

# Bassins ferrifères de Normandie et d'Anjou-Bretagne

## Phase préliminaire à la réalisation d'une modélisation numérique sur les gisements pentés des bassins ferrifères de Soumont, May-sur-Orne et Segré (Calvados et Maine-et-Loire).

DRIRE de Basse-Normandie

1er DÉCEMBRE 2003

Ce document comporte 23 pages (hors couverture).

|                | Rédaction   |  | Vérification   | Approbation                                 |
|----------------|---|--|--|---|
| <b>NOM</b>     | Thierry DELAUNAY  | Vincent RENAUD   | Alain THORAVAL   | Christian TAUZIEDE                          |
| <b>Qualité</b> | Ingénieur intervenant AUXIRBAT à la Direction des Risques du Sol et du Sous-sol | Ingénieur à la Direction des Risques du Sol et du Sous-sol | Ingénieur à la Direction des Risques du Sol et du Sous-sol | Directeur des Risques du Sol et du Sous-sol |
| <b>Visa</b>    |   |  |  |   |

## TABLE DES MATIERES

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1. OBJET ET CONTEXTE.....</b>  | <b>3</b>  |
| 1.1 CONTEXTE DE L'ETUDE.....  | 3         |
| <b>2. PRÉSENTATION DES TROIS MINES.....</b>   | <b>3</b>  |
| 2.1 MINE DE SOUMONT.....  | 3         |
| 2.2 MINE DE MAY-SUR-ORNE.....   | 4         |
| 2.3 MINE DE SEGRÉ.....  | 4         |
| <b>3. SYNTHÈSE DES ETUDES REALISEES.....</b>  | <b>8</b>  |
| 3.1 ETUDES RELATIVES À LA STABILITÉ DE LA MINE DE SOUMONT.....  | 8         |
| 3.1.1 <i>Résumés</i> .....  | 8         |
| 3.1.1.1 Rapport R81/20 sur la stabilité générale des zones exploitées en chambres et piliers en semi-dressant (cf. [14])..... | 8         |
| 3.1.1.2 Rapport R81/21 concernant le projet d'exploitation des étages 560-475 et 650-560 (cf.[15]).....                       | 10        |
| 3.1.1.3 Rapport R89/19 sur la stabilité générale du flanc sud de Soumont (cf.[16]).....                                       | 11        |
| 3.1.2 <i>Analyse des rapports</i> .....   | 12        |
| 3.2 ETUDE RELATIVE À LA STABILITÉ DE STABILITÉ DE MAY-SUR-ORNE.....   | 13        |
| 3.2.1 <i>Résumé</i> .....   | 13        |
| 3.2.2 <i>Analyse des rapports</i> .....   | 14        |
| <b>4. PROPOSITIONS DE MODELISATION.....</b>   | <b>15</b> |
| 4.1 OBJECTIFS.....  | 15        |
| 4.2 RÉTROANALYSE DE L'EFFONDREMENT DE 1966 À SOUMONT.....   | 15        |
| 4.2.1 <i>Choix de l'outil</i> .....   | 15        |
| 4.2.2 <i>Choix des paramètres et des hypothèses</i> .....   | 15        |
| 4.3 ETUDE PARAMÉTRIQUE 2D.....  | 16        |
| 4.3.1 <i>Géométrie étudiée</i> .....  | 16        |
| 4.3.2 <i>Choix de l'outil</i> .....   | 17        |
| 4.3.3 <i>Choix des paramètres</i> .....   | 17        |
| <b>5. BIBLIOGRAPHIE.....</b>  | <b>19</b> |

### LISTE DES PHOTOGRAPHIES

|   |   |
|---|---|
| Photographie 1 - Trace de la cuvette d'affaissement de l'effondrement de 1966 (vue vers le Nord-Ouest)..... | 9 |
|---|---|

### LISTE DES FIGURES

|   |    |
|---|----|
| Figure 1 – Coupe verticale SO-NE du flanc Sud à Soumont (Calvados).....     | 16 |
| Figure 2 – Coupe verticale SO-NE du flanc Sud à May/Orne (Calvados).....    | 18 |
| Figure 3 – Coupe verticale SO-NE du flanc Sud à Segré (Maine-et-Loire)..... | 18 |

### LISTE DES TABLEAUX

|  |    |
|--|----|
| Tableau 1 - Fiche signalétique de l'exploitation ferrifère de Soumont flanc Sud (Calvados).....  | 5  |
| Tableau 2 - Fiche signalétique de l'exploitation ferrifère de May-sur-Orne (Calvados).....       | 6  |
| Tableau 3 - Fiche signalétique de l'exploitation ferrifère de Segré zone 1 (Maine-et-Loire)..... | 7  |
| Tableau 4 – Taux de défrètement des étages exploités sous Soumont (cf. [14]).....                | 10 |
| Tableau 5 - Synthèse des 12 modalités de calcul (nappe à -10 m).....                             | 17 |

## **1. OBJET ET CONTEXTE**

---

### **1.1 CONTEXTE DE L'ETUDE**

Les gisements ferrifères de l'Ouest s'interstratifient dans les flancs de plusieurs synclinaux dont les pendages varient entre 35° et 90°. Sur les anciennes concessions de Segré, Soumont et May-sur-Orne, aujourd'hui renoncées, trois synclinaux ont été exploités, de manière similaire, par des méthodes dites par "chambres magasins" et, à Soumont, par chambres et piliers abandonnés en "taille montante".

Selon la prescription de la Préfecture du Maine-et-Loire et par anticipation pour les sites du Calvados, les DRIRE d'Anjou et de Basse-Normandie ont demandé l'établissement de Plans de Prévention des Risques Miniers (PPRM) concernant les communes situées dans l'emprise des anciennes exploitations ferrifères pentées de Segré "Zone 1", Soumont (flanc Sud) et May-sur-Orne.

La recherche et la synthèse des informations (documents d'archives) ont été réalisées par l'INERIS dans le cadre des phases informatives des PPRM "mouvements de terrain" de ces trois exploitations (cf. rapports INERIS-DRS-03-42376/R01 pour Segré et INERIS-DRS-03-44270/R01 pour Soumont ; le rapport pour May-sur-Orne est en cours de rédaction).

Compte tenu des informations dont l'INERIS dispose, des enjeux et de l'expérience acquise dans ce domaine, il paraît difficile d'appréhender la stabilité à long terme de ces exploitations et de définir précisément l'aléa "mouvements de terrain" en se fondant uniquement sur des méthodes analytiques simples telles que la théorie de l'aire tributaire. D'ailleurs, des travaux récents ont montré les limites de la méthode de l'aire tributaire (cf. [1] et [3]). Ainsi, dans le cadre de l'élaboration des PPRM "mouvements de terrain", l'INERIS, en collaboration avec GEODERIS, propose d'examiner la pertinence d'une modélisation numérique pour l'analyse des conditions de stabilité à long terme de ces exploitations.

## **2. PRÉSENTATION DES TROIS MINES**

---

Les exploitations ferrifères de Soumont, May-sur-Orne et Segré correspondent à des gisements interstratifiés dans des massifs primaires (Ordovico-Silurien) plissés. Ces gisements s'intègrent dans trois synclinaux dissymétriques (flancs Sud pentés entre 30° à 65° et flancs Nord subverticaux) orientés approximativement est-Ouest (axe principal pour chaque synclinal d'azimut 105° N). Le mur est composé de grès, et le toit de schistes ou, localement, d'une alternance de grès et de schistes.

