité du phénomène

La retroanalyse des autres bassins ferrifères fait clairement état de cratères ou creux en forme de gouttières de plus de 20 m de largeur, dont la longueur de ces derniers est fonction de la propagation de l'effondrement le long de la couche. Compte tenu de l'importance de l'ouverture des chantiers (5 à 7 m, sur le flanc sud) par rapport aux autres bassins, il est fort probable qu'un éboulement conséquent dans les travaux supérieurs pourrait être suivi d'un effondrement localisé de plus grande ampleur encore.

Ces différentes constatations nous amènent à considérer l'intensité du phénomène redouté comme forte, conformément à la classification adoptée (tableau 8 de l'annexe E).

2.1.1.2 Facteurs de prédisposition

L'évaluation de la probabilité d'occurrence dépend essentiellement des facteurs de prédisposition suivants :

- la fréquence des désordres apparaissant en surface ;
 - les configurations d'exploitation et l'état des cavités souterraines ;
 - la nature et l'épaisseur des terrains de recouvrement.
- 1) La retroanalyse semble montrer que la fréquence des désordres apparus en surface est faible. Aucun phénomène de ce type n'a été répertorié sur le site en surface. On peut cependant penser que certains ont probablement échappé à l'analyse (« oubliés », car anciens ou traités).
 - 2) La configuration des exploitations ainsi que l'état des cavités pourraient nous informer sur une éventuelle prédisposition d'un site plutôt qu'un autre à ce type de phénomène. Dans le cas de la mine de Soumont, il y a finalement peu de secteurs ou des chantiers ont été poussés proche de la surface. Les zones répertoriées comme étant en mauvais état, au sommet des exploitations en taille montantes, proche du carreau de Soumont sont situées à plus de 100 m de profondeur. Nous ne disposons pas d'informations sur l'état des chambres proche de la surface à Barbery.

- 3) En fait, l'élément déterminant qui apparaît à travers les différentes observations est l'épaisseur du recouvrement (recouvrement formé des calcaires du Jurassique). Son influence sur la probabilité d'occurrence est examinée ci-dessous. En effet, l'autocomblement est peu réaliste en cas d'éboulement et que seul l'épaisseur du jurassique peut empêcher l'éboulement de remontées jusqu'en surface.

Les terrains de recouvrement susceptibles de protéger la surface des instabilités du fond appartiennent à la formation des calcaires jurassiques du Bathonien bien connue dans la région (« pierre de Caen »). On dispose de données intéressantes sur la litho-stratigraphie et la résistance des bancs calcaires dans trois études différentes effectuées sur le site minier de May-sur-Orne ou dans ses environs immédiats :

- l'étude de la carrière des Aucrais (Roignot et Mathon, 1976), carrière située à 6 kilomètres, au sud, du flanc sud de May-sur-Orne ;
- l'étude CERCHAR sur la mise en sécurité des puits (Fermeture du stockage, Rapport GEOMINES, 1994) ;

L'observation des fronts (carrière des Aucrais, figure 17) et l'analyse des sondages carottés (études CERCHAR et ANTEA) montrent que les terrains jurassiques, qui peuvent atteindre plus de 50 mètres vers l'est, sont composés de bancs relativement épais (d'ordre métrique) et résistants en dessous de la partie supérieure (altérée, fracturée ou de moins bonne qualité mécanique) épaisse d'une dizaine de mètres (entre 7 à 12 m environ).

C'est ce qui apparaît clairement sur la coupe des bancs observée dans la carrière des Aucrais (figure 17) et sur l'analyse des 6 sondages carottés effectuée par le CERCHAR dans le cadre de la reconnaissance des terrains pour la mise en sécurité des puits qui montre une zone d'altération (plus franche) d'une dizaine de mètres sous la surface sur le secteur de May-sur-Orne.

Notons, en outre, que la partie inférieure de la formation calcaire, au contact des terrains primaires, est un calcaire tendre (sur 5 m, environ) qui se délite en plaquettes et qui est sujet au phénomène d'éboulement.

Pratiquement sur la hauteur considérée en un point de la série calcaire appartenant aux terrains jurassiques, il faut retirer une quinzaine de mètres de terrains altérés ou médiocres qui ne jouent aucun rôle sur la stabilité du recouvrement et la protection de la surface.

Pour les bancs de calcaire sains et massifs, les valeurs de résistance mécanique mentionnées dans ces rapports indiquent une résistance à la compression (R_c) de l'ordre de 10 MPa, en moyenne, (comprise entre 5 à 25 MPa) et à la traction (R_t) de l'ordre de 0,5 à 1,5 MPa. On peut estimer, de façon sécuritaire, la résistance à la flexion (R_f) autour de 1 MPa ($R_c/5$ ou $2,4 \times R_t$).

Partant de ces données on peut calculer l'épaisseur des terrains de recouvrement qui satisfait des classes de probabilité d'occurrence en fonction des coefficients de sécurité obtenus. Cette évaluation peut se faire succinctement par un calcul de résistance des matériaux type calcul de poutre (encastrée).

Pour de longues galeries d'exploitation de largeur L , la solution proposée par les modèles de calcul classiques de résistance des matériaux est celle d'une poutre d'épaisseur h , uniformément chargée soit par son propre poids, soit par tout ou partie du recouvrement sur une hauteur H . Pour les roches bien litées, résistantes et peu fracturées, le modèle le plus adapté est celui d'une poutre encastrée à ses extrémités, par le pilier et le banc qui la surplombe.

Les valeurs des moments de flexion et les efforts de cisaillements maximaux auxquels est soumis le toit sont calculés ainsi :

$$M_{\text{centre}} = (\gamma H L^2) / 24 \quad M_{\text{bords}} = - (\gamma H L^2) / 12 \quad V_{\text{max}} = (\gamma H L) / 2$$

On en déduit les contraintes maximales de flexion et de cisaillement de la façon suivante :

$$\sigma_{\text{max}} = 6 M_{\text{max}} / h^2 \quad \text{et} \quad \tau_{\text{max}} = 3 V_{\text{max}} / 2 h$$

On peut alors comparer les contraintes de flexion et de cisaillement maximales aux caractéristiques de résistance à la flexion (Rf) et au cisaillement du matériau (Rxy) et en déduire un coefficient de sécurité.

