



Evaluation et cartographie des aléas mouvements de terrain sur le bassin minier de May-sur-Orne

Bassin ferrifère de Normandie

**Communes de Maltot, Feuguerolles-Bully, Saint-André-sur-Orne,
Saint-Martin-de-Fontenay, May-sur-Orne, Fontenay-le-Marmion,
Rocquancourt et Saint-Aignan-de-Cramesnil (Calvados)**

GEODERIS

*J.-J. TRITSCH et T. DELAUNAY
Unité Modélisation et Evaluation des Risques Géotechniques
Direction des Risques du Sol et du Sous-sol*

10 juin 2004

Evaluation et cartographie des aléas mouvements de terrain sur le bassin minier de May-sur-Orne

Bassin ferrifère de Normandie

Communes de Maltot, Feuguerolles-Bully, Saint-André-sur-Orne,
Saint-Martin-de-Fontenay, May-sur-Orne, Fontenay-le-Marmion,
Rocquancourt et Saint-Aignan-de-Cramesnil (Calvados)

GEODERIS

10 juin 2004

Ce document comporte 67 pages (hors couverture et annexes).

| | Rédaction | Vérification | Approbation |
|----------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| NOM | J.-J. TRITSCH et T. DELAUNAY | M. GHOREYCHI | C. TAUZIEDE |
| Qualité | Ingénieur à l'Unité Modélisation et Evaluation des Risques Géotechnique de la Direction des Risques du Sol et du Sous-sol et Ingénieur AUXIRBAT intervenant pour l'INERIS | Directeur Adjoint 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 |
| REMERCIEMENTS..... | 5 |

PHASE 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 MAY-SUR-ORNE..... | 9 |
| 2.1 SITUATION ET TOPOGRAPHIE DU GISEMENT EN SYNCLINAL DE MAY-SUR-ORNE..... | 9 |
| 2.2 GEOLOGIE..... | 9 |
| 2.3 LA COUCHE DE MINERAI : COMPOSITION, PUISSANCE ET RESISTANCE..... | 10 |
| 2.4 HYDROGEOLOGIE..... | 11 |
| 2.4.1 <i>Les nappes du Jurassique</i> | 11 |
| 2.4.2 <i>L'aquifère du Primaire</i> | 11 |
| 2.4.3 <i>Conditions hydrogéologiques actuelles</i> | 11 |
| 2.4.4 <i>Remarques</i> | 11 |
| 3. HISTORIQUE DE L'EXPLOITATION MINIERE | 12 |
| 3.1 LES CONCESSIONS..... | 12 |
| 3.2 LA FERMETURE DE L'EXPLOITATION MINIERE | 13 |
| 3.3 LE STOCKAGE SOUTERRAIN D'HYDROCARBURES | 14 |
| 3.4 L'EXPLOITATION DES EAUX D'EXHAURE | 14 |
| 3.5 TRAVAUX MINIERES ET METHODES D'EXPLOITATION | 15 |
| 3.5.1 <i>Présentation des travaux miniers</i> | 15 |
| 3.5.2 <i>Ancienne méthode par traçage et défilage</i> | 16 |
| 3.5.3 <i>Méthode des tailles chassantes</i> | 16 |
| 3.5.4 <i>Les tailles montantes ou « chambres magasins »</i> | 16 |
| 3.6 OUVRAGES DEBOUCHANT AU JOUR..... | 17 |
| 3.6.1 <i>Les puits</i> | 18 |
| 3.6.2 <i>Les descenderies</i> | 19 |
| 3.6.3 <i>Les galeries horizontales d'accès</i> | 19 |
| 3.6.4 <i>Travaux miniers localisés à faible profondeur</i> | 20 |
| 4. TRAVAUX EXECUTES POUR LA MISE EN SECURITE DU SITE..... | 21 |
| 4.1 TRAVAUX D'AMENAGEMENT POUR LE STOCKAGE D'HYDROCARBURES | 21 |
| 4.1.1 <i>Cartographie de l'ensemble des travaux miniers</i> | 21 |
| 4.1.2 <i>Travaux de renforcement et d'aménagement</i> | 21 |
| 4.2 RECOLEMENT DES TRAVAUX A LA FERMETURE DU STOCKAGE..... | 22 |
| 4.2.1 <i>La mise en sécurité de zones jugées à stabilité douteuse</i> | 22 |
| 4.2.2 <i>La fermeture des orifices débouchant en surface</i> | 23 |
| 5. DESORDRES LIES AUX ANCIENNES EXPLOITATIONS MINIERES..... | 26 |
| 5.1 DESORDRES RECENSES EN SURFACE..... | 26 |
| 5.2 EBOULEMENTS AU FOND..... | 27 |
| 5.2.1 <i>Les éboulements ayant affecté la mine</i> | 27 |

| | | |
|-----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 5.2.2 | Cas de l'éboulement du niveau L..... | 28 |
| 6. | ANALYSE SYNTHETIQUE DES RISQUES D'INSTABILITES POTENTIELS | 29 |
| 6.1 | EXPERTISES RELATIVES A LA STABILITE DE LA MINE | 29 |
| 6.2 | APPORT DE LA RETROANALYSE SUR L'ANALYSE DES RISQUES DANS LES GISEMENTS FERRIFERES DE L'OUEST | 30 |
| 6.3 | ANALYSE DU RISQUE D'AFFAISSEMENT PAR MODELISATION NUMERIQUE | 32 |
| 7. | ETABLISSEMENT DE LA CARTE INFORMATIVE | 34 |

PHASE II : EVALUATION DES ALEAS

| | | |
|-----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 1. | IDENTIFICATION DES ALEAS « MOUVEMENTS DE TERRAIN » RETENUS SUR LE GISEMENT DE MAY-SUR-ORNE | 37 |
| 2. | METHODE D'EVALUATION DE L'ALEA | 38 |
| 2.1 | PRINCIPE | 38 |
| 2.2 | QUALIFICATION DE L'INTENSITE ET DE LA PROBABILITE D'OCCURRENCE DES ALEAS | 38 |
| 3. | DESCRIPTION DES PHENOMENES ET EVALUATION DES ALEAS..... | 39 |
| 3.1 | LES EFFONDREMENTS LOCALISES | 39 |
| 3.2 | L'ALEA « AFFAISSEMENT » | 42 |
| 4. | ZONAGE ET CARTOGRAPHIE DES ALEAS | 46 |
| 4.1 | LIMITES ET MARGE DE SECURITE..... | 46 |
| 4.2 | CARTOGRAPHIE DE L'ALEA | 46 |
| 5. | EVALUATION DES ALEAS DANS LE BASSIN DE MAY-SUR-ORNE | 47 |
| 5.1 | LES EFFONDREMENTS LOCALISES | 47 |
| 5.1.1 | <i>Effondrements localisés à l'aplomb des chantiers peu profonds.....</i> | <i>47</i> |
| 5.1.2 | <i>Effondrements localisés par rupture des têtes de puits.....</i> | <i>52</i> |
| 5.1.3 | <i>Effondrements localisés par éboulement de galeries isolées.....</i> | <i>54</i> |
| 5.2 | LES AFFAISSEMENTS | 56 |
| 5.3 | ELEMENTS INDIQUES POUR MEMOIRE SUR LA CARTE D'ALEA | 59 |
| 6. | CONCLUSIONS | 60 |
| | BIBLIOGRAPHIE | 63 |
| | LISTE DES ANNEXES | 66 |

INTRODUCTION

CONTEXTE DE L'ETUDE

La Société des Mines et Produits Chimiques a exploité un gisement ferrifère, de 1896 à 1968, sur les flancs nord et sud du synclinal de May-sur-Orne (Calvados), orienté globalement est-ouest sur plusieurs kilomètres. Le bassin ferrifère de May-sur-Orne se situe à environ 10 km au sud-sud-ouest de Caen, sur les communes de Maltot, Feuguerolles-Bully, Saint-André-sur-Orne, Saint-Martin-de-Fontenay, May-sur-Orne, Fontenay-le-Marmion, Rocquancourt et Saint-Aignan-de-Cramesnil. Par la suite, la Société GEOSTOCK (remplacée par une filiale du groupe, la société GEOMINES-CAEN) a utilisé la mine pour le stockage d'hydrocarbures (gazole) de 1972 à 1993.

La présence d'exploitations minières réparties sur les quatre concessions de mines de fer de Bully, Maltot, May-sur-Orne et Saint-André-sur-Orne, aujourd'hui renoncées par arrêté ministériel du 4 décembre 1975, 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. Le décret en conseil d'Etat n°2000-547 du 16 juin 2000, relatif à l'application des articles 94 et 95 du code minier, fixe les modalités d'application du chapitre I de cette loi.

A ce jour, 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 huit communes concernées. 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 huit communes concernées par cette étude, préliminaire à l'établissement du PPRM, 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 et les risques caractéristiques 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, mémoires, thèses, études géotechniques, cartes géologiques, support cartographique, 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 des personnes ayant des connaissances sur le sujet dont d'anciens mineurs ;

- les visites de terrain qui ont permis de caler les plans miniers à partir des ouvrages débouchant au jour et d'observer, à l'échelle des sites, les phénomènes d'instabilité recensés en les intégrant dans l'interprétation de l'ensemble des données collectées. Elles ont permis également, 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.

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, en procédant :

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

Cette analyse 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 1/2500^{ème}.

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

REMERCIEMENTS

Nous remercions ici, pour leur collaboration, MM. Lecouturier et Guillot (anciens cadres de la mine de May-sur-Orne), M. Poulain (chargé des archives minières à May), MM. Desflach et Galodé (adjoints au Maire de May), M. Fouques (magasins Weldom à Saint-Martin-de-Fontenay), M. Salerno, M. et Mme Bœuf, M. Chapron (propriétaires fonciers), M. Vérité (directeur des établissements Dauphin à Fontenay) et Monsieur le Directeur des établissements SNUB, à May.

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 en coupe et carte à 1/2 500^{ème} sous format papier ou codatrace ;
- fond en coupe et carte à 1/1 000^{ème} ;
- fond en coupe à 1/500^{ème} ;
- surface à 1/10 000^{ème} ;
- orthophotoplan¹ informatisé avec une précision de l'ordre de 50 cm ;
- IGN à 1/25 000^{ème} ;
- Plans des flancs sud et nord scannés respectivement au 1/1 000^{ème} et 1/2 500^{ème}.

Afin d'obtenir un rendu suffisamment précis des informations et des futurs résultats, l'échelle de restitution choisie de la carte informative est le 1/5 000^{ème}. 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 2300-BN03-NT09-BM-CV, 2003). Les documents cartographiques dont nous disposons sont sous la forme d'un Système d'Informations Géographiques (SIG sous MapInfo), constitués de tables cartographiques associées à des données comprenant :

- les plans des travaux du fond (flancs nord et sud) scannés et géoréférencés en coordonnées Lambert I carto de Paris (pour le flanc nord, seules les importantes galeries de niveau sont représentées ; pour le flanc sud, l'ensemble des travaux est représenté) ;
- 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. L'orthophotoplan est mis 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 droit de leurs points de référence (ouvrages débouchant en surface). Sur l'ensemble de la mine de May-sur-Orne, ces incertitudes varient de 0 à 9 m.

Suite à la lecture des plans originaux, et hormis le fait que seules les importantes galeries de niveau sont représentées sur le plan du flanc nord, le report cartographique des travaux du fond se rapproche globalement de la réalité, mais certains points sont absents ou schématisés. A titre d'exemple, sur le flanc sud (lèvre sud, cf. § 2.2), les chambres d'exploitation autour de la grande descenderie ne sont pas cartographiées sur le plan alors qu'elles sont représentées sur les coupes. De même, certaines chambres ne sont pas cartographiées sur les plans près du puits Taraud (lèvre nord, cf. § 2.2) ou près de la galerie de Bully (côté ouest de l'Orne).

1.2 DOCUMENTS TECHNIQUES CONSULTES

L'exploitation des mines de fer de May-sur-Orne ainsi que leur aménagement en stockage souterrain d'hydrocarbures ont 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 de May-sur-Orne ainsi que les documents liés au stockage d'hydrocarbures sont, pour la plupart, archivés à la DRIRE de Basse-Normandie (certains plans sont encore archivés à la mairie de May-sur-Orne).

Nous avons également contacté la mairie de May-sur-Orne, où la majorité des anciens travaux sont répertoriés.

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, sur l'emprise des communes de Feuguerolles-Bully, Saint-André-sur-Orne, Saint-Martin-de-Fontenay, May-sur-Orne, Fontenay-le-Marmion, Rocquancourt et Lorguichon.

Les visites effectuées en avril, mai et novembre 2003, ont eu pour objet :

- de collecter, à la DRIRE de Basse-Normandie, le maximum d'informations relatives à l'exploitation et au stockage souterrain ;
- d'observer la nature et l'état des ouvrages débouchant en surface (galeries et puits) ;
- d'observer et de caractériser les désordres anciens et, le cas échéant, nouveaux en surface, liés à des instabilités minières déjà connues ou non.

Par ailleurs, la rencontre de personnalités locales a permis de compléter les données recueillies dans les documents d'archives pour un certain nombre d'anciens accès à la mine et de désordres liés aux anciens travaux.

2. CONTEXTE GEOGRAPHIQUE ET GEOLOGIQUE DU GISEMENT FERRIFERE DE MAY-SUR-ORNE

2.1 SITUATION ET TOPOGRAPHIE DU GISEMENT EN SYNCLINAL DE MAY-SUR-ORNE

Le site des anciennes exploitations ferrifères sur les communes concernées est fortement influencé par l'activité humaine. Les habitations des principales communes (Saint-André-sur-Orne, May-sur-Orne et Fontenay-le-Marmion) sont majoritairement constituées de lotissements de maisons individuelles et de quelques PME locales. Entre ces villes, le site est marqué par des bocages et des terres agricoles (figure 1). Les coteaux de la vallée de l'Orne sont boisés ou entaillés d'exploitations de grès (Primaire) ou de calcaires (Jurassique) en carrière à ciel ouvert, notamment sur les communes de Feugueroles-Bully et Saint-André-sur-Orne.

La topographie générale du site est peu marquée (cote + 35 m NGF au centre de Saint-André-sur-Orne, + 40 m à May-sur-Orne et + 50 à + 85 m à Fontenay-le-Marmion). Cette morphologie relativement plane est, toutefois, recoupée par la vallée de l'Orne (rivière s'écoulant dans ce secteur de la cote NGF + 12 à + 5 m) d'orientation générale nord-sud au droit des anciens travaux, soulignant, à cet endroit, la direction générale sub-méridienne de la faille de l'Orne.

2.2 GEOLOGIE

Le minerai de fer exploité par la Société des Mines et Produits Chimiques 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 Angers-Rennes) (Figure 2).

Le minerai de fer est un minerai oolithique carbonaté siliceux, à faciès hématite, d'âge ordovicien (Paléozoïque), d'origine sédimentaire, issu du démantèlement de la chaîne précambrienne, et ayant subi un métamorphisme thermo-dynamique résultant de la phase tectonique à l'origine des plissements. Dans la région de May-sur-Orne, il s'intègre dans un massif dont le mur est constitué par les formations précambriennes (Briovérien) et cambriennes (schistes et grès feldspathiques) puis d'une fine couche de Grès armoricains (environ 10 m) et, le toit, d'une succession de bancs de schistes (schistes à calymènes) et de grès (Grès de May). Plus précisément, le toit immédiat consiste en 10 mètres d'alternances grésoschisteuses d'épaisseur décimétrique à métrique avant les schistes massifs (figure 3).

Ce massif primaire est plissé en un synclinal orienté approximativement est-ouest (axe principal d'azimut 105° N) et atteignant une grande profondeur (Figures 4 et 5). Ses flancs sont très redressés. Le flanc sud présente des pendages allant de 45° à l'ouest à 60° vers l'est. Le flanc nord est plus redressé, présentant des pendages variant de 85° à l'ouest du gisement, à 90° vers l'est, voire, localement, en stratigraphie légèrement inverse.

Une série argilo-calcaire du Jurassique inférieur (lias), pouvant atteindre plusieurs mètres d'épaisseur, surmontée d'une série calcaire du Jurassique moyen (Bajocien et Bathonien) tabulaires, recouvrent, en stratigraphie discordante, les formations primaires du synclinal. L'ensemble atteint 50 à 60 mètres d'épaisseur à l'est de la route départementale 235 (Fontenay-le-Marmion) puis décroît vers l'ouest jusqu'à sa disparition par érosion dans la vallée de l'Orne.

Les données recueillies dans les archives de la Banque du Sous-Sol (BSS) du BRGM, 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 au-dessus des travaux miniers. Les courbes ont été tracées à un pas de 10 m d'épaisseur depuis l'affleurement jusqu'à 50 m. Toutefois, elles ont été représentées sur la carte informative (annexe A) par des lignes en pointillés afin de ne pas leur conférer une précision trop importante relative à l'interprétation des données précitées.

Par ailleurs, le massif est découpé par deux types d'accidents :

- le premier, de direction longitudinale au synclinal, à pendage nord et au jeu inverse, affecte uniquement les formations primaires. Ces accidents sont assimilés à des chevauchements nord-sud issus de la tectonique compressive à cette époque. Dans le secteur de May-sur-Orne, cinq failles ont été observées dont l'une affecte particulièrement le flanc sud du gisement. En effet, son rejet relativement important donne un dédoublement de la couche de minerai (« digitalisation ») entre les niveaux – 72 et – 167 (la partie chevauchée vers le sud est alors appelée « lèvresud » et la partie chevauchante au nord est nommée « lèvresud nord »). La distance séparant les deux couches ainsi chevauchées est de l'ordre de 35 à 90 m en projection horizontale ;
- le second type d'accident tectonique, de direction sub-méridienne, au jeu dextre, est représenté par la faille de l'Orne qui présente au niveau des travaux miniers un rejet d'environ 100 m. Ces failles sont toutefois assez espacées, ayant laissé entre elles des panneaux réguliers et exploitables de plusieurs centaines de mètres.

2.3 LA COUCHE DE MINERAI : COMPOSITION, PUISSANCE ET RESISTANCE

Elle est divisée en un faciès à hématite (1 à 1,5 m) surmonté d'un faciès dit « tacheté » légèrement carbonaté. La teneur du banc à hématite est de 45 à 50 % de fer pour 10 % de silice. Pour le minerai « tacheté » la teneur en fer est de 35 à 38 % pour une teneur en silice de 16 à 20 %. Toutefois, ce dernier est plus riche en fer sur le flanc nord que sur le flanc sud du synclinal. Le minerai, après extraction, était vendu cru car il présentait une perte au feu d'environ 10 %.

La couche du minerai de fer présente en moyenne une puissance de 3,5 à 4 m (2 à 4 m, sur le flanc sud, et exceptionnellement 4 à 7 m, sur le flanc nord). Sur le flanc nord, la couche peut se digitaliser localement en deux couches distinctes (la couche nord et la couche sud), séparées d'un intercalaire de quelques mètres seulement (figure 16). L'épaisseur de cet ensemble peut atteindre localement plus de 12 m (comme dans le secteur de l'éboulement de 1918, près du puits Saint-André, situé à la sortie de la ville de Saint-Martin-de-Fontenay).

Les quelques résultats d'essai de résistance mécanique effectués sur le minerai et les épontes de la couche (schistes au toit et grès tachetés feldspathiques au mur) ont montré que les matériaux du flanc sud étaient plus résistants que ceux du flanc nord (Mayer, 1970, rapport GEOSTOCK n°36 VM/KC, janvier 1971). A titre indicatif, on peut donner les valeurs de résistance à la compression uniaxiale suivantes :

- minerai (flanc nord) : 90 à 110 MPa ;
- grès tachetés : entre 40 à 45 MPa (flanc nord) et 160 à 182 MPa (flanc sud) ;
- schistes : entre 20 à 28 MPa (flanc nord) et 70 à 85 MPa (flanc sud).

2.4 HYDROGEOLOGIE

Le site des anciennes exploitations ferrifères se caractérise par l'existence de deux aquifères, une nappe libre (double) dans les formations jurassiques et une zone saturée dans les terrains primaires. Ces deux aquifères sont séparés par un horizon imperméable discontinu (argiles liasiques).

2.4.1 Les nappes du Jurassique

Les niveaux du Jurassique renferment deux aquifères séparés par un horizon plus ou moins continu et imperméable de calcaires argileux, de marnes et d'argiles. Régionalement on ne distingue (piézométriquement parlant) qu'une seule nappe.

Ces deux aquifères, largement exploités, sont situés dans les terrains suivants :

- les calcaires du Bathonien (niveau de la « Pierre de Caen ») limités à la base par une couche d'argile bleue ; c'est l'aquifère supérieur bathonien ;
- les calcaires oolithiques fissurés du Bajocien ; c'est l'aquifère inférieur bajocien.

L'écoulement général est de direction sud-nord ou sud-ouest – nord-est, sauf à proximité de l'Orne vers laquelle il est dévié. Les cotes moyennes mesurées dans les calcaires jurassiques varient de + 35 m NGF sur le flanc nord jusqu'à + 55 m NGF sur le flanc sud (Milville et Matheron, 1993).

2.4.2 L'aquifère du Primaire

Les formations du Primaire sont saturées mais ne renferment pas une nappe *stricto sensu*, les faibles porosité et perméabilité de ces terrains les empêchant de constituer un aquifère exploitable. Ces formations sont alimentées par les nappes jurassiques sus-jacentes par percolation verticale au travers de zones de plus grande perméabilité.

Du fait de leur très faible perméabilité, les niveaux d'eau dans les schistes sont généralement inférieurs à ceux des Grès de May et des grès feldspathiques.

A ce jour, l'exhaure est maintenu depuis les galeries de niveau I (May-sur-Orne) et B (Saint-André-sur-Orne) respectivement aux cotes NGF + 12,55 m et + 13,30 m (Milcent, 1991). De plus, au droit des puits de Rocquancourt et d'Harcourt, les eaux d'origine jurassique et contenues dans les galeries de mine sont exploitées pour l'activité agricole locale (cf. § 3.4).

2.4.3 Conditions hydrogéologiques actuelles

Le niveau d'eau est aujourd'hui maintenu par l'existence de deux émergences au niveau de la cote NGF + 13 m (environ) avec toutefois l'existence d'un gradient qui fait évoluer le niveau piézométrique de + 10 à + 50 m, d'ouest en est. Les travaux miniers sont donc ennoyés jusqu'à ces cotes, ce qui représente la quasi totalité des travaux à l'exception des parties hautes des puits et autres ouvrages miniers (galeries, descenderies).

2.4.4 Remarques

On considère dans le cadre de la présente étude d'aléas que ce niveau est stabilisé par les émergences. Toutefois, compte tenu du fort différentiel de perméabilité entre les terrains primaires et les calcaires jurassiques (beaucoup plus perméables), toute modification du régime d'exhaure pourrait entraîner, dans certains cas, une possible évolution des conditions hydrologiques avec la survenance d'autres types de phénomènes tels que des résurgences locales, voire des phénomènes d'instabilités dans les travaux miniers

supérieurs.

Par ailleurs, certains indices (odeurs caractéristiques) émanant des deux galeries d'exhaure laissent supposer, non seulement la présence d'hydrocarbures résiduels dans les anciennes galeries minières, mais aussi celle d'une atmosphère (riche) en gaz dont certains pourraient être inflammables (méthane, etc.).

Ces aspects environnementaux sont examinés actuellement par GEODERIS.

3. HISTORIQUE DE L'EXPLOITATION MINIERE

Le minerai du bassin normand était connu depuis plusieurs siècles. Les zones d'affleurement, en l'absence de calcaires jurassiques de recouvrement, 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. C'est à la fin du XIX^{ème} siècle que l'exploitation souterraine a véritablement commencé.

3.1 LES CONCESSIONS

La mine de fer de May-sur-Orne, sur les deux flancs du synclinal, concerne quatre concessions : May-sur-Orne (964 ha) sur le flanc sud, Saint-André-sur-Orne (389 ha) sur le flanc nord, puis Bully (402 ha) et Maltot (430 ha). Cette dernière n'a fait l'objet que de faibles travaux. Il est à noter que d'autres concessions sont réparties le long du synclinal de May-sur-Orne mais n'ont jamais été exploitées ; il s'agit de Garcelles, Fierville, Ouville, Ouézy, Condé-sur-Ifs et Saint-Pierre-sur-Dives (archives de 1968 à 1975).

Concession de May-sur-Orne

La concession de May-sur-Orne a été instituée par décret du 5 mars 1896 au profit de Messieurs Chollet et Samson. D'une superficie de 964 hectares, la concession s'étend sur les communes de Saint-Martin-de-Fontenay, May-sur-Orne, Clinchamp-sur-Orne, Bully, Laize-la-Ville, Fontenay-le-Marmion, Rocquancourt et Saint-Aignan-de-Cramesnil.

Cette concession appartenait par moitié à Madame Lebas, petite fille de M. Samson, et à Madame Limbour, légataire universelle de Madame Fige, nièce de M. Chollet. La concession a été amodiée le 5 mars 1905 à la Société Française de Recherches et d'Exploitation qui deviendra la Société des Mines et Produits Chimiques (SMPC). Celle-ci restera exploitant de la mine jusqu'en 1968, date d'arrêt des travaux.

Concession de Saint-André-sur-Orne

La concession de Saint-André-sur-Orne a été instituée par décret du 1^{er} septembre 1893 au profit de Messieurs Allainguilla, Langue, Lame et Moisson, constitués en Société Civile des Mines de Fer de Saint-André le 5 janvier 1892. La concession de 295 hectares concerne d'abord les communes de Saint-André, Saint-Martin-de-Fontenay et May-sur-Orne, puis un décret du 23 juillet 1907 l'augmente de 94 ha sur Saint-Martin-de-Fontenay et Fontenay-le-Marmion, soit 389 ha au total.

La Société Civile des Mines de Fer de Saint-André a cédé ses droits de concession le 17 décembre 1910 à la Société Anonyme des Mines de Saint-André, mais celle-ci sera mise sous séquestre, par ordonnance du Tribunal de Caen le 30 octobre 1914, en raison de l'apport de capitaux allemands durant la Première Guerre Mondiale. Elle sera ensuite achetée par adjudication par la SMPC le 9 janvier 1926.

Concession de Bully

La concession de Bully a été instituée le 5 mars 1896 au profit de Messieurs Hobey et Moisson sur 402 hectares sur les communes de Bully et Feuguerolles. Ceux-ci cèdent leur droit le 30 décembre 1897 à Messieurs Lame, Lanque, Bidgrain, Houris et à la Société Civile des Mines de Saint-Rémy. Le 17 décembre 1910, Monsieur Mesnier crée la Société Anonyme des Mines de Bully par apport de la concession de Bully. Celle-ci, mise également sous séquestre, sera acquise par adjudication par la SMPC le 9 janvier 1926.