### **2.1 MINE DE SOUMONT**

Le bassin ferrifère de Soumont – Saint-Quentin se situe à 25 km au Sud de Caen, juste au Nord du village de Potigny et de part et d'autre de la route nationale RN158. De 1907 à 1989, la Société des Mines de Soumont a exploité, pour le fer, le flanc Sud du synclinal de Soumont-Urville (Calvados), orienté globalement Est-Ouest, sur plusieurs kilomètres.

## **2.2 MINE DE MAY-SUR-ORNE**

La Société des Mines et Produits Chimiques a exploité le 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 Feugerolles-Bully, Saint-André-sur-Orne, Saint-Martin-de-Fontenay, May-sur-Orne, Fontenay-le-Marmion, Rocquancourt et Lorguichon. Par la suite, la Société GEOSTOCK (remplacée par la Société GEOMINES-CAEN) a utilisé la mine pour le stockage d'hydrocarbures (gazole) de 1972 à 1993.

## **2.3 MINE DE SEGRÉ**

La Société des Mines de fer de Segré a exploité, sur plusieurs kilomètres, de 1907 à 1984, dans le Maine-et-Loire, les flancs Nord et Sud du synclinal de Segré – Saint-Sulpice-des-Landes, orienté globalement est-Ouest. Le bassin ferrifère de Segré se situe à environ 30 km au Nord-Ouest d'Angers, entre les communes de Nyoiseau et Bourg-L'Evêque.

Les informations relatives aux exploitations de Soumont, de May-sur-Orne et de Segré sont synthétisées dans les coupes et les tableaux suivants.

| MINE DE SOUMONT (FLANC SUD) |                             |  |                   |  |  |  |
|-----------------------------|-----------------------------|--|-------------------|--|--|--|
| DONNEES DISPONIBLES         |                             | CARACTERISTIQUES   |                   |  | VALEURS  | SOURCE   |
| EXPLOITATION                | Date                        | 1907-1989  |                   |  |  | archives   |
|                             | Type                        | Chambres et piliers  | Chambres magasins | Galeries horizontales élargies                                     |  | archives   |
|                             | Eau                         | ennoyé   |                   |  | - 10 à 15 m/TN soit à +150 m NGF et exhauère à +97 m NGF   | visite sur site                                    |
|                             | Profondeur                  | de 0 à 300 m   |                   | de 300 à 650 m   |  | archives   |
| GEOMETRIE                   | Dimensions mine             | largeur = 1,1 km et longueur = 15 km   |                   |  |  | archives   |
|                             | Ouverture                   | 3 à 6 m  |                   |  |  | archives   |
|                             | Pendage                     | de 30° à 45°   | de 45° à 60°      | de 30° à 60°   |  | archives   |
|                             | Taux de défruitement        | de 85 à 90% entre 0 et 170 m<br>de 75 à 85 % entre 170 et 240 m<br>de 70 à 85 % entre 240 et 325 m   |                   | de 65 à 75 % entre 325 et 475 m<br>de 60 à 65 % entre 475 et 650 m |  | archives   |
|                             | Failles                     | transversales et nombreuses  |                   |  |  | archives   |
| GEOMECHANIQUE               | Couche                      | 2 minerais : - de 95 à 450 m minerai carbonaté<br>- de 40 à 95 m minerai altéré (propriétés mécaniques plus faibles)                                       |                   |  | minerai carbonaté : Rc = 115,2 MPa<br>Ru = 51,6 MPa  | cf. [13]   |
|                             | Toit                        | alternances schistes/grès  |                   |  | Rc = 134,5 MPa toit immédiat<br>Ru = 61,4 MPa au toit immédiat   | cf. [13]   |
|                             | Mur                         | grès   |                   |  | Rc = 145,4 MPa et Ru = 68 MPa pour mur immédiat  | cf. [13]   |
|                             | recouvrement en discordance | calcaires de 0 à 50 m depuis l'Ouest ou l'est vers le centre   |                   |  | acquisition en cours   | archives   |
| DIVERS                      | Enjeux                      | Villages de Soumont et Saint-Germain-le-Vasson et quelques fermes  |                   |  |  | visite sur site                                    |
|                             | Plans disponibles           | plan 1/2500  |                   |  |  | archives   |
|                             | Effondrement connus         | Affaissements en 1929, <1940, 1951, 1961-1965-1966 + effondrements localisés par rupture de couronne proche de la surface ou débouillage de puits          |                   |  | En 1929 : effondrement entre -95 et -170 m avec taux= 80% et Am = 1m<br>En 1961-1965-1966, effondrements entre -120 et -250 m taux = 80-85% et Am=0,65 m (40 ans après exploitation). Observation en 2003 d'une cuvette de 2,5 à 3 m de profondeur/TN (cf. Photographie1) (non mentionnée dans archives) au niveau de l'effondrement de 1966 = reprise d'affaissement et origine ? | archives + cf. [18]<br>+ visite sur site (surface) |
|                             | Surveillance                | de 1994 à 1997 pendant l'ennoyage : surveillance microsismique et auscultation altimétrique - aucun indice d'instabilité et de mouvement de terrain relevé |                   |  |  | archives   |

Tableau 1 - Fiche signalétique de l'exploitation ferrifère de Soumont flanc Sud (Calvados)

| MINE DE MAY-SUR-ORNE |                             |   |   |   |                                     |
|----------------------|-----------------------------|---|---|---|-------------------------------------|
| DONNEES DISPONIBLES  |                             | CARACTERISTIQUES  |   | VALEURS   | SOURCE                              |
| EXPLOITATION         | Date                        | 1896-1968 + 1972-1993 (stockage hydrocarbures)  |   |   | archives                            |
|                      | Type                        | Chambres magasins<br>2 couches A et B avec un intercalaire 40 m   |   |   | archives                            |
|                      | Eau                         | ennoyé sauf galerie des morts-terrains au contact des calcaires jurassiques   |   | entre - 10/TN vers l'Ouest et -70/TN vers l'est   | archives                            |
|                      | Profondeur                  | de 0 à 460 m  |   |   | archives                            |
| GEOMETRIE            |                             | <b>FLANC NORD</b>   | <b>FLANC SUD</b>  |   | 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 défruitement        | > 80 %  |   |   | archives                            |
|                      | Failles                     | transversales et nombreuses   | faille longitudinale au jeu inverse faisant chevauché la couche (bicouche) entre niveau V et niveau X sur une largeur de 170 m (intercalaire de 25 à 35 m) + failles nombreuses transversales |   |                                     |
| GEOMECANIQUE         | Couche                      | monocouche sauf pour le flanc Sud dans le secteur faillé  |   | Flanc Nord : E = 87 GPa ; Rt = 10 MPa ;<br>Rc = 100 MPa ; v, c et $\Phi$ ?<br>Flanc Sud : E = 75 GPa ; Rt = 14 MPa ;<br>Rc = 170 MPa ; v, c et $\Phi$ ? | étude Géostock<br>cf. [40]          |
|                      | Toit                        | Alternances schistes/grès sur 10 m puis schistes ardoisiers   |   | Schistes: Flanc Nord : E = 70 GPa ; Rc = 25 MPa<br>Flanc Sud : E = 45 GPa ; Rc = 25 MPa   | étude Géostock<br>cf. [40]          |
|                      | Mur                         | grès feldspathiques   | schistes ardoisiers dans le secteur faillé<br>ou grès feldspathiques  | grès de très bonne qualité : difficulté de sciage et<br>de carottage  | étude Géostock<br>cf. [40]          |
|                      | recouvrement en discordance | calcaires de 0 à 60 m depuis l'Ouest vers l'Est   |   | acquisition en cours  | archives                            |
| DIVERS               | Enjeux                      | Villes de Saint-Martin-de-Fontenay et St-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           | 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 +<br>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 2 - Fiche signalétique de l'exploitation ferrifère de May-sur-Orne (Calvados)

