

RAPPORT D'ÉTUDE  
DRS-06-64788/R01

19/04/2006

**Bassin ferrifère de Normandie**

**Evaluation et cartographie des aléas  
mouvements de terrain dans l'emprise de la  
concession de Saint-Rémy-sur-Orne (Calvados)**

## **Bassin ferrifère de Normandie**

### **Evaluation et cartographie des aléas mouvements de terrain dans l'emprise de la concession de Saint-Rémy-sur-Orne (Calvados)**

Direction des Risques du Sol et du Sous-sol

GEODERIS

## PREAMBULE

Le présent rapport a été établi sur la base des informations fournies à l'INERIS, des données (scientifiques ou techniques) disponibles et objectives et de la réglementation en vigueur.

La responsabilité de l'INERIS ne pourra être engagée si les informations qui lui ont été communiquées sont incomplètes ou erronées.

Les avis, recommandations, préconisations ou équivalents qui seraient portés par l'INERIS dans le cadre des prestations qui lui sont confiées, peuvent aider à la prise de décision. Etant donné la mission qui incombe à l'INERIS de par son décret de création, l'INERIS n'intervient pas dans la prise de décision proprement dite. La responsabilité de l'INERIS ne peut donc se substituer à celle du décideur.

Le destinataire utilisera les résultats inclus dans le présent rapport intégralement ou sinon de manière objective. Son utilisation sous forme d'extraits ou de notes de synthèse sera faite sous la seule et entière responsabilité du destinataire. Il en est de même pour toute modification qui y serait apportée.

L'INERIS dégage toute responsabilité pour chaque utilisation du rapport en dehors de la destination de la prestation.

	<b>Rédaction</b>	<b>Vérification</b>	<b>Approbation</b>
<b>NOM</b>	Laurent CAUVIN	Xavier DAUPLEY	Mehdi GHOREYCHI
<b>Qualité</b>	Ingénieur à l'unité Risques Géotechniques liés à l'exploitation du sous-sol de la Direction des Risques du Sol et du Sous-sol	Responsable de l'unité Risques Géotechniques liés à l'exploitation du sous-sol de la Direction des Risques du Sol et du Sous-sol	Directeur de la Direction des Risques du Sol et du Sous-sol
<b>Visa</b>			

## TABLE DES MATIERES

<b>INTRODUCTION</b> .....	<b>7</b>
Phase informative .....	7
Evaluation des aléas « mouvements de terrain » .....	8
<b><u>PARTIE I : PHASE INFORMATIVE</u></b> .....	<b>9</b>
<b>1. TRAVAUX RÉALISÉS</b> .....	<b>11</b>
1.1 Supports cartographiques .....	11
1.2 Documents techniques consultés.....	12
1.3 Visites sur site .....	12
<b>2. CONTEXTE GÉOGRAPHIQUE ET GÉOLOGIQUE DU GISEMENT FERRIFÈRE DE SAINT-RÉMY-SUR-ORNE</b> .....	<b>13</b>
2.1 Situation et topographie du gisement synclinal de saint-rémy-sur-orne .....	13
2.2 Géologie.....	13
2.3 La couche de minerai : composition, puissance et résistance.....	14
2.4 Hydrogéologie .....	15
<b>3. HISTORIQUE DE L'EXPLOITATION MINIERE</b> .....	<b>17</b>
3.1 Historique de l'exploitation de saint-rémy-sur-orne .....	17
3.2 Fermeture de la mine .....	17
3.3 Travaux miniers et méthodes d'exploitation .....	17
3.3.1 Méthodes d'exploitation du banc d'hématite.....	18
3.3.2 Méthodes d'exploitation du banc de carbonate .....	18
3.3.3 Exploitations à ciel ouvert .....	19
3.3.4 Verses .....	19
3.4 Ouvrages débouchant au jour .....	20
3.4.1 Travaux miniers localisés à faible profondeur.....	20
<b>4. TRAVAUX EXECUTÉS POUR LA MISE EN SÉCURITÉ DU SITE</b> .....	<b>21</b>
4.1 Fermeture des orifices débouchant en surface .....	21
4.2 Autres ouvrages et infrastructures .....	21
4.3 Surveillance.....	21
<b>5. DÉSORDRES LIÉS AUX ANCIENNES EXPLOITATIONS MINIÈRES</b> .....	<b>21</b>
5.1 Désordres en phase d'exploitation .....	21

5.2	Effondrements localisés observés en surface en 2005 .....	24
5.3	Autres observations sur le site .....	24
<b>6.</b>	<b>ETABLISSEMENT DE LA CARTE INFORMATIVE .....</b>	<b>27</b>
	<b><u>PARTIE II : EVALUATION DES ALEAS.....</u></b>	<b>29</b>
<b>1</b>	<b>RETOUR D'EXPERIENCE ET IDENTIFICATION DES ALÉAS.....</b>	<b>31</b>
1.1	Etat des connaissances par retour d'expérience.....	31
1.2	Analyse du risque d'effondrement généralisé .....	33
1.3	Analyse du risque d'affaissement par modélisation numérique.....	34
<b>2.</b>	<b>IDENTIFICATION DES ALÉAS « MOUVEMENTS DE TERRAIN » .....</b>	<b>36</b>
2.1	Introduction .....	36
2.2	Les différents aléas retenus .....	36
<b>3.</b>	<b>EVALUATION DES ALÉAS DANS LE BASSIN DE SAINT-REMY-SUR-ORNE.....</b>	<b>37</b>
3.1	Les affaissements .....	37
3.1.1	Facteurs de prédisposition et probabilité d'occurrence.....	37
3.1.2	Les panneaux menacés par un éventuel affaissement.....	38
3.1.3	Intensité de l'affaissement .....	38
3.1.4	Evaluation de l'aléa.....	39
3.1.5	Limites du zonage.....	40
3.2	Effondrements localisés à l'aplomb des chantiers.....	41
3.2.1	Intensité du phénomène .....	42
3.2.2	Facteurs de prédisposition.....	42
3.2.3	Evaluation de l'aléa.....	43
3.2.4	Limites du zonage.....	43
3.3	Effondrements localisés par rupture des têtes de puits.....	43
3.3.1	Etat des puits.....	43
3.3.2	Evaluation de l'aléa.....	44
3.3.3	Limites du zonage.....	44
3.4	Effondrements localisés par éboulement de galeries isolées.....	45
3.4.1	Intensité du phénomène .....	45
3.4.2	Facteurs de prédisposition.....	45
3.4.3	Evaluation de l'aléa.....	45
3.4.4	Limites du zonage.....	46
3.5	Ecroulements des fronts rocheux de minières .....	46

3.6 Stabilité des verses .....	47
<b>CONCLUSIONS.....</b>	<b>49</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE.....</b>	<b>51</b>
<b>LISTE DES FIGURES, PHOTOGRAPHIES, ANNEXES ET CARTES .....</b>	<b>53</b>



## **INTRODUCTION**

La Société Anonyme des Mines de Fer de Saint-Rémy (SMS) a exploité, de 1875 à 1968, un gisement ferrifère sur le synclinal de Saint-Rémy (Calvados), orienté globalement est-ouest et dont la longueur est d'1 kilomètre environ. Ce synclinal se situe sur la commune de Saint-Rémy-sur-Orne à environ 33 km au sud de Caen.

La présence d'exploitations minières sur la concession de Saint-Rémy, aujourd'hui renoncées par arrêté ministériel, a conduit les pouvoirs publics à étudier l'opportunité de réaliser un Plan de Prévention des Risques Miniers (PPRM). Précisons que les Plans de Prévention des Risques Miniers ont été instaurés par la loi du 30 mars 1999.

Sur demande de la DRIRE de Basse-Normandie, service instructeur du dossier, GEODERIS a engagé la réalisation d'études et de cartographies concernant les aléas « mouvements de terrain » sur le territoire de la commune de Saint-Rémy-sur-Orne. Dans cette optique, GEODERIS a confié à l'INERIS la réalisation de ces cartes d'aléas sur la commune concernée par les exploitations du synclinal de Saint-Rémy.

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 des aléas « mouvements de terrain ».

La figure 1 représente la zone concernée par cette étude.

## **PHASE INFORMATIVE**

Cette phase d'étude dite « phase informative » réalisée conjointement avec le BRGM (Rapport BRGM/RP-53993-FR, avril 2005) a permis de caler le plus précisément possible les plans de mine et de collecter un maximum d'informations afin d'identifier les phénomènes accidentels symptomatiques du gisement. La démarche a comporté les phases suivantes :

- l'enquête préalable qui a permis de recueillir les documents disponibles concernant les sites étudiés (plans d'exploitation, archives minières, rapports, thèses, études géotechniques, cartes géologiques, etc.). Cette approche documentaire et cartographique a été menée auprès des organismes spécialisés : la DRIRE de Basse-Normandie, GEODERIS, le BRGM, les services techniques des communes concernées ainsi qu'auprès des personnes ayant des connaissances sur le sujet, en particulier des anciens mineurs ;
- les visites de terrain, qui ont permis d'observer les phénomènes d'instabilité recensés puis de les intégrer dans l'interprétation de l'ensemble des données collectées. Elles 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. Son support est la carte informative au 1/2 500<sup>ème</sup> (carte 1).

## **EVALUATION DES ALEAS « MOUVEMENTS DE TERRAIN »**

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

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

Elle a pour objectif de réaliser :

- une évaluation de l'aléa par type de phénomène attendu, compte tenu de l'intensité et de la probabilité d'occurrence estimées ;
- une cartographie des aléas « mouvements de terrain » sur les anciens travaux et ouvrages de recherche (cartes 2, 3 et 4).