Ce modèle de calcul réalisé sur le comportement en flexion du recouvrement calcaire, fait ressortir les éléments indicatifs suivants :

Hauteur totale du recouvrement (m) [*]	15	20	22
Largeur maximale exploitée (m)	7		
Masse volumique (kN/m ³)	23		
Résistance à la flexion (MPa)	1		
Contrainte de flexion (MPa)	1,2		
Coefficients de sécurité	1.1	2.2	4

* NB : La hauteur des bancs de toit réellement portants correspond à la hauteur totale du recouvrement de laquelle est retirée la hauteur des bancs de qualité médiocre (altérés, fracturés, tendres, etc.), estimée à une quinzaine de mètres.

Tableau 9 : Evaluation de la probabilité d'occurrence en fonction de la hauteur du recouvrement

En fonction des valeurs des coefficients de sécurité choisis (< 1, 1 à 2.2, 2.2 à 4 et > 4), les classes de probabilité d'occurrence définies à partir de ce calcul peuvent se décliner de la façon suivante :

Flanc sud	
Epaisseur du recouvrement	Probabilité d'occurrence
< 15 m	Fort
15 à 20 m	Moyen
20 à 25 m	Faible
> 25 m	Nul

Tableau 10 : Classes des probabilités d'occurrence retenues

2.1.1.3 Evaluation de l'aléa : « effondrement localisé »

Compte tenu de l'intensité du phénomène redouté, considérée comme forte sur l'ensemble des zones des anciens travaux miniers situés à faible profondeur, la hiérarchisation des aléas évolue en fonction de l'épaisseur du recouvrement de la façon suivante :

Epaisseur du recouvrement	Niveau d'aléa
< 15 m	Fort
15 à 20 m	Moyen
20 à 25 m	Faible
> 25 m	Nul

Tableau 11 : Hiérarchisation de l'aléa « effondrement localisé »

En conclusion de ce chapitre, le secteur de Barbery, exploité en chambre magasin jusqu'à la base du Jurassique qui a une puissance, à cet endroit, de l'ordre de 15 à 20 m, est affecté d'un niveau d'aléa moyen.

Pour le secteur du carreau de Soumont, exploité au-dessus du niveau 42, l'épaisseur du recouvrement jurassique peut être raisonnablement pris entre 20 et 25 m compte tenu des données dont nous disposons et de leur incertitude associée. Le niveau d'aléa affecté à cette zone est donc faible.

2.1.1.4 Limites du zonage

On considère d'une manière générale que l'éboulement produit par la rupture des ouvrages souterrains, se propage d'abord dans le plan de la couche (pour des pendages élevés, supérieurs à 50°). Sur le flanc sud (pendage compris entre 28° à 60°), on peut penser qu'une rupture des terrains encaissants peut se produire par cisaillement du toit de la couche. La hauteur des terrains affectés par cette rupture est estimée à une dizaine de mètres sous le recouvrement calcaire, conformément au schéma de la figure 18.

Au niveau du recouvrement calcaire l'éboulement, dans les deux cas, aura tendance à remonter verticalement dans les bancs calcaires sains.

Dans la zone des terrains altérés (une dizaine de mètres sous la surface) l'effondrement qui affecte la surface forme un cratère selon un angle d'influence (angle de talus qui dépend de la nature des terrains superficiels. Globalement cet angle est estimé égal à 45°, en se forment à une profondeur de 10 m (figure 18).

La *marge d'influence* est, à partir des bords de la couche, de 10 m du côté du mur et de 20 m du côté du toit.

La *marge d'incertitude* a été estimée autour de 5 m par GEODERIS. Nous avons donc retenu, par précaution, la valeur de 10 m comme valeur de la marge d'incertitude sur les deux flancs du bassin.

Les limites de zonage cartographique correspondent à la *marge de sécurité* qui intègre les deux marges.

2.1.2 Effondrements localisés par rupture des têtes de puits

2.1.2.1 Etat des puits

L'inventaire des puits et cheminées d'aérage effectué dans le cadre de la phase informative (Annexe B) recense 11 puits ayant servi à l'extraction ou à l'aérage.

Seuls les puits des 3 Coins et d'Aisy 2 ont été localisés avec certitude et finalement peu d'informations ont été retrouvées sur les localisations et dimensions des puits.

Comme précisé dans l'annexe B, les puits d'aérages n° 1, 2, 3, 4, 5, le puits D'Aisy 1, le puits de Saint-Germain et le puits du Fouay ont été remblayés totalement, depuis 1940 pour certains.

Les puits d'Aisy 2 et des 3 coins ont été obstrués par un bouchon de béton ancré sur le cuvelage du puits et n'ont donc pas été remblayés.

Les quelques informations retrouvées nous indiquent que ces puits devaient être globalement circulaire (3 m de diamètre pour le puits des 3 coins et 5 m pour D'Aisy 2, pour une profondeur de quelques dizaines de mètres à 528,5 m (puits D'Aisy 2). Les cheminées d'aérage sont apparemment nettement plus petites (manque d'informations).

Des travaux de mise en sécurité ont été effectués dans le cadre de la procédure d'abandon et ont été réalisés jusqu'en 1996 (Annexe B).

De façon synthétique, nous notons qu'aucun puits sur le flanc sud des mines de fer de Soumont n'a été traité de manière à garantir sa stabilité à long terme.

De plus, le remblayage de certains puits, indiqués dans les documents de récolement, comme totalement comblés, a dû être complété, en particulier en ce qui concerne le puits du Fouay qui continue d'évoluer.