| MINE DE SEGRE (ZONE 1) |                             |  |                  |  |  |   |  |
|------------------------|-----------------------------|--|------------------|--|--|---|--|
| DONNEES DISPONIBLES    |                             | CARACTERISTIQUES   |                  |  | VALEURS  | SOURCE  |  |
| EXPLOITATION           | Date                        | 1907-1984  |                  |  |  | archives  |  |
|                        | Type                        | Chambres magasins<br>2 couches A et B avec un intercalaire 40 m  |                  |  |  | archives  |  |
|                        | Eau                         | ennoyé   |                  |  | - 15 m/TN comprenant un rabattement permanent de 6 m | archives + visite sur site  |  |
|                        | Profondeur                  | de 0 à 490 m   |                  |  |  | archives  |  |
| GEOMETRIE              | Dimensions mine             | FLANC NORD   |                  | FLANC SUD                                |  | archives  |  |
|                        |                             | largeur = 200 m et longueur = 2 km   |                  | largeur = 450 m et longueur = 2,5 km     |  | archives  |  |
|                        | Ouverture                   | couche A   | couche B         | couche A                                 | couche B   | archives  |  |
|                        |                             | 1,5 à 1,8 m  | 0,8 à 1,4 m      | 1,5 à 2 m                                | 0,8 à 1,6 m  | archives  |  |
|                        | Pendage                     | de 85° à 90°   |                  | de 45° (vers l'Ouest) à 65° (vers l'est) |  | archives  |  |
|                        | Taux de défrètement         | > 80 %   |                  |  |  | archives  |  |
| Failles                | transversales et nombreuses |  |                  |  | archives   |   |  |
| GEOMECHANIQUE          | Couche                      | d'après mineur couche B plus "dure" que couche A   |                  |  | aucune donnée dans archives                          | visite sur site   |  |
|                        | Toit                        | schistes ardoisiers  | grès armoricains | schistes ardoisiers                      | grès armoricains                                     | schistes ardoisiers :<br>E = 27GPa ; $\nu = 0,2$ ; Rt = 5MPa<br>Rc = 114,5 MPa ; c = 3,1 MPa ;<br>$\phi = 61^\circ$ | Archives<br>Caractéristiques provenant de la carrière de Misengrain distante de moins d'1 km |
|                        | Mur                         | grès armoricains   | grès armoricains | grès armoricains                         | grès armoricains                                     | aucune donnée archivée  |  |
|                        | recouvrement en discordance | localement des "poches de sable" à proximité de certaines failles  |                  |  |  | archives + sondages   |  |
| DIVERS                 | Enjeux                      | Quelques hameaux et fermes   |                  |  |  | visite sur site   |  |
|                        | Plans disponibles           | plans 1/2500 et coupes 1/500 (mis à disposition du BRGM pour calage)   |                  |  |  | archives  |  |
|                        | Effondrements connus        | effondrements localisés par rupture de couronne proche de la surface ; pas d'affaissement ni d'effondrement généralisé |                  |  |  | visite sur site   |  |
|                        | Surveillance                | aucune   |                  |  |  | archives  |  |

Tableau 3 - Fiche signalétique de l'exploitation ferrifère de Segré zone 1 (Maine-et-Loire)

### 3. SYNTHÈSE DES ÉTUDES RÉALISÉES

---

Des études de stabilité ont été réalisées concernant les mines de Soumont et May-sur-Orne. Après la consultation des archives, il apparaît qu'aucune étude de stabilité ne semble avoir été effectuée pour la mine de Segré.

Pour la mine de Soumont, les études de stabilité ont été réalisées par Messieurs E. Tincelin et G. Vouille du Centre de Géotechnique et d'Exploitation du Sous-sol de l'École Nationale Supérieure des Mines de Paris. Ces études concernent l'exploitation et son dimensionnement à forte profondeur lors du projet d'extension de la mine en 1981 (cf. [15]) et l'analyse de la stabilité à terme des anciens travaux (cf. [13, 14, 15 et 16]).

Pour la mine de May-sur-Orne, une étude de stabilité a été réalisée après exploitation par la société GEOSTOCK (puis GEOMINES) pour le stockage d'hydrocarbures en 1971-1972 (cf. [43 à 46]).

#### 3.1 ÉTUDES RELATIVES À LA STABILITÉ DE LA MINE DE SOUMONT

##### 3.1.1 Résumés

3.1.1.1 Rapport R81/20 sur la stabilité générale des zones exploitées en chambres et piliers en semi-dressant (cf. [14]).

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

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

*“ La méthode d'exploitation par piliers abandonnés est la seule compatible (...) dans des conditions économiques et techniques acceptables.*

*En effet, il semble de plus en plus prouvé que les méthodes par foudroyage ne sont envisageables (...) que dans des gisements dont les roches concernées (minerai et celles du toit) ont des caractéristiques telles que :*

- $R_c > 2 \text{ à } 3 \rho_{gh}$  (possible à 1,5  $\rho_{gh}$  mais soutènement très important) ;

*R<sub>c</sub> étant la résistance à la compression instantanée du minerai et  $\rho_{gh}$  est la contrainte naturelle ;*

- $R_c < 12 \rho_{gh}$  ” (permettant la rupture immédiate des bancs du toit après torpillage des piliers) ;

*R<sub>c</sub> étant la résistance à la compression des bancs du toit et  $\rho_{gh}$  est la contrainte naturelle ”.*

Dans le cas de la mine de Soumont, ils concluent, d'après “ ces lois ”, que la méthode d'exploitation par foudroyage n'était pas réalisable dans les étages supérieures. Toutefois, cette méthode aurait pu être envisagée pour les étages inférieurs (au-delà de 500 mètres de profondeur) mais la présence d'eau dans les bancs du toit l'a finalement interdit.



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

Concernant les étages 170-95 et 250-170, les affaissements de 1961 à 1966 sont dus à l'effondrement des piliers entre les niveaux 170 et 250. Les effondrements ont été arrêtés par des stots ou des piliers de largeur supérieure à 10 m. L'ouverture de ces niveaux varie entre 3 et 4,6 m. L'affaissement mesuré au jour en 1981 était de 0,65 m, il est maintenant de l'ordre 2,5 à 3 m (uniquement pour la zone affaissée de 1966, cf. Photographie 1). Ces affaissements se sont produits 20 à 25 ans après l'exploitation de ces niveaux.