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

**PARTIE I**

**PHASE INFORMATIVE**



# **1. TRAVAUX REALISES**

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

## **1.1 SUPPORTS CARTOGRAPHIQUES**

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

- fond au 1/1 000<sup>ème</sup> datant de 1966 sous format papier ;
- orthophotoplan<sup>1</sup> informatisé avec une précision de l'ordre de 50 cm ;
- carte IGN au 1/25 000<sup>ème</sup>.

Afin d'obtenir un rendu suffisamment précis des informations et des futurs résultats, l'échelle de restitution choisie est le 1/2 500<sup>ème</sup> (cartes informatives des travaux miniers et cartes d'aléas associées). Ces échelles permettent de rendre compte de façon lisible des informations les plus complètes (plans d'exploitation, ouvrages débouchant au jour, désordres de surface, etc.) et référencables sur l'orthophotoplan.

Pratiquement, le calage entre l'orthophotoplan et les plans d'exploitation a été assuré par le BRGM sur la base d'une campagne au GPS différentiel (Rapport BRGM/RP-53993-FR, 2005). Les documents cartographiques dont nous disposons sont sous la forme d'un Système d'Informations Géographiques (SIG sous MapInfo) constitué de tables cartographiques associées à des données comprenant :

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

Les incertitudes de calage des plans miniers sur l'orthophotoplan ont été définies par le BRGM au niveau de leurs points de référence (ouvrages débouchant au jour). Elles n'excèdent pas 7 m en x, y et z.

---

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

## **1.2 DOCUMENTS TECHNIQUES CONSULTES**

L'exploitation des mines de fer de Saint-Rémy-sur-Orne a été l'objet de nombreux rapports et articles. Les publications d'ordre général ont été recherchées et consultées à partir des fonds d'archives disponibles à l'INERIS, les dossiers d'exploitation des anciennes mines de fer à partir des archives de la DRIRE de Basse-Normandie.

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

## **1.3 VISITES SUR SITE**

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

Elles ont eu pour objet :

- d'observer la nature et l'état des ouvrages débouchant au jour (galeries, descenderies et puits) ;
- d'observer et de caractériser les désordres de surface, anciens et, le cas échéant, récents, liés à des affaissements miniers et/ou des effondrements localisés déjà connus ou non.

## **2. CONTEXTE GEOGRAPHIQUE ET GEOLOGIQUE DU GISEMENT FERRIFERE DE SAINT-REMY-SUR-ORNE**

### **2.1 SITUATION ET TOPOGRAPHIE DU GISEMENT SYNCLINAL DE SAINT-REMY-SUR-ORNE**

Le terrain concerné par l'exploitation ferrifère est uniquement constitué de forêts et de terres agricoles. La route départementale D 133 traverse l'extrémité ouest de la concession sur 250 m. Le village de Saint-Rémy-sur-Orne se situe à l'est de l'exploitation, sans qu'aucune habitation ne soit incluse dans l'emprise de la zone exploitée (figure 1).

La concession est bordée par deux collines (Beaumont et Mont-de-Vêpres), séparées par une vallée orientée est-ouest. Le talweg mesure 1 000 à 1 100 m de longueur et 600 m de largeur. La profondeur maximum du gisement est de l'ordre de 150 à 200 m (figure 5).

La topographie générale du site est marquée par les deux collines qui culminent au nord à 184 m NGF (Beaumont) et à 217 m NGF au sud (Mont-de-Vêpres).

**Dans la suite du rapport, les cotes sont indiquées par rapport au niveau zéro (niveau de référence de la mine) qui correspond à la cote + 47 m NGF (carreau de la mine en bordure de l'Orne).**

### **2.2 GEOLOGIE**

Le minerai de fer exploité à Saint-Rémy-sur-Orne s'intègre aux bassins ferrifères de l'ouest de la France constitués du bassin de Normandie (région Caen-Domfront) et du bassin d'Anjou-Bretagne (région d'Angers-Rennes). Le bassin de Saint-Rémy appartient aux grands synclinaux qui traversent la Basse-Normandie sur 110 kilomètres de Granville jusqu'à Falaise (figures 2, 3 et 4). L'érosion des roches primaires y a été très intense. Seules les synclinaux encaissés dans le Brioverien subsistent aujourd'hui.

Le bassin de Saint-Rémy se présente sous la forme d'un petit synclinal perché, orienté est-ouest, dont le flanc nord correspond à la colline de Beaumont et le flanc sud à celle du Mont-de-Vêpres. Il est dissymétrique (son flanc nord est plus redressé que son flanc sud) et présente une terminaison périclinale à l'est. Une faille, orientée est-ouest, décale les flancs. Il est très peu étendu car il a été tronqué à l'ouest par une faille pentée à 60° vers l'ouest, au-delà de laquelle apparaît le Cambrien. Le minerai n'a pas été rencontré au-delà de cette faille (figures 2, 3, 4 et 5) et carte 1.

Ses flancs ne présentent aucune couverture secondaire.

L'inclinaison générale de la couche est de 45° environ, vers le sud dans le flanc nord et vers le nord dans le flanc sud. L'allure très tourmentée du gisement donne cependant des pendages localement très variables, allant de l'horizontale à la verticale. De nombreux accidents parallèles à l'axe du synclinal ont créé une succession de petits synclinaux et anticlinaux responsables de la structure en

écaillés. La couche du flanc de Beaumont est particulièrement tourmentée (figure 5). Ces accidents ont accru, par l'évasement des bords de la cuvette et par des replongées de couche, l'étendue des affleurements sur cette colline. La couche de minerai de fer affleure donc sur une grande partie de la concession.

Le gisement est constitué d'une seule couche de minerai constitué d'un banc d'hématite à la base et d'un banc de carbonate au-dessus. La couche repose sur une formation cambrienne, « les schistes et grès rouges de Saint-Rémy », qui remplacent les grès armoricains ordoviciens présents sur les autres gisements de minerai de fer de l'ouest de la France. Cette couche correspond au mur de la mine. La formation au toit de la couche exploitée est celle des « schistes d'Angers » (localement appelée schistes d'Urville) qui occupe toute la dépression axiale du synclinal.

### 2.3 LA COUCHE DE MINERAI : COMPOSITION, PUISSANCE ET RESISTANCE

La couche de minerai de fer du synclinal de Saint-Rémy-sur-Orne est caractérisée par :

- un pendage général de 45° ;
- une puissance exploitable de 7 à 8 m ;
- une exploitation menée en deux temps.

En effet, le gisement est constitué d'une seule couche de minerai comprenant un banc d'hématite situé au mur d'une puissance moyenne de 2,50 m et d'un banc de carbonate de 5 à 7 m d'épaisseur (figure 6). L'hématite oolithique à la base de la couche, appelée par les mineurs le « minerai rouge », très riche en oxyde de fer, a été très longtemps le seul minerai exploité. Il est considéré comme « la couche principale » par opposition à la « couche secondaire », qui surmonte l'hématite, exploitée à partir de 1913. Cette dernière est constituée d'un minerai carbonaté moins riche que l'hématite, appelée « minerai violet ».

	Minerai rouge hématite	Minerai violet carbonate cru	Minerai violet carbonate après grillage au four
Fer	53,00 %	43,00 %	47,50 %
Silice	7,97 %	13,20 %	14,40 %
Phosphore	0,75 %	0,58 %	0,73 %
Perte au feu	9,00 %	13,00 %	
Densité	4	3,4	
Epaisseur moyenne	2,50 m	5-7 m	
Appellation locale	Couche principale	Couche secondaire	

Source : Les mines de fer normandes

Tableau 1 : Caractéristiques des minerais exploités à Saint-Rémy-sur-Orne

Nous ne disposons pas de données sur la valeur de la résistance mécanique du minerai et des terrains encaissants même si les rapports des ingénieurs des mines mentionnent fréquemment un minerai « très résistant » autorisant des taux de défrusement élevés.

## **2.4 HYDROGEOLOGIE**

Le fonctionnement hydrogéologique est assez simple. De manière synthétique, les anciens chantiers sont ennoyés depuis l'arrêt de l'exhaure jusqu'au niveau 0 (niveau du carreau de la mine soit +47 m NGF) des travaux miniers qui correspond au niveau de l'Orne. Les travaux situés au-dessus de cette cote drainent les eaux de ruissellement de la surface du fait de la communication directe des travaux souterrains avec les exploitations à ciel ouverts. Ces eaux sont évacuées par la galerie dite «de l'Orne », seul exutoire du réservoir minier, en direction de la rivière Orne.

Pendant l'exploitation, les eaux présentes en dessous du niveau 0 étaient pompées dans une albraque située au niveau le plus bas de la mine, c'est à dire au niveau –55 m.



### **3. HISTORIQUE DE L'EXPLOITATION MINIERE**

#### **3.1 HISTORIQUE DE L'EXPLOITATION DE SAINT-REMY-SUR-ORNE**

Des documents relatifs à des corporations de mineurs attestent une exploitation du minerai de fer dès le XV<sup>ème</sup> siècle (1460) sur le flanc de Beaumont. On retrouve trace de l'exploitation de ces deux flancs à la fin du XVIII<sup>ème</sup> siècle, puis aucun document ne mentionne d'activité pendant un siècle.

Des travaux de recherche reprennent en 1873. La concession de Saint-Rémy sur Orne, instituée par décret du 28 septembre 1875, est la plus ancienne des mines de fer normandes. D'une superficie de 750 ha, elle s'étend seulement sur la commune de Saint-Rémy-sur-Orne. Anciennement Société Civile des Mines de Fer de Saint-Rémy, la Société Anonyme des Mines de Fer de Saint-Rémy, constituée en 1895, exploite la mine jusqu'à sa fermeture en 1968. Les deux guerres mondiales perturbent l'exploitation qui reprend en janvier 1946. D'abord exporté cru, le grillage sur place du minerai a été envisagé puis réalisé sur place à partir de 1921. Il était acheminé à Caen par la ligne de chemin de fer Flers-Caen.