2.1.2.2 Evaluation de l'aléa

On remarque que les travaux de traitement réalisés pour la mise en sécurité de ces ouvrages ont été réalisés. Néanmoins, la pose d'un bouchon tel que dimensionné ou le remblayage total, pour lequel nous ne disposons pas d'informations précises quant à leur réalisation, ne permet pas d'éliminer définitivement les risques à long terme. En effet, la stabilité des puits n'est pas garantie (dans le cadre d'un PPRM) contre les risques de rupture du cuvelage et l'éboulement des bords qui sont susceptibles de s'opérer par altération ou vieillissement au bout de plusieurs dizaines d'années, voire d'une centaine d'années pour les puits obstrués par un bouchon. Il en est de même pour les puits remblayés pour lesquelles nous ne connaissons pas les méthodes mises en œuvre pour la fermeture des recettes.

On ne peut donc pas éliminer, dans le long terme, le risque de rupture « en grand » (dépassant le périmètre du puits) de type effondrement localisé, compte tenu de l'importance des volumes qui pourraient être mobilisés. On estime que les terrains superficiels, constitués de terres végétales, de colluvions et de terrains altérés, primaires ou jurassiques, constituent une couverture de qualité médiocre jusqu'à une profondeur estimée globalement à une dizaine de mètres.

L'intensité du phénomène redouté peut être jugée de moyenne (effondrement localisé de type fontis, relativement important, de plusieurs mètres de diamètre, et à caractère spontané) et la probabilité d'occurrence de faible pour les 11 ouvrages.

Le niveau d'aléa relatif aux différents puits et cheminées peut être donc considéré, comme moyen pour les 11 puits connus au droit des travaux du flanc sud des mines de Soumont.

2.1.2.3 Limites du zonage

On admet globalement que les terrains de recouvrement sont meubles près de la surface (terres végétales) et que les terrains primaires ou jurassiques peuvent avoir été déconsolidés par altération sur une profondeur de l'ordre de 10 m, déterminée à partir des observations sur site et des sondages de reconnaissance. Du fait du caractère relativement cohérent et frottant des terrains, l'angle de cône moyen (angle d'influence) est estimé à 45°.

Si l'on considère un recouvrement de 10 m de terrains déconsolidés, la marge d'influence (limite des effets possibles en surface autour du centre du puits) forme ainsi un rayon d'influence égal à $R = r + 10$ m.

En considérant les puits qui ont été suffisamment bien géoréférencés (points GPS), on peut négliger l'incertitude de positionnement et négliger, de ce fait, la marge d'incertitude sur ces puits. La marge de sécurité s'établit donc comme un cercle, centré sur le puits et de diamètre au moins égal à 20 m.

Le schéma montrant la marge adoptée pour les puits et cheminées est représenté sur la figure 19.

Par contre, un certain nombre de puits et descenderies volontairement masqués par un traitement de banalisation des sites n'ont pas pu être bien géoréférencés. Une marge d'incertitude de 10 m est appliquée sur ces puits et entrées.

2.1.3 Effondrements localisés par éboulement de galeries isolées

La présence de galeries isolées situées à faible profondeur (en général des galeries d'accès ou des galeries de reconnaissance) peut provoquer, en cas d'éboulement, des phénomènes d'effondrement localisé en surface qui s'apparentent aux fontis. Il ne faut pas confondre ce type d'accident avec les effondrements localisés de taille plus importante provoqués par les instabilités des travaux et chantiers de tous types proches de la surface dont les dimensions sont beaucoup plus importantes.

Nous incluons dans ce chapitre le cas des 4 descenderies (descenderie routière du Livet pentée à 11°, descenderies 1 et 2 du carreau de Soumont pentées à 31° et la descenderie de Bray-en-Cinglais pentée approximativement à 30°). En effet, ces descenderies produiront, en cas de rupture, les mêmes phénomènes en surface que des galeries isolées horizontales jusqu'à une certaine profondeur.

2.1.3.1 Intensité du phénomène

L'intensité du phénomène redouté en surface, en cas de remonté d'un fontis est globalement proportionnelle au volume du vide et donc aux dimensions de la galerie. S'agissant de galeries relativement petites (4 m x 4 m, au maximum), on peut présumer que l'intensité du phénomène ne soit que moyenne (diamètre du cratère compris entre 3 et 10 m au maximum).

2.1.3.2 Estimation de la probabilité d'occurrence

Description des fontis

Un certain nombre de fontis a été observé au droit de galeries situées à faible profondeur au niveau de galerie de Saint-Quentin à l'Est du bassin ainsi qu dans le secteur du Puits du Fouay ou des galeries ont été creusées à faible profondeur (environ 20 m). Ces fontis sont de forme circulaire de diamètre largement inférieur à 10 m et de profondeur métrique. Ces fontis ne semble plus évoluer actuellement. On notera que ces fontis se situent dans les

vallées de la Laize (à l'ouest) et du Laizon (à l'est), entaillant profondément la couverture jurassique qui est donc presque inexistante à leur niveau.

Malgré la rareté de ce type d'accident sur l'ensemble du secteur exploité, on ne peut pas exclure (par retour d'expérience) qu'il puisse se produire, à terme, à l'aplomb des parties de galeries situées aux plus faibles profondeurs.

En plus de ce facteur (fréquence des désordres), un autre facteur de prédisposition est la hauteur du recouvrement. Par analogie au critère de prédisposition adopté précédemment pour l'estimation de la profondeur à partir de laquelle les éboulements localisés ont peu de chance de remonter jusqu'en surface, on peut retenir comme hauteur de recouvrement la valeur de 30 m, valeur fondée sur la nature et la résistance des terrains de recouvrement.

Cette hypothèse paraît, en effet, sécuritaire dans la mesure où, pour une galerie d'accès de dimensions habituelles (de l'ordre de 2,5 m x 3,5 m, d'après les données de l'annexe B), cette valeur de 30 m représente la hauteur à partir de laquelle il y aurait, en cas d'éboulement, autocomblement de la galerie (par le phénomène de foisonnement des éboulis).