Concession de Maltot

La concession de Maltot a été instituée par décret du 3 juin 1903, au profit de Monsieur de Ghaisne de Bourmont. Elle s'étend sur 430 hectares sur les communes de Saint-André-sur-Orne, Feuguerolles, Maltot et Eterville. Monsieur Bertrand (Compagnie des Phosphates d'Océanie) l'acquiert le 17 décembre 1910 en apport à la constitution de la Société des Mines de Maltot. Mise sous séquestre, elle sera ensuite achetée par adjudication par la Société des Mines et Produits Chimiques (SMPC) le 9 janvier 1926.

Sur cette concession, une seule galerie de 250 m de long a été tracée à flanc de coteau mais sans jonction avec la mine de May-Saint-André. De même, un sondage situé à 1 500 m au sud-sud-est de Fontaine-Etoupefour et à 1000 m à l'ouest de la concession, a recoupé la couche sur 6,6 m de puissance (de 81 à 87,6 m).

Les concessions de Saint-André, Bully et Maltot ont été mutées officiellement au nom de la SMPC par décret en date du 9 août 1926.

3.2 LA FERMETURE DE L'EXPLOITATION MINIERE

La SMPC, propriétaire des quatre concessions, avait son siège principal d'extraction à May-sur-Orne où les travaux se sont prolongés sous la concession sur 1 700 m. Un stot de protection a été maintenu sous l'Orne.

La production annuelle était en moyenne de 650 000 à 700 000 tonnes, avec un maximum de 726 000 tonnes en 1955. Le minerai était vendu à des usines françaises, anglaises, belges, allemandes et hollandaises.

Afin d'améliorer le prix de revient de l'exploitation, une campagne de modernisation a été amorcée en 1957 et, en 1963, un nouveau siège d'extraction est mis en place. Mais cette modernisation s'est accompagnée d'une baisse des effectifs entre 1961 et 1967 (de 668 ouvriers et 85 cadres et agents de maîtrise en 1961, à 266 ouvriers et 61 agents de maîtrise et cadres en 1967).

En 1967, certains clients suspendirent leurs achats, entraînant ainsi une chute rapide de l'exploitation avec l'annonce par la SMPC d'une fermeture certaine pour septembre 1968 et le licenciement du personnel de mars à août. La fin des travaux d'exploitation eut lieu en avril 1968 et la fermeture définitive le 1er septembre de la même année. Des travaux de fermeture furent alors prescrits afin d'assurer la protection du public et réalisés en 1968.

Le 30 décembre 1973, la SMPC, concessionnaire de Maltot, Bully et Saint-André, ainsi que les héritières Lebas et Limbour, concessionnaires de May-sur-Orne demandèrent la renonciation aux concessions précitées. La renonciation aux quatre concessions fut acceptée le 4 décembre 1975.

La catastrophe économique régionale qu'a amené la fermeture des mines, après un siècle d'exploitation, a été atténuée par deux activités qui ont permis de continuer, plus ou moins directement, la vie de la mine :

- le stockage souterrain d'hydrocarbures ;
- l'exploitation des eaux d'exhaure.

3.3 LE STOCKAGE SOUTERRAIN D'HYDROCARBURES

Dès 1969, la société GEOSTOCK s'est intéressée au site de la mine souterraine de May-sur-Orne pour étudier les possibilités d'un stockage souterrain d'hydrocarbures. Le 30 juin 1971, un accord est signé entre la SMPC et GEOSTOCK. Ensuite, les travaux d'aménagement de la mine ont été mis en œuvre par la société Géomines Caen (filiale de GEOSTOCK). L'utilisation des vides pour le stockage souterrain d'hydrocarbures liquides s'est traduite par un transfert de responsabilité en matière de sécurité publique entre la SMPC et la société Géomines Caen, gestionnaire du stockage pour le compte des compagnies pétrolières.

Seules cinq ouvertures ont été maintenues accessibles pour contrôler le stockage, pour l'aéragé et pour l'exhaure : le puits Saint-André, le puits Central et le puits Urbain-le-Verrier (ULV) ainsi que les galeries de niveau I (flanc sud) et B (flanc nord).

En 1982, le stockage a été perturbé par une activité microbienne productrice de méthane dont la maîtrise a demandé à la société Géomines Caen plus d'un an d'efforts techniques et financiers. Durant cette période, l'exploitation du stockage a dû être interrompue. Compte tenu de ces difficultés, la décision de vidange complète a été prise en août 1983 et mise en œuvre de 1984 à 1988. Cette vidange a été suivie d'une période d'observation de 3 mois, à l'issue de laquelle l'autorisation du remplissage en eau des cavités souterraines a été acceptée. La remontée des eaux a été conduite entre 1989 et 1990, accompagnée de mesures ponctuelles de sa qualité.

3.4 L'EXPLOITATION DES EAUX D'EXHAURE

En 1925, des venues d'eau très importantes, en provenance de la base des calcaires jurassiques, ont été interceptées. Ces calcaires, beaucoup plus perméables que les schistes et grès sont le siège, à leur base, d'une zone d'accumulation d'eau constituant des sources intéressantes pour le captage. Ces sources ont provoqué des venues d'eau intempestives qui ont obligé à renforcer l'exhaure qui se faisait par les galeries de niveau.

En 1955, ces réserves furent utilisées afin d'alimenter l'agglomération caennaise, en réaménageant un ancien puits (puits Taraud) reliant le niveau I à la surface. Depuis 1962, la gestion de ce puits fut confiée au Syndicat d'exploitation des eaux d'exhaure des mines de May-sur-Orne, suite à une convention signée le 2 février 1961 avec la SMPC pour une durée de 99 ans.

En 1965, une autre installation de pompage fut mise en place au puits de Rocquancourt et exploitée par une exploitation fruitière, la société « La Crête de Fontenay » (2 juin 1965 pour 99 ans).

A la fermeture du stockage, une convention de remise des installations fut signée entre la société Géomines Caen et le Syndicat d'exploitation des eaux pour le maintien de l'accès aux ressources dans les galeries de la mine par les puits Taraud et de Rocquencourt. Ces travaux furent réalisés pendant l'exécution des travaux de fermeture du stockage.

Ces eaux proviennent de sources liées au percement de la nappe des calcaires jurassiques (cote NGF + 44 m) et s'écoulant jusqu'à la galerie de niveau I (cote NGF + 25 m au droit de Rocquencourt). Ainsi, compte tenu que la cote maximale atteinte par le stockage était de - 15 m, il semble que ces eaux ne pouvaient être, en aucun moment, en contact direct avec les hydrocarbures, ce qui a permis son exploitation pour l'agriculture locale.

3.5 TRAVAUX MINIERES ET METHODES D'EXPLOITATION

3.5.1 Présentation des travaux miniers

Les travaux miniers s'étendent d'est en ouest sur environ 3,5 km pour le flanc nord (concessions de Saint-André-sur-Orne et Maltot) et 6 km pour le flanc sud (concessions de May-sur-Orne et Bully), avec des profondeurs allant jusqu'à 450 mètres.

L'exploitation a été menée sur plusieurs panneaux accessibles depuis le fond par des galeries horizontales de niveau (Figures 6 et 7) :

- flanc sud : **15 galeries** (I à XV) échelonnées tous les 40 m, environ, à + 12 m (I) - 30 m (III), - 70 m (V), - 115 m (VII), - 170 m (IX), - 200 m (X), - 240 m (XI), - 270 m (XII), - 310 m (XIII), - 340 m (XIV) et - 392 m (XV) ;
- flanc nord : **17 galeries** (B à T) dont les principales aux cotes NGF + 19,5 m (galerie de niveau B), - 8 m (E), - 50 m (G), - 95 m (J), - 145,5 m (L), - 262 m (P), -394,5 m (T).

A l'arrêt des travaux miniers, l'exploitation était centralisée dans la « lèvre nord » (flanc sud) dans une zone située entre les galeries des niveaux XIV (cote NGF - 340 m) et IX (cote NGF - 170 m) sur une longueur de 1650 m environ.

Il est à signaler que les galeries de niveaux I et B ne correspondent pas aux ouvrages les plus superficiels. En effet, elles sont surmontées de travaux anciens ainsi que de galeries dites de « morts-terrains », percées en limite voire au sein même des calcaires jurassiques. Ainsi, la profondeur des exploitations les plus superficielles n'excède pas 50 m et est, le plus souvent, inférieure à 20 m (exemple de l'exploitation à 13 m de profondeur au niveau du puits Saint-André pour le flanc nord ou celle à moins de 10 m au niveau de la Descente de la Hogue pour le flanc sud).

Un travers-bancs, percé entre les niveaux XV et T, permettait de rejoindre les deux flancs de l'exploitation. Finalement, sur le flanc sud, un stot de 70 m de large a été laissé sous le passage de l'Orne.

Du fait des pendages (45° à 60° sur le flanc sud et plus de 80° sur le flanc nord) et des évolutions techniques au cours du temps, plusieurs méthodes d'exploitation se sont succédées à la mine de May-sur-Orne.

3.5.2 Ancienne méthode par traçage et dépilage

La première, utilisée de la fin du XIX^{ème} siècle au début du XX^{ème}, fut l'exploitation par dépilage (Figure 8). Elle consistait, dans un premier temps, au creusement de galeries dites « voie de base » et « voie de tête » espacée de 20 à 25 m suivant la pente et, dans un deuxième temps, au percement de galeries parallèles intermédiaires accessibles par des cheminées. L'abattage du minerai se faisait, de façon manuelle, de haut en bas par dépilage progressif des piliers longitudinaux. Bien que les taux d'exploitation (ou taux de défrètement) était compris entre 80 et 85 %, cette méthode était longue à mettre en œuvre et peu rentable.

3.5.3 Méthode des tailles chassantes

La méthode par dépilage fut abandonnée avant la Première Guerre Mondiale au profit de l'exploitation par taille chassante (Figure 9). Si les fronts se développaient en chassant entre les deux voies de tête et de base, séparées de 30 à 35 mètres, l'abattage s'opérait cette fois en descendant, en abandonnant régulièrement des piliers.

3.5.4 Les tailles montantes ou « chambres magasins »

Finalement, vers 1925, cette dernière méthode fut aussi progressivement abandonnée pour être remplacée par l'exploitation par « chambres magasins » (Figures 10 et 11). Le principe général de celle-ci est l'abattage du minerai de bas en haut, les blocs « s'écoulant » par gravité au sein de la chambre. Durant l'abattage, les blocs sont retenus puis soutirés dans les berlines en galerie de base par un système de trémies. L'accès à la chambre se faisait par l'une des cheminées percées depuis la galerie de tête et équipées d'échelles. En cours d'exploitation, des piliers étaient laissés tous les 15 m (d'axe à axe) et devaient comporter une largeur correspondant à une épaisseur de couche exploitée plus 1 m. De plus, vers le tête du chantier, ces piliers étaient découpés suivant une forme triangulaire afin d'assurer l'écoulement du minerai.

Les dimensions types des chambres étaient les suivantes :

- dans la concession de Saint-André-sur-Orne, la distance suivant la relevée (hauteur verticale) entre les niveaux de tête et de base est de l'ordre de 44 m et la largeur de la chambre entre les parois extrêmes suivant l'horizontale est de 100 m. Le plus souvent, la chambre est limitée par des failles ;
- dans la concession de May-sur-Orne, la distance suivant la relevée entre les niveaux de tête et de base est de l'ordre de 60 m et la largeur de la chambre entre les parois extrêmes suivant l'horizontale est de 100 m.

Ces trois méthodes d'exploitation se sont échelonnées au cours du temps, au fur et à mesure que la profondeur augmentait. Ainsi, l'exploitation par dépilage concerne les niveaux les plus superficiels jusqu'au niveau E (flanc nord, soit à 50 m de profondeur au puits Saint-André), puis celle par taille chassante jusqu'à niveau L (flanc nord, soit à 190 m de profondeur au puits Saint-André), et finalement l'exploitation par « chambres magasins » jusqu'à 450 m (Figure 12).

3.6 OUVRAGES DEBOUCHANT AU JOUR

L'accès au fond se faisait par différents puits (puits Urbain-le-Verrier dit « ULV » cote NGF + 84 m, puits Central cote NGF + 52 m, etc.), descenderies (de l'Orne cote NGF + 38 m, de la Hogue, etc.) et des galeries horizontales depuis les coteaux de l'Orne (galeries de niveaux B et 1, etc.). La majorité de ces ouvrages est localisée sur les concessions de Saint-André-sur-Orne et May-sur-Orne.

La mine de May-sur-Orne comprenait 24 accès aux travaux miniers depuis la surface. Sur ces 24 accès, 18 étaient destinés à l'exploitation (extraction, aérage ou cheminement du personnel) et les 6 autres étaient réservés à l'aérage et au contrôle durant le stockage d'hydrocarbures.

Remarque : ces 6 derniers ouvrages sont de très faible dimension (forages de gros diamètre, évent, etc.), leur diamètre n'excédant pas 50 cm. Ces forages traités par rebouchage en béton ne présentent pas de risques notables dans le cadre des aléas « mouvements de terrain » et ne sont pas pris en compte dans la suite de l'analyse.

Le récolement des ouvrages débouchant en surface a été réalisé en deux temps :

- en 1968, sur 13 orifices, à la fermeture de la Société des Mines et Produits Chimiques ;
- en 1993, sur 16 orifices (comportant des reprises sur les précédents) suite à l'abandon du stockage d'hydrocarbures ;
- Un dix-septième accès est répertorié sur d'anciens plans. Cet accès était une galerie horizontale de recherche sur la concession de Maltot. Elle a été percée à flanc de coteau et a une longueur avoisinant 130 m (Photographie 1).

De même, un dernier ouvrage a été observé sur site. Il se situe à 10 m au nord de la galerie de niveau I et a été percé à flanc de coteau au travers des schistes à calymènes (Photographie 2). D'après l'ancien géomètre, cet ouvrage était une petite galerie de 15 m de longueur qui servait aux jeunes mineurs à l'apprentissage des techniques de forage et d'abattage.

Ce dernier ouvrage a fait également l'objet de travaux mais n'est mentionné dans aucun document d'archives.

3.6.1 Les puits

Sur les 18 accès, la mine de May-sur-Orne comportait 9 puits dont 4 sur le flanc nord et 5 sur le flanc sud.

| | Puits (cote NGF) | Activité | date et géologie de fonçage | Diamètre ou Section | Profondeur (m) | Niveaux des recettes | Travaux définis à la date de fermeture de la mine | Observations sur site |
|--------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| Flanc Nord (d'est en ouest) | Verrières (+ 83 m) | Aérage | Ancien – entièrement foncé au sein des calcaires jurassiques | $\phi=2,5$ m | 45 (jusqu'au niveau B) | Niveau B | dalle en béton armé | puits non observé |
| | Saint-André (+ 43 m) | Exploitation | Aucune donnée – foncé au travers les calcaires jurassiques sur au moins 7 m dont les 4 premiers m sont très fracturés (coupe CERCHAR dans PV de récolement) | $\phi=4,5$ m | 450 | Tous niveaux jusqu'au T + albraque inférieur | dalle en béton armé | Dalle observée (Photo 3) |
| | Accès au Puits Saint-André (+ 43 m) | Exploitation | Aucune donnée - entièrement foncé au sein des calcaires jurassiques très fracturés | section rectangulaire de 2 m \times 3 m | quelques m | Petite galerie menant au puits St-André | dalle en béton armé + ouverture aménagée et fermée par trappe métallique | non observé |
| | Central (+ 52 m) | Extraction | 1962 - foncé au travers des calcaires jurassiques sur 7 à 10 m dont les 6 premiers m sont destructurés (coupe CERCHAR dans PV de récolement) | $\phi=5,5$ m | 540 | Relié à H=450 m (cote NGF – 392 m) par travers-bancs au voies de base de St-André (niveau T) et de May/Orne (niveau XV) | dalle en béton armé | Dalle observée (Photo 4) |
| Flanc Sud (d'est en ouest) | Urbain-le- Verrier (U.L.V.) (+ 84 m) | Exploitation puis aéragé | Aucune donnée – foncé sur les 40 premiers mètres dans les calcaires jurassiques | Aucune donnée précise, de l'ordre de 5 à 6 m de diamètre | 250 | Niveaux III, V et IX | dalle en béton armé | Dalle observée par BRGM et GEODERIS |
| | Taraud (+ 67 m) | Exploitation et aéragé | Aucune donnée – foncé sur les 35 premiers mètres dans les calcaires jurassiques | $\phi=1,5$ m | Bétonné sur 30 m et réservoir cimenté à la base | « morts terrains » puis relayé jusqu'au niveau I | Ouvert : utilisation des eaux | Bâtiments accueillant le système de pompage observés |
| | Rocquancourt (+ 60 m) | Exploitation et aéragé | Aucune donnée – foncé sur les 30 premiers mètres dans les calcaires jurassiques | section rectangulaire de 2,2 m \times 1,1 m | 44 | Tous les niveaux jusqu'au IX | Ouvert : utilisation des eaux + puits bétonné jusqu'au niveau I | Bâtiments accueillant le système de pompage (Photo 5) |
| | Descenderie de la Hogue (puits d'accès à la descenderie) (+ 64 m) | Exploitation puis aéragé | Très ancien – foncé sur les 20 premiers mètres dans les calcaires jurassiques | section rectangulaire de 2 m \times 3 m | quelques m | Galerie des « morts terrains » puis relayé à tous niveaux jusqu'au V | A remblayer | Emplacement masqué par un bosquet |
| | Harcourt (+63 m) | aéragé | Aucune donnée – foncé sur les 10 premiers mètres dans les calcaires jurassiques | section carrée de 3 m \times 3 m | 15 m | Tous niveaux jusqu'au V | dalle en béton armé | plus visible |
| | Cheminées Bully | aéragé | Aucune donnée – foncée au travers de la couche de minerai : absence de couverture jurassique | Aucune donnée | Aucune donnée | Niveau I | A remblayer | Débourrage en cours (Photo 6) |

Tableau 1 – Inventaire et caractéristiques des puits d'accès à la mine de May-sur-Orne (Archives dossier d'abandon du stockage d'hydrocarbures de May-sur-Orne, août 1999)

Remarque : après comparaison des archives de la SMPC et de Géomines Caen, il s'avère qu'il existe une inversion de position entre le puits Taraud et celui de Rocquancourt. Afin de respecter la nomenclature des ouvrages choisie par la SMPC, nous conserverons les dénominations et les positions de ces deux puits telles qu'elles étaient indiquées lors de la fermeture de l'exploitation minière (cf. Annexe A).

Ainsi, le puits Taraud correspond aux puits de captage des sources (captage AEP référencé dans la Banque du Sous-sol du BRGM n° 0146-1X-0049) situé à environ 100 m à l'ouest des sources. Le puits de Rocquancourt est, quant à lui, situé à environ 500 m à l'Ouest du premier, au cœur de la cité Taraud.

3.6.2 Les descenderies

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

| Descenderie | Activité | Date de creusement | Section | Longueur (m) | Cote NGF (m) | Profondeur (m) | Travaux préconisés à la date de fermeture de la mine | Observations sur site |
|---------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|--------------------|-----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|--------------------------------------------|------------------------------------------------------|-----------------------|
| Accès Salerno ou descente d'Harcourt | Accès aux travaux anciens et dynamitière | Aucune donnée | H = 2,5 m | Environ 30 m en incliné creusé dans les calcaires jurassiques | + 64,8 | 12,5 jusqu'à la galerie des morts terrains | A fermer par un mur épais maçonné | Dalle dans garage |
| Descenderie de l'Orne ou Grande Descenderie | Extraction jusqu'en 1962 puis uniquement circulation du personnel | ancien | 5 m × 3 m | 300 m en incliné, creusée au sein des schistes et grès primaire : absence de recouvrement jurassique | + 38 | 200 (niveau IX à la cote NGF – 167 m) | dalle en béton armé | Rien de visible |

Tableau 2 – Inventaire et caractéristiques des descenderies à la mine de May-sur-Orne

3.6.3 Les galeries horizontales d'accès

Six galeries horizontales ont été percées à flanc de coteau de l'Orne, deux à l'ouest (concessions de Bully et Maltot) et quatre à l'est (concessions de May-sur-Orne et Saint-André-sur-Orne). Ces galeries ont été creusées au cœur du minerai sauf pour la galerie + 13, percée au travers des grès felspathiques du flanc nord et la galerie « Ecole » creusée au sein des schistes à calymènes.

| | Travers-bancs | Activité | Section | Longueur/ Profondeur (m) | Recouvrement | Cote NGF (m) | Travaux préconisés à la date de fermeture de la mine | Observations sur site |
|-------------------|---------------------|------------------------------------------------------------|---------------------|----------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Flanc Nord | Galerie de niveau B | Exhaure | l=2,2 m et H= 2,5 m | globalement tout le long du flanc nord | Creusée suivant la couche de minerai : le recouvrement jurassique débute au bout de 50 m de longueur | + 18,5 | A fermer par un mur épais maçonné | Entrée maçonnée et fermée (permettant l'accès au système réservé à l'exhaure) (Photographie 7) Odeur caractéristique d'hydrocarbures, non systématique |
| | Galerie + 13 | Exhaure du puits central dans l'ancienne carrière de May | 2 × 2 m | L=40m | Creusée au travers les grès felspathiques : le recouvrement jurassique débute au bout de 50 m de longueur | + 13 | A fermer par un mur épais maçonné | Inaccessible : demande d'autorisation de pénétrer dans l'ancienne carrière de May en cours de remblayage |
| | Galerie Maltot | Recherche | Aucune donnée | L=130 m | Creusée suivant la couche de minerai : absence de calcaires jurassiques | Aucune donnée | Aucune donnée | Entrée bouchée par remblais (Photographie 1) Galerie au-dessus |
| Flanc Sud | Galerie de niveau I | Exhaure | l=3,5 m et H=2,6m | globalement tout le long du flanc sud | Creusée suivant la couche de minerai : le recouvrement jurassique débute au bout de 550 m de longueur | + 12 | A fermer par un mur épais maçonné avec aménagement de système d'évacuation des eaux | Entrée maçonnée et fermée (permettant l'accès au système réservé à l'exhaure) (Photographie 8) Odeur caractéristique d'hydrocarbures |
| | Galerie « Ecole » | Apprentissage du forage et de l'abattage pour les mineurs | l=3,5 m et H=2,5m | Environ 15 m | Creusée au travers les schistes : absence de calcaires jurassiques | + 12 | Aucune donnée | Fermée par un mur maçonné (Photographie 2) |
| | Galerie de Bully | retour d'air des travaux effectués sur concession de Bully | Aucune donnée | Aucune donnée précise | Creusée suivant la couche de minerai : absence de calcaires jurassiques | + 10 | A fermer par un mur épais maçonné | Entrée bouchée par des remblais. Ancienne tranchée observée |

Tableau 3 – Inventaire et caractéristiques des galeries horizontales d'accès à la mine de May-sur-Orne

3.6.4 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 :

Pour le flanc nord :

- à l'exploitation de petits chantiers au-dessus de la galerie du niveau B jusqu'au contact des calcaires jurassiques depuis l'extrême est de la mine jusqu'à 200 m de l'entrée de la galerie.

Pour le flanc sud :

- à la galerie dite « des morts terrains » (dont le toit correspond au contact des calcaires jurassiques) creusée au flanc sud depuis la faille des 20000 tonnes jusqu'à l'extrême est de la mine ;
- à la dynamitière d'Harcourt accessible depuis la descente d'Harcourt creusé au sein des calcaires jurassiques et au même niveau que la galerie des « morts terrains » à cet endroit, soit à environ 10 m de profondeur.

Ainsi, pour l'ensemble de ces travaux, les profondeurs varient de 0 (au niveau des différents accès à la mine) jusqu'à 55 m pour les secteurs les plus orientaux de la mine (flanc nord et sud).

4. TRAVAUX EXECUTES POUR LA MISE EN SECURITE DU SITE

Les travaux de mise en sécurité du site furent essentiellement entrepris dans le cadre de la transformation des anciens vides miniers en stockage d'hydrocarbures et lors de la fermeture du stockage (travaux de réhabilitation du site).

4.1 TRAVAUX D'AMENAGEMENT POUR LE STOCKAGE D'HYDROCARBURES

4.1.1 Cartographie de l'ensemble des travaux miniers

Dans le cadre du stockage d'hydrocarbures, une cartographie préalable des travaux miniers pour les concessions situées à l'est de l'Orne (concessions Saint-André-sur-Orne pour le flanc nord et May-sur-Orne pour le flanc sud) a été réalisée en 1973 par GEOSTOCK, avec l'aide de Monsieur Lecouturier, ancien géomètre de la mine, pour les parties les plus superficielles, et a été restituée sous forme de coupes parallèles au pendage à l'échelle du 1/500.

Ces reconnaissances avaient pour but d'évaluer la stabilité générale de la mine ainsi que de contrôler les communications entre les chambres et les galeries afin que le gazole ne puisse être piégé artificiellement dans certains secteurs.

L'analyse de ces coupes montrent que de nombreuses chambres (à moyenne et forte profondeurs et en particulier sur le flanc nord) n'ont pas été représentées. Elles ont été considérées comme inaccessibles car obstruées par des déblais. Renseignement pris auprès de l'ancien géomètre de la mine, ces chambres seraient (très) partiellement remblayées par des stériles issus de la couche ou (et surtout) par des déblais provenant des galeries creusées dans le calcaire (galeries dans les morts-terrains) et rejetés dans les anciens travaux.

4.1.2 Travaux de renforcement et d'aménagement

Les travaux réalisés par GEOSTOCK pour le stockage d'hydrocarbures après l'arrêt de l'exploitation ferrifère ont eu pour objet de renforcer la stabilité de certaines zones de la mine en des points considérés comme sensibles en fonction de la proximité de zones d'habitation et de l'importance relative des vides.

Ces travaux de renforcement s'étendent sur environ 1300 m de longueur à partir de la limite ouest de la concession et ont été réalisés en lèvre sud, pour la plupart, et en lèvre nord, pour certains. En particulier, des confortements de vides ont été réalisés sur le flanc nord aux abords du puits Saint-André, aux niveaux L et H, puis sur le flanc sud, aux abords de la Grande Descenderie et de la Descenderie des 20 000 tonnes (descenderie au fond reliant les niveaux I et VII). De même, des aménagements de la galerie de niveau E du flanc nord et la galerie de niveau I sur le flanc sud ont été réalisés (fermeture des accès avec les vides inférieurs et renforcement contre les éboulements et des accès aux vides supérieurs).

Tous ces confortements ont été obtenus en coulant, dans certaines des chambres d'exploitation, des massifs de béton dont le volume total est de l'ordre de 70 000 m³.