La renonciation de la concession a été prononcée par arrêté du 10 novembre 1981.

#### **3.2 FERMETURE DE LA MINE**

Le gisement est arrivé à épuisement en 1966. La Société des Mines de Saint-Rémy n'ayant pas la possibilité d'exploiter la concession du Mont Pinçon située plus à l'ouest, en raison de la faiblesse du gisement et de frais de transport accrus, un procès verbal de fermeture des travaux est établi le 18 mai 1968. La société disparaît le 31 décembre 1975 sans que la renonciation ait été prononcée.

#### **3.3 TRAVAUX MINIERS ET METHODES D'EXPLOITATION**

L'exploitation est divisée en deux quartiers distincts correspondant au deux versants du synclinal. Séparé par une faille centrale orientée est-ouest, le quartier du Mont-de-Vêpres au sud (point bas au niveau – 33 m) est relevé par rapport à celui de Beaumont (point bas au niveau – 49 m) (figure 5). Le gisement sera exploité depuis le niveau – 49 m jusqu'au niveau +150 m.

Un travers-bancs de 500 m de long permettait d'accéder à l'ensemble des galeries à partir du carreau de la mine situé sur les bords de l'Orne (carte 1). L'entrée de ce tunnel est le niveau de référence (niveau 0) (photo 21 et figures 15 et 16) et d'où débutent deux galeries rejoignant chacune un quartier d'exploitation. Les produits sont évacués par des cheminées inclinées jusqu'au niveau 0.

Sur les deux flancs du synclinal, le minerai était extrait par le tunnel mais aussi par des galeries débouchant au jour aux étages 10, 15, 45 et 61 pour Beaumont et à

l'étage 89 pour le Mont-de-Vêpres.<sup>2</sup>. Des bures et descenderies reliaient l'ensemble des niveaux tracés aux étages 0, 30, 61, 89, 110, 125, 140, 145, 150, pour le Mont-de-Vêpres et aux étages -50, -33, -14, 0, 10, 15, 29, 45, 59, 89, 107, 112, 120 pour Beaumont (carte 1).

L'extrême irrégularité du dépôt (pendage de 0 à 90°) a occasionné des méthodes d'exploitation très variées.

### **3.3.1 METHODES D'EXPLOITATION DU BANC D'HEMATITE**

L'exploitation du banc d'hématite, la plus ancienne, a eu lieu suivant deux méthodes :

- la méthode des « piliers abandonnés » pour les couches en plateures. Des piliers carrés de 2 m à 2,5 m de côté sont disposés en quinconce à des distances de 5 m environ, soit un taux de défrètement de l'ordre de 80%, et ce quelle que soit la profondeur. Ces chantiers avaient une dimension finalement réduite du fait de l'irrégularité du gisement ;
- une première méthode de « tailles chassantes » à gradins droits pour les couches en dressants avec 2 ou 3 tailles par étages de 5 à 8 m de relevée (figures 7 et 8). Une galerie de roulage était maintenue au-dessus et en dessous des étages. Des cloisons de 2 m environ d'épaisseur entre les tailles étaient percées d'orifice pour permettre l'évacuation des produits. Après l'exploitation des tailles, les stots horizontaux étaient attaqués jusqu'à ne laisser que des piliers de 2 m sur 2,50 distants de 5 m environ. La longueur des chambres ne dépasse pas 70 m ;
- une deuxième méthode de « tailles chassantes » pour l'exploitation de l'hématite en aval du niveau 0. Les panneaux sont divisés par des cloisons horizontales de 2 m d'épaisseur laissées à intervalles de 10 m suivant la relevée et séparées par des cloisons de 2 m laissées suivant le pendage tous les 15 m. Une cloison plus épaisse est laissée au-dessus et au-dessous de la galerie principale (tous les 30 m suivant la relevée).
- la méthode des chambres magasins, utilisée pour l'hématite lorsque le pendage est supérieur à 50° et au voisinage des affleurements où l'hématite est suffisamment friable pour donner de gros blocs au chargement (PV 1935) (figure 11) ;

Dans les trois dernières méthodes, le taux de défrètement atteignait 90 %. La presque totalité du banc d'hématite au-dessus du niveau 0 a été exploitée avant la guerre de 1914-1918.

### **3.3.2 METHODES D'EXPLOITATION DU BANC DE CARBONATE**

Le dépilage de la couche secondaire s'est effectué avec des méthodes d'exploitation extrêmement variées, s'adaptant à la prise préalable de l'hématite :

- la méthode des « tailles chassantes » comme décrite précédemment en laissant au toit des anciens chantiers à hématite un stot de protection de 2 m

---

<sup>2</sup> rappelons que le numéro de l'étage correspond approximativement à l'altitude en mètres de celui-ci par rapport au zéro de la mine

d'épaisseur. Chaque étage, d'une hauteur verticale de 30 m était pris en 3 tranches, par tailles chassantes à gradins droits, séparées par des stots de 2 m d'épaisseur (figure 8) ;

- la méthode des « chambres magasins », appliquée pour des pendages supérieurs à 45-50°. Les chambres, de 20 à 25 m de large, progressant sur une relevée variant entre 30 et 70 m, sont limitées par deux stots constitués par une poutre de carbonate supportée par deux séries de piliers d'hématite ;
- la méthode des « tailles montantes », utilisée pour les panneaux moins importants et pour les pendages inférieurs à 45°. Elle ne diffère de la méthode précédente que par des dimensions moindres (largeur de 10 à 15 m, hauteur de 20 à 30 m) et par les conditions d'évacuation des produits. Les possibilités de chargement sont plus faibles que pour les chambres magasins, mais néanmoins facilitées par les vides laissés en dessous par le dépilage de l'hématite (figure 10) ;
- la méthode des « tailles chassantes » en plateure. Les dépilages de 8 à 10 m de largeur progressent en chassant entre 2 stots constitués par une poutre de carbonate reposant sur 2 séries de piliers d'hématite. C'est dans ces chantiers que s'exercent a priori les plus fortes pressions et que risquent de s'écraser les piliers d'hématites supportant les poutres de carbonate (figure 9).

### **3.3.3 EXPLOITATIONS A CIEL OUVERT**

Les deux niveaux à hématite et carbonaté ont été exploités à ciel ouvert au niveau des affleurements sur le Mont-de-Vêpres et sur Beaumont. Les nombreux plis et failles du gisement font que ces exploitations ont une très grande emprise, principalement au sommet des deux collines.

La méthode d'exploitation n'est pas connue en détail mais semble très proche des techniques classiques d'abattage en carrière. Il subsiste donc actuellement des fronts de taille de hauteurs variables allant de quelques mètres à environ 50 mètres (carte 1 et photos 1, 2, 3, 4).

Ces exploitations à ciel ouvert sont localement très anciennes, probablement du Moyen-Age pour la partie est du gisement. Elles se sont poursuivies jusqu'à la fin de la mine. Il est donc assez fréquemment arrivé que ces travaux de surfaces aient recoupé d'anciens travaux souterrains (photos 5, 8 et 10).

### **3.3.4 VERSES**

Les exploitations à ciel ouvert ont produit de grandes quantités de stériles. Ces matériaux ont été stockés sous la forme de verses, de faibles hauteurs (10 à 20 m) généralement adossées à un talus naturel ou à un ancien front d'exploitation et réparties sur tout le site (carte 1 et photos 18 et 19). Les exploitations ayant été réalisées à la main, le chargement des wagonnets ayant toujours été réalisé à la pelle, le tri des matériaux était donc réalisé sur place et les verses s'édifiaient au plus près des chantiers à ciel ouvert. Ces verses contiennent les résidus de l'abattage du minerai, du toit et du mur de la couche. Elles sont constituées principalement de blocs décimétriques de schistes et de grès primaires.

### **3.4 OUVRAGES DEBOUCHANT AU JOUR**

Au total 106 orifices débouchant à la surface sont représentés sur la carte informative. Ces ouvrages ont été soit localisés au DGPS parce que retrouvés sur le site, soit positionnés à l'aide du plan d'archives géoréférencé. Les travaux réalisés à ciel ouvert ont parfois intersecté d'anciens travaux souterrains. Ces anciennes galeries sont devenues des orifices débouchant au jour.

Dans le détail on relève :

- 52 entrées de galerie dont 11 retrouvées sur le site et levées au DGPS ;
- 54 ouvrages verticaux (trémies, cheminées d'aérage, montages, puits...) dont 8 retrouvés sur le site et levés au DGPS.

La grande majorité des travaux étant conduite de manière archaïque avec très peu de moyen mécanique, les ouvrages présentent des sections de dimensions modestes, de 2 mètres de côté en moyenne avec des largeurs ou des hauteurs n'excédant pas les 3 mètres.

Le minerai extrait des excavations à ciel ouvert, situées sur les sommets des deux collines, était acheminé jusqu'à la galerie niveau 0. De nombreuses cheminées et galeries ont été creusées à partir de la surface pour permettre de déverser les produits dans la partie souterraine de la mine et atteindre cette galerie de niveau 0 (photos 7, 14, 15, 16 et 20). Cette méthode d'acheminement explique la forte proportion d'ouvrages débouchant au jour à proximité des exploitations à ciel ouvert.