En effet, si l'on considère un éboulement localisé d'une telle galerie en forme de cloche parabolique, en adoptant un coefficient de foisonnement de 1,3 (tout à fait admissible dans ce milieu) on obtient, par un simple calcul volumétrique, une hauteur d'autocomblement sensiblement égale à 30 m. Ce résultat est vérifié à partir d'un modèle de calcul, établi par l'INERIS sous tableur Excel, qui reprend globalement la même démarche, mais en considérant une remontée (ou « cheminée ») de fontis circulaire (modèle en cours de validation). Dans ce dernier calcul, pour une cheminée de 2,5 m de diamètre, la hauteur d'autocomblement est aussi de l'ordre de 30 m, toutes choses égales par ailleurs.

Parmi les galeries isolées situées à moins de 30 m de profondeur, on retrouve les galeries décrites en annexe 1, à savoir :

- la descenderie routière du Livet ;
- la galerie d'accès à la descenderie routière du Livet ;
- la galerie de niveau 120 levant ;
- la galerie de niveau 100 couchant ;
- la galerie de niveau 120 couchant côté nord ;
- la galerie de niveau 120 couchant côté sud ;
- la descenderie de Bray-en-Cinglais ;
- les descenderies 1 et 2 du carreau de Soumont ;
- la galerie de Saint-Quentin ;
- les travaux en galeries parallèles à l'est du village de Saint-Germain-le-Vasson (figure 12).

2.1.3.3 Evaluation de l'aléa

L'intensité du phénomène redouté étant jugée de moyenne, le niveau de l'aléa peut être considéré comme moyen si la galerie ou la descenderie est située à moins de 30 m de la surface (prédisposition favorable à la remontée). Par contre, à plus de 30 m de profondeur, l'aléa est considéré comme nul (processus bloqué par autocomblement).

2.1.3.4 Limites du zonage

Le zonage de l'aléa se limite aux galeries situées à moins de 30 m de profondeur 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 la zone altérée du recouvrement est de 10 m, environ, et qu'en dessous de cette zone la cloche de fontis remonte verticalement vers la surface, la largeur de la bande de protection est de 10 m, au maximum de part et d'autre des bords de la galerie.

On peut présumer, en effet, qu'un éboulement localisé de galerie remonterait, sous forme d'une cheminée plutôt circulaire, plus ou moins verticalement dans le milieu rocheux fracturé au moins jusqu'à 10 m de profondeur. Une fois débouché au jour, le fontis devrait prendre progressivement une forme classique d'entonnoir avec un angle de talus de 45°, environ, à partir de cette profondeur de 10 m (terrains meubles ou déconsolidés).

Comme dans le cas des puits, les galeries étant suffisamment bien géoréférencées à proximité des entrées, on peut négliger l'incertitude de positionnement et négliger de ce fait la marge d'incertitude sur les premières dizaines de mètres. A plus longue distance des entrées, on a considéré que la marge d'incertitude sur la localisation pouvait atteindre 5 m environ.

2.2 LES AFFAISSEMENTS

L'étude préliminaire des risques d'affaissement menée par retroanalyse et calcul sur modèle dans la phase informative (partie I) a montré que le flanc sud était et pouvait de nouveau être, dans certaines conditions, le siège de phénomènes d'affaissement.

2.2.1 Etat des travaux et nature des désordres

Le phénomène d'affaissement est la manifestation en surface d'éboulements répétés dans les travaux du fond, ce qui fut le cas dans les exploitations de May-sur-Orne et de Soumont qui furent le siège d'éboulements importants au fond (§ 6.2).

L'existence d'affaissements n'est connue qu'à Soumont où ils se sont manifestés en surface sous forme de cuvettes à bords étalés montrant un affaissement maximal limité à 0,65 m environ (au départ) et la présence de fissures ouvertes mais apparemment sans rejet. La figure 15 représente en coupe et plan les éboulements suivis d'affaissements en surface à la mine de Soumont, en 1961, 1965 et 1966. L'analyse de ce plan permet déterminer, à partir des fractures relevées, les caractéristiques à la rupture suivantes :

Dates de l'éboulement	Profondeur moyenne du panneau	Angle de rupture amont	Angle de rupture aval
1961	170 m	+ 5°	+ 20°
1965	185 m	+ 10°	+ 20°
1966	150 m	+ 5°	+ 40°

Tableau 12 : Principales caractéristiques des affaissements de Soumont (pour un pendage de 30 à 40°)

2.2.2 Facteurs de prédisposition et probabilité d'occurrence

L'étude par modélisation numérique (Renaud, 2004) montre que les panneaux menacés par le processus d'affaissement sont ceux qui présentent les caractéristiques suivantes :

- largeur du panneau supérieure à la profondeur moyenne de celui-ci (milieu de panneau) pour que l'affaissement se donne en totalité, en dessous ($L < H$), les affaissements sont d'autant plus limités et considérés comme non perceptibles si le panneau présente une largeur $L < 0,4 H$;
- profondeur du panneau inférieure à 300 m ;
- pendage compris entre 30° et 55° , avec un taux d'exploitation supérieur à 80 % et une ouverture des chantiers supérieure à 5 m (les détails sont donnés dans le tableau 6).

Les secteurs exploités par la méthode des tailles montantes et parfois par la méthode des chambres magasin répondent presque partout aux critères de faisabilité ou s'en approchent, si l'on compare l'ouverture exploitée (3 à 5 m) et, à moindre titre, le taux d'exploitation (85 % à 90 %) du site aux valeurs du tableau 6.

D'une manière synthétique :

- pour les secteurs exploités en taille montante, la faible différence qui sépare ces caractéristiques des critères théoriques d'exclusion du processus d'affaissement donnés dans le tableau 6, et l'existence d'affaissements recensés à ce jour dans le bassin, laissent penser que la réalisation du phénomène d'affaissement est encore possible sur les secteurs exploités par des tailles montantes. La probabilité d'occurrence est donc évaluée à un niveau moyen sur ces secteurs ;
- pour les secteurs exploités par chambres magasins, la limite d'exclusion de l'affaissement située autour de 50° à 55° permet d'exclure l'affaissement sur une majeure partie de ces chantiers (pendage autour de 60° à 70°) sauf aux abords ouest du village de Saint-Germain-le-Vasson où le pendage est proche de 50° . Cette valeur limite ne permet pas d'exclure complètement le phénomène suivant ce critère. Par contre, l'analyse informative du site montre qu'aucun affaissement à l'aplomb de ces travaux n'a été répertorié à ce jour. Pour ce secteur spécifique, la probabilité d'occurrence est donc évaluée à un niveau faible.