*Photographie 1 - Trace de la cuvette d'affaissement de l'effondrement de 1966  
(vue vers le Nord-Ouest)*

Concernant l'étage 325-250, aucun panneau ne s'est effondré à la date du rapport (et jusqu'à ce jour, cf.[4]).

Suivant cette analyse, les auteurs concluent aussi que le taux de contrainte imposé aux piliers des étages 170-95 et 250-170 parvenus à l'effondrement dépassait légèrement la limite admissible. Ainsi, il a été décidé de mettre en oeuvre une surveillance par convergencemètres car 90 % de la surface des niveaux [170-325] ne s'étaient pas encore effondrés.

Certaines stations ont montré que des zones étaient stables et que d'autres convergeaient. Les recommandations des auteurs ont été de laisser évoluer les mouvements car les affaissements attendus en surface seraient de faible amplitude et n'affecteraient que des zones non habitées.

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

- **Stabilité des étages inférieurs au niveau 325**

La rétroanalyse des effondrements précédemment cités ont permis de déterminer la résistance ultime, évaluée en connaissant les taux de défruitement des zones effondrées et leurs profondeurs ainsi que la résistance élastique "moyennement mesurée sur un échantillon" ( $Re = 51,6$  MPa). La résistance ultime a ainsi été calculée à 38 MPa. Suivant cette valeur, les auteurs ont préconisé des taux de défruitement pour l'exploitation des étages inférieurs (exploités par la méthode des galeries élargies, cf. tableau 1). Ces taux sont de 75 % pour l'étage 400-325 et de 70% pour l'étage 475-400. Les auteurs soulignent le respect de ces taux de défruitement par la mine de Soumont.

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

• **Stabilité du stot de protection du village de Soumont**

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

De plus, ils soulignent que les taux de défrètement des exploitations à l'aplomb du village de Soumont, calculés en tenant compte des bandes fermes séparant les chantiers, sont " nettement " inférieurs aux taux limites préconisés (taux de sécurité) pour " assurer la stabilité des piliers abandonnés " (cf. tableau 4).

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

Tableau 4 – Taux de défrètement des étages exploités sous Soumont (cf. [14])

3.1.1.2 Rapport R81/21 concernant le projet d'exploitation des étages 560-475 et 650-560 (cf.[15])

Ce rapport souligne les éléments suivants :

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

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

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

### 3.1.1.3 Rapport R89/19 sur la stabilité générale du flanc sud de Soumont (cf.[16])

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

Les rétroanalyses des effondrements du flanc sud ont permis d'évaluer la résistance à la compression du minerai par la méthode de l'aire tributaire à :

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

Les auteurs présentent ensuite une synthèse des deux précédents rapports ainsi qu'un compte-rendu de leurs visites au fond. Ils en concluent que si  $\tau > 85 \%$  et si  $L > H$ , quelle que soit la profondeur  $H$ , alors il y a risque d'effondrement.

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

#### • **Zones hors stot exploitées par piliers abandonnés avant 1965**

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

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

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

- “ dans la zone située à l'Ouest du stot de Soumont entre ce stot et le plan 4 levant, limitée à l'aval par la galerie de niveau 240 et à l'amont par la limite supérieure des chantiers (vraisemblablement le contact avec l'hématite), le taux de défrètement est compris entre 80 et 90 % et on peut y inscrire un cercle de 230 m de diamètre car le stot de la galerie de niveau 170 a été tellement percé qu'il ne saurait constituer un obstacle à la propagation d'un éventuel éboulement ” ;
- “ les zones situées de part et d'autre de la descenderie de Soumont entre 170 et 95 sont dans une situation en tous points semblable à celle de la zone effondrée au levant vers 1929, leur stabilité à terme est donc improbable ” ;

- “ dans la zone située à l'Ouest de la faille d'Aisy et à l'est des éboulements de 1961 entre le contact avec l'hématite et le niveau 240, le taux d'exploitation est compris entre 85 % et 90 % et, là encore, le stot de la galerie de niveau 170 est tellement exploité qu'il doit être englobé dans une zone éventuellement effondrable (un cercle de plus de 200 m de diamètre est inscriptible dans la zone considérée) ” ;
- “ enfin, d'un point de vue objectif, à la lecture des plans, rien ne différencie la zone située à l'Ouest de la descenderie de Bray en amont de 235, zone qui est encore debout, de la zone effondrée située à l'Est de cette même descenderie ; la stabilité à terme de la zone située en amont 235 entre la descenderie de Bray en Cinglais et la zone des plis n'est donc absolument pas assurée ” ;
- les auteurs ajoutent que “ la zone située entre les niveaux 170 et 240 d'une part, et les plans 1 et 2 levant d'autre part, accolée à la zone effondrée en 1951 pourrait éventuellement se remettre en mouvement et progresser vers le levant. La zone affectée pourrait parvenir alors à une dimension critique au point de toucher la surface ”.

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

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

- **Zones hors stot exploitées par piliers abandonnés après 1965**

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

- **Zones de stot**

Les auteurs constatent, après une visite au fond et à la lecture des plans de mine, que : *“ Près de la descenderie de Soumont, un stot est en train de s'effondrer au niveau 95. Cela affecte deux maisons, les bâtiments du carreau ainsi qu'une route nationale. Sous St-Germain le Vasson, il y a un hangar sous la mine de Barbery (travaux en hématite dont la résistance à la compression est plus faible que celle du minerai carbonaté) ”.*

### 3.1.2 Analyse des rapports

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

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

- la valeur retenue de 38 MPa pour la contrainte moyenne nous paraît élevée notamment par rapport à la valeur calculée de 32,3 MPa sur la rétroanalyse de l'effondrement de 1929 ;
- la largeur critique pour qu'un effondrement des travaux miniers se répercute en surface est classiquement de  $L/H \geq 0,4$  (cf. [14]). Toutefois, la valeur utilisée dans l'étude de stabilité générale de la mine de Soumont est de  $L/H \geq 1$  (cf. [16]). Nous pensons que ce choix de cette valeur élevée est peu sécuritaire. En effet, des effondrements de secteurs de dimensions compris entre 0,4 et 1 pourront se répercuter jusqu'en surface ;
- le bilan de la campagne de mesures de contraintes in situ effectuée en 1979 a montré que  $\sigma_h = 0,5\sigma_v$ . Ce résultat pose problème car, à notre connaissance, toutes les mesures de contraintes effectuées dans l'Ouest de la France, au sein de structures synclinales, montrent que la contrainte horizontale est toujours supérieure ou égale à la contrainte verticale (cela se comprend aisément dans une zone plissée lors d'une phase tectonique de compression). Pour les sites de Grais (Orne) et de Saint-Sigismond (Maine-et-Loire), le rapport de la contrainte horizontale sur la contrainte verticale varie entre 1 et 1,5 (cf. [57]). Ce rapport diminue avec la profondeur (mesures jusqu'à -250 m).