L'orifice du travers-banc du niveau 0, aboutissant sur le carreau de la mine dans le village de Saint-Rémy-sur-Orne, constituait le seul ouvrage d'évacuation du minerai (photo 21). Ce tunnel, long de 500 mètres et de section carrée de 2 mètres de côté, permettait d'acheminer le minerai directement sur le carreau pour ensuite être transporté par le chemin de fer jusqu'à Caen. En 1968, dans le cadre de la fermeture des travaux, la partie du tunnel située sous la route départementale 562 (ancienne N162), a été comblée sur une longueur de 22 mètres à partir de l'entrée du tunnel. Le reste du tunnel n'a pas été traité (figures 15 et 16). Cependant, d'après le témoignage de l'actuel maire de Saint-Rémy-sur-Orne, les murs construits seraient percés et il serait possible de franchir cette partie comblée.

D'autres ouvrages ou travers-bancs débouchant à flanc de coteau permettaient également d'accéder à la mine, au niveau des étages d'exploitations. Les plus importants étaient, sur Beaumont, les deux entrées de galeries des travaux de la Forge et les entrées des TB 15, 45 et 61, et sur le Mont-de-Vêpres, l'entrée du TB 89. En 1968, les deux entrées de la Forge ont été bouchées avec des remblais et les accès aux TB 15, 45, 61 et 89 ont été obturés par des murs en maçonnerie de 0,8 à 1 mètre d'épaisseur.

#### **3.4.1 TRAVAUX MINIERS LOCALISES A FAIBLE PROFONDEUR**

Outre les ouvrages débouchant au jour (puits et galeries horizontales) cités précédemment, les travaux ont été poursuivis jusqu'aux affleurements. La topographie de la surface est elle-même concordante avec la forme du synclinal, une forte proportion des travaux souterrains se trouve donc à moins de 50 mètres de profondeur (carte 1).

## **4. TRAVAUX EXECUTES POUR LA MISE EN SECURITE DU SITE**

### **4.1 FERMETURE DES ORIFICES DEBOUCHANT EN SURFACE**

L'ensemble du site de la mine a été clôturé en 1968, ainsi que certains orifices particulièrement dangereux et certains cônes d'effondrement.

#### **Tunnel d'accès de la mine au carreau (TB du niveau 0)**

La partie du tunnel sous la route départementale 562 (ancienne N162), à une profondeur de 8 mètres, a été comblée sur 22 mètres, puis a fait l'objet de travaux de renforcement par la suite. Les 500 mètres de tunnel jusqu'au carreau n'ont pas été traités.

#### **Ouvrage débouchant au jour**

Cinq ouvrages ont été murés avant la fermeture. Les deux accès de l'étage de la forge de Beaumont ont été remblayés.

### **4.2 AUTRES OUVRAGES ET INFRASTRUCTURES**

#### **Autres ouvrages souterrains**

Leur comblement n'a pas été réalisé. Certains de ces orifices ont fait l'objet de dépôts sauvages de déchets industriels. Une grave pollution au phénol a affecté l'Orne en 1974-1975. Suite à cela et afin d'y remédier, une décharge d'ordures ménagères contrôlée a été autorisée au SIVOM dans les carrières les plus à l'est de la mine en 1982.

#### **Carreau de mine**

Les bâtiments ont été convertis en zone artisanale. Les anciens fours ont été démantelés, mais il subsiste les infrastructures dont une partie est occupée par une société fabriquant des cheminées.

### **4.3 SURVEILLANCE**

Dans le cadre des travaux de fermeture de la mine de Saint-Remy-sur-Orne, aucune surveillance particulière n'a été effectuée pendant la phase de remontée des eaux.

## **5. DESORDRES LIES AUX ANCIENNES EXPLOITATIONS MINIERES**

### **5.1 DESORDRES EN PHASE D'EXPLOITATION**

En janvier 1931, « *un éboulement très important s'était produit dans le quartier du Mont-de-Vêpres. C'est la partie de la couche restant au voisinage de l'affleurement qui avait glissé jusqu'au niveau 0* » [1]. Cet événement s'est produit dans des chantiers réalisés selon la méthode des tailles montantes dans les carbonates alors que le banc à hématite avait déjà été complètement exploité (défruitement de 80%).

En été 1931, à l'aplomb d'une zone du quartier de Mont-de-Vèpres, une dépression apparaît, accompagnée de cratères en surface de 2,50 m de profondeur et d'une fissuration des terrains autour [4]. Le rapport mentionne : « *le 29 juillet, quelques crevasses apparurent dans le chemin de Launay (...) puis les crevasses se propagèrent vers l'est et le Sud...Le champ de crevasses présente 3 fissures principales (...) la plus longue présente une longueur d'environ 100m (...) avec au sud un affaissement de 25 cm sur 30 mètres. L'affaissement maximum est de 0.50 m. Les crevasses 2 et 3 sont un peu plus courtes, avec un affaissement du sol de 5 à 10 cm. D'autres fissures sans affaissement notable se présentent à l'ouest en prolongement des crevasses principales (...) L'affaissement s'est propagé jusqu'à la surface suivant la normale à la couche (...) Au sud, il a dû être amorti par les anciens travaux en amont du niveau 110, région en plateau (...) à l'est par une zone vierge (...) à l'ouest par la présence d'un stot important* ».

Cet événement, important à considérer pour la démarche d'analyse, n'a malheureusement pas pu être localisé en surface à la date de réalisation de cette étude.

En janvier 1935, un éboulement s'est produit dans le quartier de Beaumont, abondamment décrit dans les rapports de l'Ingénieur des Mines [1] et [2]. A cet endroit, l'hématite est entièrement exploitée jusqu'à l'affleurement sauf à l'est au voisinage du chemin de Grande Communication n°133 où un stot de 10 m avait été laissé suivant la relevé. L'exploitant avait par contre laissé un stot de 20 m entre le sommet des chambres réalisées dans les carbonates et l'affleurement. L'épaisseur de ce stot avait été augmentée à 60 m sous le chemin n°133.

En décembre 1937, un éboulement a lieu dans le quartier de Beaumont. Cet événement avait été annoncé par des signes précurseurs au fond : craquements de cloisons et nombreuses chutes de blocs.

La genèse de la plupart des mouvements de terrains apparus depuis 1931 a été résumée dans la note [3] par :

- « *on constate des écaillages de piliers plusieurs mois avant l'effondrement. Il se produit en outre dans les piliers des fissurations* » ;
- plusieurs mois avant l'éboulement, « *la composante de la pression suivant le pendage de la couche se manifeste par des fissures en pied des galeries, et par des plaquettes se détachant des parements* » ;
- dans les jours précédents l'éboulement, « *on note de petits éboulements locaux et des affaissements de piliers* » ;
- les manifestations prémonitoires sont « *les craquements dans les piliers, notamment après le tir de mine. En outre des chutes de blocs du toit se produisent fréquemment* » ;
- « *Enfin au dernier stade, apparaissent des fissures en surface, fissures par lesquelles s'échappent des bulles d'air que l'on voit facilement s'il y a un peu d'eau à la surface* ».

Ces trois événements sont localisés approximativement sur la carte 5 par leur date d'occurrence.

Mis à part ces éboulements au fond, mentionnés dans les différents procès verbaux des visites du Service des Mines, le plan final des travaux annexé au dossier d'arrêt des travaux, archivé à la DRIRE Basse-Normandie, (copie du plan, carte 5) indique qu'environ 50% de la surface des travaux est éboulée à sa date de réalisation en 1966. Nous avons aussi retrouvé au moins un autre plan de format semblable, non daté mais vraisemblablement plus ancien de quelques années qui mentionne aussi ces éboulements au fond mais sur des surfaces plus faibles. Après vérification, il semblerait que ces plans indiquent bien les travaux éboulés au fond mais ne fait aucune mention de désordres en surface. Compte tenu des quelques événements bien documentés de 1931 à 1937, on peut raisonnablement penser que des mouvements en surface (affaissements ou effondrements) ont donc pu avoir lieu à l'aplomb des zones ébouées (figure 17).

Cette hypothèse semble confirmée par les effondrements du champ Potier (photos 22 et 23). En effet, les deux cratères se situent en limite supérieure de zone ébouée au fond en 1966. Par contre, ces deux effondrements semblent de plus grandes dimensions que ceux plus anciens situés à l'est des travaux, mentionnés dans les différents rapports. Une explication pourrait être que ceux ci se sont produits dans une zone de fond de vallée où les formations superficielles sont plus épaisses. Le plan minier mentionne en plus la présence de sables au contact de la faille. Ces deux facteurs pourraient expliquer une plus grande extension du cône d'éboulement.

Afin de rechercher une éventuelle corrélation entre présence de travaux, effondrements en surface, profondeur, pente et éboulements en surface, un maillage au pas de 40 mètres a été superposé aux plans des travaux sur le SIG (figure 13). Chacune des cellules du maillage a été renseignée par trois données : ébouée ou non, pente moyenne sur la cellule et profondeur moyenne. La méthode par maille a été retenue car nous ne disposons pas d'un plan précis des travaux (le plan du dossier d'arrêt des travaux ne contient en effet que les galeries de niveau). Par contre, les archives permettent d'affirmer que le taux d'exploitation à l'échelle des chantiers avoisine les 90% et que l'ouverture est relativement constante autour de 8 mètres.

Cette analyse par maille corrélée à celle des effondrements localisés connus, observés en surface et bien documentés quant à leur mécanisme au fond montre que :

- des éboulements au fond se sont produits à toutes les profondeurs ;
- des éboulements au fond se sont produits quelle que soit la pente de la couche exploitée ;
- des éboulements au fond sont apparus dès que les chantiers dans les carbonates ont été menés sur de grandes étendues;
- les effondrements localisés au jour se situent généralement à l'aplomb des panneaux éboués ;
- la majorité des chantiers (carbonates + hématite exploités) situés à grande profondeur (au-delà de 60 m) est ébouée en 1966 (carte 5) ;
- une majorité des chantiers à faible profondeur n'était pas ébouée en 1966 ;

- le taux de défruitement n'est pas directement discriminant mais avec l'augmentation de la profondeur, les piliers dans l'hématite semblent sous-dimensionnés après l'exploitation des carbonates ce qui initie le mécanisme de rupture du toit de la chambre par augmentation de sa portée ;
- les mécanismes d'éboulement au fond sont plutôt liés à la rupture de planches de carbonates laissées au toit ou de stots de protection au sommet des chambres qui viennent " balayer " les travaux situés en dessous et les comblent plus ou moins bien.