En ce qui concerne les chantiers plus profonds (au-delà de 300 m, on considère que les zones en rupture n'ont pas de chance d'atteindre la surface et que la probabilité d'occurrence du phénomène d'affaissement (comme son intensité) devient nul.

2.2.3 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 13 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 que la valeur de l'affaissement maximal est de la forme :

$$A_{\max} = 0,3 \cdot w \cdot \tau$$

avec :

- A_{\max} = affaissement maximal ;
- w = ouverture exploitée ;

- τ = taux d'exploitation (ou de taux de défruitement).

On peut en déduire facilement les valeurs des déformations et pentes à partir des relations classiques suivantes :

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

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

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 pour leur caractère sécuritaire.

Le tableau suivant donne les résultats obtenus sur le site de Soumont, en considérant un taux d'exploitation moyen de 85 % et deux valeurs de l'ouverture exploitée (3 et 5 m) :

Ouverture exploitée (w)	3 m	5 m
Affaissement maximal (A_{\max})	0,76 m	1,28 m
Profondeur (P)	170 m	170 m
Déformation maximale (ε_{\max})	6,5 mm/m	11,3 mm/m
Mise en pente maximale (μ_{\max})	2,0 %	3,8 %
Classe d'intensité (tableau 9)	Faible	Moyen

Tableau 13 : Valeurs des déformations horizontales et pentes calculées sur le site par référence aux affaissements de Soumont

Comme on le constate sur ce tableau, l'intensité du phénomène d'affaissement déduite du tableau 8 est classée entre faible et moyenne en fonction des évolutions de l'ouverture exploitée.

Nous aboutissons à deux classes d'intensité :

- $W \ll 3$ m → faible
- $3 < W < 5$ → moyen

Dans le cas des exploitations de Soumont, seule la classe d'intensité moyenne est retenue compte tenu du fait que les ouvertures sont systématiquement supérieures à 3 m.

Dans le cas particulier des zones déjà éboulées connues (affaissements de 1929, 1961, 1962 et 1966), l'analyse informative a montré qu'une cuvette d'affaissement s'est formée en surface. Nous ne disposons pas, par contre, de données de nivellement précises sur ces zones permettant d'affirmer que l'amplitude maximale de l'affaissement est atteinte. Il n'est donc pas raisonnable de considérer un aléa nul dans l'emprise de ces anciens secteurs affaissés car une éventuelle reprise d'affaissement n'est pas impossible. Cependant, les mises en pente et les déformations envisageables seront beaucoup plus faibles que pour les secteurs « affaissables » et qui n'ont pas connu de mouvements à ce jour. L'intensité de ce phénomène de reprise d'affaissement est donc évaluée à un niveau faible.

2.2.4 Evaluation de l'aléa

L'analyse des plans du fond a permis d'identifier plusieurs types de zones homogènes (du point de vue de leur méthode d'exploitation, de leur profondeur moyenne, de leur pente et de leur taux de défrètement), susceptibles de répondre aux critères de prédisposition à un affaissement. En effet, seule cette prédisposition nous permet finalement de varier le niveau d'aléa sur les exploitations du flanc sud de Soumont car, comme indiqué au paragraphe 2.2.3, le niveau d'intensité est partout considéré comme moyen sauf dans le cas particulier des quelques secteurs déjà en partie affaissés.

Nous aboutissons donc à trois grands secteurs :

1. Secteur ouest de Saint-Germain-le-Vasson :

Ce quartier, exploité par la méthode des chambres magasins, est affecté d'un niveau d'aléa faible du fait d'une intensité moyenne et d'une probabilité d'occurrence faible à très faible (§2.2.2) ;

2. Secteurs exploités en Taille montante à moins de 300 m de profondeur :

Ces quartiers, exploités par la méthode des tailles montantes, sont affectés d'un niveau d'aléa moyen du fait d'une intensité moyenne et d'une probabilité d'occurrence moyenne (§2.2.2) ;

3. Secteurs déjà affaissés :

Ces secteurs sont affectés d'un niveau d'aléa faible du fait d'une intensité faible (§2.2.3) et d'une probabilité d'occurrence moyenne.

Les quartiers exploités à plus de 300 m de profondeur sont considérés comme présentant un aléa nul en surface.

2.2.5 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 surface où les affaissements, déformations ou pentes sont considérés comme imperceptibles ou nulles.

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, on considère le plus souvent dans une couche située en plateure (pendage subhorizontal) un angle d'influence (γ) ou « angle limite » 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 ;

La première étape consiste à vérifier sur les plans décrivant l'éboulement de Soumont (figure 21) que les caractéristiques relevées (tableau 13), en l'occurrence l'angle de rupture, sont compatibles avec les mêmes caractéristiques théoriques d'autres bassins (par exemple : abaques d'affaissement des bassins houillers du Nord et du 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

Tableau 14 : Valeurs données dans les abaques d'affaissement des bassins houillers du Nord Pas-de-Calais, de Lorraine et de la Sarre

Au vu des données obtenues sur Soumont (tableau 13), on remarque que les valeurs des angles de rupture amont et aval mesurées pour un pendage compris entre 30° et 40° (en moyenne de l'ordre de 7° et 30°) sont très proches les valeurs correspondantes des abaques des bassins houillers de Lorraine ou du Nord Pas-de-Calais (tableau 15). On peut en déduire que les angles d'influence doivent être également très proches et prendre raisonnablement pour le gisement de Soumont des valeurs d'angle d'influence égales à 28° (côté amont) et 47° (côté aval) (figure 20).

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

Cas particulier du village de Soumont :

Le village de Soumont se trouve presque entièrement en zone d'aléa moyen, bien qu'il soit situé à l'aplomb d'un stot considéré comme stable du fait de la présence de gros piliers.

Compte tenu des angles d'affaissement latéraux liés aux travaux affaissables à l'est et à l'ouest de ce village, une majeure partie de celui-ci se retrouve située dans les zones d'influence.