Ces aménagements ont également permis :

- d'isoler la partie transformée en réservoir d'hydrocarbures de la partie en contact avec l'extérieur par obturation des orifices reliant la galerie de visite (niveau I) à la partie inférieure ;
- d'isoler les deux parties du synclinal par obturation de la galerie en travers-bancs reliant les deux flancs, au moyen de deux bouchons en béton implantés à chacune des extrémités de la galerie (Figure 4) ;
- d'aménager les orifices faisant communiquer la partie supérieure de la mine avec la surface.

Par ailleurs, un système de surveillance a été mis en place pendant toute la durée du stockage. Il consistait en :

- un surveillance sismique permanente de la mine par des géophones et des hydrophones placés dans le stockage d'hydrocarbures ;
- plusieurs appareils de mesure de la convergence ;
- des rondes périodiques des équipes de sécurité dans les galeries de niveau E (flanc nord) et I (flanc sud).

Durant toute la période du stockage (1972 à 1993), aucun indice de mouvement de terrain significatif n'a été signalé.

4.2 RECOLEMENT DES TRAVAUX A LA FERMETURE DU STOCKAGE

Dans le cadre du processus de fermeture du stockage souterrain d'hydrocarbures de May-sur-Orne, la société Géomines Caen a réalisé plusieurs types de travaux :

- la mise en sécurité de zones jugées de stabilité douteuse ;
- la fermeture des orifices débouchant en surface, comprenant les puits d'accès, les galeries horizontales, les descenderies ainsi que les ouvrages de petites dimensions (évents et piézomètres).

4.2.1 La mise en sécurité de zones jugées à stabilité douteuse

Suite à la visite par Messieurs E. Tincelin et G. Vouille (E.N.S. des Mines de Paris) des travaux les plus superficiels, ces derniers ont préconisé un confortement des niveaux supérieurs de la mine jugés instables (rapport GEOSTOCK, 1971). Ces travaux, réalisés de novembre 1989 à janvier 1990, sont :

- le comblement de la zone appelée « N1 – Ferrière 1986 » (proche de la zone représentée sur la figure 14) sous la commune de Fontenay-le-Marmion (flanc nord). Les travaux ont consisté au remblaiement des vides par 693 tonnes de tout-venant argileux, après décapage de la dalle calcaire (épaisseur maximale de 3,9 m) et bouchonnage des galeries inférieures et latérales à la zone ;
- le comblement de la zone appelée « N6-1 – Eboulement 1918 » (proche de la zone représentée sur la figure 17) sous la commune de Saint-Martin-de-Fontenay (flanc nord). Ce secteur a été jugé à risque suite aux éboulements de blocs venant du toit des galeries superficielles (morts-terrains) dont la profondeur maximale était de 15 m. Les travaux ont consisté en l'injection, par deux forages, de 1106 tonnes de tout-venant et de 1071 tonnes de sable au coefficient de talutage favorable à un meilleur écoulement ;
- le comblement des chambres PK 1244 et PG 630 sous la commune de Fontenay-le-Marmion dans la zone appelée « la Hoguette » (flanc sud). Les travaux ont consisté, pour la première, en l'injection par un forage gros diamètre d'environ 250 m³ de béton classique ou cellulaire et, pour la seconde, à l'injection de 135 tonnes de tout-venant.

Précisons, en outre, qu'en dehors des travaux de mise en sécurité de ces secteurs, la société Géomines Caen avait édité en 1977 puis 1988 deux cartes respectivement à l'échelle du 1/2 500^{ème} et du 1/10 000^{ème}. Des zones de 50 m de large, liées aux travaux les plus superficiels et susceptibles d'être instables ou « zones classées X », sont cartographiées en surface (figure 20). Ces zones s'étendent :

- pour le flanc nord, depuis l'entrée des galeries de niveau B jusqu'à l'extrémité est de la mine ;
- pour le flanc sud, depuis l'entrée de la galerie de niveau I jusqu'à 500 mètres avant l'extrémité est de la mine.

Précisons que la version 1977, au 1/2 500^{ème}, de la carte de risque définit « le tracé d'une bande de 50 m de large sur une zone de risque d'affaissement minier, extrait du Plan d'Occupation des Sols ».

4.2.2 La fermeture des orifices débouchant en surface

La fermeture des orifices débouchant en surface concerne les ouvrages d'accès à la mine ainsi que les ouvrages de faibles dimensions (évents et piézomètres) réservés à l'aérage et au contrôle du stockage pendant son exploitation. Nous rappelons que ces derniers ouvrages, du fait de leurs très faibles dimensions, ne présentent pas de risques notables d'autant plus qu'ils ont été comblés (au béton).

En ce qui concerne les accès à la mine, le tableau ci-après (tableau 4) synthétise les observations du procès-verbal de recensement faites par la DRIRE (Ducoin, 1994) sur les travaux de fermeture réalisés par la société Géomines Caen, et celles effectuées, en 1999, par le BRGM pour la DRIRE de Basse-Normandie (Maurin, 1999).

Les ouvrages sont décrits, ici, dans l'ordre ouest en est, en commençant par le flanc nord.

ANNEXE A : Rapport INERIS DRS-04-48514/R02

| Dates de constat | Ouvrages | Constatations des travaux par l'ingénieur des mines | Remarques et observations (1999) |
|----------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| FLANC NORD | | | |
| 12.10.93 09.11.93 21.12.93 | Entrée galerie de niveau B (ORE 1) | <p>1) A la hauteur du puits IV (accès aux eaux de remplissage) construction d'un barrage en maçonnerie de 0,50 m d'épaisseur avec à la base des orifices de Φ 100 mm pour circulation des eaux de surverse venant de l'aval de la galerie B et en hauteur un orifice de Φ 100 mm pour prise d'échantillons d'air (un tube en Rilsan relie ce dernier orifice à l'entrée de la galerie B pour permettre des mesures d'air sans circuler dans la galerie).</p> <p>2) Toujours à la hauteur du puits IV, l'accès à une chambre voisine a été obstrué par un mur de maçonnerie de 0,50 m d'épaisseur. Le puits lui-même est fermé par une grille amovible et surmonté d'une dalle en béton de protection contre les chutes de bloc.</p> <p>3) A cent mètres en aval du bouchon décrit en (1) un barrage de retenue des eaux de surverse peut être mis en service et assurer une décantation grossière des eaux éventuellement polluées par les hydrocarbures.</p> <p>4) L'entrée de la galerie B est fermée par un mur en béton de 0,40 m d'épaisseur muni d'une porte blindée fermant à clef.</p> | <p>Fermeture de la galerie de niveau B, modifiée à la suite des observations enregistrées au CDH du 11.05.92 pour permettre un accès aux eaux de remplissage du flanc nord de la mine (surveillance et mise en place d'éventuelles mesures de sécurité) à partir du puits IV ainsi que des mesures d'atmosphère des galeries supérieures des cavités souterraines après le départ de Géomines Caen. La maîtrise de l'accès à la galerie B par la porte blindée appartiendra à la municipalité de Saint-André-sur-Orne (accord de principe du 24.03.94).</p> <p><i>Galerie d'exhaure du flanc nord. Elle a fait l'objet d'une visite détaillée, en 1999, en montrant une sécurité conforme avec les mêmes recommandations que celle de May-sur-Orne (Maurin, 1999).</i></p> |
| 19.10.93 09.11.93 24.11.93 10.12.93 | Puits de Saint-André (extraction,-393 m) (ORE 3) | <p>Démontage de toutes superstructures métalliques (derrick) et maçonneries.</p> <p>Renforcement de la base de la tête de puits par 6 x 3 = 18 forages (l= 5 m Φ= 40 mm) d'injection de ciment à - 11 m, à - 8 m et à - 5 m de la surface.</p> <p>Pose d'une dalle en béton armé de forme octogonale (5,10 m x 5,40 mm), d'épaisseur 0,40 m, reposant sur 4 poutrelles HEB 200 mm et ancrée à la maçonnerie en béton armé de la tête du puits (peut supporter un essieu de 13 t).</p> <p>Nettoyage complet du site.</p> | <p>Etude CERCHAR du 15.12.89.</p> <p>Calcul et dossier d'exécution de la dalle par l'entreprise QUILLERY en date 07.02.94.</p> <p>Rapport de contrôle de l'AIF (calcul et extension) en date du 16.02.94.</p> <p>N.B. : le recouvrement final en terre végétale n'a pas été exécuté à la demande du futur utilisateur du site.</p> |
| 24.11.93 10.12.93 | Petit puits de Saint-André (cheminée aérage) (ORE 2) | <p>Fermeture de la galerie inférieure d'accès aux petits puits de Saint-André par un mur en maçonnerie de 0,40 m et fermeture du puits lui-même par une dalle en béton armé (2,3 x 2 m) de 0,50 m d'épaisseur.</p> <p>Comblement de l'accès au puits par du remblai jusqu'à la surface du sol et le socle en béton supérieur entièrement reconstitué.</p> | <p>L'abri supérieur de l'accès aux petits puits de Saint-André a été conservé à la demande du futur utilisateur du site.</p> <p><i>(Bâtiment appartenant actuellement à un particulier).</i></p> |
| 12.10.93 19.10.93 | Puits de Verrières (aérage) (ORE 4) | <p>démolition des superstructures et pose d'un bouchon en béton armé de 0,70 m d'épaisseur s'appuyant sur la maçonnerie du puits.</p> | <p>par rapport au projet d'origine, les barbacanes ont été supprimées et le bouchon en béton armé est plus grand (3,6 m x 3,3 m au lieu de 3,5 m x 3,1 m).</p> |
| FLANC SUD | | | |
| 19.10.93 | Ancienne entrée niveau I à Bully (ORE 18) | <p>Accès déjà fermé par un mur maçonné de 0,60 m d'épaisseur recouvert d'un remblai total pour la banalisation du site.</p> <p><i>Galerie d'aérage comblée à 30 m au Nord-Ouest.</i></p> <p><i>Fontis de l'éboulement de 1995 visible à 50 m de la cheminée (« fontis de Bully ») avec protection sommaire de grillage et barbelés à présent inefficace</i></p> | <p>Le coulis de ciment superficiel prévu à l'origine n'a pas été réalisé pour permettre une reprise normale de la végétation sur le site.</p> <p><i>Un retalutage et la reprise de la végétation ne permet plus d'observer le site.</i></p> |
| 09.11.93 10.12.93 21.12.93 14.01.94 20.01.94 | Entrée galerie de niveau I de May-sur-Orne (ORE 5) | <p>1) Au niveau de la bouchure n°1, un mur de béton de 0,50 m ferme l'accès amont de la galerie sans obstruer la circulation des eaux de Rocquancourt (busées)</p> <p>A la partie inférieure du mur, des orifices permettent la circulation des eaux de surverse qui émergent en amont dans la galerie (bouchure n°6).</p> <p>De plus, un orifice de Φ 100 mm a été percé à la partie supérieure de la dalle pour permettre des prises d'air de la galerie. Cet orifice est relié à l'entrée de la galerie par un tuyau en Rilsan permettant des mesures d'air sans pénétrer dans la galerie.</p> <p>2) l'accès la bouchure n°1 a été décrocté jusqu'au niveau + 12,50 m NGF pour assurer une évacuation correcte et pérenne des eaux de surverse. Cet accès est protégé par une grille amovible.</p> <p>3) le long de la paroi sud de la galerie entre l'entrée et la bouchure n°1, 4 bouchures de liaison avec les travaux miniers supérieurs ont été fermées de façon sûre pour empêcher tout risque d'éboulement de matériaux dans la galerie.</p> <p>4) un barrage a été édifié à 40 m en amont du bouchon décrit en (1) pour retenue et décantation des eaux de surverse éventuellement polluées</p> <p>5) l'entrée de la galerie a été fermée par un mur en béton de 0,50 m porte blindée fermant à clef</p> | <p>Fermeture de la galerie de niveau I modifiée à la suite des observations enregistrées au CDH du 11.05.92 pour permettre un accès aux eaux de remplissage du flanc nord de la mine (surveillance et mise en place d'éventuelles mesures de sécurité) à partir de la bouchure n°1, ainsi que des mesures de l'atmosphère des galeries supérieures des cavités souterraines après le départ de Géomines Caen.</p> <p>La maîtrise de l'accès à la galerie I par la porte blindée appartient à la municipalité de May-sur-Orne (accord de principe du 24.03.94).</p> <p><i>La galerie a fait l'objet d'une visite détaillée en 1999 montrant une sécurité conforme aux exigences, avec recommandation d'un contrôle bi-annuel de l'exhaure(Maurin, 1999).</i></p> |

ANNEXE A : Rapport INERIS DRS-04-48514/R02

| | | | |
|----------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 24.11.93 10.12.93 21.12.93 07.01.94 14.01.94 | Grande descenderie de l'ouest (GDO, -150 m) (ORE 6) | Démontage de toutes les superstructures métalliques (derrick) et maçonneries. Renforcement de la base de la tête de puits par 18 forages (l=5 m $\Phi=40$ mm) d'injection de ciment à - 8,5 m, à - 5,5 m et à - 2,5 m de la surface Pose d'une dalle (bouchon ancré) en béton armé d'épaisseur 0,80 m, reposant sur 5 poutrelles HEB 200 mm et ancrée au revêtement en béton armé de la tête du puits (peut supporter un essieu de 13 t + le poids du remblai d'une hauteur de 7 m). | Etude CERCHAR du 15.12.89. Calcul et dossier d'exécution de la dalle par l'entreprise QUILLERY en date 07.02.94 Rapport de contrôle de l'AIF (calcul et extension) en date du 16.02.94 N.B. : le recouvrement du site par des remblais reste, à sa demande, à la charge du futur utilisateur du site et les barbacanes ont été supprimées. |
| 26.10.93 21.12.93 | Entré galerie niveau + 13 (ORE 20) | Fermeture de la galerie par un mur de maçonnerie de 0,50 m d'épaisseur muni à la base d'un espace d'évacuation des eaux de ruissellement. Camouflage de la fermeture par de très gros blocs de pierre. | Le projet initial de fermeture a été modifié pour permettre de masquer de façon efficace et permanente l'entrée de la galerie + 13. <i>Galerie servant d'exhaure au Puits Central : l'exhaure est maintenue mais l'entrée a été masquée efficacement par de gros blocs de pierre.</i> |
| 24.11.93 10.12.93 21.12.93 07.01.94 | Puits Central (ORE 19) | Démontage de toutes les superstructures métalliques (derrick) et maçonnerie. Renforcement de la base de la tête de puits par 18 forages (l=5 m $\Phi=40$ mm) d'injection de ciment à - 15 m, à - 12 m et à - 9 m de la surface, complété par 18 x 7 = 126 boulons de 2 m (1 par m ²). Pose d'une dalle en béton armé de forme octogonale (6,62 m x 6,61 m), d'épaisseur 0,40 m, reposant sur 4 poutrelles HEB 200 mm et ancrée au revêtement en béton armé de la tête du puits (peut supporter un essieu de 30 T). Nettoyage complet du site. | Etude CERCHAR du 15.12.89. Calcul et dossier d'exécution de la dalle par l'entreprise QUILLERY en date 07.02.94. Rapport de contrôle de l'AIF (calcul et extension) en date du 16.02.94. N.B. : le recouvrement final en terre végétale n'a pas été exécuté à la demande du futur utilisateur du site. <i>Dalle apparente.</i> |
| 14.01.90 13.11.90 | Descente d'Harcourt (Accès Salerno) (ORE 9) | Pose d'un mur en parpaings doublé d'une barrière en rails scellés, avec échappement inférieur pour circulation d'eau de ruissellement. | Travaux considérés comme concernant les niveaux supérieurs. <i>Ancienne descenderie transformée en dynamitière dans les morts-terrains. L'accès a été traité et se situe dans le dépôt de M. Salerno.</i> |
| 26.10.93 09.11.93 | Puits d'Harcourt (aéragé et secours) (ORE 10) | Démolition de la dalle supérieure ; création d'un bouchon en béton armé de 0,50 m ancré dans les parois maçonnées du puits, remblayage (1 m de tout-venant + 0,5 m de terre végétale). | Compte tenu de la bonne qualité des parois du puits, la dalle de fermeture a été relevée de 1,80 m par rapport au projet d'origine. Suppression des barbacanes. |
| 19.10.93 26.10.93 | Descenderie de la Hogue (ORE 11) | Pose d'un bouchon en béton armé de 0,50 m d'épaisseur ancré dans les parois à l'entrée de la descenderie (2,5 x 1,5 m), remblayage du puits d'accès et recouvrement général du site par de la terre végétale (0,50 m) pour la banalisation du site. | Par rapport au projet d'origine, le bouchon a été implanté verticalement et non perpendiculairement à la pente et la dalle de béton supérieure de protection du site posée par les mineurs (e = 1 m) a été laissée en place. Suppression des barbacanes. <i>Etat contrôlé par ANTEA, en 1999, et jugé satisfaisant (Maurin, 1999).</i> |
| 17.12.91 19.10.93 | Puits de Rocquancourt (ORE 13) | Le système de protection contre la chute de bloc dans la première partie de la galerie d'accès aux sources de Rocquancourt a été réalisé au 3 ^{ème} trimestre 1991. L'obturation de l'accès à la galerie de niveau I a été réalisé par un mur en parpaings. | Par convention en date du 08.12.93, le syndicat d'exploitation des eaux d'exhaure des mines de May/Orne a accepté la reprise de l'exploitation et de la surveillance du puits de Rocquancourt et de la galerie d'accès aux sources de Rocquancourt |
| 23.01.90 12.10.93 | Puits Taraud (ORE 12) | Obturation des accès entre le puits et les galeries minières au niveau - 42,50 m NGF et au niveau I (avec siphon pour permettre la circulation des eaux de Rocquancourt). | Par convention en date du 26.04.90 la Société « La Grande Fenne » et « La Crête de Fontenay » ont accepté la reprise de l'exploitation et de la surveillance du Puits Taraud. |
| 09.11.93 24.11.93 | Puits ULV (ORE 14) | La dalle de recouvrement du puits en béton armé (1 m d'épaisseur) a été conservée. Les tubes de $\Phi=100$ mm et $\Phi=615$ mm qui la traversaient ont été enlevés et la dalle reconstituée en béton armé. Une galerie latérale d'accès au puits a été fermée par un mur de maçonnerie de 0,50 m d'épaisseur. | Compte tenu de la solidité de la dalle de recouvrement du puits, le bouchon intérieur prévu à l'origine n'a pas été réalisé (double emploi). |

Tableau 4 – Extrait du procès-verbal de récolement des travaux de fermeture du stockage souterrain d'hydrocarbures liquides de May-sur-Orne du 15 avril 1994, concernant les accès à la mine de May-sur-Orne (d'après Ducoin, 1994) avec mention de quelques observations effectuées par le BRGM pour la DRIRE en 1999.

5. DESORDRES LIES AUX ANCIENNES EXPLOITATIONS MINIERES

5.1 DESORDRES RECENSES EN SURFACE

A ce jour, moins d'une dizaine d'effondrements localisés anciens ou récents ont été recensés (Annexe A, carte informative) ; aucun effondrement généralisé à caractère brutal n'a eu lieu (Maury, 1974).

Plusieurs secteurs des deux flancs du synclinal ont été affectés de désordres. La totalité des désordres en surface connus à ce jour sont des effondrements localisés au droit des exploitations (anciennes) à faible profondeur. Ils se sont tous produits après que l'exploitation des chantiers ait été achevée.

Ces effondrements localisés sont consécutifs à la remontée d'un éboulement du fond jusqu'en surface dont l'origine est la rupture du stot de protection séparant le toit de la chambre de la surface et appelé souvent « pilier de couronne » ou « couronne » (Figure 13). Ce type de désordre peut provoquer en surface des effondrements de forme circulaire et relativement limités (fontis) ou des effondrements localisés de plus grande dimension (en forme de gouttière suivant le filon ou la couche).

Sur le flanc nord

Plusieurs effondrements localisés se sont produits entre 1958 et 1959, puis en juin 1973. Ces effondrements étaient situés à environ 1 km à l'est de l'entrée de la galerie de niveau B, en limite sud des communes de Saint-André-sur-Orne et de Saint-Martin-de-Fontenay. Aujourd'hui remblayés et les terrains remodelés, ces effondrements ne sont plus guère visibles. Ils s'agit probablement d'effondrements localisés de petites dimensions (fontis) résultant de l'éboulement des terrains de couverture à l'emplacement de chantiers miniers proches de la surface. En effet il semble que l'épaisseur du recouvrement au-dessus des chantiers n'excède pas 10 m, dont au maximum 5 m de terrains jurassiques (calcaires altérés de mauvaise tenue).

N'oublions pas également que certaines zones considérées, à l'époque, comme « zones de stabilité douteuse » et sièges d'éboulement importants ont été traitées préventivement mais très localement (par comblement) pour éviter de possibles effondrements en surface (§.5.2.1). Il s'agit essentiellement des zones suivantes :

- la zone appelée « N1 – Ferrière 1986 », sous la commune de Fontenay-le-Marmion (figure 14) ;
- la zone appelée « N6-1 – Eboulement 1918 », sous la commune de Saint-Martin-de-Fontenay (figure 17).

Sur le flanc sud

On recense deux d'effondrements localisés de nature différente :

- le premier effondrement localisé résulte de l'éboulement d'une galerie très proche de la cheminée de Bully plutôt que du débouillage des remblais d'une des cheminées d'aéragage (hypothèse parfois émise). A ce jour, les cheminées ont été remblayées et ne sont plus visibles. Cet effondrement est mentionné dans le rapport du BRGM pour la DRIRE de 1999 (Maurin, 1999). Il s'agit d'un fontis récent (1995) qui n'a guère évolué depuis. De forme circulaire, le diamètre du cratère est de l'ordre de 8 m et sa profondeur d'une dizaine de mètres (Photographie 6). Ses flancs y sont très raides. Au fond du trou, on distingue toujours la présence de vides non comblés (ancienne

galerie). La protection est sommaire (grillage et fils barbelés) et , comme l'indiquait le BRGM, « *son remblaiement est préconisé, mais il doit être précédé par la pose d'un bouchon en béton* » ;

- le second correspond à un effondrement localisé plus important, longitudinal et en forme de gouttière (aujourd'hui en partie remblayé). Ses dimensions sont de 25 à 30 m de largeur pour une longueur voisine de 150 m et une profondeur actuelle de 8 à 10 m. Il serait manifestement dû à la rupture de la « couronne » (toit immédiat) proche de la surface, sur le flanc du coteau bordant l'Orne, à un endroit où la dalle des calcaires jurassiques n'est pas présente. Cet effondrement aurait eu lieu en 1919 et résulterait de l'éboulement des terrains des chantiers des niveaux supérieurs en suivant, en surface, la trace de ces chantiers (Maurin, 1999). Cet accident s'est produit sur la propriété de Monsieur Guillot (Photographie 9). Notons que ce type d'effondrement est classique dans les exploitations minières pentées des bassins ferrifères de l'ouest.

Parmi les zones de « stabilité douteuse » ayant fait l'objet de travaux spécifiques de mise en sécurité on peut citer :

- la zone des chambres PK 1244 et PG 630 sous la commune de Fontenay-le-Marmion, dans la zone appelée « la Hoguette » (figure 19).

5.2 ÉBOULEMENTS AU FOND

5.2.1 Les éboulements ayant affecté la mine

Quartiers anciens proches de la surface

Plusieurs éboulements ont été recensés au fond après l'exploitation des chantiers sans avoir de conséquence en surface. Ils sont mentionnés dans les études de stabilité et de reconnaissance (cartographie complète de la mine) effectuées dans le cadre du stockage d'hydrocarbures (Rapport GEOSTOCK n°36 VM/KC, janvier 1971 ; Maury, 1974).

La plupart d'entre eux sont cartographiés et répertoriés comme des éboulements provenant du toit des chambres ou des ruptures de stots. Ils sont essentiellement situés dans les niveaux les plus superficiels, où le minerai et les calcaires jurassiques montraient une mauvaise tenue. Trois de ces zones dites « instables », situées à proximité de la surface, ont fait l'objet de travaux de confortement lors de la mise en sécurité pour l'exploitation du stockage d'hydrocarbures (§.5.2.1).

Quartiers plus récents et plus profonds

En dehors des quartiers anciens situés à faible profondeur (quartiers exploités par dépilage), les éboulements sont rares et généralement de faible extension (30 à 50 m) montrant une forme classique de cloche ouverte dans le toit. On dénombrerait ainsi 6 éboulements localisés dans le flanc sud et 2 éboulements dans le flanc nord (Maury, 1974).

Un seul éboulement véritablement important est largement décrit : celui du flanc nord dit « éboulement du niveau L », éboulement qui aurait pu avoir « *une influence catastrophique sur la stabilité des terrains sus-jacents* » (Tincelin et Vouille, 1970, rapport de synthèse GEOSTOCK, janvier 1971).

5.2.2 Cas de l'éboulement du niveau L

Dans le cadre de l'évaluation de la stabilité de travaux miniers pour le stockage d'hydrocarbures, la société GEOSTOCK a analysé un éboulement particulier, situé au niveau L à environ 220 m de profondeur.

Observation de l'éboulement

En effet, durant l'exploitation de l'étage L (cote NGF – 160 m sur le flanc nord²), à environ 100 m à l'est du Puits Saint-André, un pilier de la chambre 503 (entre les étages L et P) a « lâché », des blocs du toit sont venus et la base de la galerie de niveau L s'est effondrée sur une longueur de 30 à 50 m.

D'après les mineurs, cet éboulement ne résulte pas de l'écrasement du pilier dans le toit, mais d'une erreur d'exploitation. Cette hypothèse fut confirmée par l'enquête qui montra que la tête du pilier avait été sous-cavée par un coup de mine malheureux dans le toit, entraînant la progression de l'éboulement. L'éboulement progressa dans le toit perpendiculairement à la couche (dans un plan horizontal) par claquage successifs des dalles formant le bas-toit (alternance, sur une dizaine de mètres, de bancs de grès raides de 50 cm d'épaisseur et de schistes argileux compacts formant les joints, avant de passer aux schistes à calymènes massifs).

Analyse et évolution

Suites à ces observations, GEOSTOCK soupçonna que cet éboulement devait être dû à une faiblesse « organique » dans le toit : « *les contraintes de cisaillement théoriques ne sont jamais assez fortes pour cisailer un minerai massif* » (Rapport GEOSTOCK, 1971).

GEOSTOCK engagea alors une modélisation de cet éboulement afin d'estimer son évolution dans le temps. Leurs conclusions montrèrent que, compte tenu de l'état des contraintes mécaniques et de la portée des schistes à cet endroit, l'éboulement devait se stabiliser après 28 m de progression horizontale dans le toit (schistes). De plus, l'éboulement ne devait pas progresser plus haut dans le toit vers la surface (Rapport GEOSTOCK, avril 1971). Pour vérifier cette analyse, des dispositifs de surveillance furent implantés à différents endroits sur les conseils de MM. Tincelin et Vouille (rapport de synthèse GEOSTOCK, janvier 1971).