## **5.2 EFFONDREMENTS LOCALISES OBSERVES EN SURFACE EN 2005**

La morphologie du site minier de Saint-Rémy-sur-Orne est chaotique. Il est dès lors très difficile d'identifier ce qui résulte d'anciens effondrements, fontis, exploitations à ciel ouvert ou affaissements ...

Cependant, les visites du site ont permis de localiser plusieurs fontis et effondrements localisés non ou partiellement remblayés.

Pour le Mont de Beaumont, cinq effondrements de trois à dix mètres de diamètre ont été observés, correspondant probablement à des ruptures de tête de puits ou de travaux proches de la surface.

A la base de Beaumont, dans le champ Potier, ont été observés deux grands effondrements d'environ cinquante mètres de diamètre (en 2005). Nous ne connaissons cependant pas leur profondeur car ils sont en cours de remblayage par l'agriculteur exploitant le champ et nous n'en avons pas retrouvé trace dans les archives. D'après le maire de Saint-Rémy-sur-Orne, ces éboulements, initiés au fond, sont arrivés très rapidement en surface dans les années 60 sans plus de précision sur la date. Par contre, le maire nous a confirmé qu'ils sont toujours actifs actuellement car, malgré un apport régulier de remblais, les cratères se reforment.

Pour le Mont-de-Vêpres, quatre effondrements de trois à dix mètres de diamètre ont été observés. Ils ne semblent cependant plus actifs à la date de visite du site. D'autres traces pouvant correspondre à d'autres effondrements comblés ont aussi été vues par M. Maurin du BRGM lors d'une visite du site en 1999 (rapport BRGM 99-G-398).

## **5.3 AUTRES OBSERVATIONS SUR LE SITE**

Le site de Saint-Rémy-sur-Orne a aussi été exploité à ciel ouvert. Certains documents indiquent que les plus vieux travaux (minières) auraient de 500 à 600 ans. Ces anciennes exploitations seraient plutôt situées à l'est du gisement.

Les monts de Vêpres et Beaumont ont aussi été fortement exploités à ciel ouvert et cela jusqu'à la fin de l'exploitation en 1966.

Aucun travaux de mise en sécurité de ces minières n'a été réalisé. Il subsiste donc des fronts de taille à ciel ouvert subverticaux d'une dizaine de mètres de hauteur mais pouvant très localement atteindre 50 mètres.

Les matériaux présents (schistes et grès du toit et du mur de la couche exploitée), proches de la surface, sont généralement les plus altérés. Les anciens fronts sont donc instables et sujets à écroulements.

Ces travaux à ciel ouvert ont aussi produit de gros volumes de stériles. Ces matériaux ont été déplacés et stockés sous forme de versés généralement situés en milieu de pente. On notera cependant que ces versés sont constitués de blocs décimétriques (peu ou pas de fines) et possèdent des pentes faibles (30° au maximum), ce qui explique sans doute l'absence d'observations de glissement de talus dans ces dépôts miniers.



## **6. 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 1/2 500 (carte 1) . Elle comprend :

- le fond représenté par l'orthophotoplan mis à disposition par le conseil général du Calvados ;
- le plan des travaux du fond On notera que le rapport BRGM/RP-53993-FR 2005 attribue une précision de l'ordre de 6 m au calage des plans sur les différents points utilisées comme références. La valeur de 10 m a finalement été retenue d'expérience par l'INERIS de façon sécuritaire ;
- les ouvrages débouchant en surface (puits et entrées de galeries) ;
- les désordres recensés issus de la phase informative réalisée par le BRGM et l'INERIS ;
- les affleurements du minerai et les fronts de mines à ciel ouvert ;
- l'emprise des verses ;
- les courbes correspondant à l'iso-profondeur, à 50 m et 100 m, du mur de l'hématite.



**PARTIE II**

**EVALUATION DES ALEAS**



## **1. RETOUR D'EXPERIENCE ET IDENTIFICATION DES ALEAS**

L'identification et l'évaluation des aléas sur le bassin ferrifère de Saint-Rémy-sur-Orne fait appel aux connaissances acquises lors de la phase informative, en particulier l'observation ancienne ou actuelle des désordres.

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

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

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

### **1.1 ETAT DES CONNAISSANCES PAR RETOUR D'EXPERIENCE**

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

Le tableau 2 ci-après récapitule de façon très synthétique les principales caractéristiques des différents bassins étudiés.

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 600 m) et recèlent une 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°).

On notera quand même que le site de Saint-Rémy-sur-Orne est différent sur plusieurs points :

- la couche a été exploitée en deux temps : en premier la partie à hématite, puis la partie en carbonates ;

- le gisement est très faillé et plissé ce qui fait que les travaux ne sont pas homogènes sur de grandes distances (en terme de pente et de profondeur) ;
- l'ouverture totale est d'environ 8 m soit la plus grande connue actuellement dans les gisements de l'ouest.

		MAY-SUR-ORNE (14)	SOUMONT (14)	LA FERRIERE (61)	SAINT-REMY-SUR-ORNE	SEGRE (49)
Dates d'exploitation		1896 - 1968	1907 - 1989	1905 - 1970	1875-1981	1907 - 1984
Profondeur maximale		450 m	650 m	400 m	200 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)	Tailles montantes Chambres magasins Tailles chassantes	Chambres magasins
Pendage	Flanc nord	85° à 90°	45° à 65°	absent	0 à 90°	80° à 90°
	Flanc sud	45° à 60°	30° à 60° 50° à 90° (plis)	25° à 45°	0 à 90°	60° à 70°
Nombre de couches exploitées		1 (très localement 2)	1	1	1 exploitée en deux fois sans intercalaire entre les deux	2 (couches A et B)
Puissance		3,5 à 4,0 m (localement : 6 à 7 m)	3 m (localement : 6 m)	3 à 4 m (localement : 5 m)	8 m	A : 1,5 à 5 m B : 1,5 à 6 m
Recouvrement jurassique discordant		0 à 60 m (calcaire jurassique)	0 à 50 m (calcaire jurassique)	absente	absente	absente
Zone d'altération du minerai		20 à 50 m sous le contact jurassique	20 à 50 m sous le contact jurassique	< 80 m	inconnue	< 80 m
Types de désordres observés		Fontis (rupture de couronne) Eboulements (6 dans le flanc sud, 2 dans le flanc nord) Débourage de puits ou cheminée	Affaissements (éboulements de 1929, 1951, 1961, 1965, 1966) Fontis (à l'aplomb de galeries proches de la surface) Deux gros éboulements en 1935 et 1936 avec fontis de 20 à 35 m en surface sur le flanc nord	Fontis (rupture de couronne) Fontis (à l'aplomb de galeries proches de la surface)	Affaissements Eboulements Fontis (rupture de couronne) Fontis (à l'aplomb de galeries proches de la surface)	Fontis (rupture de couronne) Débourage de cheminée

*Tableau 2 : Analyse comparative de différents bassins ferrifères de l'Ouest*

Les désordres observés dans ces différents bassins sont comparables (essentiellement des effondrements localisés par rupture de couronne et de l'intercalaire, des débourrages de puits ou cheminées des fontis dus à des éboulements de galeries). On note toutefois l'existence d'éboulements importants au fond, en phase d'exploitation, dans les exploitations de May-sur-Orne, de Soumont, de Saint-Rémy-sur-Orne et de la Ferrière-aux-Etangs. A Soumont, à la Ferrière-aux-Etangs mais aussi à Saint-Rémy-sur Orne, certains désordres se

sont manifestés en surface par des phénomènes que l'on peut classer comme des affaissements plutôt que comme des effondrements généralisés : forme de cuvettes d'affaissement à bords étalés, amplitude verticale de l'ordre du mètre avec présence de fissures ouvertes mais absence de cassures franches de cisaillement (avec rejet).

## **1.2 ANALYSE DU RISQUE D'EFFONDREMENT GENERALISE**

Les témoignages et recherches documentaires ne recensent aucun événement de type effondrement généralisé sur les bassins étudiés (tableau 2) exploitant le minerai de fer.

Les mouvements de terrain de grande ampleur, observés sur ces différents bassins, sont :

- soit des effondrements du stot de protection de la surface dans le cas des chantiers subverticaux ou très pentés ;
- soit des affaissements de la surface consécutifs à des éboulements du fond dans le cas de chantiers faiblement ou moyennement pentés.

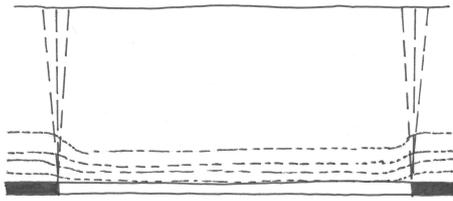
D'un point de vue général, les conditions d'apparition d'un effondrement généralisé peuvent être précisées pour les deux cas d'exploitation suivants :

### *a) Cas d'une exploitation en plateure*

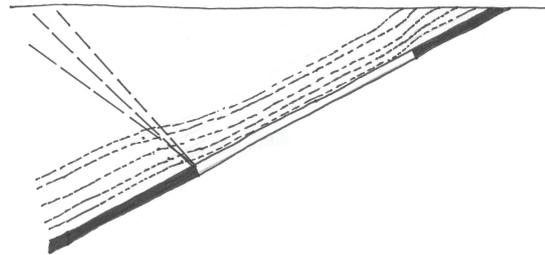
Dans le cas d'un chantier situé dans un gisement stratifié subhorizontal ou très peu penté, constitué de *bancs suffisamment raides*, les mécanismes du comportement des bancs du toit sont bien connus : les points de rupture par flexion ou par cisaillement se situent sensiblement dans un plan proche de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

### *b) Cas d'une exploitation pentée*

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



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



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

Les exploitations du flanc nord du synclinal de Saint-Rémy-sur-Orne ont toutes été réalisées dans des terrains ayant un pendage localement très variable (de 0 à 90°) mais généralement supérieur à 45°.