Ainsi, bien que nous remettons en question certaines conclusions de ces rapports, notamment sur la façon d'appréhender la stabilité de la mine à long terme, les informations qualitatives et quantitatives relatives à l'exploitation de la mine de Soumont figurant dans ces rapports (synthétisées dans le tableau 1) nous permettent d'envisager la réalisation de travaux de modélisation numérique.

## **3.2 ETUDE RELATIVE À LA STABILITÉ DE STABILITÉ DE MAY-SUR-ORNE**

### **3.2.1 Résumé**

Cette étude, réalisée par la société GEOSTOCK, avait pour objectif de garantir la stabilité de la mine à court et moyen termes pour le stockage d'hydrocarbures. Pour cela, GEOSTOCK disposait d'importants moyens analytiques et numériques.

La synthèse des rapports liés à cette étude met en évidence les analyses suivantes :

1. sur recommandation de E. Tincelin, GEOSTOCK a mis en place une surveillance en différents points de la mine à l'aide de 30 cannes de convergence. Durant la période d'auscultation, aucun mouvement n'a été relevé sauf à proximité des éboulements au niveaux L et 5 ces derniers évoluant toujours. Ainsi, E. Tincelin a conclu que la mine était stable ;

2. M. Mayer a examiné ensuite la stabilité de la mine du point de vue de la mécanique des roches. Des essais géotechniques ont été réalisés en laboratoire (compression simple et essais brésiliens) sur le minerai, les grès du mur, les grès et les schistes du toit. Parallèlement, il effectue quelques mesures ponctuelles au vérin plat afin de déterminer la valeur du rapport entre contrainte horizontale et la contrainte verticale ( $\sigma_h/\sigma_v$ ). Ces dernières mesures montrent des résultats très variables et inutilisables ( $\sigma_h/\sigma_v$  variant entre 1,15 et 3). D'un point de vue général, il est admis que  $\sigma_h/\sigma_v = 1/3$  en surface et  $\sigma_h/\sigma_v = 1$  à forte profondeur. Mayer prend l'hypothèse que  $\sigma_h/\sigma_v = 1$  (contrainte horizontale égale à la contrainte verticale) et évalue la contrainte dans les piliers avec  $R_c = 130$  MPa, alors que la sollicitation est évaluée à 110 MPa. Ainsi, il a conclu que les piliers travaillaient en dessous de leur résistance et a rejoint l'avis de E. Tincelin sur la stabilité de la mine ;
3. *“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 fiable à la stabilité (...), et qu'il doit exister un autre agent de soutènement naturel”*. Par ces conclusions, V. Maury (GEOSTOCK) a émis une hypothèse sur le mécanisme de tenue de la mine : *“la tenue des chambres de très grande portée que nous constatons avec des piliers même cassés, permet de penser qu'il existe un autre agent de soutènement, et que les composantes latérales des contraintes et longitudinale par rapport au gisement doivent jouer ce rôle. Les dalles du toit, comme du mur, apparaissent alors non seulement, encadrées le long des stots, mais soumises à une sorte de précontrainte. A ce moment, les piliers n'interviennent plus que pour maintenir le freinage par collage de la dalle du toit immédiat, évitant éventuellement son flambage (...).”*

### 3.2.2 Analyse des rapports

Le rapport montre l'importance dans cette géométrie d'excavation du rôle joué par le toit et le mur en liaison avec les piliers. La prise en compte de cette interaction nécessite la mise en œuvre de méthodes numériques, les méthodes analytiques devenant impraticables dans ce cas. Les progrès réalisés depuis la rédaction de ce rapport dans les codes de calculs géomécaniques permettent d'étudier plus finement les conditions de rupture. Par ailleurs, un certain nombre de remarques peuvent être faites :

- concernant les essais géomécaniques en laboratoire, les auteurs semblent avoir peu saturé les échantillons, ceux-ci présentant une perméabilité très faible. Or, nous rappelons qu'aujourd'hui la mine est ennoyée. Ainsi, certaines valeurs calculées semblent inadéquates et seront diminuées (dégradation des valeurs des caractéristiques géomécaniques des matériaux) afin de simuler l'effet de l'ennoyage de la mine et donc de la saturation en eau des matériaux ;
- de même que pour la mine de Soumont, l'hypothèse concernant le rapport entre la contrainte horizontale et la contrainte verticale se fonde sur des mesures ponctuelles au vérin plat qui nous semblent non représentatives. Des mesures montrent que la valeur de ce rapport peut atteindre 3, ce qui nous semble irréaliste compte tenu des résultats d'autres campagnes de mesure de contraintes plus récentes et par la technique de la fracturation hydraulique (voir § 3.1.2) ;

- les auteurs ne semblent pas avoir pris en compte la variabilité du pendage ainsi que le recouvrement d'une partie du flanc sud lié au jeu de la faille inverse ;
- en émettant l'hypothèse que la stabilité de la mine dépendait essentiellement de la tenue du toit et du mur, les auteurs n'indiquent pas précisément à partir de quelle portée, en cas d'absence de piliers ou de présence de piliers " cassés ", le flambage de l'un ou de l'autre était possible.

Ainsi, de même que pour la mine de Soumont et bien que nous remettons en question certaines conclusions de ces rapports, les informations relatives à l'exploitation de la mine de May-sur-Orne et au stockage d'hydrocarbures figurant dans ces rapports (synthétisées dans le tableau 2), nous permettent d'envisager la réalisation de travaux de modélisation numérique.

## **4. PROPOSITIONS DE MODELISATION**

---

### **4.1 OBJECTIFS**

La modélisation numérique a pour objectif de définir des critères de stabilité des quartiers tenant compte d'un mécanisme de tenue des terrains couplé entre les piliers et les bancs du toit et du mur.

Dans un premier temps, le calage du modèle sera effectué à partir de la rétroanalyse de l'effondrement de Soumont en 1966. Ce calage permettra de définir les mécanismes mis en jeu lors de l'effondrement et d'évaluer, dans le cadre de ce modèle, la résistance *in situ* des piliers et du toit.

Les conditions de stabilité d'un quartier de la mine seront définies à partir d'une étude paramétrique recoupant les différentes configurations rencontrées dans les trois exploitations (Segré, May sur-Orne et Soumont).

### **4.2 RÉTROANALYSE DE L'EFFONDREMENT DE 1966 À SOUMONT**

#### **4.2.1 Choix de l'outil**

Nous utiliserons un logiciel 2D capable de prendre en compte la fracturation, à savoir le code UDEC.

#### **4.2.2 Choix des paramètres et des hypothèses**

Le logiciel UDEC étant un code de calcul bidimensionnel, nous ferons l'hypothèse des déformations planes. De ce fait, nous augmenterons la largeur des chambres pour tenir compte de l'effet inhibiteur de la modélisation 2D sur le développement de la plasticité (par rapport au cas réel 3D). Les caractéristiques géomécaniques ont été résumées dans la fiche de la mine de Soumont (cf. tableau 1, § 2.1) et la géométrie modélisée est représentée sur la figure 1.