2.3 ELEMENTS INDIQUES POUR MEMOIRE SUR LA CARTE D'ALEA

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.

* PROUST A. : Etude sur les affaissements miniers dans le bassin du Nord et du Pas-de-CALAIS. R.I.M., 1964.

Naturellement, ici, la marge d'incertitude de 10 m correspondant aux erreurs possibles de calage cartographiques est appliquée comme limite de l'enveloppe.

3. CONCLUSIONS

La présente analyse a conduit à la définition de l'aléa pour les risques « mouvements de terrains » liés aux exploitations souterraines et aux travaux de surface sur tout le secteur du bassin minier ferrifère de Soumont concernant les communes de Barbery, Moulines, Bray-en-Cinglais, Saint-Germain-le-Vasson, Soumont–Saint-Quentin, Fontaine-le-Pin, Potigny et Olendon.

Deux phénomènes principaux ont été retenus sur le site :

- le phénomène d'effondrement localisé qui a différentes origines dont la rupture des anciens travaux et des chambres situés à faible profondeur, la rupture des puits ou l'éboulement de galeries isolées proches de la surface (moins de 30 m) ;
- le phénomène d'affaissement qui pourrait affecter le flanc sud du bassin minier.

L'analyse des différentes configurations d'exploitation a permis d'exclure l'occurrence d'effondrements généralisés sur l'ensemble des secteurs sous-minés.

Effondrements localisés à l'aplomb des chantiers peu profonds

Ces chantiers, chambres, galeries de niveau sont situés sous un recouvrement dont la hauteur varie entre quelques mètres seulement à une cinquantaine de mètres.

Le caractère défavorable de ces travaux vis-à-vis de la stabilité de la surface, est non seulement lié à leur faible profondeur, mais aussi à leur découpage, à leur ancienneté et à leur état général peu être dégradé comme sur les exploitations de May-sur-Orne.

Les secteurs menacés affectent deux secteurs :

- le secteur de Barbery ou les travaux ont été poussés jusqu'à la base du calcaire dont l'épaisseur ne pourrait être que de 20 m ;
- le secteur du carreau de Soumont ou des travaux ont été réalisés au-dessus du niveau 42, jusqu'à la base du jurassique et où l'épaisseur du calcaire serait de l'ordre de 20 à 25 m.

L'élément déterminant la probabilité d'occurrence du phénomène est l'épaisseur du recouvrement (recouvrement formé des calcaires du Jurassique). Compte tenu de l'intensité du phénomène redouté, considérée comme forte sur l'ensemble des zones des anciens travaux miniers situés à faible profondeur, les niveaux d'aléas ont été classés en fonction de l'épaisseur du recouvrement. Le secteur de Barbery est affecté d'un aléa moyen et le secteur du carreau de Soumont d'un aléa faible.

Effondrements localisés par rupture des têtes de puits

Selon les traitements réalisés pour la mise en sécurité de ces ouvrages (bouchons en béton armé ou pose de dalles en béton armé ou pose d'une simple dalle bétonnée), l'aléa a été jugé moyen pour tous les puits.

On estime, en effet, que, quel que soit le traitement pratiqué, la stabilité des puits n'est pas totalement garantie contre les risques de rupture du cuvelage et l'éboulement des bords qui sont susceptibles de s'opérer par altération ou vieillissement au bout de plusieurs dizaines d'années, voire d'une centaine d'années ou plus (cadre d'un PPRM).

Effondrements localisés par éboulement de galeries

Pour le phénomène de fontis, Le facteur de prédisposition essentiel est la hauteur du recouvrement (en considérant le ratio ouverture/hauteur du recouvrement). Une hauteur de recouvrement de 30 m a été retenue, à partir de différentes approches, comme limite de protection de la surface vis-à-vis du risque de fontis.

Les secteurs concernés sont les suivants :

- la descenderie routière du Livet ;
- la galerie d'accès à la descenderie routière du livet ;
- la galerie de niveau 120 levant ;
- la galerie de niveau 100 couchant ;
- la galerie de niveau 120 couchant côté nord ;
- la galerie de niveau 120 couchant côté sud ;
- la descenderie de Bray-en-Cinglais ;
- les descenderies 1 et 2 du carreau de Soumont ;
- la galerie de Saint-Quentin (niveau 60).

On ajoutera à ces galeries et descenderies débouchantes, les galeries non débouchantes en surface, proche du puits du Fouay, à l'ouest de Saint-Germain-le-Vasson ;

Le niveau de l'aléa a été considéré comme moyen si la galerie est située à moins de 30 m de la surface (prédisposition favorable à la remontée). Par contre, à plus de 30 m de profondeur, l'aléa est considéré comme nul (processus bloqué par autocomblement).

Le risque d'affaissement

Les calculs des affaissements, déformations horizontales et mises en pente, ont montré que l'on pouvait raisonnablement qualifier l'aléa affaissement sur le site de Soumont de moyen sur les quartiers exploités par chambres magasins situés à moins de 300 m de profondeur, du fait de leur pendage, ouverture et taux de défrètement mais surtout du fait de l'existence d'affaissements connus dans le secteur.

Une majeure partie des travaux réalisés par tailles montantes et situés à moins de 300 m de profondeur ont donc été cartographiés en aléa affaissement de niveau moyen. On notera, en particulier à ce sujet, que la majeure partie du village de Soumont est concernée, bien que celui-ci soit situé sur un stot considéré comme stable. Une approche en retour d'expérience a permis de fixer les angles d'influence amont et aval qui déterminent les limites des zones où les affaissements, déformations différentielles ou pentes peuvent être considérés comme imperceptibles ou nuls. Le village se trouve donc entièrement situé dans les zones influençables en cas de rupture des travaux miniers situés à l'est et à l'ouest de celui-ci.

Le secteur ouest de Saint-Germain-le-Vasson est, lui, cartographié en aléa faible du fait d'une probabilité d'occurrence plus faible que pour les chantiers en taille montante.