Partant de conclusions favorables relatives à la stabilité de la mine (« *la mine apparaît d'une stabilité remarquable, ne montrant aucun effondrement généralisé, spontané, et n'en ayant jamais montré au cours des 80 années d'exploitation* »), GEOSTOCK aurait envisagé de laisser s'autocomblent cet éboulement par foisonnement des matériaux éboulés. Toutefois, pour garantir une meilleure stabilité à long terme du stockage et des infrastructures servant au stockage (puits Saint-André), les vides résiduels autour de cet éboulement furent finalement remblayés.

² Nous rappelons que le pendage y est subvertical.

6. ANALYSE SYNTHETIQUE DES RISQUES D'INSTABILITES POTENTIELS

L'identification et l'évaluation des aléas sur le bassin ferrifère de May-sur-Orne fait appel aux connaissances acquises lors de la phase informative, en particulier l'observation des désordres (§ 6).

Néanmoins, cette démarche, à caractère prévisionnel, 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 (§ 7.1).

Cette analyse est ainsi complétée par une étude plus globale (par retroanalyse) qui considère non plus le seul bassin de May-sur-Orne mais l'ensemble des bassins de risque appartenant à un même contexte, comme ceux des gisements ferrifères de l'Ouest (§ 7.2).

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 (§ 7.3).

6.1 EXPERTISES RELATIVES A LA STABILITE DE LA MINE

Dans le cas présent, les avis et expertises formulés sur la stabilité des ouvrages miniers concernent la faisabilité géotechnique du stockage souterrain à la fermeture de la mine. Ils émanent essentiellement de MM. Tincelin, Vouille et Mayer (rapports pour GEOSTOCK, dossier n°36 VM/KC, janvier 1971), ainsi que de M. Maury (Chef du service Géotechnique à la Société GEOSTOCK).

Ces études, réalisées pour et par la société GEOSTOCK, avaient pour objectif de garantir la stabilité des ouvrages souterrains, à court et moyen termes, pour l'exploitation du stockage d'hydrocarbures.

Face aux problèmes des éboulements du flanc nord et les craintes concernant un éventuel effondrement étendu en surface étudiés par MM. Tincelin et Vouille, GEOSTOCK a mis en place une surveillance des quartiers du flanc nord au moyen de 30 cannes de convergence. Durant la période de mesure, aucun mouvement significatif n'a été relevé sauf en deux endroits, à proximité des éboulements du niveau L et du niveau V a priori réputé stable par les mineurs (rapport GEOSTOCK, avril 1971). Précisons que ces deux zones furent néanmoins remblayées (Maury, 1972).

Monsieur Mayer (Ingénieur Général des Mines) a examiné ensuite les conditions de stabilité de la mine sous l'aspect purement géomécanique. Des essais de caractérisation ont été réalisés en laboratoire (compression uniaxiale et essais brésiliens) sur le minerai, les grès du mur, les grès et les schistes du toit ainsi que quelques mesures ponctuelles pressiométriques au vérin plat. Prenant l'hypothèse que $\sigma_h/\sigma_v = 1$ (contrainte horizontale égale à la contrainte verticale) et $\nu = 0,25$ (coefficient de Poisson), M. Mayer a estimé par différents calculs numériques, calés sur les essais au vérin plat, que la contrainte dans les piliers était égale à 110 MPa, environ, pour une résistance à la compression uniaxiale, R_c , de 130 MPa (en évaluant le coefficient de sécurité à 1,3). Concluant que les piliers travaillaient en dessous de leur résistance son avis rejoint celui de M. Tincelin sur la stabilité de la mine (rapport GEOSTOCK, avril 1971).

Suite aux observations faites dans les vieux travaux et aux réflexions des précédents experts, M. Maury (Société GEOSTOCK) a considéré que la stabilité des ouvrages souterrains était liée à un effet de voûte dans un toit particulièrement raide : « *Cependant, les observations dans certaines chambres ont montré que les piliers pouvaient travailler au-delà d'une rupture partielle sans affecter la stabilité de l'ensemble. Ainsi, le niveau de contrainte de ces piliers n'est pas directement reliable à la stabilité (...), et qu'il doit exister un autre agent de soutènement naturel* ».

Il poursuit ainsi : *La tenue des chambres de très grande portée que nous constatons avec des piliers même cassés, permet de penser (...) que les composantes latérale et longitudinale des contraintes par rapport au gisement doivent jouer ce rôle. Les dalles du toit, comme du mur, apparaissent alors non seulement, encastrées le long des stots, mais soumises à une sorte de précontrainte. A ce moment, les piliers n'interviennent plus que pour maintenir le frettage par collage de la dalle du toit immédiat, évitant éventuellement son flambage (...)* » (Maury, 1974).

Pour conclure, en dépit de ces résultats très intéressants et plutôt favorables, il faut en nuancer quelque peu la teneur en précisant :

- que ces études peuvent paraître, à présent, un peu anciennes, les techniques de caractérisation, d'auscultation (pressiométrie) et de calcul ayant significativement progressé depuis lors ;
- qu'aucune étude n'a été véritablement réalisée pour l'analyse du comportement « à long terme » de l'ensemble des exploitations de la mine de May-sur-Orne, si l'on fait abstraction des mesures et travaux adoptés dans le cadre de la fermeture de la mine et du stockage (§ 5.2.1), dont la cartographie des risques qui a abouti à la délimitation des zones douteuses « classées X », versions 1977 et 1988, (figure 20). Ceci est particulièrement vrai pour les travaux les plus superficiels dont les conditions de stabilité dépendent plus du phénomène d'altération des ouvrages que de l'état de contraintes.

6.2 APPORT DE LA RETROANALYSE SUR L'ANALYSE DES RISQUES DANS LES GISEMENTS FERRIFERES 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/Orne, La Ferrière-aux-Etangs et Segré).

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

| | | MAY/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 séparées par un intercalaire de quelques mètres au maximum) | 1 | 1 | 2 (couches A et B, séparées par un intercalaire de 40 à 50 m, environ) |
| Puissance | | 3,5 à 4,0 m (localement : 6 à 7 m) | 3 m (localement : 6 m) | 3 à 4 m (localement : 5 m) | A : 1,5 à 1,8 m B : 0,8 à 1,4 m |
| Recouvrement jurassique discordant | | 0 à 60 m (calcaire jurassique) | 0 à 50 m (calcaire jurassique) | absente | absente |
| Zone d'altération du minerais | | 20 à 50 m sous le contact jurassique | 20 à 50 m sous le contact jurassique | 20 à 80 m | 20 à 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 5 : 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 débourages 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/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 21 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 recensent aucun accident de type effondrement généralisé sur aucun de ces bassins exploitant le minerai de fer.

Les seuls effondrements généralisés connus dans les bassins synclinaux de l'Ouest (donnés dans le tableau 5) sont exclusivement le fait d'exploitations ardoisières dont les facteurs communs sont leur géométrie complexe et la présence de vides importants (Schwartzmann, 1991 ; Tritsch, 2000).

En outre, ces derniers arguments, pris en compte et vérifié dans l'analyse par modélisation numérique décrite ci-après, permettent d'exclure, au vu des connaissances actuelles, le scénario d'effondrement généralisé à caractère spontané sur les exploitations des mines de fer.

6.3 ANALYSE DU RISQUE D'AFFAISSEMENT PAR MODELISATION NUMERIQUE

Le bassin de May-sur-Orne 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 les anciens travaux miniers peuvent être le siège de phénomènes d'affaissement, tels que ceux de Soumont, même si l'analyse informative ne mentionne aucun effondrement ni affaissement quelconque.

Notons que les épontes des couches exploitées à May-sur-Orne, formées essentiellement par des grès (feldspathiques) au mur et des schistes au toit de la couche sont sensiblement aussi résistantes que les épontes des autres bassins ferrifères de Normandie (comme à Soumont, où les épontes sont formées de schistes très résistants).

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, 2003).

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 analyse numérique montre que le processus d'affaissement peut être exclu dans les conditions suivantes :

| Pendage | Taux de défruitement ($\tau\%$) | Ouverture (w) |
|----------------|---------------------------------------------------|----------------------|
| > 55° | $\leq 90 \%$ | ≤ 4 m |
| 45° à 55° | $\leq 90 \%$ | ≤ 3 m |
| | $\leq 80 \%$ | ≤ 5 m |
| 30° à 45° | $\leq 80 \%$ | ≤ 3 m |
| | $\leq 70 \%$ | ≤ 5 m |

*Tableau 6 : conditions d'exclusion du processus d'affaissement
(Renaud, 2003)*

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

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

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

Les travaux miniers du gisement de May-sur-Orne sont systématiquement placés dans les conditions suivantes :

Flanc nord :

- pendage subvertical ($> 80^\circ$) ;
- taux de défruitement $\leq 85 \%$ (chambres magasins) ;
- ouverture comprise entre 4 et 7 m (localement plus).

Malgré une ouverture relativement importante des chantiers ($w \geq 4$ m), le très fort pendage (80° à 90°) permet d'exclure sans ambiguïté le phénomène d'affaissement sur le flanc nord du gisement (résultats tirés de l'analyse numérique).

Flanc sud :

- pendage compris entre 45° (ouest) et 60° (est) ;
- taux de défruitement ≤ 85 % (chambres magasins) ;
- ouverture comprise entre 3 et 5 m (localement plus).

Sur le flanc sud, compte tenu de la baisse du pendage (45 à 60°), on ne peut pas totalement exclure le phénomène d'affaissement, même si les autres caractéristiques (défruitement et ouverture) sont sensiblement proches des valeurs limites d'exclusion.

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 ;
- 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 (5 m). On notera, plus précisément, que l'incertitude de calage est estimée à 5 m sur le flanc sud et 10 m sur le flanc nord (rapports GEODERIS 2003 et BRGM 2003) ;
- les secteurs où les chambres ne sont pas cartographiées sur le plan (flanc sud) ;
- 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 ;
- la localisation des 3 zones de travaux remblayées par la société Géomines Caen à la fermeture du stockage ;
- les courbes de niveau issues du SCAN 25 ;
- les courbes isopaques supposées (pas de 10 m) du recouvrement argilo-calcaire jurassique.

Les principales données acquises sur la mine de May-sur-Orne, lors de la phase informative, sont présentées dans la fiche synthétique suivante (tableau 7). On notera les caractéristiques suivantes :

- R_c = résistance à la compression uniaxiale ;
- R_t = résistance à la traction ;
- E = module d'élasticité ou « module de Young ».

| DONNEES DISPONIBLES | | CARACTERISTIQUES | | VALEURS | SOURCE |
|---------------------|-----------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|
| EXPLOITATION | Date | 1896-1968 + 1972-1993 (stockage hydrocarbures) | | | archives |
| | Type | Chambres magasins 2 couches A et B avec un intercalaire 40 m | | | archives |
| | Eau | Mine ennoyée sauf galerie des morts-terrains au contact des calcaires jurassiques | | entre - 10 m/TN vers l'Ouest et -70 m/TN vers l'est | archives |
| | Profondeur | de 0 à 460 m | | | archives |
| GEOMETRIE | | FLANC NORD | FLANC SUD | | archives |
| | Dimensions mine | largeur = 150 m et longueur = 3,5 km | largeur = 450 m et longueur = 6 km | | archives |
| | Ouverture | 3 à 5 m | | | archives |
| | Pendage | de 85° à 90° | de 45° à 65° | | archives |
| | Taux de défrusement | > 80 % | | | archives |
| | Faïlles | transversales et nombreuses | faïlle longitudinale au jeu inverse faisant chevaucher la couche (bicouche) entre niveau V et niveau X sur une largeur de 170 m (intercalaire de 25 à 35 m) + faïlles transversales nombreuses | | |
| GEOMECHANIQUE | Couche | monocouche sauf pour le flanc Sud dans le secteur faillé | | Flanc Nord : E = 87 GPa ; Rt = 10 MPa ; Rc = 100 MPa Flanc Sud : E = 75 GPa ; Rt = 14 MPa ; Rc = 170 MPa | étude Géostock cf. [28] |
| | Toit | Alternances schistes/grès sur 10 m puis schistes ardoisiers | | Schistes: Flanc Nord : E = 70 GPa ; Rc = 25 MPa Flanc Sud : E = 45 GPa ; Rc = 25 MPa | étude Géostock cf. [28] |
| | Mur | grès feldspathiques | schistes ardoisiers dans le secteur faillé ou grès feldspathiques | grès de très bonne qualité : difficulté de sciage et de carottage | étude Géostock cf. [28] |
| | recouvrement en discordance | calcaires de 0 à 60 m depuis l'Ouest vers l'Est | | | archives |
| DIVERS | Enjeux | Villes de Saint-Martin-de-Fontenay et Saint-André-sur-Orne + quelques fermes | Villes de May-sur-Orne, Fontenay-le- Marmion, Rocquancourt et village de Lorguichon + quelques fermes | | visite sur site |
| | Plans disponibles | plans 1/2500 et coupes 1/2500 et 1/500 | | | archives |
| | Effondrement connus | effondrements localisés par rupture de couronnes proches de la surface ou débouillage de puits, pas d'affaissement ni d'effondrement généralisé ; éboulements au fond du toit progressant dans les schistes et grès sans conséquence en surface | | | étude Géostock + visite sur site |
| | Surveillance | quelques travaux de confortement liés au stockage et surveillance pendant stockage : aucun indice d'instabilité et de mouvement de terrain relevé | | | étude Géostock |

Tableau 7 – Fiche synthétique des données disponibles sur la mine de May-sur-Orne

PARTIE II

EVALUATION DES ALEAS

1. IDENTIFICATION DES ALEAS « MOUVEMENTS DE TERRAIN » RETENUS SUR LE GISEMENT DE MAY-SUR-ORNE

Introduction

La présente étude d'évaluation et de cartographie des risques miniers menée sur le territoire des huit communes de Maltot, Feuguerolles-Bully, Saint-André-sur-Orne, Saint-Martin-de-Fontenay, May-sur-Orne, Fontenay-le-Marmion, Rocquancourt et Saint-Aignan-de-Cramesnil, ne concerne que les aléas géotechniques de « mouvements de terrain », liés aux exploitations minières. 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.

Les différents aléas

La phase informative a révélé sur les travaux miniers des flancs du synclinal du bassin de May-sur-Orne 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} siècle ou début du XX^{ème}, 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 (type effondrement « Guillot ») ;
- les phénomènes d'effondrements localisés de plus petites dimensions liés à la rupture d'anciens orifices miniers (puits et cheminées d'aérage) 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 (type « fontis de Bully ») ;
- les phénomènes d'affaissement (non observés) que l'on ne peut totalement exclure sur le flanc sud par référence aux événements passés observés sur le bassin ferrifère de Soumont (§ 6.2).

On a considéré, toutefois, au vu des connaissances acquises, que les arguments développés par retroanalyse (§ 6.2) ou calcul numérique (§ 6.3) permettent d'exclure le scénario d'effondrement généralisé à caractère spontané sur les exploitations minières des bassins ferrifères de l'ouest étudiés, en particulier sur le bassin de May-sur-Orne.

2. METHODE D'EVALUATION DE L'ALEA

2.1 PRINCIPE

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

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

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

2.2 QUALIFICATION DE L'INTENSITE ET DE LA PROBABILITE D'OCCURRENCE DES ALEAS

Notion d'intensité

L'intensité de chaque aléa peut être hiérarchisée en plusieurs niveaux à partir de critères tels que l'importance des dégâts prévisibles pour un phénomène donné en se basant sur les observations et données fournies par l'analyse informative et les retours d'expérience. Des exemples de qualification d'aléas sont donnés ci-après.

Notion de probabilité d'occurrence

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

La notion de probabilité d'occurrence est appréhendée par le concept de « prédisposition du site » vis-à-vis d'un type donné d'instabilité. Des critères, si possible paramétriques, témoignant de la « sensibilité » ou de « l'activité » du phénomène redouté sont donc établis en fonction de la configuration étudiée. L'analyse de la fréquence des événements passés fait, naturellement, partie intégrante de la démarche.

3. DESCRIPTION DES PHENOMENES ET EVALUATION DES ALEAS

3.1 LES EFFONDREMENTS LOCALISES

Définition et effets en surface

Un effondrement localisé se caractérise par l'apparition soudaine en surface d'un cratère d'effondrement dont l'extension horizontale varie généralement de quelques mètres à quelques dizaines de mètres de diamètre. La profondeur du cratère dépend principalement de la profondeur et des dimensions des travaux souterrains mais il n'est pas rare qu'elle atteigne une dizaine de mètres même si, dans la majorité des cas, elle se limite à quelques mètres. Dans le cas de gisements pentés, l'effondrement peut prendre la forme d'une gouttière ou d'une tranchée allongée dans la direction du plan de la veine.

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

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

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

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

La forme du cratère en surface dépend étroitement de la nature des terrains et des caractéristiques d'exploitation mais peut différer du fontis par un contour plus allongé, aligné dans l'orientation de la veine. Si la largeur de l'effondrement n'excède ainsi que très rarement quelques dizaines de mètres, son extension longitudinale peut être plus importante dans le sens du filon ou de la veine (ce qui est le cas de l'effondrement « Guillot »).

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

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

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

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

La manifestation en surface peut ainsi se restreindre à un cratère de petite taille (quelques mètres de diamètre au maximum) ou générer des désordres plus importants (diamètre pouvant dépasser une dizaine de mètres). Des effondrements de diamètre beaucoup plus grands sont tout à fait exceptionnels et correspondent généralement à la présence de sables bouillants proches de la surface.

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

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

On parle de « fontis » lorsque le désordre qui affecte la surface résulte de la remontée au jour d'un éboulement initié au sein d'une excavation souterraine (galerie, chambre d'exploitation, etc.). Lorsque la voûte initiée par la rupture du toit de l'excavation ne se stabilise pas mécaniquement du fait de la présence de bancs résistants et massifs au sein du recouvrement, elle se propage progressivement vers la surface et, si l'espace disponible au sein des vieux travaux est suffisant pour que les matériaux éboulés et foisonnés puissent s'y accumuler sans bloquer le phénomène par « autocomblement », la voûte peut atteindre la surface du sol.

L'apparition de ce type de désordre en surface ne concerne que les travaux peu profonds. Les retours d'expérience menés sur plusieurs bassins miniers ont ainsi montré que, sauf spécificité géologique ou d'exploitation, au-delà d'une cinquantaine de mètres de profondeur (et parfois moins), les anciens vides miniers (dans des gammes d'ouvertures classiques : 2 à 4 ou 5 m) n'étaient plus susceptibles de provoquer ce phénomène en surface.

Qualification de l'intensité

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

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

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

| Classe d'intensité | Diamètre de l'effondrement <i>(valeurs purement indicatives)</i> |
|---------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| Très faible | Effondrements autocomblés, à proximité immédiate de la surface (profondeur centimétrique) |
| Faible | $\varnothing < 2-3 \text{ m}$ |
| Moyen | $2-3 \text{ m} < \varnothing < 10 \text{ m}$ |
| Fort | $\varnothing > 10 \text{ m}$ |

Tableau 8 : Classes d'intensité de l'aléa « effondrement localisé »

Qualification de la probabilité d'occurrence

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

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

Les principaux facteurs de prédisposition spécifiques aux phénomènes identifiés sur May-sur-Orne sont les suivants :

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

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

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

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

- cas de l'effondrement de la structure mise en place en tête d'un puits vide (cuvelage, plancher, voûte en briques, dalle, bouchon, etc) : caractéristiques de cette structure, altérabilité dans le temps, nature du cuvelage, nature résistance des terrains encaissants ;
- cas du débouillage d'un puits remblayé : conditions hydrogéologiques (remontée des eaux, battements de nappe), présence de galeries connectées au puits et non obturées par des serrements, ancienneté du remblayage, facteurs défavorables (vibrations, surcharges, variations du niveau de la nappe, etc.).

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

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

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

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

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

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

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

3.2 L'ALEA « AFFAISSEMENT »

Définition et effets en surface

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

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

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

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

a) Cas des exploitations en plateure (pendage <math>< 20^\circ</math>)

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

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

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

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

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

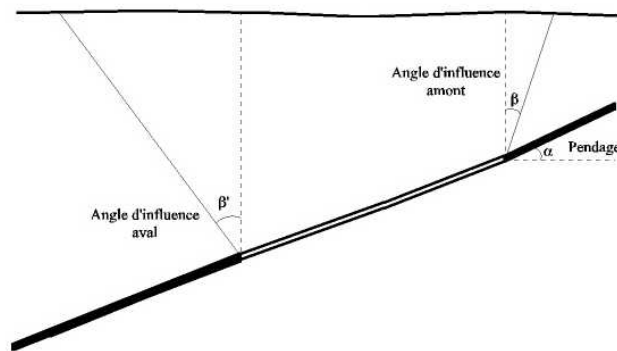


Schéma montrant la dissymétrie des angles d'influence amont et aval en gisement penté

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

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

Qualification de l'intensité

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

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

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

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

| Classe d'intensité | Déformations différentielles horizontales ϵ (en mm/m) | Mise en pente μ (en %) |
|---------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| Négligeable | $\epsilon < 1$ | $\mu < 0,2$ |
| Très faible | $1 < \epsilon < 5$ | $0,2 < \mu < 1$ |
| Faible | $5 < \epsilon < 10$ | $1 < \mu < 2$ |
| Moyen | $10 < \epsilon < 30$ | $2 < \mu < 6$ |
| Fort | $\epsilon > 30$ | $\mu > 6$ |

*Tableau 9 : Classes d'intensité de l'aléa « affaissement »
(valeurs purement indicatives)*

Qualification de la probabilité d'occurrence

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

a) Exploitations menées par foudroyage

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

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

b) Exploitations partielles menées par chambres et piliers

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

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

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

c) Exploitations pentées et filoniennes

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

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

Le processus d'affaissement, étudié plus spécifiquement sur les gisements ferrifères pentés de l'Ouest par modélisation numérique (Renaud, 2003), a été analysé au § 7.3 pour évaluer les facteurs de prédisposition favorables ou non à la réalisation du phénomène.

4. ZONAGE ET CARTOGRAPHIE DES ALEAS

4.1 LIMITES ET MARGE DE SECURITE

Marge d'influence

La représentation des contours délimitant les zones d'aléas s'établit en considérant, dans l'analyse, outre la zone sous-minée directement affectée par les travaux miniers, la zone située en bordure susceptible d'être influencée par l'évolution du désordre attendu. Cette dernière zone constitue la « marge d'influence » qui, depuis l'aplomb des travaux, s'étend jusqu'à une limite en surface matérialisée par l'angle d'influence des travaux miniers, qu'il s'agisse d'un effondrement localisé ou d'un affaissement (figures 23 à 25).

Marge d'incertitude

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

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

Marge de sécurité

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

4.2 CARTOGRAPHIE DE L'ALEA

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

5. EVALUATION DES ALEAS DANS LE BASSIN DE MAY-SUR-ORNE

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 (partie II).

Ils concernent :

- les effondrements localisés à l'aplomb des chantiers proches de la surface (anciens travaux) par rupture des structures souterraines, couronnes, stots de protection, piliers ou planches, ou éboulement de galerie ;
- les effondrements localisés de moindre dimensions (de type « fontis ») liés à la rupture des anciens orifices miniers (puits ou cheminées d'aération) ou à l'éboulement de galeries d'accès isolées ;
- les phénomènes d'affaissement possibles des chantiers (chambres magasins) situés à plus grande profondeur (entre 60 et 400 m de profondeur, environ).

5.1 LES EFFONDREMENTS LOCALISES

5.1.1 Effondrements localisés à l'aplomb des chantiers peu profonds

Ces chantiers, chambres, galeries de niveau ou galeries d'accès (galerie de niveau B pour le flanc nord, galerie I et galeries tracées dans les morts terrains pour le flanc sud) sont situés sous un recouvrement dont la hauteur varie entre quelques mètres seulement (à l'ouest) et une cinquantaine de mètres, voire un peu plus (à l'est).

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 (pour ne pas dire) très anarchique, à leur ancienneté et à leur état général fortement dégradé marqué par de nombreux éboulements (figures 14 à 19).

Les secteurs menacés de risque d'effondrement localisés à l'aplomb des chantiers les moins profonds (recouvrement de calcaire jurassique inférieur à une trentaine de mètres) affectent la quasi totalité du gisement minier, à proximité des affleurements de la couche de minerai, aussi bien sur le flanc nord que sur le flanc sud. Ils sous-minent des zones urbanisées (généralement pavillonnaires) principalement sur les bordures sud des communes de Saint-Martin-de-Fontenay (flanc nord), May-sur-Orne et Fontenay-le-Marmion (flanc sud).

Configurations d'exploitation – état des travaux

Les désordres observés se produisent à l'aplomb des chantiers miniers proches de la surface, poussés trop haut vers l'affleurement et qui laissent une hauteur de stot de protection trop faible (< 30 m) dans un milieu rocheux altéré.

On a une bonne représentation de la configuration et de l'état de ces chantiers sur la carte de reconnaissance établie au 1/500ème par GEOSTOCK, en 1973, pour les parties les plus superficielles (figures 14 à 19), l'état des travaux interdisant la reconnaissance des niveaux inférieurs.

Pour compléter ces informations, précisons qu'une reconnaissance de la galerie des « morts-terrains » a été effectuée en 1999 par ANTEA (Martin, 1999) sur un secteur limité du flanc sud (Fontenay-le-Marmion et Rocquancourt) en vue de la réalisation de la déviation routière de May-sur-Orne. Les rapports d'observations, riches de précision,

indiquent une mauvaise tenue du toit calcaire, fortement lité, altéré, friable avec des joints marneux et que « *cette configuration donne lieu à un effondrement progressif du toit de la galerie (...). Pour certains tronçons, le toit de la galerie est déjà surmonté de plusieurs mètres, par suite d'effondrements successifs* ». Il est également fait mention dans ce rapport de l'importance des éboulements dans les niveaux sous-jacents, exploités par dépilage partiel. Les photos illustrant ce rapport font ressortir avec évidence que les conditions de stabilité de ces anciens travaux sont mauvaises.

Un élément important apparaît néanmoins à travers les différentes observations : l'épaisseur du recouvrement, formé des calcaires du Jurassique. Ce paramètre est un facteur évident de prédisposition du site vis-à-vis du risque d'effondrement localisé dans la mesure où sa puissance correspond exactement à la hauteur du stot de protection entre les vieux travaux et la surface. Son influence sur la probabilité d'occurrence est examinée plus loin.

Nature des désordres observés et intensité du phénomène

Les désordres observés ou mentionnés sont décrits dans le chapitre 5 de la phase informative (partie I).

Il s'agit d'effondrements localisés (une dizaine de recensés à ce jour) consécutifs à des éboulements plus ou moins importants des chantiers anciens, peu profonds, ou des galeries supérieures, par rupture des structures souterraines, piliers, planches ou couronne (toit). Le stot de protection protégeant la surface, constitué par un recouvrement de terrains primaires, surmontés ou non par la formation jurassique, peut se rompre progressivement avec la remontée d'une cloche d'éboulement.