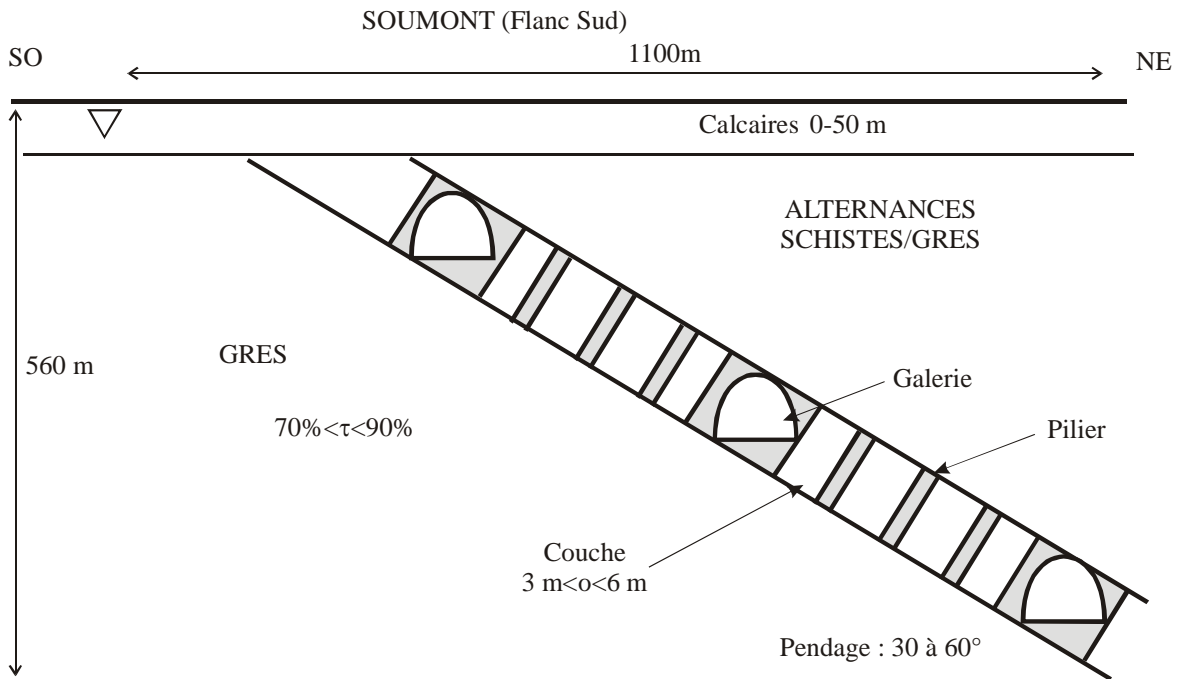


Figure 1 – Coupe verticale SO-NE du flanc Sud à Soumont (Calvados)

### 4.3 ETUDE PARAMÉTRIQUE 2D

#### 4.3.1 Géométrie étudiée

Les géométries observées sont décrites sur les figures 1, 2 et 3.

Douze modalités seront étudiées en faisant varier le pendage, le taux de défrètement et la hauteur de la dalle calcaire (au-dessus des anciennes exploitations). Ces modalités (tableau 4) représentent l'ensemble des configurations que nous retrouvons sur les trois mines de May-sur-Orne, Soumont et Segré. Les résultats de cette étude générique pourront même être utilisés pour l'analyse de risques d'autres sites. Les secteurs exploités en bicouches (flancs sud de Segré et de May-sur-Orne) peuvent être étudiés comme deux monocouches indépendantes puisque l'intercalaire a une dimension supérieure à 35 m.

Cette méthode n'est pas utile dans le cas de pendages verticaux ou subverticaux (flanc Nord de May-sur-Orne et Segré), l'évolution d'un effondrement vers la surface étant privilégiée par l'axe vertical de l'exploitation et ressortant d'un autre mécanisme que celui qui est simulé dans ce modèle numérique.

Trois phases seraient prises en compte : exploitation, ennoyage et long terme.

Lors de la modélisation, la fracturation sera prise en compte comme un facteur défavorable à la stabilité. Toutefois, la fracturation du recouvrement calcaire devrait être moins dense dans cette modélisation que dans la rétroanalyse car nous supposons que la fracturation des niveaux supérieurs a joué un rôle décisif dans l'effondrement de 1966.



| modalité n° | pendage (°) | taux de défruitement (%) | ouverture (m)    | hauteur de la dalle calcaire (m) |
|-------------|-------------|--------------------------|------------------|----------------------------------|
| 1           | 30          | 70                       | 4                | 10                               |
| 2           | 30          | 80                       | 4                | 10                               |
| 3           | 30          | 90                       | 4                | 50                               |
| 4           | 45          | 70                       | 4                | 10                               |
| 5           | 45          | 80                       | 4                | 10                               |
| 6           | 45          | 90                       | 4                | 50                               |
| 7           | 55          | 75                       | 4                | 50                               |
| 8           | 55          | 85                       | 1,5 <sup>1</sup> | 0                                |
| 9           | 55          | 90                       | 4                | 50                               |
| 10          | 65          | 80                       | 4                | 50                               |
| 11          | 65          | 85                       | 1,5              | 0                                |
| 12          | 65          | 90                       | 4                | 50                               |

*Tableau 5 - Synthèse des 12 modalités de calcul (nappe à -10 m)*

#### **4.3.2 Choix de l'outil**

Nous utiliserons le même logiciel 2D que précédemment : UDEC.

#### **4.3.3 Choix des paramètres**

Les caractéristiques géomécaniques des trois mines concernées ont été résumées dans les fiches des mines de Soumont, May-sur-Orne et Segré (tableaux 1 à 3).

---

<sup>1</sup> Nous avons choisi ici une ouverture plus faible que l'ouverture moyenne de 4 m afin de pouvoir prendre en compte les ouvertures pratiquées lors de l'exploitation de la mine de Segré : entre 1,5 à 1,8 m pour la couche A (flanc nord), entre 0,8 à 1,4 m pour la couche B (flanc nord), entre 1,5 à 2 m pour la couche A (flanc sud), entre 0,8 à 1,6 m pour la couche B (flanc sud).