Les secteurs déjà pour partie affaissés sont cartographiés en aléa faible du fait qu'une éventuelle reprise d'affaissement sur ces zones produirait un phénomène d'intensité plus

faible qu'en cas de rupture, dans des travaux non encore éboulés au fond.

Remarques complémentaires

Bien que non pris en compte dans le cadre de cette étude, d'autres phénomènes ou nuisances pourraient être induits par la présence des exploitations minières maintenant arrêtées (risques liés aux gaz de mine, inondations, problèmes environnementaux, etc.). Ils mériteraient d'être examinés dans le cadre de l'élaboration d'un PPRM.

BIBLIOGRAPHIE

Dossiers et articles relatifs à l'exploitation ferrifère :

F. Doré (1969) : Les formations cambriennes de Normandie. Thèse de l'Université de Caen, 1969.

J.A. Varoquaux et E. Gérard (1980) : Les gisements de minerai de fer français. Annales des Mines, p.135-154, juillet-août 1980.

E. Tincelin et G. Vouille (1989) : Société des mines de Soumont. Stabilité à terme des zones exploitées à la mine de Soumont – flanc sud. Rapport de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris – Centre de Géotechnique et d'Exploitation du Sous-sol, 40 pages, 1989.

Les gisements miniers de Basse-Normandie. Document DRIRE de Basse-Normandie Division Environnement Sous-sol, 1998.

Rapports et articles relatifs à la stabilité générale des travaux miniers :

R. Roignot, C. Mathon (1976) : Société Métallurgique de Normandie ; Etude de la stabilité de l'ancien front de taille de la carrière des Aucrais, rapport BRGM 76 SGN 503 PNO, 15 p., 1976.

R. Schwartzmann (1991) : Rapport d'étude sur l'effondrement de la Pouèze. Ardoisières d'Angers, 9 p., décembre 1991.

V. Renaud (2003) : Contribution à l'analyse des conditions d'effondrement des gisements pentés des bassins ferrifères de Soumont, May-sur-Orne et Segré (Calvados, Maine-et-Loire), rapport INERIS-DRS-03-50864/RN01 44 p., 2003.

Autres références :

- [1] Rapport de fermeture de la mine de fer de Soumont (Calvados) – avril 1998.
- [2] Dossier de renonciation aux concessions de la Société des Mines de Soumont – février 1990.
- [2bis] Mines de Soumont : Hydrogéologie + Fermeture des accès – rapport GEOSTOCK réf. GK/DT/90061-TY/TT – janvier 1990.
- [3] Surveillance de la Mine de Soumont de juillet 1994 à octobre 1997 : Suivi de stabilité par écoute sismique - Suivi de la remontée et de la qualité des eaux – rapport GESTER réf. 97/2520 – décembre 1997.
- [4] Carte et notice géologiques BRGM– Feuille de Mézidon (146) à 1/50 000 – avril 1999.
- [5] Carte hydrogéologique du département du Calvados BRGM à 1/100 000 – 1991.
- [6] Plan de Prévention des Risques d'effondrement de terrains des anciennes mines de fer – DDE Calvados - décembre 1995.
- [6bis] Modification du Plan de Prévention des Risques d'effondrement de terrains des anciennes mines de fer en date du 22 décembre 1995 (Document Provisoire) – DDE Calvados – novembre 1998.
- [7] E. Tincelin et G. Vouille : *Société des mines de Soumont - Stabilité à terme des zones exploitées à la mine de Soumont – flanc sud*. Rapport de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris – Centre de Géotechnique et d'Exploitation du Sous-sol, 1989, 40 pages.

- [8] E. Tincelin et G. Vouille : *Mine de Soumont – Définition des zones à risques et de la nature des risques*. Rapport de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris – Centre de Géotechnique et d'Exploitation du Sous-sol, 1991, 8 pages.
- [9] J.A. Varoquaux et E. Gérard : *Les gisements de minerai de fer français*. Annales des Mines. juillet-août 1980, p.135-154.
- [10] A. Perrotte et B. Lidou : *Diverses variantes de chambres avec piliers abandonnés dans la mine de fer de Soumont*. Industrie Minérale – Les Techniques, février 1983, p.74-78.
- [11] Bulletin Technique des Mines de fer. *Les mines de fer de Soumont*. Edition G.E.D.I.M. 2^{ème} trimestre 1976, p.61-68.
- [12] Société des Mines de Soumont. *Les Mines de Soumont*. Editeur local. 1980. 13 pages.
- [13] *Bassin ferrifère de NORMANDIE - Participation à l'élaboration de la phase informative du PPRM sur l'emprise des concessions de Cinglais, Barbery, Soumont et Perrières (Calvados)*. Rapport INERIS-DRS-03-44270/R01, juin 2003.
- [14] *Analyse du géoréférencement du plan minier de Soumont - Saint-Quentin (14)*. Rapport GEODERIS 2300-BN03-NT10-BM-CV, 2003.
- [15] *Bassin ferrifère de NORMANDIE - Participation à l'élaboration de la phase informative du PPRM sur l'emprise des concessions du Bully, Maltot, May-sur-Orne et Saint-André-sur-Orne (Calvados)*. Rapport INERIS-DRS-03-48514/R01-Projet, décembre 2003 (en cours de validation).
- [16] M. Desurmont : *Analyse des mesures de libération de contraintes effectuées à Soumont*. Rapport de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris – Centre de Géotechnique et d'Exploitation du Sous-sol. R74/4, 1974, 23 pages.
- [17] *Mine de Soumont - Caractéristiques mécaniques des terrains*. Rapport de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris – Centre de Géotechnique et d'Exploitation du Sous-sol. SE/762, 1976, 44 pages.
- [18] E. Tincelin et G. Vouille : *Stabilité générale des mines de Soumont*. Rapport de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris – Centre de Géotechnique et d'Exploitation du Sous-sol. R81/20, 1981, 18 pages.
- [19] E. Tincelin et G. Vouille : *Société des mines de Soumont - Projet d'exploitation des Etages 560-475 et 650-560 - Etude de stabilité*. Rapport de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris – Centre de Géotechnique et d'Exploitation du Sous-sol. R81/21, 1981, 8 pages.
- [20] E. Tincelin et G. Vouille : *Mine de Soumont - Mesures à entreprendre pour prévoir l'imminence d'un risque d'effondrement survenant à l'aplomb des routes nationales n° 158 ou départementales n° 43*. Rapport de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris – Centre de Géotechnique et d'Exploitation du Sous-sol. R92/12, 1992, 20 pages.
- [21] Denis Buret (1991) : Détermination du champ de contrainte régional à partir de tests hydrauliques en forages, résultats de neuf expérimentations in situ réalisées en France. Thèse de doctorat de Géophysique Interne, université de Paris VII.