Ce type de désordre peut provoquer en surface des effondrements de forme circulaire et relativement limités (fontis) ou des effondrements localisés de plus grande dimension (en forme de gouttière suivant le filon ou la couche). C'est le risque de mouvements de terrain le plus à craindre sur le gisement minier de May-sur-Orne.

Outre les rares cas d'effondrement localisés mentionnés ou observés sur le site de May-sur-Orne (quelques désordres traités sur le flanc nord et « fontis Guillot » partiellement traité sur le flanc sud), 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. Rappelons que les dimensions du « fontis Guillot » était de 25 à 30 m de largeur, pour une longueur voisine de 150 m et une profondeur de 8 à 10 m. Compte tenu de l'importance de l'ouverture des chantiers (5 à 8 m, sur le flanc sud, et 7 à 15 m, sur le flanc nord) 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 secteurs (correspondant aux chantiers anciens et peu profonds), considérés, à l'époque, comme des « zones de stabilité douteuse » et sièges d'éboulement importants ont fait l'objet de traitements locaux (par remblayage), très limités en volume, pour éviter de possibles effondrements de la surface (détaillés au §.4.2.1, partie I). La carte représentée sur la figure 20 montre les zones classées « X », identifiées en 1988, comme des zones à risques d'instabilités potentielles (Archives du dossier d'abandon du site de stockage d'hydrocarbures).

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

Facteurs de prédisposition (probabilité d'occurrence)

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 relativement faible (une dizaine de recensés sur les deux flancs), même si certains ont probablement échappé à l'analyse (« oubliés », car anciens ou traités).

2) Par contre, les configurations d'exploitation et l'état des cavités souterraines décrits précédemment caractérisent des conditions précaires et préoccupantes de la stabilité de l'ensemble des anciens travaux proches de la surface. Des instabilités locales pourraient avoir des conséquences graves sur la surface là où l'épaisseur de la couverture est insuffisante.

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.

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 ou dans ses environs immédiats :

- l'étude de la carrière des Aucrais (Roignot et Mathon, 1976), carrière située à 6 kilomètre, 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'étude ANTEA pour la déviation routière de May-sur-Orne (Martin, 1999).

L'observation des fronts (carrière des Aucrais, figure 22) 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 22) 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.

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 joue 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 uniaxiale (Rc) de l'ordre de 10 MPa, en moyenne, (comprise entre 5 à 25 MPa) et à la traction (Rt) de l'ordre de 0,5 à 1,5 MPa. On peut estimer, de façon sécuritaire, la résistance à la flexion (Rf) autour de 1 MPa (Rc/5 ou 2,4.Rt).

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 (M) et les efforts de cisaillements maximaux (V_{max}) auxquels est soumis le toit sont calculés ainsi :

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

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

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

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 sans considérer la contrainte horizontale (négligeable près de la surface), fait ressortir les éléments indicatifs suivants :

| | Flanc nord | | | Flanc sud | | |
|-------------------------------------------|------------|------|------|-----------|-----|------|
| Hauteur totale du recouvrement (m) | 23 | 25 | 30 | 18,5 | 20 | 22 |
| Épaisseur cumulée des bancs [*] | 8 | 10 | 15 | 3,5 | 5 | 7 |
| Largeur maximale exploitée (m) | 15 | | | 8 | | |
| Masse volumique (kN/m ³) | 23 | | | 23 | | |
| Résistance à la flexion (MPa) | 1 | | | 1 | | |
| Contrainte de flexion (MPa) | 0,95 | 0,65 | 0,35 | 1,1 | 0,6 | 0,35 |
| Coefficients de sécurité (sur la flexion) | 1 | 1,5 | 3 | 1 | 1,7 | 3 |

**]NB : L'épaisseur 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 10 : Evaluation de la probabilité d'occurrence en fonction de la hauteur du recouvrement

Les classes de probabilité d'occurrence, définies ci-dessous, correspondent à différentes épaisseurs de la couverture jurassique, déduites des valeurs des coefficients de sécurité choisis et légèrement « arrondies » pour tenir compte des incertitudes liées à la nature et à l'épaisseur effective du recouvrement.

| Flanc nord | | Flanc sud | |
|---------------------------|--------------------------|---------------------------|--------------------------|
| Epaisseur du recouvrement | Probabilité d'occurrence | Epaisseur du recouvrement | Probabilité d'occurrence |
| < 25 m | Elevée | < 20 m | Elevée |
| 25 à 30 m | Moyenne | 20 à 25 m | Moyenne |
| 30 à 35 m | Faible | 25 à 30 m | Faible |
| > 35 m | Nulle | > 30 m | Nulle |

Tableau 11 : Classes des probabilités d'occurrence retenues

Evaluation de l'alea : « 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 :

| Flanc nord | | Flanc sud | |
|---------------------------|---------------|---------------------------|---------------|
| Epaisseur du recouvrement | Niveau d'aléa | Epaisseur du recouvrement | Niveau d'aléa |
| < 25 m | Fort | < 20 m | Fort |
| 25 à 30 m | Moyen | 20 à 25 m | Moyen |
| 30 à 35 m | Faible | 25 à 30 m | Faible |
| > 35 m | Nul | > 30 m | Nul |

Tableau 12 : Hiérarchisation de l'aléa « effondrement localisé »

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°). Deux types d'évolution du processus de remontée de la cloche d'éboulement sont à distinguer :

- sur le flanc nord (subvertical), l'éboulement ne peut remonter que verticalement (ou presque) jusqu'au niveau des terrains de recouvrement calcaires altérés, conformément au schéma de la figure 23a ;
- sur le flanc sud (45° à 60°), on peut penser qu'une rupture des terrains encaissants peut se produire par cisaillement ou altération 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 23b.

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 23).

La *marge d'influence*, sur le flanc nord, est donc de 10 m à partir des bords de la couche. Elle est, sur le flanc sud, 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 entre 5 (flanc sud) et 10 m (flanc nord) 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. La bande des zones d'aléa effondrement localisé atteint donc 47 à 55 m, sur le flanc nord, et 55 à 57 m, sur le flanc sud.

5.1.2 Effondrements localisés par rupture des têtes de puits

Etat des puits

L'inventaire des puits et cheminées d'aéragé effectué dans le cadre de la phase informative (tableau 1, § 4.6) recense 10 puits ayant servi à l'extraction ou à l'aéragé. Parmi ceux-ci, le puits de La Hogue n'est qu'un puits d'accès à la descenderie proprement dite. Les cheminées d'aéragé dites de « Bully » ne sont plus observables (le fontis de Bully n'est pas un effondrement de cheminée mais un fontis dû à l'éboulement de la galerie elle-même).

Les puits de forme circulaire ont un diamètre compris entre 1,5 et 5,5 m (respectivement puits Taraud et puits Central), pour une profondeur de quelques dizaines de mètres à 540 m (puits Central). Les cheminées d'aéragé sont apparemment nettement plus petites en diamètre (manque d'informations). Les puits d'accès de section rectangulaire sont très peu profonds (quelques mètres à une cinquantaine de mètres).

Des travaux de mise en sécurité ont été effectués dans le cadre de la procédure d'abandon et achevés en 1994 (tableau 4) :

- 3 puits, parmi les plus importants, ont fait l'objet de travaux importants comprenant un traitement du sol par des injections de ciment et la pose de dalles en béton armé (puits de St-André, puits GDO, puits Central) ;
- 5 puits ont été obstrués par un bouchon en béton armé ou recouverts d'une dalle en béton armé (petit puits de St-André, Verrières, Harcourt, La Hogue et ULV) ;
- Les deux derniers puits (Rocquancourt et Taraud) ont été fermés pour permettre l'exploitation des eaux. Ils sont toujours actuellement sous surveillance (§ 4.4).

Aucun phénomène de débouillage ou de rupture de la tête ne s'est produit sur ces puits ou cheminées.

Evaluation de l'aléa

On remarque que les travaux de traitement réalisés pour la mise en sécurité de ces ouvrages (injections de ciment avec pose de dalles en béton armé, bouchons en béton armé ou pose de dalles en béton armé) assurent une bonne protection à plus ou moins long

terme. Néanmoins, la pose d'une simple dalle bétonnée même avec une tête de puits renforcée par injections ne permet pas d'éliminer définitivement les risques à long terme. En effet, la stabilité des puits n'est pas 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.

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 et/ou fracturés (primaires ou jurassiques), constituent une couverture de qualité médiocre jusqu'à une profondeur estimée globalement à une dizaine de mètres (sondages CERCHAR, rapport GEOMINES-CAEN, 1994).

L'intensité du phénomène redouté peut être jugée de moyenne (effondrement localisé de type fontis, moyennement important, plusieurs mètres de diamètre, et à caractère brutal) et la probabilité d'occurrence de faible (petit puits de St-André, Verrières, Harcourt, La Hogue et ULV) à très faible (puits de St-André, puits GDO, puits Central) compte tenu des facteurs de prédisposition favorables (nature des terrains encaissants, traitement élaboré des terrains périphériques et des structures de protection des ouvrages les plus importants).

Le niveau d'aléa relatif aux différents puits et cheminées peut être donc considéré, comme :

- moyen pour les puits de Verrières, d'Harcourt, La Hogue, ULV et petit puits de St-André ;
- faible pour les puits les mieux traités : puits de St-André, puits GDO et puits Central.

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 à 12 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 rayon, centré sur le puits et égal à 12 m.

Le schéma montrant la marge adoptée pour les puits et cheminées est représenté sur la figure n° 24.

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. Il s'agit des puits de Verrières, d'Harcourt, de La Hogue et Taraud, ainsi que des entrées de la galerie de niveau + 13 et de la descente d'Harcourt. Une marge d'incertitude de 10 m est appliquée sur ces puits et entrées.

5.1.3 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.

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 (2,5 x 3,5 m, au maximum), on peut présumer que l'intensité du phénomène ne soit que moyenne (diamètre du cratère de l'ordre de quelques mètres et probablement inférieur à 10 m).

Estimation de la probabilité d'occurrence

Le seul désordre connu est le « fontis de Bully » (§ 6.1). Ce fontis résulte de l'éboulement localisé de la galerie de reconnaissance de Bully (sur le flanc sud). Cette galerie entame le coteau sous faible recouvrement peu épais. Il s'agit d'un fontis récent (1995), de forme circulaire (diamètre et profondeur de l'ordre de 8 m) et qui n'a guère évolué depuis. Ses flancs, très raides et peu ravinés, permettent toujours de distinguer la présence de vides non comblés (ancienne galerie) mais ne permettent plus de voir les rails au mur de la galerie.

Malgré la rareté de ce type d'accident sur l'ensemble du secteur exploité, on ne peut pas exclure qu'il puisse se produire, à terme, des fontis à l'aplomb des parties de galeries situées aux plus faibles profondeurs, ce qui est le cas sur d'autres bassins miniers ferrifères de l'Ouest (par exemple sur les gisements de Soumont et de La Ferrière-aux-Etangs).

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 (§ 4.1, partie II), on pourrait 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 x 3,5 m, d'après les données du tableau 3), cette valeur de 30 m représente également 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 six galeries décrites dans le tableau 3, à savoir :

- la galerie de niveau B, à proximité de son entrée ;
- la galerie dite « de niveau + 13 » ;
- la galerie de Maltot ;
- la galerie de niveau I ;
- la galerie « école » ;
- la galerie de Bully.

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 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).

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.

Cas du fontis de Bully

Signalons ici que le fontis de Bully est resté ouvert dans son état originel, mais simplement interdit d'accès par une clôture en fils barbelés actuellement hors d'usage et qui jonche le sol. Ce trou en forme d'entonnoir (diamètre et profondeur de l'ordre de 8 m) devrait d'être protégé efficacement contre les intrusions (par exemple : par un grillage plus efficace ou un bouchon en béton).

5.2 LES AFFAISSEMENTS

Même si l'analyse informative ne mentionne aucun affaissement quelconque sur le gisement de May-sur-Orne, l'étude préliminaire des risques d'affaissement menée par retroanalyse et calcul sur modèle dans la phase informative (partie I, § 6.3) a montré que le flanc sud pouvait être, dans certaines conditions, le siège de phénomènes d'affaissement, comme sur le gisement de Soumont.

Etat des travaux et nature des désordres

Une prédisposition au risque d'affaissement est la manifestation d'éboulements répétés dans les travaux du fond, ce qui fut le cas dans les exploitations de May/Orne et de Soumont qui furent le siège d'éboulements importants au fond (partie I, § 5.2 et 6.2).

L'existence d'affaissements n'est connue qu'à Soumont où des désordres 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 21 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 de déterminer, à partir des fractures relevées, les caractéristiques 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 13 : Principales caractéristiques des affaissements de Soumont (pour un pendage mesuré de 30 à 40°)

Facteurs de prédisposition et probabilité d'occurrence

L'étude par modélisation numérique (Renaud, 2003) 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).

Si le flanc nord n'est pas menacé grâce à son pendage élevé (80° à 90°), ce n'est pas le cas du flanc sud (45° à 60°) qui répond presque partout aux critères de faisabilité ou s'en approche, 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 (partie I, § 6.3).

D'une manière synthétique, la faible différence qui sépare ces caractéristiques des critères théoriques d'exclusion du processus d'affaissement donnés dans le tableau 6, et l'inexistence d'affaissements recensés à ce jour dans le bassin, laissent penser que la probabilité de réalisation du phénomène d'affaissement est possible mais peu élevée (faible).

En ce qui concerne les chantiers plus profonds, on considère que les zones en rupture ont peu de chance d'atteindre la surface et que la probabilité d'occurrence du phénomène d'affaissement (comme son intensité) devient quasi nulle.

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 (§.3.2). Le tableau 9 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 (dans les quartiers exploités par chambres magasins)
- τ = taux d'exploitation (ou taux de défrètement),

On peut en déduire facilement les valeurs des déformations (ε_{\max}) et pentes (μ_{\max}) 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 très sécuritaire.

Le tableau suivant (tableau 14) donne les résultats obtenus sur le site de May-sur-Orne, 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 (μ_{\max}) | 2,0 % | 3,8 % |
| Classe d'intensité (tableau 9) | Faible | Moyen |

Tableau 14 : Valeurs des déformations horizontales et pentes calculées sur le site de May-sur-Orne par référence aux affaissements de Soumont

Comme on le constate sur ce tableau, l'intensité du phénomène d'affaissement déduite du tableau 9 est classée entre faible et moyenne en fonction des évolutions de l'ouverture exploitée.

Evaluation de l'aléa

Compte tenu de la faible probabilité d'occurrence et de l'intensité faible à moyenne du phénomène redouté, on peut raisonnablement qualifier l'aléa affaissement sur le site de May-sur-Orne de faible sur les quartiers exploités par chambres magasins situés à moins de 300 m de profondeur. L'aléa affaissement est considéré comme nul ou négligeable sur les quartiers les plus profonds.

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

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

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 : abaque d'affaissement du Nord et 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 15 : Valeurs données dans les abaques d'affaissement des bassins 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 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 May-sur-Orne des valeurs d'angle d'influence égales à 28° (coté amont) et 47° (coté aval).

Précisons que l'angle d'influence aval est pris à la base des panneaux exploités jusqu'à la profondeur de 300 m, environ. L'angle d'influence amont est pris à la partie supérieure des panneaux exploités (en incluant les panneaux supérieurs).

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

5.3 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.

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

6. CONCLUSIONS

La présente analyse a conduit à la définition et à l'évaluation de l'aléa pour les risques « mouvements de terrains » liés aux exploitations souterraines et aux travaux de surface sur tout le secteur du bassin minier ferrifère de May-sur-Orne concernant les communes de Maltot, Feuguerolles-Bully, Saint-André-sur-Orne, Saint-Martin-de-Fontenay, May-sur-Orne, Fontenay-le-Marmion, Rocquancourt et Saint-Aignan-de-Cramesnil.

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 ou galeries d'accès (galerie de niveau B pour le flanc nord, galerie I et galeries tracées dans les morts terrains pour le flanc sud) sont situés sous un recouvrement dont la hauteur varie entre quelques mètres seulement (à l'ouest) et une cinquantaine de mètres, voire un peu plus, (à l'est).

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 désordonné, à leur ancienneté et à leur état général dégradé.

Les secteurs menacés affectent la quasi totalité du gisement minier, à proximité des affleurements de la couche, aussi bien sur le flanc nord que sur le flanc sud. Ils sous-tendent des zones urbanisées (généralement pavillonnaires), principalement sur les bordures sud des communes de Saint-Martin-de-Fontenay (flanc nord), May-sur-Orne et Fontenay-le-Marmion (flanc sud).

Ces secteurs considérés, déjà à l'époque, comme des « zones de stabilité douteuse » et sièges d'éboulement importants ont été identifiés et cartographiés, en 1988, en zones classées « X », considérées comme des zones à risques d'instabilités potentielles (Archives du dossier d'abandon du site de stockage d'hydrocarbures). Ils ont fait l'objet de traitements limités (quantitativement et qualitativement), décrits dans ce rapport.

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 en distinguant le flanc nord du flanc sud. Globalement, l'aléa est jugé comme fort sous moins de 20 m de recouvrement, moyen entre 20 et 25/30 m, faible entre 25/30 m et 30/40 m, nul au-delà de 30/40 m.

Effondrements localisés par rupture des têtes de puits

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

- moyen pour les puits de Verrières, d'Harcourt, La Hogue, ULV et petit puits de St-André ;
- faible pour les puits les mieux traités : puits de St-André, puits GDO et puits Central.

On estime, en effet, que, quelque 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

Malgré la rareté de ce type d'accident sur l'ensemble du secteur exploité (le seul désordre connu est le « fontis de Bully »), on ne peut pas exclure qu'il puisse se produire, à terme, des fontis à l'aplomb des galeries situées à faible profondeur, comme c'est le cas sur les autres bassins miniers ferrifères de l'Ouest (par exemple sur les gisements de Soumont et de La Ferrière-aux-Etangs).

En fait 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.

Parmi les galeries isolées situées à moins de 30 m de profondeur, on retrouve les six galeries recensées dans la phase informative, à savoir :

- la galerie de niveau B, à proximité de son entrée ;
- la galerie dite « de niveau + 13 » ;
- la galerie de Maltot ;
- la galerie de niveau I ;
- la galerie « école » ;
- La galerie de Bully.

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 ou négligeable (processus bloqué par autocomblement).

Signalons ici que le fontis de Bully est resté ouvert dans son état originel, mais simplement interdit d'accès par une clôture en fils barbelés actuellement hors d'usage et qui jonche le sol. Ce trou en forme d'entonnoir (diamètre et profondeur de l'ordre de 8 m) devrait d'être protégé efficacement contre les intrusions (par exemple : par un grillage plus efficace ou un bouchon en béton).

Le risque d'affaissement

Même si l'analyse informative ne mentionne aucun affaissement sur le gisement de May-sur-Orne, l'étude préliminaire des risques d'affaissement menée par retroanalyse et calcul sur modèle dans la phase informative a montré que le flanc sud pouvait être, dans certaines conditions, le siège de phénomènes d'affaissement, comparables à ceux du gisement de Soumont.

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 May-sur-Orne de faible sur les quartiers exploités par chambres magasins situés à moins de 300 m de.

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 nulles.

Remarques complémentaires

Bien que non pris en compte dans le cadre de cette étude, d'autres phénomènes ou nuisances devraient être considérés du fait de la présence des exploitations minières maintenant arrêtées ou de leur réutilisation ultérieure en stockage (risques liés aux gaz de mine, inondations, problèmes environnementaux, etc.). Ils devraient être examinés dans le cadre d'une extension du champ d'évaluation des aléas.

BIBLIOGRAPHIE

Dossiers et articles relatifs à l'exploitation ferrifère :

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

Visite a la mine de May-sur-Orne. Bulletin Technique de la Chambre Syndicale des Mines de Fer. n°84, p.192-193, 1966.

Dossier de renonciation aux concessions de la Société des Mines et Produits Chimiques : Archives de 1968 à 1975.

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

P. Meloy et S. Barou (1983) : Chambres-magasins dans les mines de fer de Segré. Industrie Minérale – Les Techniques, p.173-178, février 1983.

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.

G. Maurin (1999) : Concession des mines de fer de May-sur-Orne (Calvados) : Rapport de visite et diagnostic sécuritaire. Rapport BRGM R 40759 pour la DRIRE Basse-Normandie, septembre 1999.

Histoire d'un pays minier - Autour de May-sur-Orne. Collège Paul Verlaine Evrecy et Amicale des anciens mineurs. Editeur local. 2^e édition, 175 pages, avril 2002.

Rapports et articles relatifs au stockage d'hydrocarbures (gazole) :

Stockage souterrain d'hydrocarbures de May-sur-Orne : Etude de l'aménagement. Rapport GEOSTOCK MPa/B.Da. - n°312 – GK, mars 1971.

Stockage souterrain d'hydrocarbures de May-sur-Orne : Etude du site. Rapport GEOSTOCK CC/b.Da. - n°307 – GK, avril 1971.

Ph. De La Queriére et P. Pascaud (mars 1970) : Etude de la nappe du Jurassique (Dogger et Lias) dans la région de May-sur-Orne (Calvados). Rapport BRGM 70 SGN 102 PNO, mars 1970.

Ph. De La Queriére et P. Pascaud (octobre 1970). Etat de la nappe du Jurassique (Dogger et Lias) dans la région de May-sur-Orne (Calvados) : Etiage. Rapport BRGM 70 SGN 304 PNO, octobre 1970.

P. Pascaud et M. Tirat (1971) : Etude de la nappe du Jurassique (Dogger et Lias) dans la région de May-sur-Orne (Calvados) durant le mois de juin 1971. Rapport BRGM 71 SGN 227 PNO, décembre 1971.

Stockage d'hydrocarbures de May-sur-Orne - Flanc Nord : Proposition de programme d'essai pour le premier remplissage. Rapport GEOMINES-CAEN VM/MPa/cm, n°503, GMC, avril 1972.

P. Pascaud et M. Tirat (1972) : Etude de la nappe du Jurassique (Dogger et Lias) dans la région de May-sur-Orne (Calvados) durant le mois de novembre 1971. Rapport BRGM 72 SGN 095 PNO, mai 1972.

J.L. Picard (1973) : Stockage de 5 millions de m³ dans l'ancienne mine de fer de May-sur-Orne (Calvados). Annales de Mines, p. 26-30, janvier-février 1973.

M. Pachet (1974) : Un stockage d'hydrocarbures dans une mine de fer désaffectée à May-sur-Orne. Revue de l'Association Française des Techniciens du Pétrole, p. 39-43, mars-avril 1974.

A. Galera (1974) : Stockage d'hydrocarbures de May-sur-Orne. Notice de l'ouvrage. Rapport GEOMINES-CAEN AG/SL/GM/fb-C n°270, juin 1974

C. Dassibat et P. Pascaud (1977) : Etude de la nappe du Jurassique (Dogger et Lias) dans la région de May-sur-Orne (Calvados) durant le mois de novembre 1976. Rapport BRGM 77 SGN 169 PNO, avril 1977.

A. Milcent (1991) : Géomines Caen - Abandon du Stockage de May-sur-Orne : Variations des niveaux et qualité des eaux dans la mine et dans la nappe de Primaire. Rapport BRGM R 33 305 4S BNO 91, août 1991.

Dossier de synthèse suite à la période annuelle d'observations à l'issue du remplissage final de la mine. Rapport GEOMINES-CAEN GMC/DT-92/021 MGe/TT, mars 1992.

F. Milville et J.P. Matheron (1993) : Géomines – Stockage de May-sur-Orne (14) – Surveillance des opérations de contrôle effectuées au cours du premier semestre de l'année 1993 au voisinage des installations. Rapport BRGM 93 N 0526 4S CAE, novembre 1993.

Fermeture du stockage : Rapport général de réalisation des fermetures des orifices, du renforcement de zones à stabilité douteuse et de l'évacuation des eaux de surverse vers l'Orne. Rapport GEOMINES-CAEN GK/GMC-94/026 MGe/TT, janvier 1994.

Compte rendu de visite de la Galerie de May-sur-Orne. Note technique du BRGM SMN/REM - 99/041, juillet 1999.

Compte rendu de visite de la Galerie de Saint-André-sur-Orne. Note technique du BRGM SMN/REM - 99/054, juillet 1999.

Mémoire en réponse suite à l'enquête administrative. Rapport GEOMINES-CAEN GMC-EXP/89-051 TT/PC, août 1999.

Dossier d'abandon du stockage d'hydrocarbures de May-sur-Orne, août 1999.

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

Etude de stabilité de la mine de May-sur-Orne considérée en vue du stockage d'hydrocarbures. Rapport GEOSTOCK n°36 VM/KC, janvier 1971, comprenant des notes et rapports de MM. Tincelin et Vouille (1970), ainsi que de M. Mayer (1970).

V. Maury (1972) : Aménagement de la mine de May-sur-Orne en stockage souterrain d'hydrocarbures. Revue de l'Industrie Minérale. Cahier 4 du Comité Français de Mécanique des Roches, p.73-84, avril 1972.

V. Maury (avril 1974) : Stabilité des cavités souterraines utilisées ou projetées pour le stockage souterrain. Industrie Minérale. Cahier n° 6 du Comité Français de Mécanique des Roches, p.32-44, avril 1974.

- V. Maury (1974) : Stabilité, contraintes et exploitation de la mine de May-sur-Orne comme stockage souterrain d'hydrocarbures. CR - 3ème Congrès de la Société Internationale de Mécanique des Roches – Denver, Vol. II, Tome B, R12 - 598 (3) II B, p.1294-1301, 1974.
- 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.
- V. Maury (1979) : Utilisation des essais et mesures en laboratoires et in-situ dans cinq projets de stockage souterrains. Proceedings - 4ème Congrès de la Société Internationale de Mécanique des Roches - Montreux. Vol. 2, R12 - 598 (4) II, p. 417-428, 1979.
- D. Ducoin (1994) : Procès-verbal de recolement des travaux de fermeture du stockage souterrain d'hydrocarbures liquides de May-sur-Orne. Rapport DRIRE Basse-Normandie, avril 1994.
- R. Schwartzmann (1991) : Rapport d'étude sur l'effondrement de la Pouèze. Ardoisières d'Angers, 9 p., décembre 1991.
- P. Martin (1999) : Route départementale n° 562, déviation de May-sur-Orne, St-Martin-de-Fontenay et Laize-la-Ville. Etude géotechnique. Rapport ANTEA A 16525, 33 p., mai 1999.
- P. Martin (1999) : Route départementale n° 562, déviation de May-sur-Orne, St-Martin-de-Fontenay et Laize-la-Ville. Etude géotechnique. Rapport ANTEA A 17111, 8 p., juin 1999.
- Conseil Général du Calvados (2000) : Route départementale n° 562. Etude géotechnique générale, second secteur sensible. Analyse des contraintes posées par les anciennes mines de May-sur-Orne. Rapport ANTEA n° A20813/A, 20 p., juin 2000.
- J-J. Tritsch (2000) : Assistance technique à l'élaboration d'un dossier de demande d'abandon concernant les carrières de Misengrain - Site de Noyant (49). Rapport INERIS-DRS-00-25078/R01, 97 p., 26 oct. 2000.
- Analyse du géoréférencement des plans miniers de May-sur-Orne (14). Rapport GEODERIS 2300-BN03-NT09-BM-CV, 2003.
- Mines de fer de May-sur-Orne (Calvados) : Phase informative. Rapport BRGM pour la DRIRE Basse-Normandie, n° BRGM/RP-52684-FR, 23 p. avec CD-ROM, novembre 2003.
- V. Renaud (2003) : Contribution à l'analyse des conditions d'effondrement des gisements pentés des bassins ferrifères de Soumont, May/Orne et Segré (Calvados, Maine-et-Loire), rapport INERIS-DRS-03-50864/RN01 (version projet), 44 p., 2003.