L'extension des chantiers y est finalement faible entre deux stots de protection, entre deux failles ou encore entre deux plis (figures 5 et 6).

Même si, localement, l'exploitation a été réalisée en plateaux, la topographie pentée de la surface nous place dans un schéma semblable à celui d'un gisement penté et rend donc peu probable le mécanisme de rupture brutal du recouvrement sur de vastes zones.

De plus, une étude récente, réalisée pour le compte du Ministère de l'Economie, des finances et de l'Industrie, sur les accidents affectant les exploitations minières pentées ne recense aucun cas d'effondrement généralisé (Lambert 2005). Ce mode de rupture affecterait donc essentiellement les exploitations en plateaux ou faiblement pentées.

**Conclusion : Ces différents arguments permettent d'exclure, au vu des connaissances actuelles, le scénario d'effondrement généralisé à caractère spontané sur l'exploitation du synclinal de Saint-Rémy-sur-Orne.**

**Le site de Saint-Rémy-sur-Orne a été l'objet d'effondrements d'une cinquantaine de mètres de diamètre. Ceux-ci ne sont pas pour autant considérés comme des effondrements en masse mais comme étant localisés mais de grande ampleur, leur origine provenant de la rupture du toit d'une chambre au droit d'un panneau exploité.**

### **1.3 ANALYSE DU RISQUE D'AFFAISSEMENT PAR MODELISATION NUMERIQUE**

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).

La question que l'on peut se poser est de savoir si, en surface, les anciens travaux

miniers peuvent être le siège de nouveaux phénomènes d'affaissement, tels que ceux de Soumont flanc sud de 1929, 1961, 1965 et 1966 et celui de la Ferrière-aux-Etangs.

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

Les configurations d'exploitation qui permettent le déclenchement (ou non) du processus de rupture sont la combinaison des trois facteurs suivants :

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

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

<b>Pendage</b>	<b>Taux de défrètement (<math>\tau\%</math>)</b>	<b>Ouverture (w)</b>
> 55°	≤ 90 %	≤ 4 m
45° à 55°	≤ 90 %	≤ 3 m
	≤ 80 %	≤ 5 m
30° à 45°	≤ 80 %	≤ 3 m
	≤ 70 %	≤ 5 m

*Tableau 3 : conditions d'exclusion du processus d'affaissement*

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).

Les travaux souterrains de Saint-Rémy-sur-Orne ont pour caractéristiques fondamentales :

- une seule couche exploitée sur une puissance de 8 mètres environ ;
- un pendage moyen de 45° mais variant en fait de 0 à 90° (déversé dans certains plis) ;
- un taux de défrètement relativement constant et homogène de l'ordre de 80 à 90% .

Le synclinal de Saint-Rémy-sur-Orne est très complexe du point de vue de sa tectonique. L'exploitation y a été réalisée par panneaux successifs limités principalement par des failles longitudinales et transversales et par de nombreux plis et plis-failles (figures 5 et 6). La méthode d'exploitation changeait donc

rapidement en fonction des variations du pendage de la couche. Les chantiers ont donc toujours eu des dimensions relativement restreintes entre chaque stots transversaux et longitudinaux. Rappelons cependant que nous ne disposons pas de plans miniers nous permettant une évaluation précise de la largeur L des panneaux exploités.

Cependant, le retour d'expérience sur tous les éboulements au fond connus jusqu'en 1966 (carte 5) (environ 50% de la surface exploitée) montre qu'ils se seraient, semble t'il, parfois traduit par un affaissement des terrains en surface comme cela a été décrit dans le rapport de l'ingénieur des mines de 1931 (paragraphe 5.1).

**Si l'on se rapporte au tableau 3, à l'annexe A du présent rapport ainsi qu'aux rapports des ingénieurs des mines des années 30, une analyse du processus d'affaissement s'impose donc sur l'ensemble des travaux souterrains de la mine de Saint-Rémy-sur-Orne.**

## **2. IDENTIFICATION DES ALEAS « MOUVEMENTS DE TERRAIN »**

### **2.1 INTRODUCTION**

La présente étude d'évaluation et de cartographie des risques miniers menée sur le territoire de la commune de Saint-Rémy-sur-Orne ne concerne que les aléas géotechniques de « mouvements de terrain », liés aux exploitations minières (annexe A). Elle n'aborde pas les autres risques miniers tels que les émanations de gaz, par exemple, ou les impacts environnementaux sur les eaux et les sols.

### **2.2 LES DIFFERENTS ALEAS RETENUS**

La phase informative a révélé, sur les travaux miniers du synclinal du bassin de Saint-Rémy-sur-Orne, un certain nombre de phénomènes de mouvements de terrain observés ou considérés comme prévisibles. 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'affaissement liés à la rupture des travaux au fond. Même si le phénomène majoritaire semble être l'effondrement localisé, des mouvements de terrain de type affaissement ont été décrit en 1931. Sur le synclinal de Saint-Rémy-sur-Orne, ces phénomènes peuvent se traduire par des affaissements plus ou moins souple des terrains délimités par des zones de crevasses présentant de faibles décrochements. Ils peuvent être rencontrés, par exemple, à l'aplomb de travaux les plus profonds, pour lesquelles le phénomène d'effondrement localisé peut-être exclu mais où les éboulements des vides au fond pourraient se traduire par des mouvements en surface plus souples, apparentés à des affaissements ;
- les phénomènes d'effondrements localisés provoqués par la rupture du stot de protection (couronne) ou du toit des chambres de tous les chantiers miniers.

Ces phénomènes peuvent se traduire en surface par des dépressions en forme de gouttières ou de tranchées qui suivent la couche à proximité de l’affleurement ;

- les phénomènes d’effondrements localisés de plus petites dimensions liés à la rupture d’anciens orifices miniers (puits, cheminées d’aérage et trémies débouchant en surface) ou des galeries à faible profondeur. Ces phénomènes se traduisent en surface par l’ouverture d’un fontis en forme de cratère ou d’entonnoir, généralement circulaire ;
- les phénomènes de tassements sur les anciennes verses. Même si celles-ci ne présentent pas à l’heure actuelle de signes d’instabilités, ces apports de matériaux peuvent néanmoins être le siège de quelques mouvements résiduels ;
- les phénomènes de chutes de blocs et d’écroulements liés à la présence des anciens fronts rocheux des exploitations à ciel ouvert. Ces fronts peuvent parfois atteindre très localement 50 m de hauteur. Ces phénomènes peuvent se traduire par un recul de la ligne de crête en même temps qu’un épandage de ces matériaux à la base de la falaise.

Au vu des connaissances acquises et des arguments développés précédemment, le scénario d’effondrement généralisé sur le bassin de Saint-Rémy-sur-Orne a été exclu.

### **3. EVALUATION DES ALEAS DANS LE BASSIN DE SAINT-REMY-SUR-ORNE**

#### **3.1 LES AFFAISSEMENTS**

L’enquête historique mentionne en 1931 au moins un phénomène en surface que l’on peut assimiler à un affaissement sur le synclinal de Saint-Rémy-sur-Orne. La rétroanalyse a montré que des phénomènes d’affaissement ne pouvaient donc pas être totalement exclus, a priori, sur les deux flancs du synclinal, par référence aux évènements passés observés sur d’autres bassins ferrifères (Soumont et la Ferrière-aux-Etangs).

##### **3.1.1 FACTEURS DE PREDISPOSITION ET PROBABILITE D’OCCURRENCE**

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

- profondeur du panneau inférieure à 300 m. Dans le cas de la mine de Saint-Rémy-sur-Orne, l’ensemble des chantiers sont situés à moins de 300 mètres de profondeur ;
- largeur du panneau supérieure à la profondeur moyenne de celui-ci, prise en milieu de panneau, pour que l’affaissement se donne en totalité ( $L > H$ ). En dessous ( $L < H$ ), les affaissements diminuent progressivement et sont considérés comme imperceptibles à la largeur limite ( $L < 0,4 H$ ) ; dans le cas

de Saint-Rémy-sur-Orne, nous ne connaissons pas précisément la dimension des panneaux exploités. Par contre la description des méthodes d'exploitation retrouvée dans les archives indique que les stots de protection des galeries de niveau étaient fréquemment repris en fin d'exploitation des panneaux avant abandon du quartier. Il n'est donc pas possible de considérer les galeries de niveau comme marquant la présence de stots limitant des panneaux. Nous devons donc considérer que quelque soit la profondeur,  $L < H$ .