LISTE DES ANNEXES

Repère	Désignation	Nombre de pages
	Figures	1 A4
Figure 1	Carte de localisation des concessions sur le synclinal de Soumont-Urville (environ 1/150 000)	1 A4
Figure 2	Carte de localisation des bassins ferrifères d'Anjou-Bretagne et de Normandie (modifié d'après Varoquaux et Gérard, 1980)	
Figure 3	Coupe géologique et localisation des travaux miniers au sein du flanc sud du synclinal de Soumont-Urville (d'après le dossier de renonciation)	1 A4
Figure 4	Carte synthétique indiquant l'épaisseur totale de la couverture au-dessus des formations primaires (d'après notice de la carte géologique, édition BRGM cf. [4]) et en coupe (d'après Bulletin Technique des Mines de fer)	
Figure 5	Coupe schématique du gisement et des écoulements d'eau de nappes pendant l'exploitation (d'après rapport hydrogéologique GEOSTOCK)	1 A4
Figure 6	Méthode d'exploitation par « tailles montantes » (d'après Perrotte et Lidou)	
Figure 7	Méthode d'exploitation par « élargissage » (d'après Perrotte et Lidou)	1 A4
Figure 8	Méthode d'exploitation par « chambres magasins » ; vues en plan	
Figure 9	Méthode d'exploitation par « chambres magasins » ; vue en bloc diagramme (d'après Perrotte et Lidou)	1 A4
Figure 10	Descenderie routière du Livet (accès n° 15 cf. annexe B) de 1 900 m de long (d'après un document de La Société des Mines de Soumont)	
Figure 11	Exploitation en chambre magasin proche de la surface sur la commune de Barbery, hameau du Mesnil-Aumont	1 A4
Figure 12	Exploitation en galeries parallèles proches de la surface à l'ouest du village de Saint-Germain-le-Vasson	
Figure 13	Exploitation au-dessus du niveau 42, carreau de Soumont	1 A4
Figure 14	Schéma général d'une « couronne »	
Figure 15	Représentation en coupe et plan des éboulements suivis d'affaissements en surface à la mine de Soumont, en 1961, 1965 et 1966 (Archives DRIRE)	1 A4
Figure 16	Zonage du risque lié aux anciens travaux miniers (d'après PPR de décembre 1995)	1 A4
Figure 17	Front rocheux de la carrière des Aucrais entamant la couverture jurassique et située à 6 kilomètres au sud du flanc sud de May-sur-Orne	1 A4
Figure 18	Définition de la marge de sécurité (marges d'influence et marge d'incertitude) concernant les travaux miniers proches de la surface (chambres, galeries)	1 A4
Figure 19	Définition de la marge de sécurité (marges d'influence) concernant les puits et cheminées d'aérage	
Figure 20	Représentation théorique des angles d'influence amont et aval en gisement penté	1 A4

	Planches photographiques	1 A4
Photo 1	Ancien bâtiment administratif de la Société des Mines de Soumont	1 A4
Photo 2	Ancienne entrée de la galerie de Saint-Quentin (accès n° 1)	
Photo 3	Ancienne entrée de la galerie d'accès à la descenderie du Livet (galerie horizontale ; accès n° 16)	1 A4
Photo 4	Ancienne entrée de la galerie d'accès bétonnée (galerie horizontale ; accès n° 17)	
Photo 5	Ancienne entrée de la galerie d'accès à la descenderie du Livet (galerie horizontale ; accès n° 19)	1 A4
Photo 6	Ancienne entrée de la descenderie routière du Livet (accès n° 15)	
Photo 7	Localisation de l'ancien puits des Trois Coins (accès n° 9)	1 A4
Photo 8	Localisation du puits d'Aisy n° 2 (accès n° 10)	
Photo 9	Localisation supposée de l'ancien puits du Fouay (accès n° 14)	1 A4
Photo 10	Exemple de fours de grillage à Saint-Germain-le-Vasson	
Photo 11	Localisation de l'ancienne descenderie de Bray-en-Cinglais (accès n° 11)	1 A4
Photo 12	Trace de la cuvette d'affaissement (+ reprise) de l'effondrement de 1966 (vue vers le nord-ouest)	
Photo 13	Premier fontis dans l'axe de la galerie de Saint-Quentin (accès n° 1)	1 A4
Photo 14	Deuxième fontis dans l'axe de la galerie de Saint-Quentin (accès n° 1)	
Photo 15	Troisième fontis dans l'axe de la galerie de Saint-Quentin (accès n° 1)	1 A4
Photo 16	Exemple de fontis dans l'axe de la galerie à proximité du puits du Fouay	1 A4
Photo 17	Exemple de fontis dans l'axe de la galerie à proximité du puits du Fouay	
	Annexes	
Annexe A	Cartographie informative des mines de fer de May-sur-Orne (échelle 1/5 000 ^{ème})	1 A4 + 3 plans hors texte
Annexe B	Liste des accès à la mine de Soumont et travaux réalisés	5 A4
Annexe C	Cartographie de l'aléa « Affaissement » dans les mines de fer de May-sur-Orne (échelle 1/2 500 ^{ème})	1 A4 + 4 plans hors texte
Annexe D	Cartographie des aléas « Effondrements localisés » dans les mines de fer de May-sur-Orne (échelle 1/2 500 ^{ème})	1 A4 + 4 plans hors texte
Annexe E		10 A4