LISTE DES ANNEXES

| Repère | Désignation | Nombre de pages |
|-----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| Figure 1 | Plan de situation des travaux miniers concernés par l'étude d'évaluation des aléas mouvements de terrain | 1 A4 |
| Figure 2 | Carte de localisation des bassins ferrifères d'Anjou-Bretagne et de Normandie (d'après Varoquaux et Gérard, 1980) | 1 A4 |
| Figure 3 | Coupe géologique des formations montrant la couche de minerai de fer entre les schistes à Calymènes ordoviciniens et les grès feldspathiques cambriens (d'après F. Doré, 1969) | 1 A4 |
| Figure 4 | Localisation des travaux miniers au sein du synclinal de May-sur-Orne (d'après les archives de Géomines) | 1 A4 |
| Figure 5 | Bloc diagramme représentatif de la mine de May-sur-Orne (d'après Maury, 1972) | |
| Figure 6 | Projection verticale des galeries de niveau du flanc sud (d'après les archives de Géomines Caen) | 1 A4 |
| Figure 7 | Projection verticale des galeries de niveau du flanc nord (d'après les archives de Géomines Caen) | 1 A4 |
| Figure 8 | Méthode d'exploitation par défilage (tiré de l'ouvrage « Histoire d'un pays minier, 1980) | 1 A4 |
| Figure 9 | Méthode d'exploitation par taille chassante (tiré de l'ouvrage « Histoire d'un pays minier, 1980) | 1 A4 |
| Figure 10 | Méthode d'exploitation par chambres magasins (tiré de l'ouvrage « Histoire d'un pays minier, 1980) | 1 A4 |
| Figure 11 | Coupes synthétisant l'abatage et de chargement du minerai dans une chambre magasin (tiré de l'ouvrage « Histoire d'un pays minier, 1980) | 1 A4 |
| Figure 12 | Coupe générale d'un secteur du flanc nord montrant la localisation des différentes méthodes d'exploitation employées (tiré de l'ouvrage « Histoire d'un pays minier, 1980) | 1 A4 |
| Figure 13 | Schéma général d'une « couronne » | |

| | | |
|-----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|
| Figure 14 | Travaux du flanc nord près de l'entrée de la galerie de niveau B (coupe longitudinale dans le plan de la couche) | 1 A4 |
| Figure 15 | Travaux du flanc nord près du puits Saint-André (coupe longitudinale dans le plan de la couche) | |
| Figure 16 | Coupe transversale du flanc nord montrant l'exploitation des deux couches (couche nord et couche sud) dans le secteur de l'éboulement de 1918 | 1 A4 |
| Figure 17 | Coupe longitudinale des travaux du flanc nord dans le secteur de l'éboulement de 1918 | |
| Figure 18 | Travaux du flanc sud près du puits d'Harcourt | 1 A4 |
| Figure 19 | Travaux du flanc sud près de la descenderie de La Hogue | |
| Figure 20 | Reproduction de la cartographie de 1988 des zones classées « X » à risques d'instabilités potentielles (niveaux supérieurs des flancs nord et sud) | 1 A4 |
| Figure 21 | 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 22 | Front rocheux de la carrières des Aucrais entamant la couverture jurassique et située à 6 kilomètre au sud du flanc sud de May-sur-Orne | 1 A4 |
| Figure 23 | 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 24 | Définition de la marge de sécurité (marges d'influence) concernant les puits et cheminées d'aérage | 1 A4 |
| Figure 25 | Représentation théorique des angles d'influence amont et aval en gisement penté | |
| Photos | Photographies illustratives | 6 A4 |
| Annexe A | Cartographie informative des mines de fer de May-sur-Orne (échelle 1/5 000 ^{ème}) | 2 plans hors texte |
| Annexe B | Cartographie de l'aléa « Affaissement » dans les mines de fer de May-sur-Orne (échelle 1/2 500 ^{ème}) | 3 plans hors texte |
| Annexe C | Cartographie des aléas « Effondrements localisés » dans les mines de fer de May-sur-Orne (échelle 1/2 500 ^{ème}) | 3 plans hors texte |

FIGURES

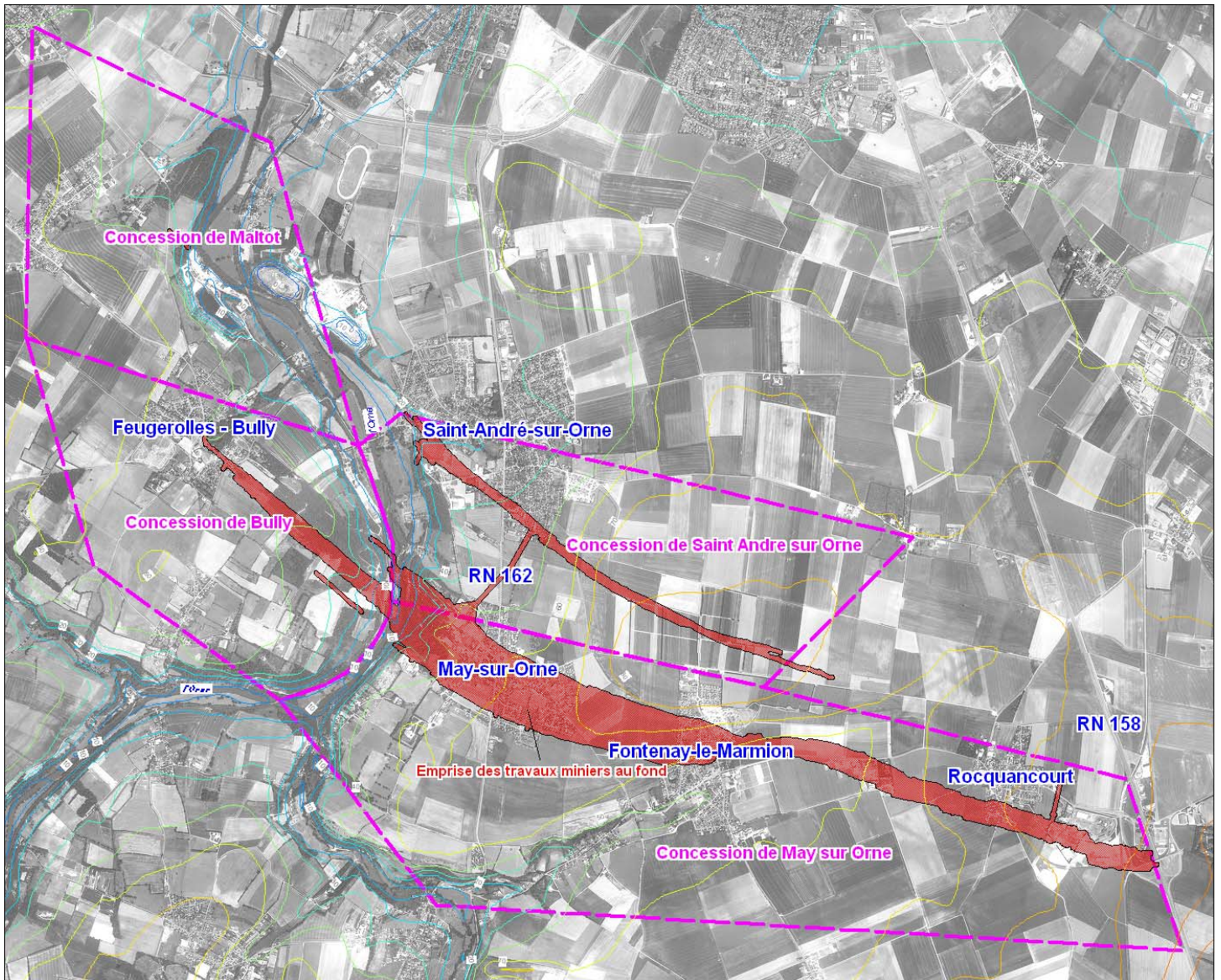


Figure 1 : Plan de situation des travaux miniers concernés par l'étude d'évaluation des aléas mouvements de terrain

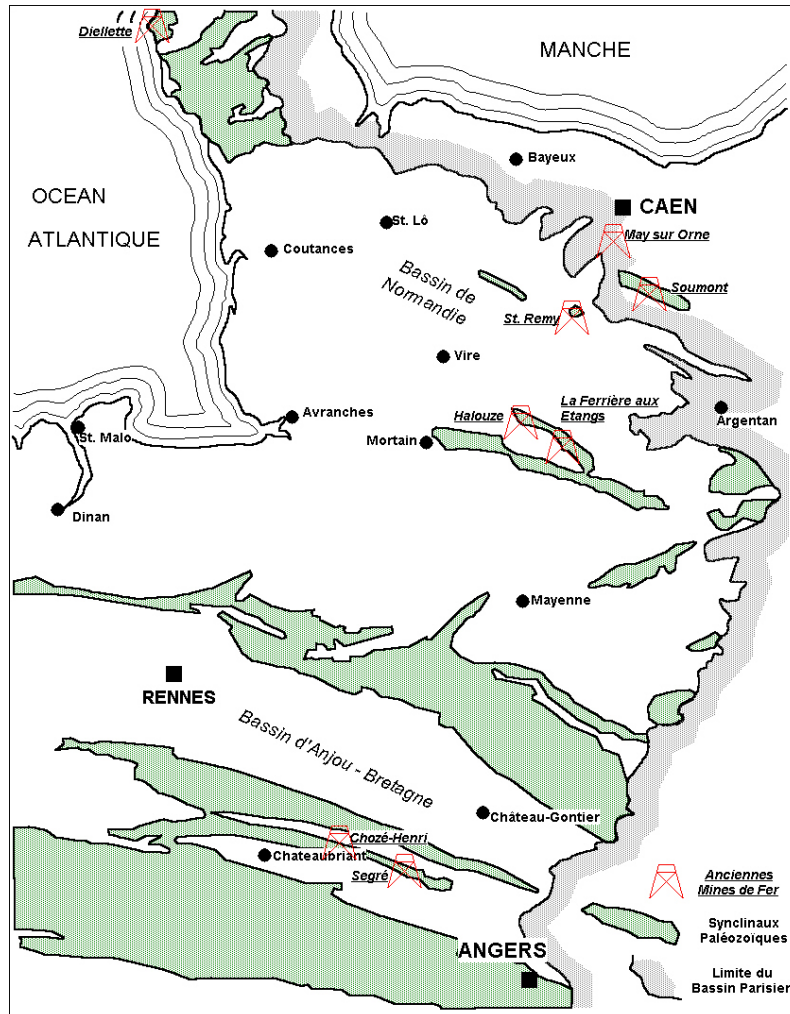


Figure 2 - Carte de localisation des bassins ferrifères d'Anjou-Bretagne et de Normandie (d'après Varoquaux et Gérard, 1980)

| ETAGES | | FORMATIONS | LITHO | EPAISSEURS REELLES EN METRES | | | |
|-------------|--------------|-----------------------------------|-------------------------------------------|------------------------------|---------------|------------------------------|-------|
| | | | | Travers-Banc | Puits-Central | Affleurements ⁽¹⁾ | |
| GOTHLANDIEN | Ludlow | Schistes à Graptolites | | | | ≈ 100 | |
| | Wenlock | Calc. à Orthoceres de Feugueroles | | | | | |
| | Valentien | Schistes à Fucoïdes | | | | 30 | |
| ORDOVICIEN | Sup. | Caradoc | Schistes gréseux à Trinucleus et Calliops | | 27 | 60 à 80 | |
| | | | "Grand Moy" | > 70 | 120 | 110 | |
| | Moy. | Llandeiliien | Grès de May | 7-8 | > 200 | 3 | ≈ 250 |
| | | | "Petit Moy" | 90 | | 90 | 95 |
| | | | Grès ferrug. | 28-34 | | 33 | 45 |
| | | | Schistes à Calymènes | 70-82 | | 82 | 80 |
| CAMBRIEN | Inf. ou Moy. | Grès Feldspathiques | | > 10 | > 50 | 75 | |
| | | | | | | 45 | 550 à |
| | | | | | | 450 à 600 | 600 |

Figure 3 : Coupe géologique des formations montrant la couche de minerai de fer entre les schistes à Calymènes ordoviciens et les grès feldspathiques cambriens (d'après F. Doré, 1969)

COUPE N.N.E. S.S.W.

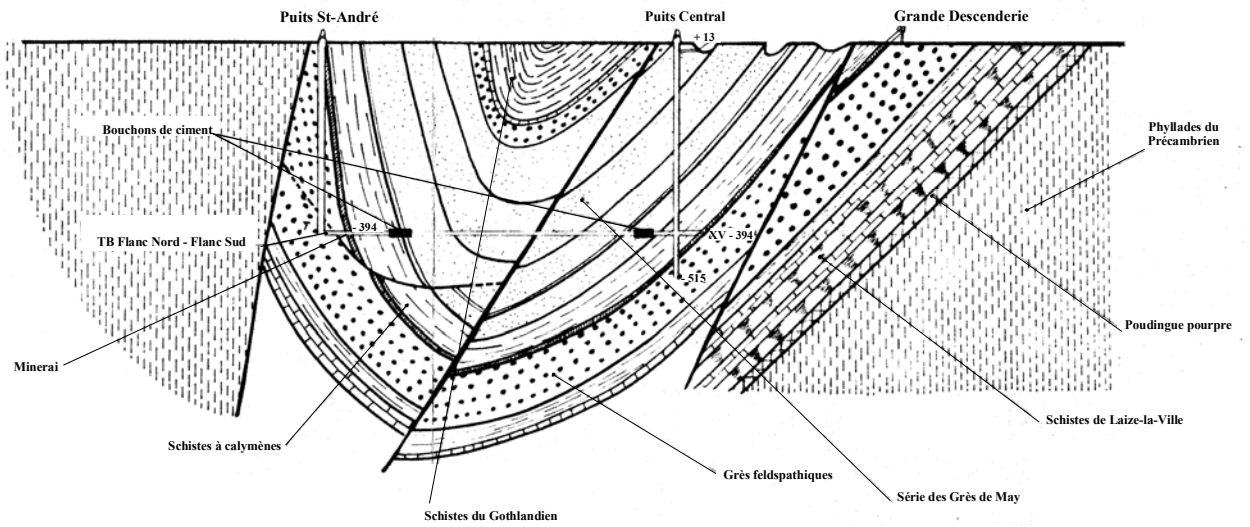


Figure 4 - Localisation des travaux miniers au sein du synclinal de May-sur-Orne (d'après les archives de Géomines Caen)

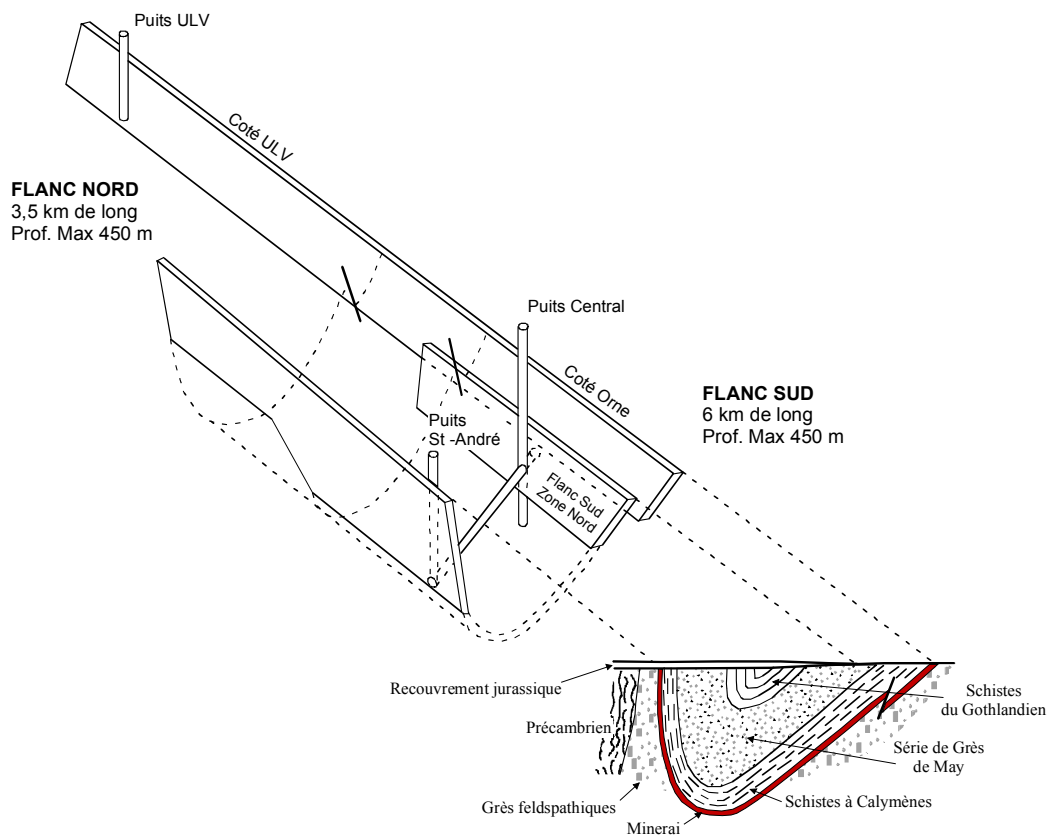


Figure 5 – Bloc diagramme représentatif de la mine de May-sur-Orne (d'après Maury, 1972)

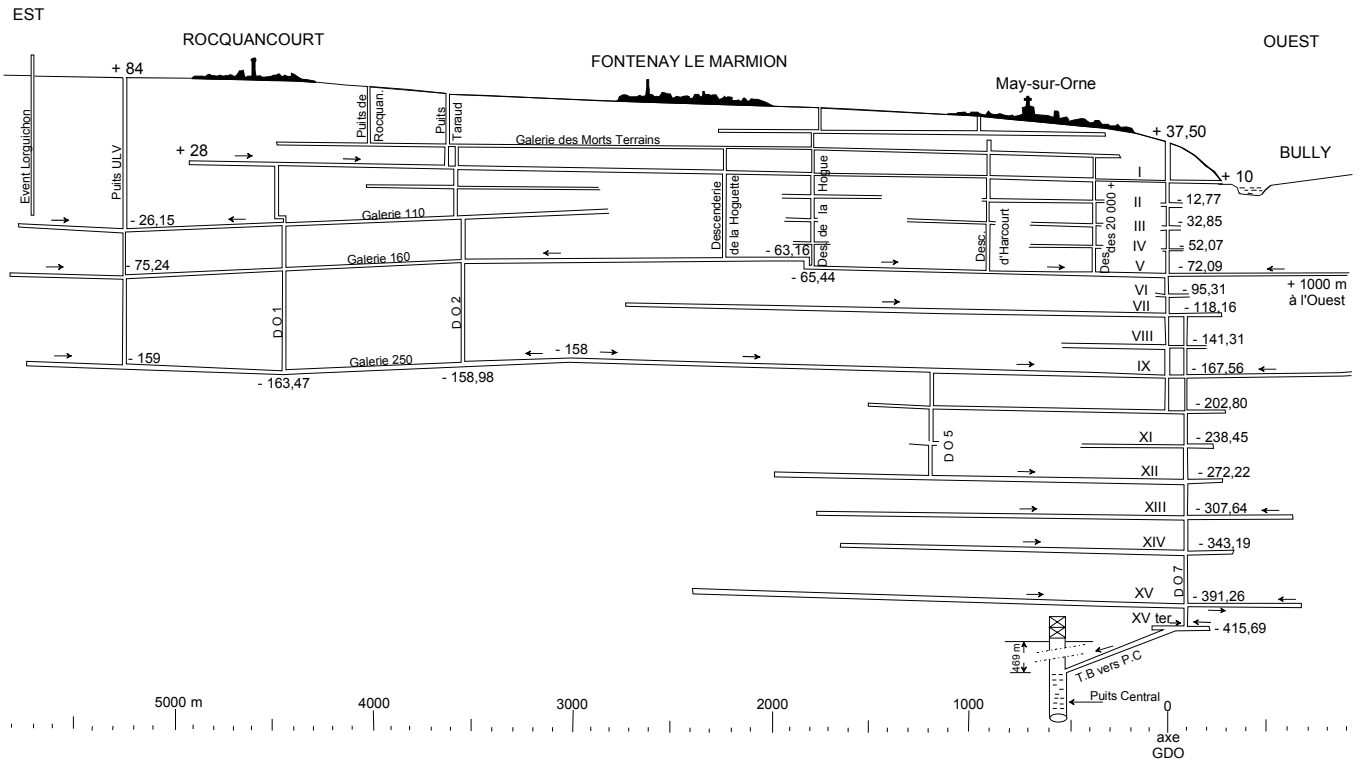


Figure 6 – Projection verticale des galeries de niveau du flanc sud (d'après les archives de Géomines Caen)

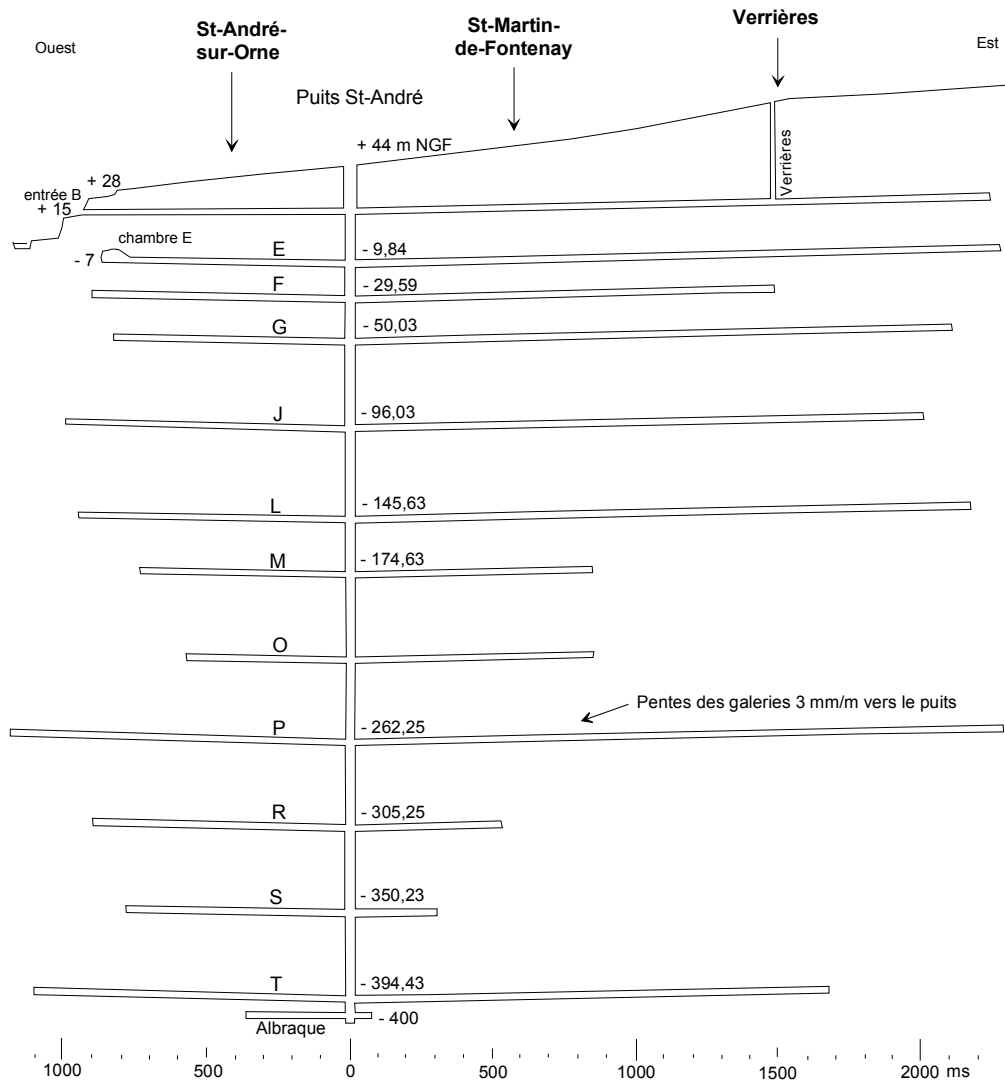


Figure 7 - Projection verticale des galeries de niveau du flanc nord (d'après les archives de Géomines Caen)