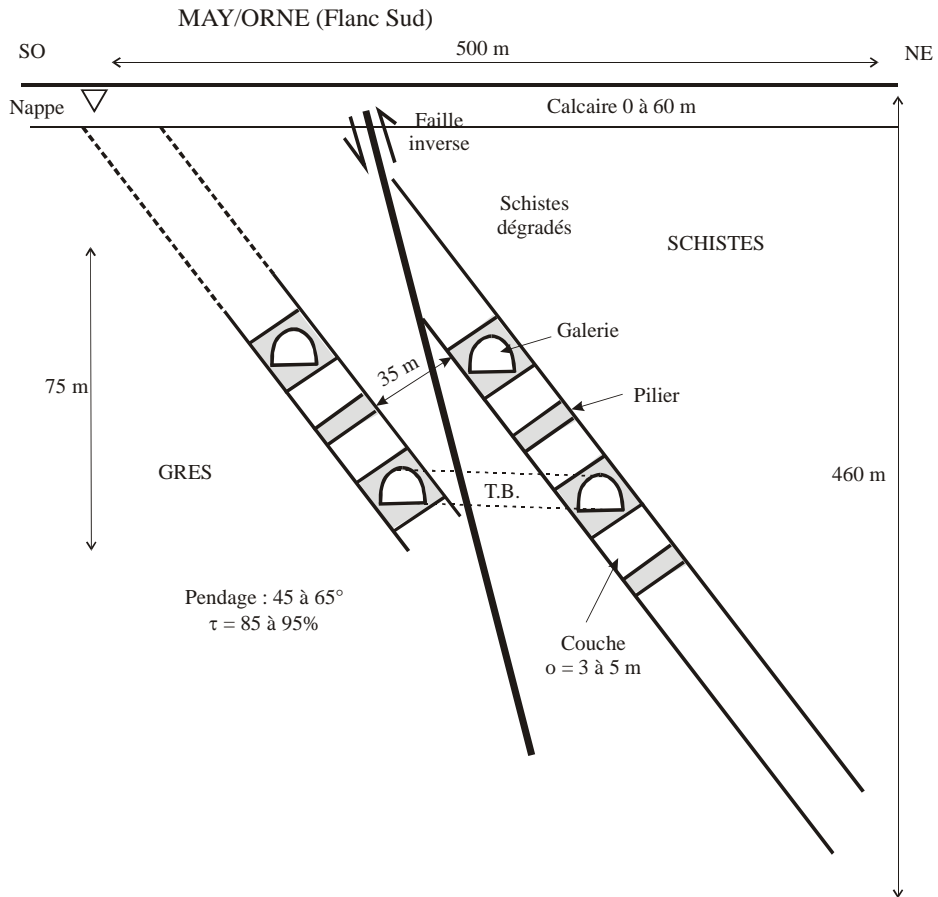


Figure 2 – Coupe verticale SO-NE du flanc Sud à May/Orne (Calvados)

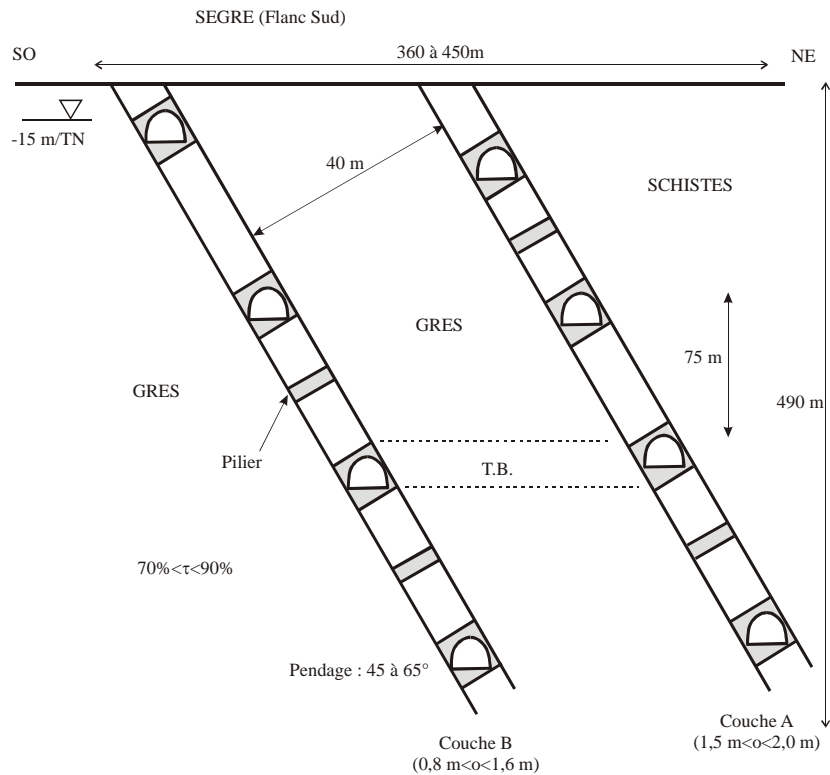


Figure 3 – Coupe verticale SO-NE du flanc Sud à Segré (Maine-et-Loire)

## 5. BIBLIOGRAPHIE

---

### • Documents INERIS

- [1] M. Al Heib (2000). *Calcul des contraintes dans une exploitation par chambres et piliers*, rapport INERIS DRS-00-25300/RN02.
- [2] A. Thoraval et V. Renaud, (2001). *Etude de l'implantation d'un viaduc dans une zone d'affaissements potentiels différés à Briey*, rapport INERIS-DRS-01-25716/RN01bis.
- [3] V. Renaud (2003). *Abaques de calcul des contraintes verticales dans une exploitation par chambres et piliers : application aux bicouches*, rapport INERIS DRS-03-45915/RN01.
- [4] T. Delaunay, (2003). *Bassin ferrifère de Normandie : Participation à l'élaboration de la phase informative du PPRM sur l'emprise des concessions de Cinglais, Barbery, Soumont et Perrières (Calvados)*, rapport INERIS-DRS-03-44270/R01.
- [5] T. Delaunay, (2003). *Bassin ferrifère d'ANJOU – BRETAGNE : Participation à l'élaboration de la phase informative du PPRM sur l'emprise des concessions du Bois et des Aulnais (Maine-et-Loire)*, rapport INERIS-DRS-03-42376/R01.

### • Documents relatifs à la mine de Soumont

- [6] Rapport de fermeture de la mine de fer de Soumont (Calvados) – Avril 1998.
- [7] Dossier de Renonciation aux concessions de la Société des Mines de Soumont – Février 1990.
- [7bis] Mines de Soumont : Hydrogéologie + Fermeture des accès – rapport GEOSTOCK réf. GK/DT/90061-TY/TT – Janvier 1990.
- [8] Surveillance de la Mine de Soumont de juillet 1994 à octobre 1997 : Suivi de stabilité par écoute sismique - Suivi de la remontée et de la qualité des eaux – rapport GESTER réf. 97/2520 – Décembre 1997.
- [9] Carte et notice géologique BRGM– Feuille de Mézidon (146) à 1/50 000 – Avril 1999.
- [10] Carte hydrogéologique du département du Calvados BRGM à 1/100 000 – 1991.
- [11] Plan de Prévention des Risques d'effondrement de terrains des anciennes mines de fer – DDE Calvados - Décembre 1995.
- [11bis] Modification du Plan de Prévention des Risques d'effondrement de terrains des anciennes mines de fer en date du 22 décembre 1995 (Document Provisoire) – DDE Calvados – Novembre 1998.
- [12] M. Desurmont : *Analyse des mesures de libération de contraintes effectuées à Soumont*. Rapport de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris – Centre de géotechnique et d'exploitation du sous-sol. R74/4, 1974. 23 pages.