- pendage compris entre 30° et 45° et un taux d'exploitation supérieur à 80 % ou pendage compris entre 45° et 55° et un taux d'exploitation supérieur à 70 %, pour une ouverture des chantiers de 5 m ;

### 3.1.2 LES PANNEAUX MENACES PAR UN EVENTUEL AFFAISSEMENT

La mine de Saint-Rémy-sur-Orne a connu par le passé des affaissements des terrains en surface. Les caractéristiques retenues pour l'ensemble de la mine sont les suivantes :

Caractéristiques d'exploitation des panneaux de la mine de Saint-Rémy-sur-Orne					
Mine de Saint-Rémy-sur-Orne	Quartiers	Taux de défruitement	Couches	Pendage	Ouverture
	Mont de Vêpres	85 à 90 %	Hématite et carbonates	0 à 90°	7 à 8 m
	Mont de Beaumont				

Tableau 4 : caractéristiques d'exploitation au critère d'affaissement de l'annexe A

### 3.1.3 INTENSITE DE L'AFFAISSEMENT

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

On sait, à partir de la rétroanalyse des affaissements de Soumont (Tritsch & Delaunay, 2004) 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)

$\tau$  = taux d'exploitation (ou taux de défruitement),

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

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

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

Où :

$A_{\max}$  est l'affaissement maximal

P, la profondeur moyenne du panneau

$$\alpha = 1,5$$

$$\beta = 5$$

Les coefficients  $\alpha$  et  $\beta$  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 5) donne les résultats obtenus sur différents secteurs du site de Saint-Rémy-sur-Orne, en considérant un taux d'exploitation moyen de 85 % et une ouverture de 8 m. On retiendra que ces valeurs sont purement indicatives et n'ont d'objet que de fixer des ordres de grandeur nécessaires à la réflexion.

Quartiers	Exploitations de 0 à 50 m de profondeur	Exploitations de 50 à 100 m de profondeur	Exploitations de 100 à 150 m de profondeur
Profondeur moyenne (P)	25 m	75 m	125 m
Ouverture exploitée (w)	8 m	8 m	8 m
Affaissement maximal ( $A_{\max}$ )	2,05 m	2,05 m	2,05 m
Déformation maximale ( $\epsilon_{\max}$ )	123 mm/m	40 mm/m	25 mm/m
Mise en pente ( $\mu_{\max}$ )	41%	13 %	8 %
Classe d'intensité (annexe A)	Forte	Forte	Moyenne à Forte

*Tableau 5 : Valeurs indicatives des déformations horizontales et pentes calculées sur le site de Saint-Rémy-sur-Orne par référence aux affaissements de Soumont*

*On retiendra, par référence au tableau 2 de l'annexe A, que l'intensité du phénomène d'affaissement est classée comme forte dans les quartiers situés à faible profondeur et moyenne à forte dans les quartiers plus profonds.*

### 3.1.4 EVALUATION DE L'ALEA

D'une manière synthétique, compte tenu du contexte d'exploitation très morcelé mais aussi des événements passés connus :

- les exploitations situées à moins de 50 m de profondeur n'ont jamais connu de phénomènes d'affaissements en surface. Par contre, ils ont été fortement sujets à des effondrements localisés. Dans cette tranche de profondeur, on peut raisonnablement penser que l'éboulement des travaux du fond se traduira préférentiellement par un phénomène d'effondrement localisé au jour. Bien que l'intensité potentielle de l'affaissement soit forte (tableau 5), l'absence

d'événements et la préexistence du phénomène d'effondrement localisé pour ces chantiers peu profonds, d'intensité plus forte encore, nous conduit à ne pas considérer cet aléa ;

- les exploitations situées entre 50 et 150 m de profondeurs ont provoqué au moins un affaissement connu, en surface. Cet affaissement avait une amplitude maximale  $A_m$  de 0,50 m, valeur bien inférieure à celle calculée dans le tableau 5. Par mesure de précaution, cette valeur faible ne sera pas retenue comme valeur de référence car nous n'avons aucunes données sur l'évolution de cette cuvette dans le temps. Par contre, il semble que les affaissements en surface ne soient pas très récurrents sur cette mine, comparativement aux effondrements localisés. La probabilité d'occurrence sera donc qualifiée de faible à moyenne. Nous retiendrons donc un niveau d'aléa affaissement moyen pour tous les travaux situés à plus de 50 m de profondeur.
- Il n'y a pas de travaux situés au-delà de 150 m de profondeur.

### 3.1.5 LIMITES DU ZONAGE

Les limites matérialisant en surface la zone possiblement 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 ( $\gamma$ ) de l'ordre de  $30^\circ$  à  $35^\circ$ , en gisement penté (pendage supérieur à  $20^\circ$ ) on est conduit à distinguer trois angles limites qui varient en fonction du pendage :

- l'angle limite ( $\gamma$ ), 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  $\gamma$  ;
- l'angle limite « aval », toujours plus grand que l'angle.

Au vu de la rétroanalyse des cuvettes observées à Soumont, on remarque que les valeurs des angles de rupture amont et aval mesurées (en moyenne respectivement de l'ordre de  $7^\circ$  et  $30^\circ$ ), pour un pendage compris entre  $30^\circ$  et  $40^\circ$ , sont très proches des valeurs correspondantes des abaques des bassins de Lorraine ou du Nord Pas-de-Calais<sup>[3]</sup> (tableau 6, ci-après). On peut en déduire que les angles d'influence devraient être également très proches et prendre pour ce gisement des valeurs d'angle d'influence égales à au moins  $30^\circ$  (coté amont) et  $45^\circ$  (coté aval).

---

<sup>[3]</sup> PROUST A. : Etude sur les affaissements miniers dans le Bassin du Nord et du Pas-de-Calais. RIM, 1964

<b>Valeurs du pendage</b>		0°	15°	25°	30°	<b>40°</b>	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	<b>30</b>	28	27
	Angle aval	35	38	40	43	<b>45</b>	47	48

*Tableau 6 : Valeurs données dans les abaques d'affaissement des bassins du Nord Pas-de-Calais, de Lorraine et de la Sarre*

Cependant, dans le cas très particulier de la mine de Saint-Rémy-sur-Orne qui a exploité l'ensemble du synclinal, lui-même contenu en surface au cœur d'une vallée, nous n'avons pas considéré d'angle aval car celui-ci vient se superposer, de fait, à la zone d'aléa générée par les travaux de l'autre flanc.

Pour l'angle amont, une valeur de 20° a été retenue à partir de la limite des 50 m de profondeur. En effet, sur le synclinal de Saint-Rémy, les couches ont tendance à se redresser (pendage supérieur à 60°). Précisons que l'angle d'influence aval est normalement pris à la base des panneaux exploités « affaissables » (axe du synclinal dans ce cas), et l'angle d'influence amont à la partie supérieure des panneaux.

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.

### **3.2 EFFONDREMENTS LOCALISÉS A L'APLOMB DES CHANTIERS**

Ces chantiers (chambres et galeries de niveau) sont situés sous un recouvrement dont la hauteur varie entre quelques mètres seulement à environ 150 m.

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

Les secteurs menacés de risque d'effondrements localisés à l'aplomb des chantiers exploités dans les deux couches, hématite et carbonates, concernent la majorité des travaux souterrains de la mine comme le montre le chapitre 6.

L'histoire de la mine a montré qu'une majorité des travaux situés au-delà de 70 m sont déjà éboulés au fond. Il subsistait par contre toujours des zones stables sur l'ensemble de la mine en 1966 (carte 5), même si la majorité se situait à faible profondeur. Par contre, les quelques effondrements au jour connus sont plutôt situés à l'aplomb du sommet de panneaux éboulés au fond. On remarque ainsi qu'il n'y a pas eu d'effondrement en surface au droit de la zone située à plus de 100 m de profondeur.

Le vieillissement des matériaux constituant les piliers mais surtout le toit de la formation risque à court terme d'engendrer l'éboulement des travaux du fond et la

propagation vers la surface d'une cloche d'éboulement. La présence de vieux travaux à ciel ouvert aux affleurements facilite d'ailleurs grandement l'infiltration des eaux de pluie ce qui accélère les dégradations.

Compte tenu de la grande similitude des zones stables en 1966 avec celles déjà ruinées par ailleurs, il n'est pas possible de garantir leur stabilité à long terme. En ce qui concerne les zones déjà éboulées, le mécanisme décrit dans les procès verbaux du Service des Mines indique que les éboulements ne remplissent pas complètement les vides disponibles. Leur présence pourrait donc engendrer, à terme, de nouveaux effondrements localisés à leur aplomb. Par contre, les travaux éboulés situés à plus de 100 m de profondeur ne devraient pas engendrer de désordres en surface, le volume des vides résiduels comparés à la profondeur, n'étant pas suffisamment importants.

### **3.2.1 INTENSITE DU PHENOMENE**

Les exploitations ont été conduites de manière très semblable en tout point du gisement. La couche à hématite a été exploitée sur l'ensemble de l'emprise du synclinal où elle était exploitable, la couche carbonatée, sur une majorité de la surface où elle était exploitable, avec une ouverture constante. Les quelques effondrements localisés connus sont de dimension entrant dans la classe d'intensité moyenne à forte (quelques mètres à plus de dix mètres).

Les deux effondrements apparus après la fermeture des travaux, dans le champ Potier, justifient la qualification de l'intensité de moyenne à forte.

### **3.2.2 FACTEURS DE PREDISPOSITION**

Compte tenu de l'évolution défavorable de la stabilité des chantiers entre 1931 et 1966, date de la réalisation du plan général des travaux, il n'est pas possible d'exclure l'occurrence de nouveaux éboulements au fond dans les anciens travaux

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

- la fréquence des désordres observés en surface ;
  - la nature et l'épaisseur des terrains de recouvrement ;
  - les configurations d'exploitation et l'état des cavités souterraines.
- 1) La rétroanalyse montre que la fréquence des désordres apparus en surface est relativement élevée. Au moins quatre fontis de dimensions supérieures à 20 m sont apparus en surface au droit des secteurs exploités.
  - 2) L'élément déterminant était l'épaisseur du recouvrement (recouvrement formé des calcaires du Jurassique) sur le flanc sud du synclinal de Soumont et à May-sur-Orne. Sur le synclinal de Saint-Rémy-sur-Orne, ce recouvrement jurassique est inexistant. Il n'y aura donc aucune influence bénéfique de ce critère sur la prédisposition du site.
  - 3) L'analyse de la carte des éboulements au fond croisée avec les paramètres profondeur et pente montre que la profondeur a une influence essentielle sur l'apparition en surface d'effondrement. Ainsi, pour les secteurs éboulés situés à plus de 100 m, aucun événement n'est connu en surface. Les secteurs éboulés à moyenne profondeur ont provoqué des effondrements en surface, comme les travaux à faible profondeur même s'ils se sont moins éboulés au fond.