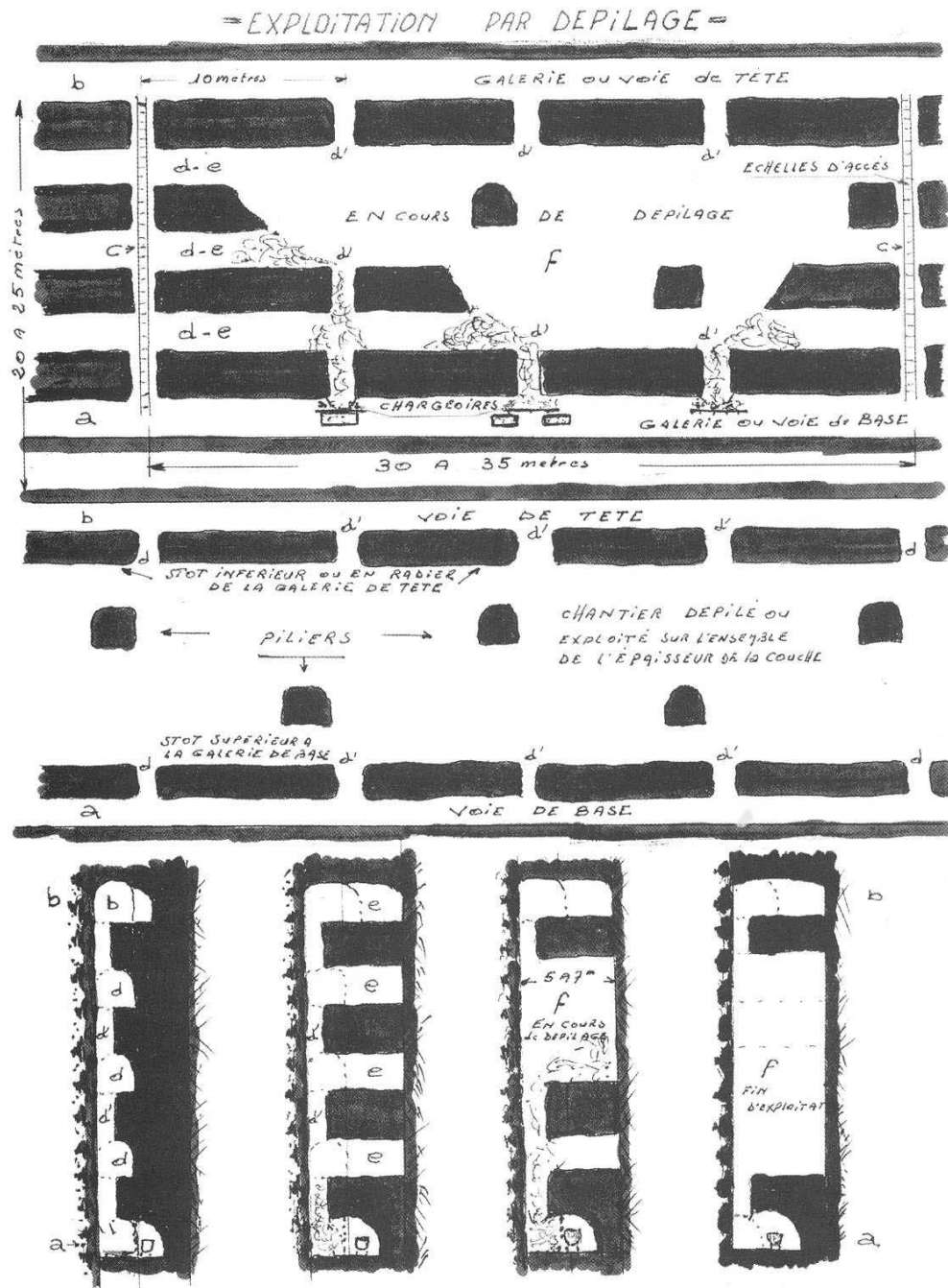


Figure 8 - Méthode d'exploitation primitive par traçage et défilage (tiré de l'ouvrage « Histoire d'un pays minier, 1980)

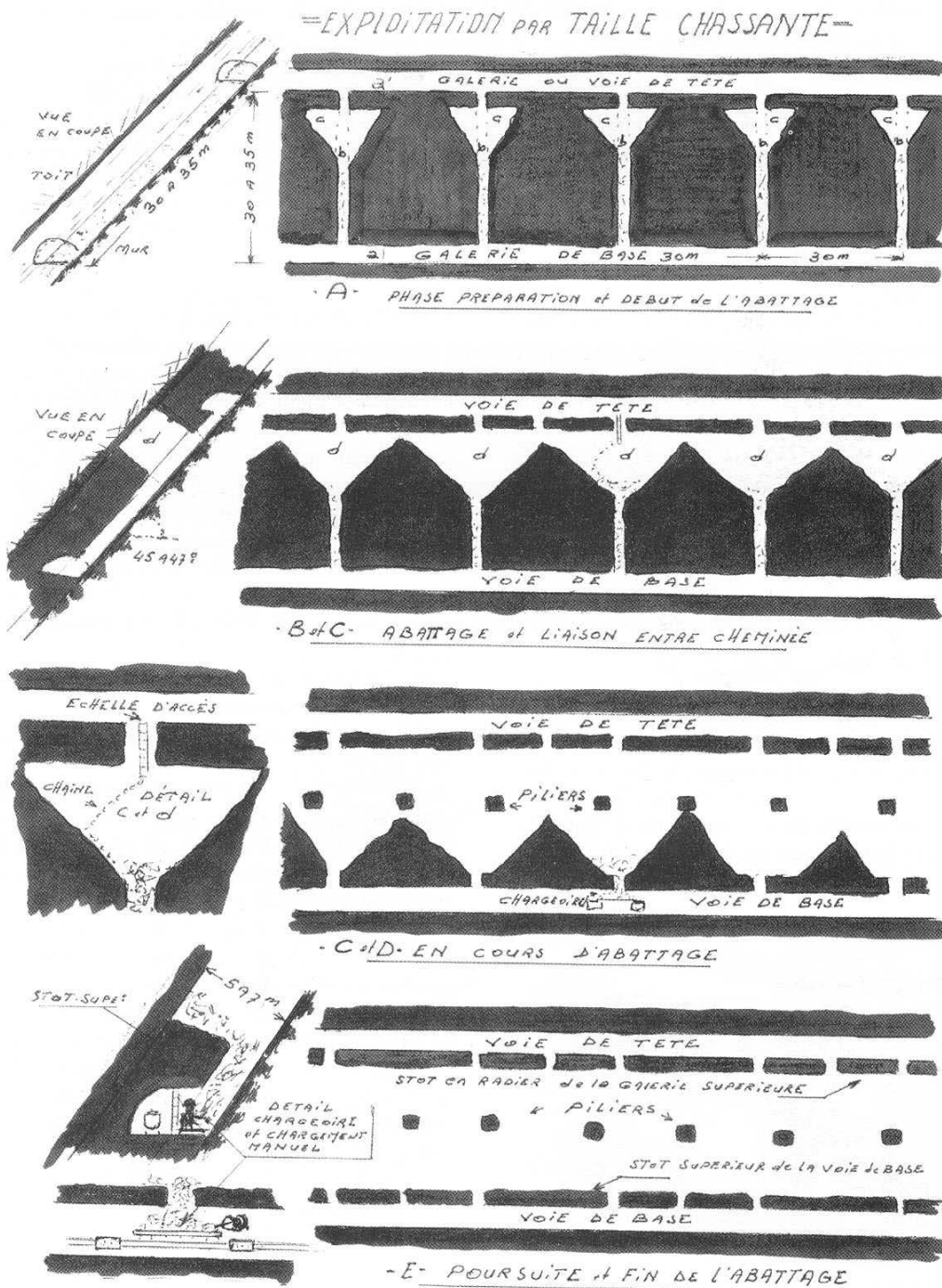


Figure 9 - Méthode d'exploitation par taille chassante
 (tiré de l'ouvrage « Histoire d'un pays minier, 1980)

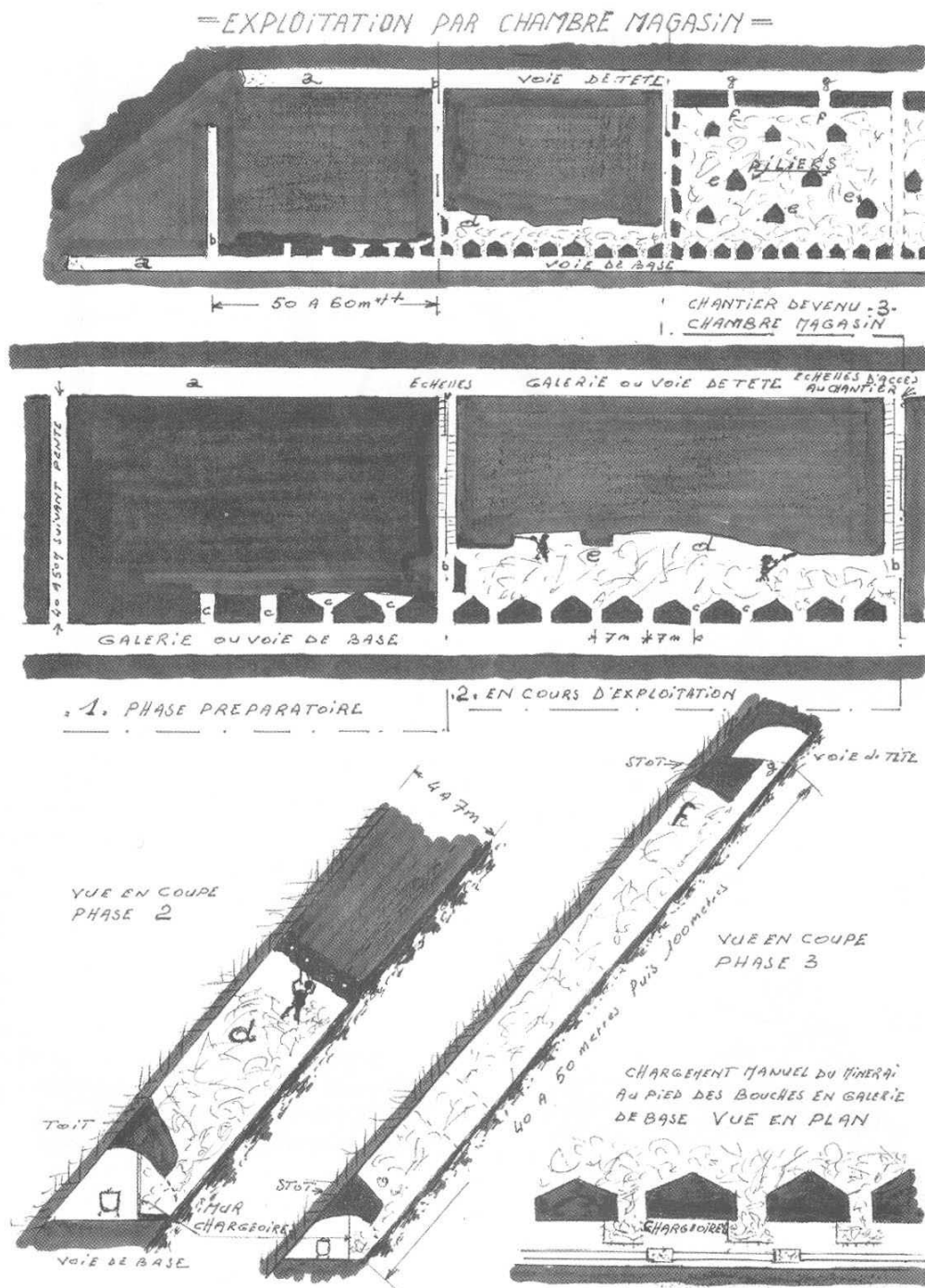


Figure 10 - Méthode d'exploitation par chambres magasins
(tiré de l'ouvrage « Histoire d'un pays minier, 1980)

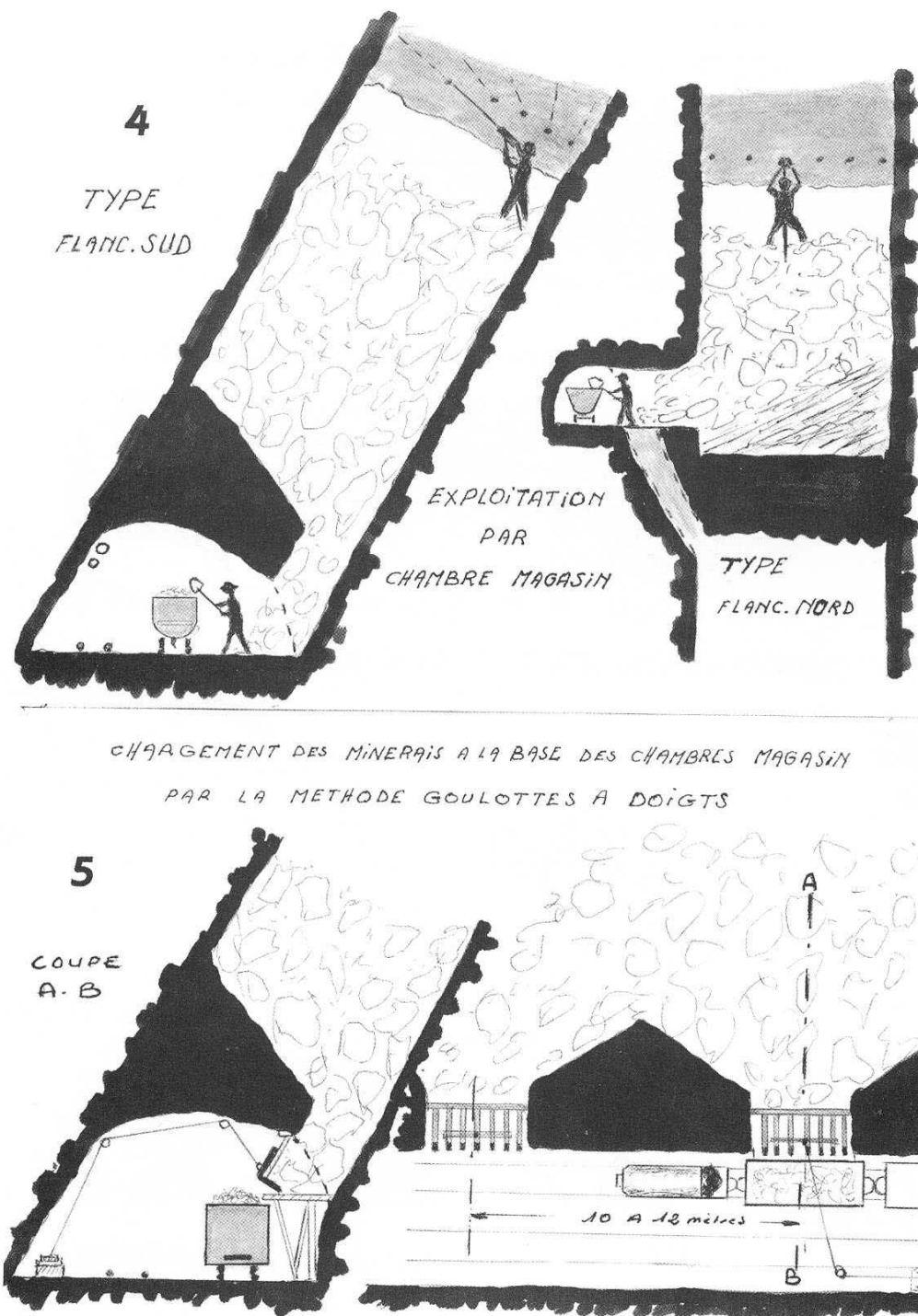


Figure 11 – Coupes synthétisant l'abattage et de chargement du minerai dans une chambre magasin (tiré de l'ouvrage « Histoire d'un pays minier, 1980)

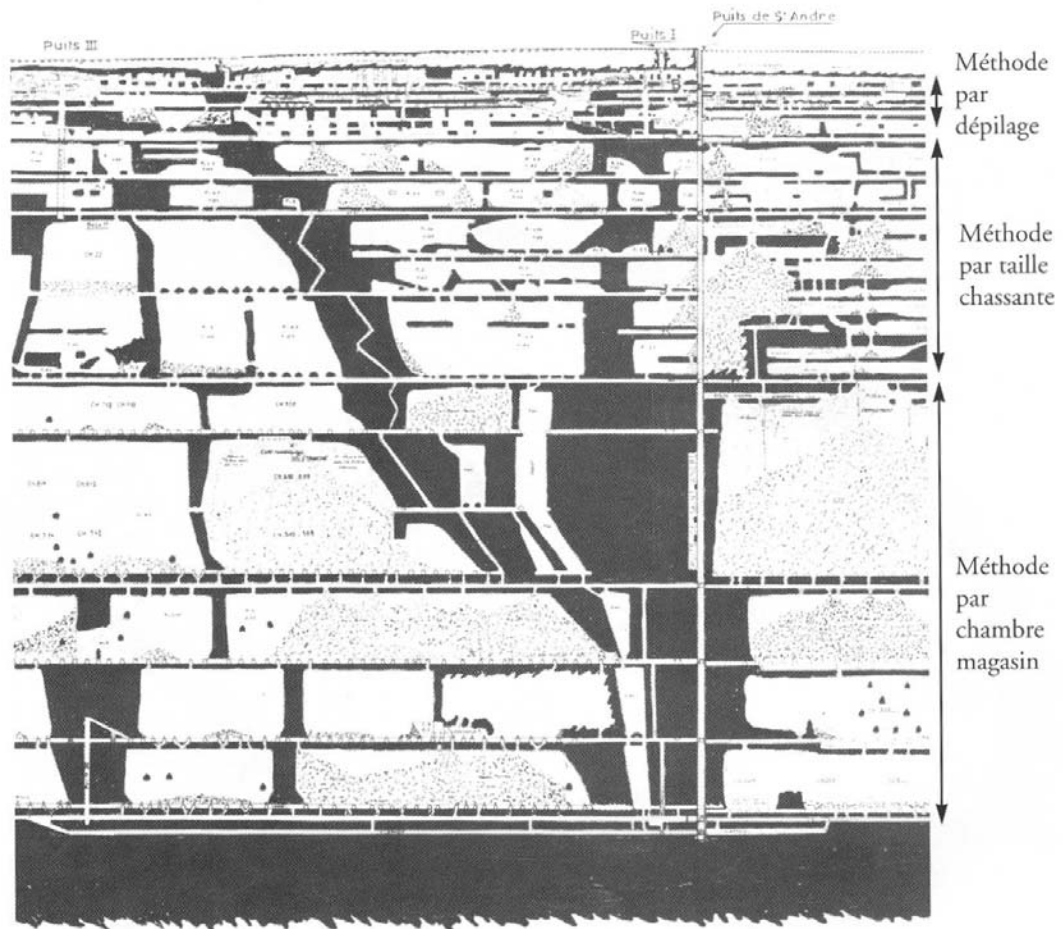


Figure 12 – Coupe générale d'un secteur du flanc nord montrant la localisation des différentes méthodes d'exploitation employées (tiré de l'ouvrage « Histoire d'un pays minier, 1980)

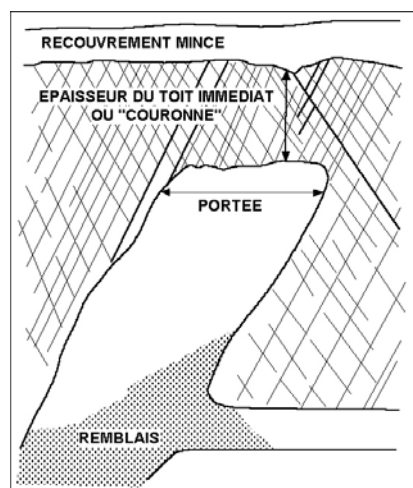


Figure 13 - Schéma général d'une « couronne »

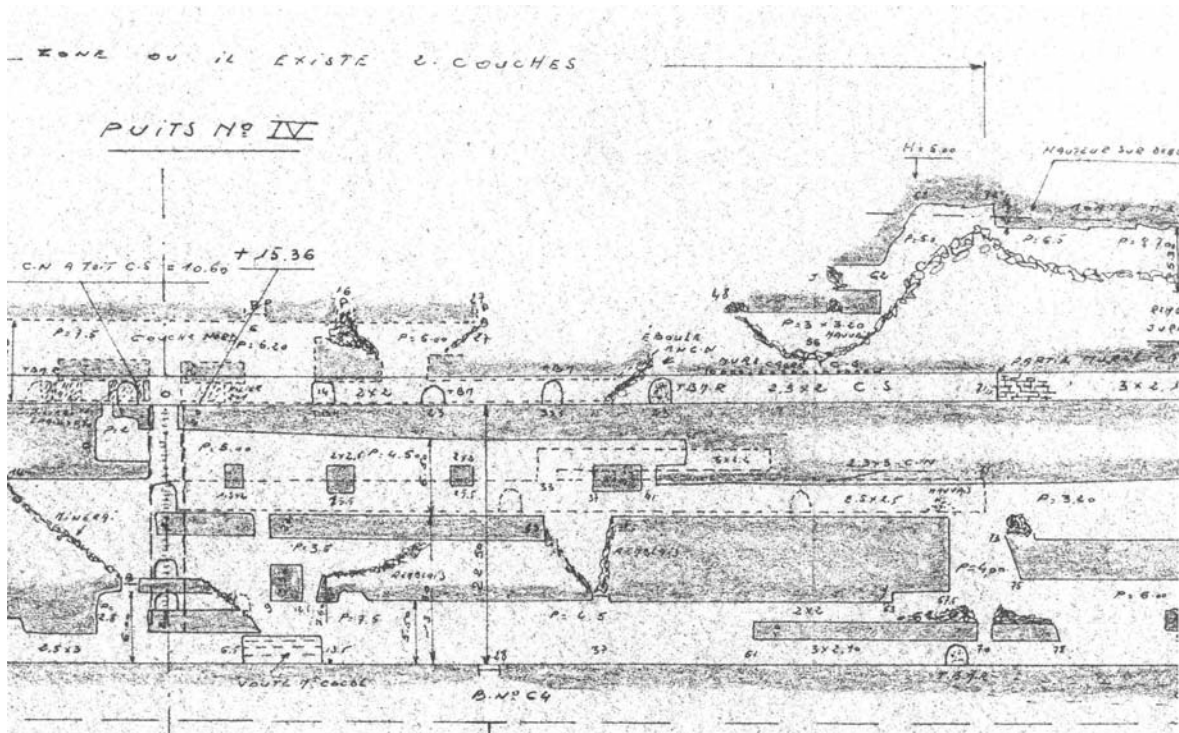


Figure 14 : Travaux du flanc nord près de l'entrée de la galerie de niveau B (coupe longitudinale dans le plan de la couche)

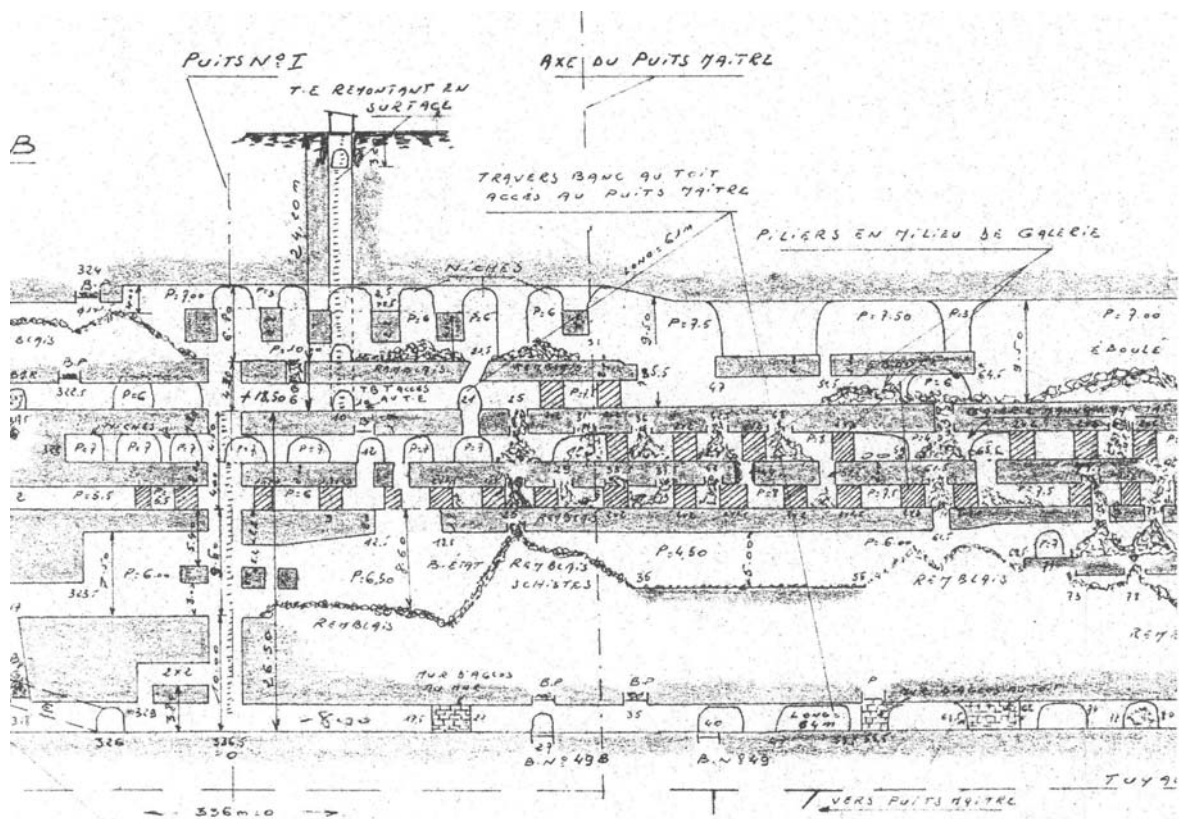


Figure 15 : Travaux du flanc nord près du puits Saint-André (coupe longitudinale dans le plan de la couche)

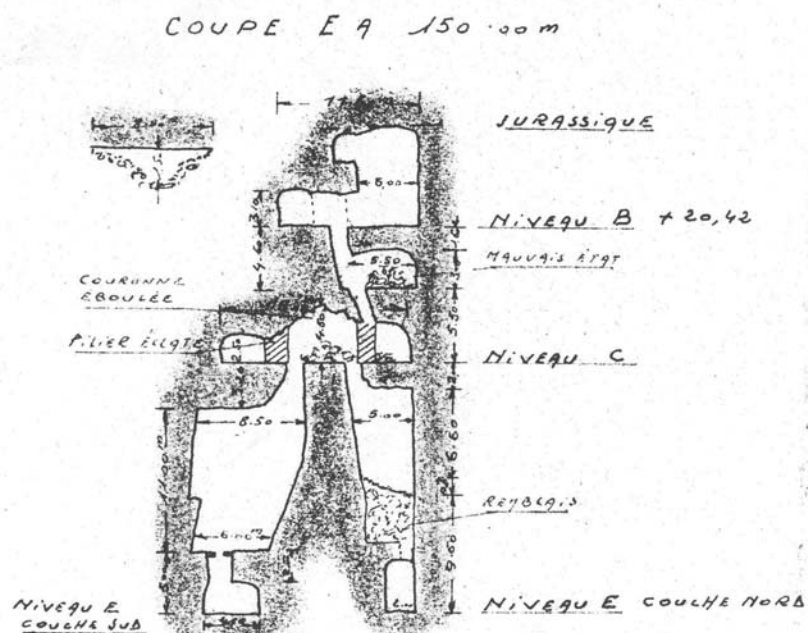


Figure 16 : Coupe transversale du flanc nord montrant l'exploitation des deux couches (couche nord et couche sud) dans le secteur de l'éboulement de 1918