- [13] *Mine de Soumont - Caractéristiques mécaniques des terrains*. Rapport de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris – Centre de géotechnique et d'exploitation du sous-sol. SE/762 (sans auteur), 1976. 44 pages.
- [14] E. Tincelin et G. Vouille : *Stabilité générale des mines de Soumont*. Rapport de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris – Centre de géotechnique et d'exploitation du sous-sol. R81/20, 1981. 18 pages.
- [15] E. Tincelin et G. Vouille : *Société des mines de Soumont - Projet d'exploitation des Etages 560-475 et 650-560 - Etude de stabilité*. Rapport de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris – Centre de géotechnique et d'exploitation du sous-sol. R81/21, 1981. 8 pages.
- [16] E. Tincelin et G. Vouille : *Société des mines de Soumont - Stabilité à terme des zones exploitées à la mine de Soumont – flanc Sud*. Rapport de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris – Centre de géotechnique et d'exploitation du sous-sol. R89/19, 1989. 40 pages.
- [17] E. Tincelin et G. Vouille : *Mine de Soumont – Définition des zones à risques et de la nature des risques*. Rapport de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris – Centre de géotechnique et d'exploitation du sous-sol. 1991. 8 pages.
- [18] E. Tincelin et G. Vouille : *Mine de Soumont - Mesures à entreprendre pour prévoir l'imminence d'un risque d'effondrement survenant à l'aplomb des routes nationales n°158 ou départementales n°43*. Rapport de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris – Centre de géotechnique et d'exploitation du sous-sol. R92/12, 1992. 20 pages.
- [19] A. Perrotte et B. Lidou : *Diverses variantes de chambres avec piliers abandonnés dans la mine de fer de Soumont*. Industrie Minérale – Les Techniques. Février 1983. p.74-78.
- [20] Bulletin Technique des Mines de fer. *Les mines de fer de Soumont*. Edition G.E.D.I.M. 2<sup>ème</sup> trimestre 1976. p.61-68.
- [21] Société des Mines de Soumont. *Les Mines de Soumont*. Editeur local. 1980. 13 pages.

• **Documents relatifs à la mine de May-sur-Orne**

Dossiers et articles relatifs à l'exploitation ferrifère ;

- [22] Dossier de Renonciation aux concessions de la Société des Mines et Produits Chimiques – archives de 1968 à 1975.
- [23] G. Maurin : *Concession des mines de fer de May-sur-Orne (Calvados) : Rapport de visite et diagnostic sécuritaire*. Rapport BRGM R 40759 – Septembre 1999.
- [24] Les gisements miniers de Basse-Normandie. Document DRIRE de Basse-Normandie Division Environnement Sous-sol – 1998.
- [25] *Visite a la mine de May-sur-Orne*. Bulletin Technique de la Chambre Syndicale des Mines de Fer. n°84. 1966. p.192-193.

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

- [26] *Stockage souterrain d'hydrocarbures de May-sur-Orne : Etude de l'aménagement.* Rapport GEOSTOCK MPa/B.Da. - n°312 - GK – Mars 1971.
- [27] *Stockage souterrain d'hydrocarbures de May-sur-Orne : Etude du site.* Rapport GEOSTOCK CC/b.Da. - n°307 - GK – Avril 1971.
- [28] Ph. De La Queriére et P. Pascaud. *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.
- [29] Ph. De La Queriére et P. Pascaud. *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.
- [30] P. Pascaud et M. Tirat. *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.
- [31] *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.
- [32] P. Pascaud et M. Tirat. *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.
- [33] M. Pachet. *Un stockage d'hydrocarbures dans une mine de fer désaffectée : May-sur-Orne.* Revue de l'Association Française des Techniciens du Pétrole – Mars-Avril 1974. p. 39-43.
- [34] J.L. Picard. *Stockage de 5 millions de m<sup>3</sup> dans l'ancienne mine de fer de May-sur-Orne (Calvados).* Annales de Mines – Janvier-Février 1973. p. 26-30
- [35] A. Galera : *Stockage d'hydrocarbures de May-sur-Orne : Notice de l'ouvrage.* Rapport GEOMINES-CAEN AG/SL/GM/fb-C n°270 – Juin 1974
- [36] C. Dassibat et P. Pascaud. *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.
- [37] *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.
- [38] *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.
- [39] *Compte rendu de visite de la Galerie de May-sur-Orne.* Note technique du BRGM SMN/REM - 99/041 – Juillet 1999.
- [40] *Compte rendu de visite de la Galerie de Saint-André-sur-Orne.* Note technique du BRGM SMN/REM - 99/054 – Juillet 1999.

- [41] *Mémoire en réponse suite à l'enquête administrative. Rapport GEOMINES-CAEN GMC-EXP/89-051 TT/PC – Août 1999.*
- [42] *Dossier d'abandon du stockage d'hydrocarbures de May-sur-Orne – Août 1999.*

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

- [43] *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.*
- [44] V. Maury. *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 Roche – Avril 1972. p.73-84.*
- [45] V. Maury. *Stabilité des cavités souterraines utilisées ou projetées pour le stockage souterrain. Industrie Minérale. Cahier 6 du Comité Français de Mécanique des Roche – Avril 1974. p.32-44.*
- [46] V. Maury. *Stabilité, contraintes et exploitation de la mine de May-sur-Orne comme stockage souterrain d'hydrocarbures. CR - 3<sup>ème</sup> Congrès de la Société Internationale de Mécanique des Roches - Denver. Vol. II, Tome B, R12 - 598 (3) II B. 1974. p.1294-1301.*
- [47] V. Maury. *Utilisation des essais et mesures en laboratoires et in-situ dans cinq projets de stockage souterrains. Proceedings - 4<sup>ème</sup> Congrès International de Mécanique des Roches - Montreux. Vol. 2, R12 - 598 (4) II. 1979. p. 417-428.*

• **Documents relatifs à la mine de Segré**

- [48] H. Pochelski. *Mines de fer de Segré. Déclaration d'abandon de travaux et renonciation aux titres miniers. Août 1986.*
- [49] M. Loislard. *Anciennes mines de fer de Segré : Cartographie des travaux miniers sur les communes de Noyant-la-Gravoyère et de Nyoiseau (Maine-et-Loire). Rapport BRGM/RP-51419-FR. Octobre 2001.*
- [50] S. Brull. *Les Mines de Fer dans l'Anjou et la Bretagne : L'exploitation intensive des concessions des environs de Segré (Maine-et-Loire). Revue générale hebdomadaire des Industries Françaises et Etrangères. Tome LIX – N°18 – 2 septembre 1911. p.1-8.*
- [51] *Schistes du Maine-et-Loire : Synthèse géologique et étude de l'exhaure des mines de fer de Segré. Rapport BRGM 88 SGN 076 GEO. Septembre 1988.*
- [52] Archives de la Société des Mines de Fer de Segré (historique, procès verbaux de visites, déclarations d'accidents, rapports de l'Ingénieur TPE des Mines, etc.) de 1912 à 1984.
- [53] J.A. Varoquaux et E. Gérard : *Les gisements de minerai de fer français. Annales des Mines. Juillet-Août 1980. p.135-154.*
- [54] P. Meloy et S. Barou : *Chambres-magasins dans les mines de fer de Segré. Industrie Minérale – Les Techniques. Février 1983. p.173-178.*

- [55] Arrêté Préfectoral n°86-787 du 11 septembre 1986 : Abandon des concessions 1+2 : Le Bois – Les Aulnais ;
- [56] J. Hutchinson, C. Phillips et G. Cascante. *Risk considerations for crown pillar stability assessment for mine closure planning*. Geotechnical and Geological Engineering. 2002. 20 : p.41-63.

- **Thèse**

- [57] Denis Burllet (1991) : Détermination du champ de contrainte régional à partir de tests hydrauliques en forages, résultats de neuf expérimentations in-situ réalisées en France. Thèse de doctorat de Géophysique Interne à l'université de Paris VII.