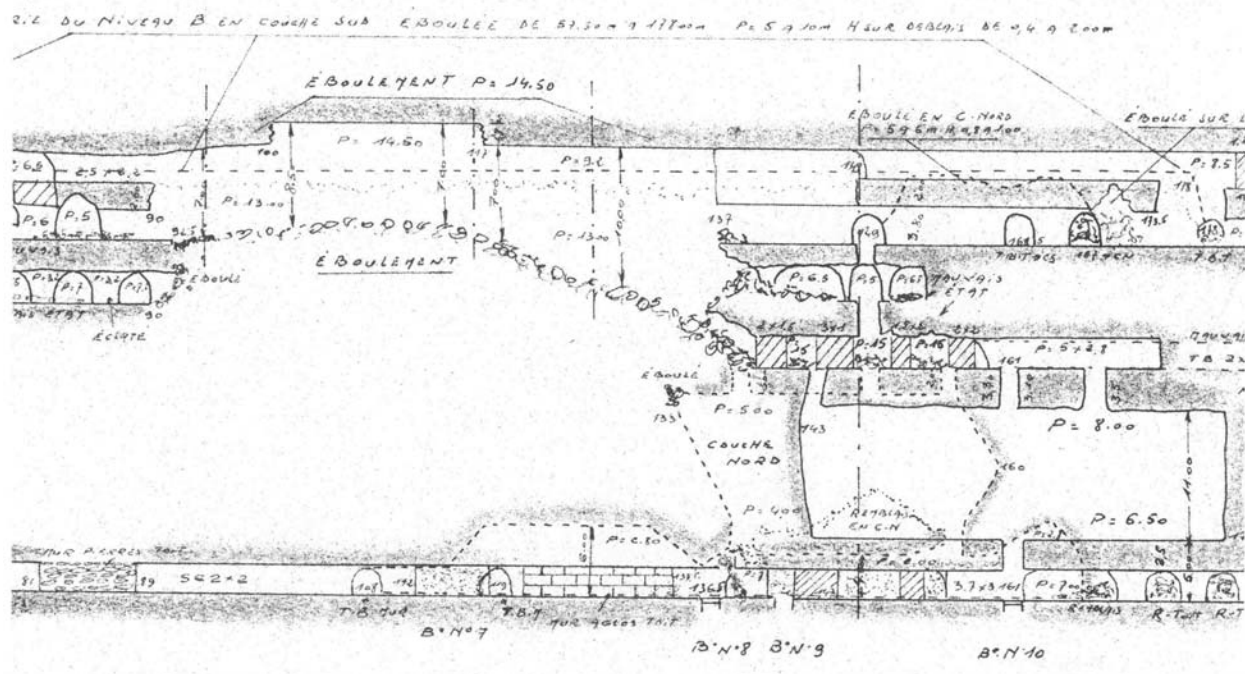


Figure 17 : Coupe longitudinale des travaux du flanc nord dans le secteur de l'éboulement de 1918

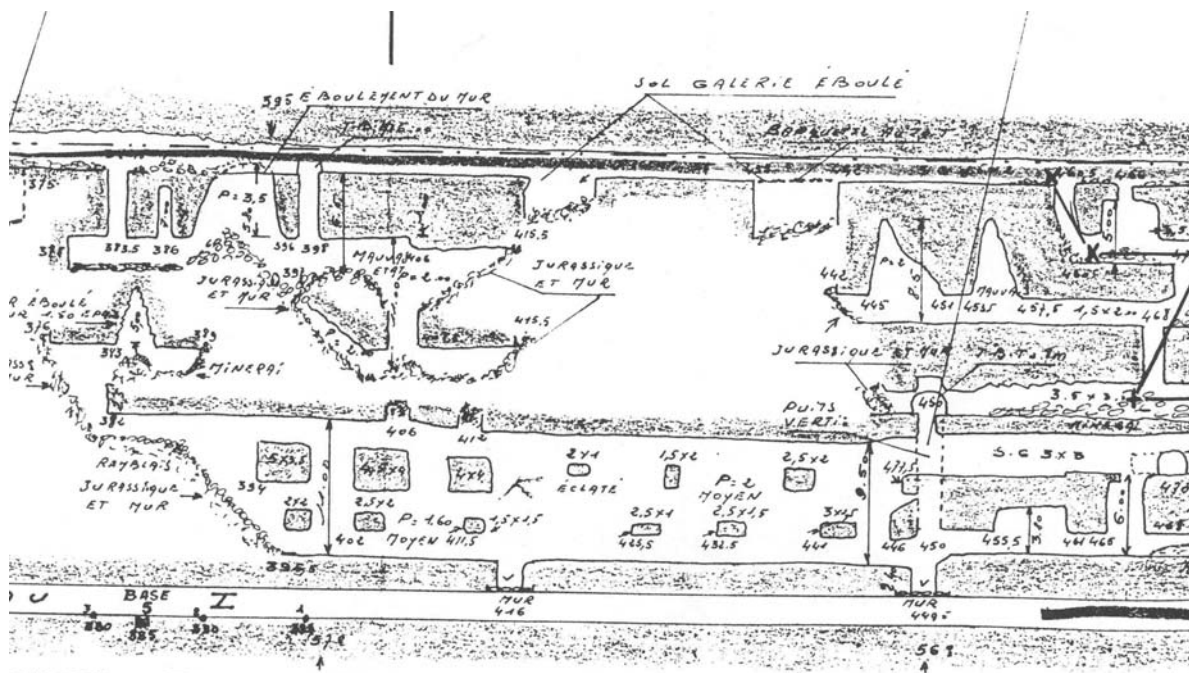


Figure 18 : Travaux du flanc sud près du puits d'Harcourt

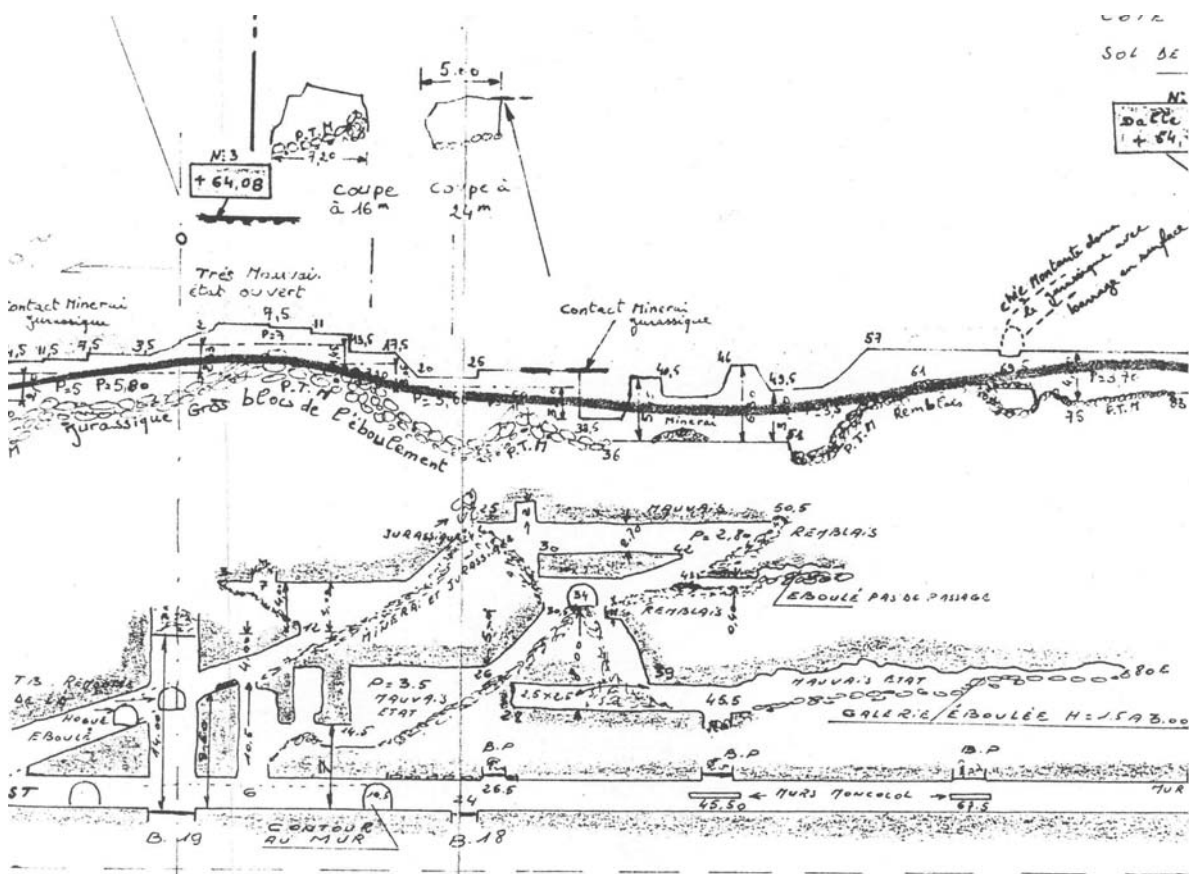


Figure 19 : Travaux du flanc sud près de la descenderie de La Hogue

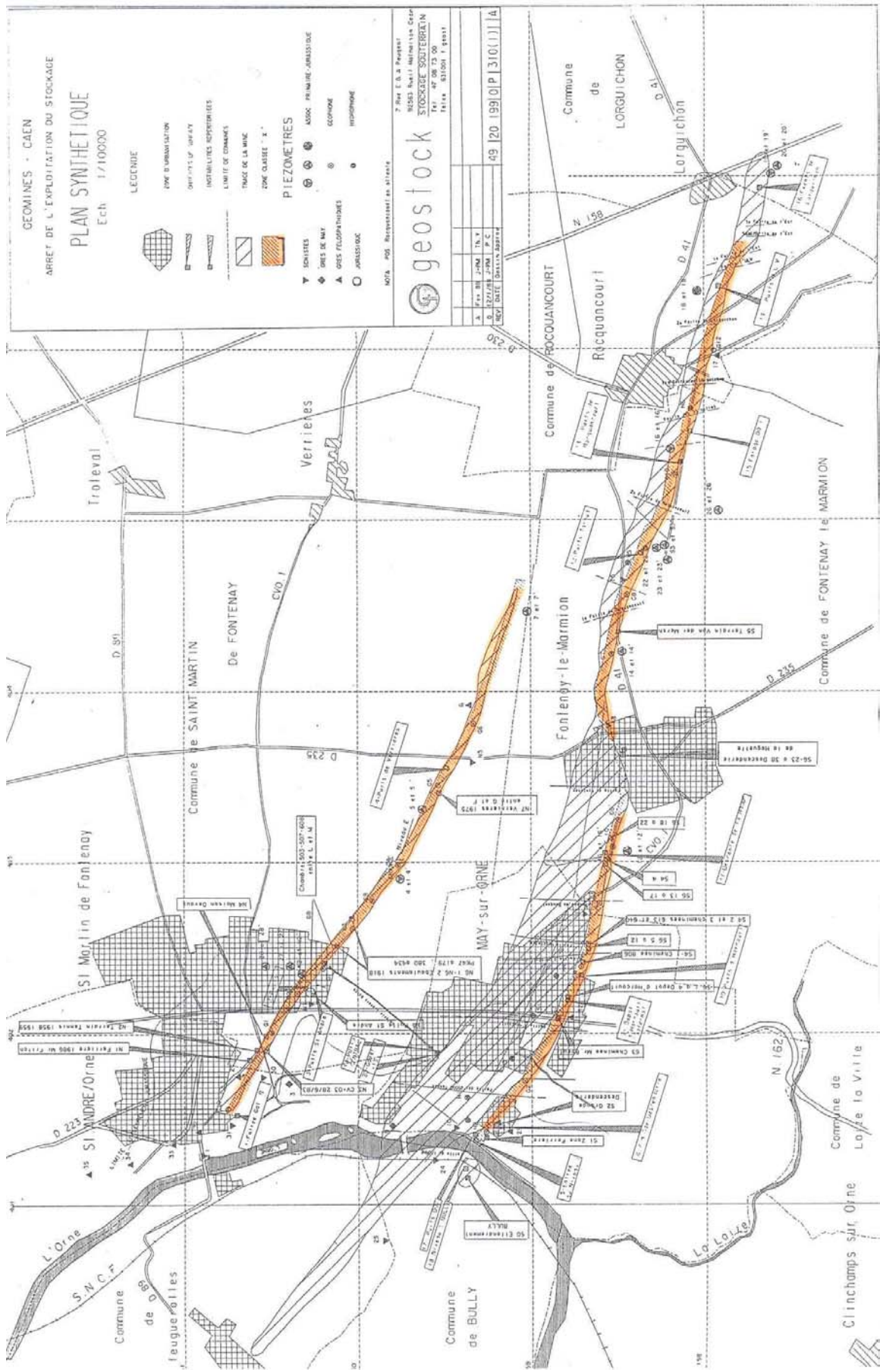


Figure 20 : Reproduction de la cartographie de 1988 des zones classées « X » à risques d'instabilités potentielles (niveaux supérieurs des flancs nord et sud)

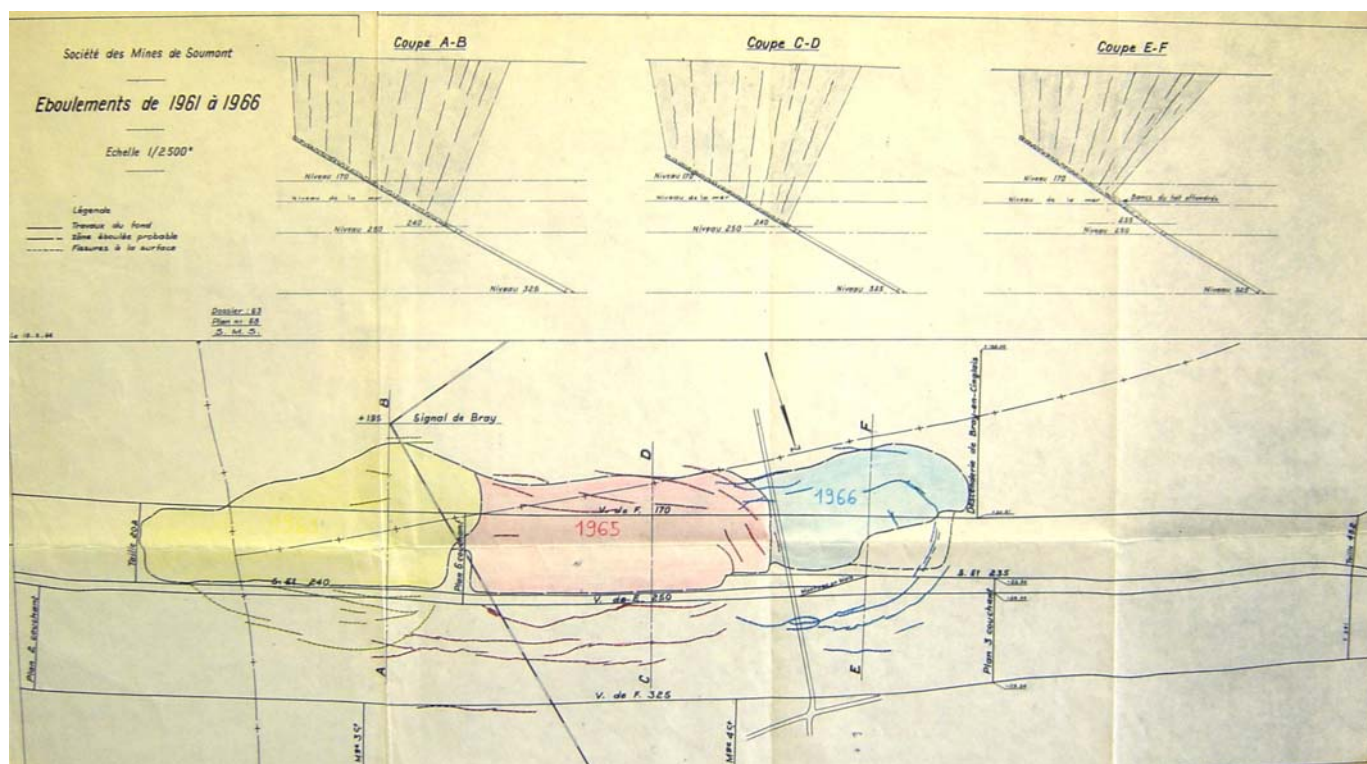


Figure 21 : Représentation en coupe et plan des éboulements suivis d'affaissements en surface à la mine de Soumont, en 1961, 1965 et 1966 (Archives DRIRE)

Principales caractéristiques relevées :

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

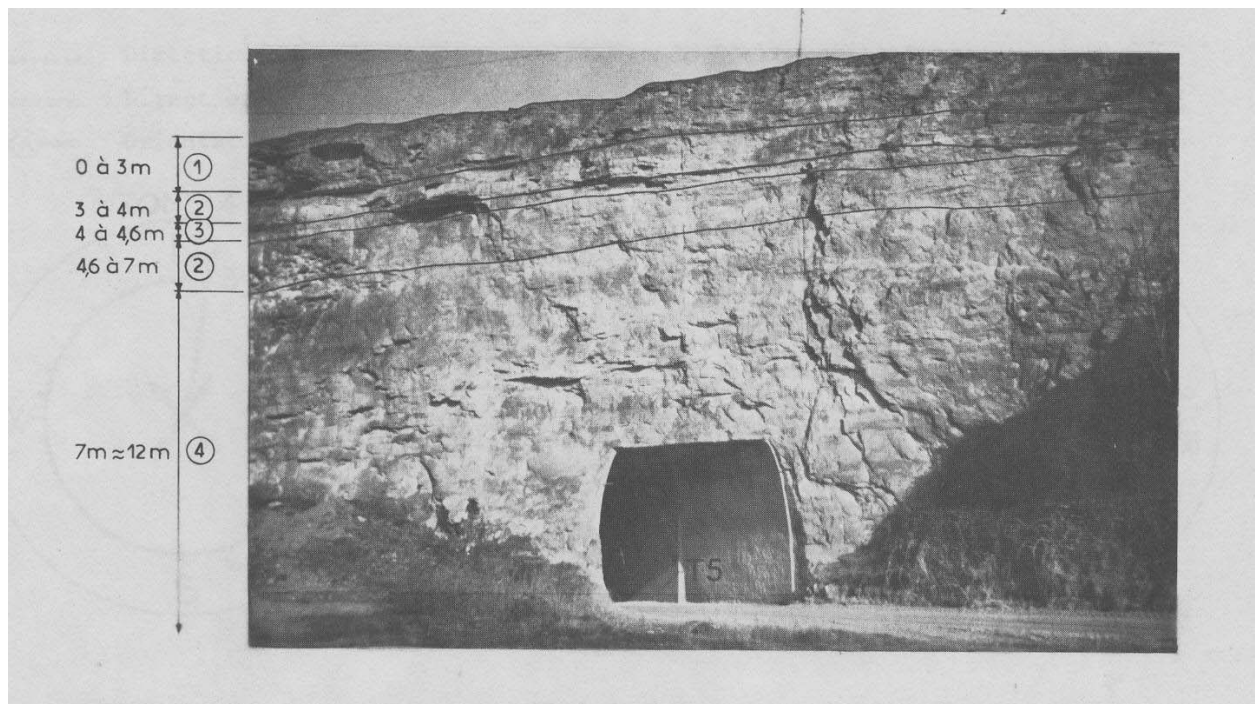


Figure 22 : Front rocheux de la carrières des Aucrais entamant la couverture jurassique et située à 6 kilomètre au sud du flanc sud de May-sur-Orne

On remarque sur cette photo la structure monoclinale et tabulaire des terrains jurassiques, discordants sur les terrains primaires, dont la composition de haut en bas est la suivante :

- 1 : calcaire à délits en plaquettes, très disloqués en surface ;
- 2 : calcaire fossilifère compact ;
- 3 : calcaire sans cohésion, à prédominance sableuse ;
- 4 : calcaire compact et massif, avec quelques intercalations de niveaux plus tendres.

Figure 23a : Flanc nord

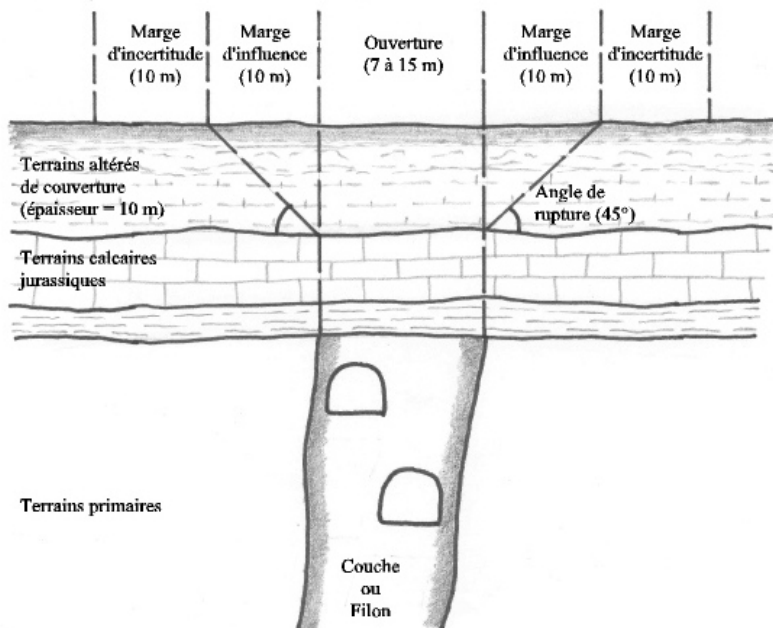


Figure 23b : Flanc sud

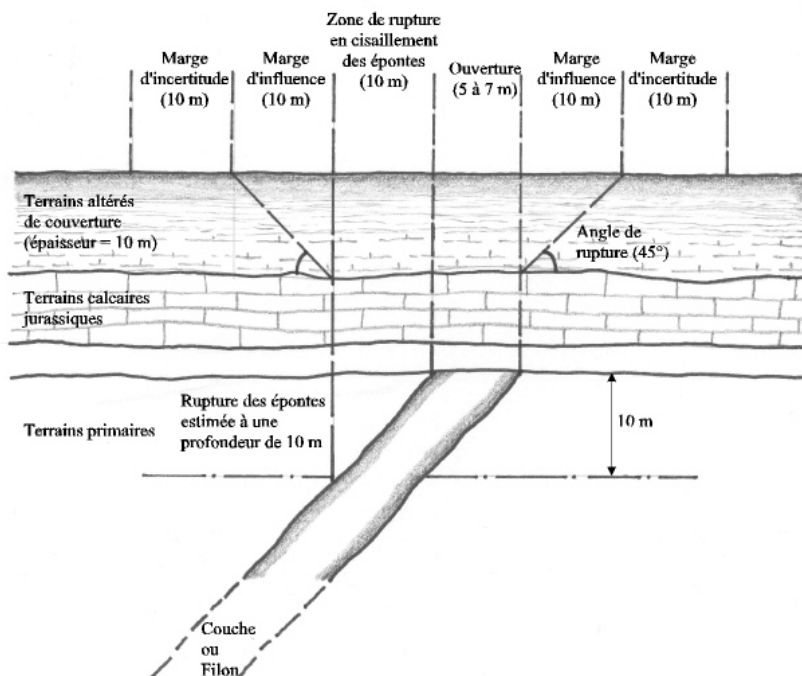


Figure 23 : Définition de la marge de sécurité (marges d'influence et marge d'incertitude) concernant les travaux miniers proches de la surface (chambres, galeries)

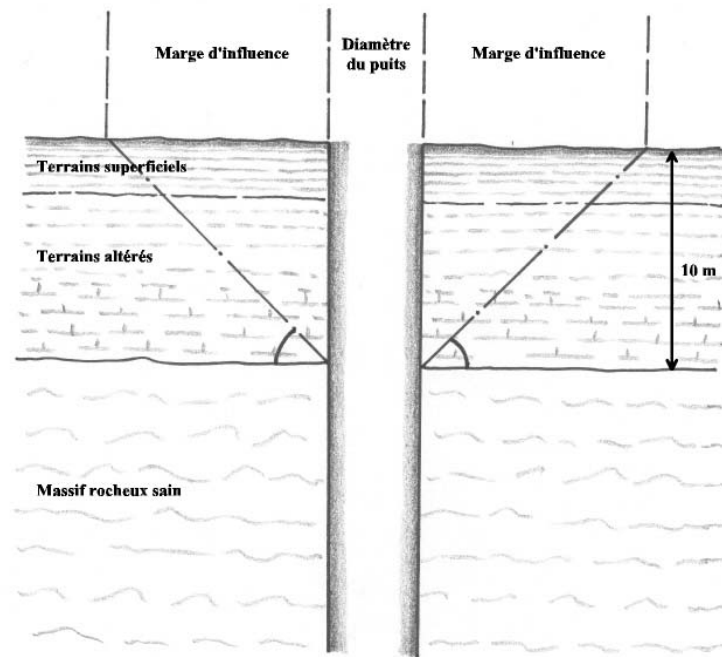


Figure 24 : Définition de la marge de sécurité (marges d'influence) concernant les puits et cheminées d'aération

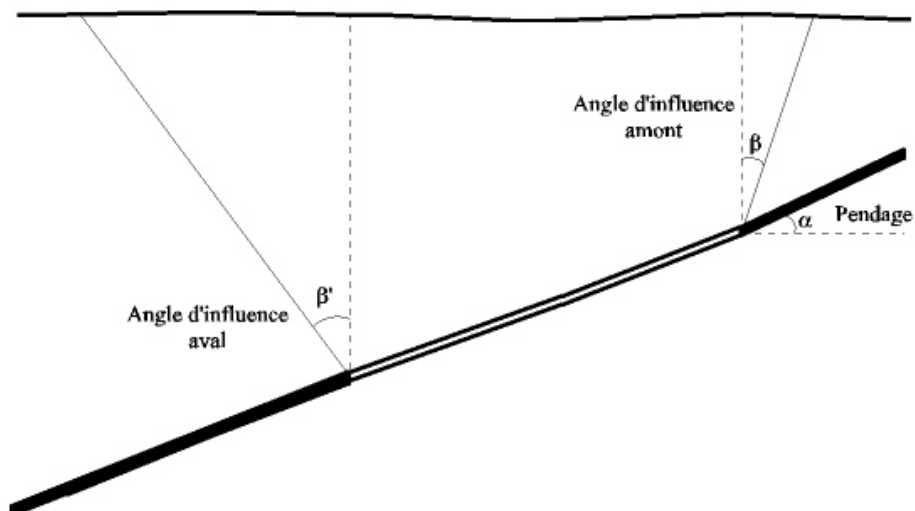


Figure 25 : Représentation théorique des angles d'influence amont et aval en gisement penté

PHOTOGRAPHIES



Photographie 1 – Entrée remblayée de la galerie de recherche sur la concession de Maltot (flanc nord)



Photographie 2 – Entrée murée de la galerie « école » (flanc sud)



Photographie 3 – Dalle sur le puits Saint-André (flanc nord)



Photographie 4 – Dalle sur le puits Central



Photographie 5 – Bâtiments des pompes du puits Taraud (flanc sud)



Photographie 6 – Effondrement d'une cheminée Bully (flanc sud)



Photographie 7 – Entrée vers la galerie de niveau B (flanc nord)



Photographie 8 – Entrée vers la galerie de niveau 1 (flanc sud)



Photographie 9 – Effondrement localisé de Guillot (flanc sud hors dalle calcaire)