Compte tenu des éléments précédents, nous retiendrons :

- Une probabilité d'apparition au jour d'un effondrement localisé d'occurrence moyenne à faible pour les travaux situés entre 0 et 100 m de profondeur, déjà éboulés, la probabilité de survenance d'un tel phénomène diminuant avec la profondeur ;
- Une probabilité d'occurrence forte pour les travaux non éboulés au fond en 1966 et situés à des profondeurs inférieures à 100 m.

### **3.2.3 EVALUATION DE L'ALEA**

Compte tenu de l'intensité du phénomène redouté, considérée comme moyenne à forte sur l'ensemble des zones des anciens travaux miniers, la hiérarchisation des aléas évolue en fonction de la configuration des exploitations.

Pour les secteurs exploités, non encore éboulés au fond, situés entre 0 et 100 m de profondeur, d'après la carte de 1966, le croisement d'une intensité moyenne à forte et d'une probabilité d'occurrence forte les classe en aléa fort.

Pour ceux déjà éboulés au fond, situés à moins de 100 m de profondeur, le croisement d'une intensité moyenne à forte et d'une probabilité d'occurrence faible à moyenne les affecte en aléa moyen.

### **3.2.4 LIMITES DU ZONAGE**

L'épaisseur des terrains déconsolidés est estimée à une quinzaine de mètres, conformément à ce qui peut être observé dans les fontis et les puits toujours ouverts.

Dans la zone des terrains altérés (une quinzaine 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 formant à une profondeur de 15 m (figure 11).

La *marge d'incertitude* a été estimée autour de 6 m par GEODERIS. Nous avons donc retenu, par précaution, la valeur de 10 m comme valeur de la marge d'incertitude sur les deux flancs du bassin.

Les limites de zonage cartographique correspondent à la *marge de sécurité* qui intègre les deux marges soit 25 m (figure 20).

## **3.3 EFFONDREMENTS LOCALISES PAR RUPTURE DES TETES DE PUIITS**

### **3.3.1 ETAT DES PUIITS**

L'inventaire des puits et cheminées d'aéragé effectué dans le cadre de la phase informative (chapitre 4.1) recense de nombreux puits (54) qui ont servi à l'extraction ou à l'aéragé ainsi que des trémies perçant au jour. Les quelques informations retrouvées et les ouvrages observés sur le site nous indiquent que ces puits devaient être généralement circulaires et très généralement sans revêtement.

D'après le recensement réalisé lors de la phase informative, aucun de ces ouvrages n'a été mis en sécurité après l'arrêt des travaux.

### **3.3.2 EVALUATION DE L'ALEA**

Les puits inventoriés sur le site de Saint-Rémy-sur-Orne n'ont pas été traités à la fermeture de la mine. Ces ouvrages, sans revêtement, sont donc vides actuellement. Les têtes de ces puits sont généralement dans des terrains superficiels très altérés jusqu'à une profondeur estimée globalement à une quinzaine de mètres.

On peut donc qualifier la probabilité d'occurrence de la rupture de la tête de l'ouvrage de forte.

Les puits étaient de profondeur moyenne (50 m au maximum) et de diamètre faible (de l'ordre de 2 m). L'effondrement localisé de la tête de puits aura une dimension au moins supérieure à son diamètre, soit de quelques mètres à une dizaine de mètres (tableau 2 de l'annexe A). L'intensité du phénomène redouté peut donc être jugée de faible à moyenne (effondrement localisé de type fontis, relativement important, de quelques mètres à une dizaine de mètres de diamètre).

Un certain nombre de ces ouvrages a été retrouvé sur le terrain. D'autres n'ont pas été localisés principalement du fait de la difficulté à y accéder en surface.

Un seul niveau d'aléa est donc affecté à l'ensemble des puits, retrouvés ou non.

Le niveau d'aléa relatif aux différents puits et cheminées peut donc être considéré comme fort pour les ouvrages situés au droit des travaux du synclinal de Saint-Rémy-sur-Orne.

### **3.3.3 LIMITES DU ZONAGE**

On admet globalement que les terrains de recouvrement sont meubles près de la surface (terres végétales) et que les terrains primaires ou jurassiques peuvent avoir été altérés et déconsolidés sur une profondeur de l'ordre de 15 mètres, 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 15 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  $R = r + 15 \text{ m}$ .

En considérant que les puits ont été suffisamment bien positionnés, au moins à partir du plan recalé, on peut estimer l'incertitude de positionnement de ceux-ci égale à l'incertitude générale de positionnement du plan, c'est à dire 10 mètres. La marge de sécurité s'établit donc comme un cercle centré sur le puits d'un rayon égal à  $R = r + 25 \text{ m}$ .

Le schéma de principe montrant la marge adoptée pour les puits et cheminées est représenté sur la figure 18.

On notera que cette zone est probablement sécuritaire et majorante pour les ouvrages de très petits diamètres et les ouvrages localisés en surface mais aussi si le volume des vides disponibles est faible (par exemple, puits ne débouchant pas directement dans les travaux).

### **3.4 EFFONDREMENTS LOCALISES PAR EBOULEMENT DE GALERIES ISOLEES**

La présence de galeries isolées situées à faible profondeur (galeries d'accès ou galeries de reconnaissance) peut provoquer, en cas d'éboulement, des phénomènes d'effondrement localisé dénommés 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.

#### **3.4.1 INTENSITE DU PHENOMENE**

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

#### **3.4.2 FACTEURS DE PREDISPOSITION**

Un facteur important de prédisposition est la hauteur du recouvrement. La hauteur limite à partir de laquelle il y aurait, en cas d'éboulement au fond, autocomblement de la cloche de fontis ou de l'éboulement (par le phénomène de foisonnement des éboulis) est estimée à partir d'un modèle de calcul, établi par l'INERIS sous tableur Excel, considérant une remontée (ou « cheminée ») de fontis circulaire et un coefficient de foisonnement de 1,3. Dans ce dernier calcul, pour une cheminée de 2,5 m de diamètre, la hauteur d'autocomblement est de l'ordre de 30 m, toutes choses égales par ailleurs.

Aucun fontis n'a été observé sur le site au droit des galeries isolées situées à faible profondeur.

Parmi les galeries isolées situées à moins de 30 m de profondeur, on retrouve les galeries décrites au paragraphe 4.1, à savoir :

- le tunnel de l'Orne (TB de niveau 0) ;
- une galerie d'accès à des travaux à ciel ouvert située au nord du site, en forêt.

#### **3.4.3 EVALUATION DE L'ALEA**

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

En 1968, dans le cadre de la fermeture des travaux, la partie du tunnel située sous la route départementale 562 (ancienne N162) a été comblée sur une longueur de 22 mètres à partir de l'entrée du tunnel. Le reste du tunnel n'a pas été traité (figures 15 et 16). Cependant, d'après le témoignage de l'actuel maire de Saint-Rémy-sur-Orne, les murs construits seraient percés et il serait possible de franchir ce bouchon. Il subsiste donc un vide au sommet des remblais. Le recouvrement étant faible sous la route, un aléa effondrement localisé de niveau faible a été conservé.

#### **3.4.4 LIMITES DU ZONAGE**

Le zonage de l'aléa se limite aux galeries situées à moins de 30 m de profondeur au droit desquelles on trace une bande de protection (de chaque côté de la galerie). 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 15 m de profondeur puis prendre progressivement une forme classique d'entonnoir avec un angle de talus de 45°, environ, à partir de cette profondeur maximum de 15 m (terrains meubles ou déconsolidés) si le volume des vides au fond est suffisant.

Dans le cas du tunnel de l'Orne, le volume des vides est relativement limité. Dans ces conditions, l'extension du phénomène en surface sera également limitée par ce faible volume disponible (autocomblement). Il sera donc de dimension largement inférieure à la marge théorique d'influence définie ci-avant. Nous limiterons donc cette marge à 10 m axée sur la galerie.

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 de son parcours. A plus longue distance des entrées, on a considéré que la marge d'incertitude sur la localisation pouvait atteindre 10 m environ (figure 19).

L'emprise de la zone sera donc de 30 m au maximum.

Sous la route départementale, seule l'emprise de la galerie a été cartographiée en aléa faible.

#### **3.5 ECROULEMENTS DES FRONTS ROCHEUX DE MINIERES**

La mine de Saint-Rémy-sur-Orne a été exploitée à ciel ouvert au niveau des affleurements de la couche. Ces secteurs présentent donc des anciens fronts plus ou moins instables d'une hauteur pouvant atteindre très localement 50 mètres, mais plus généralement une dizaine de mètres. Compte tenu de la hauteur des fronts, jugée relativement moyenne, de leur forte végétalisation et de leur altération possible à long terme, la probabilité d'occurrence d'un écoulement rocheux est qualifiée de moyenne. Les blocs ne feront probablement que quelques mètres cubes. L'intensité est-elle aussi qualifiée de moyenne. Les fronts rocheux sont donc cartographiés en aléa de niveau moyen.

L'emprise de la zone d'aléa tient compte de la zone au sommet du front rocheux, correspondant au recul de la ligne de crête, ainsi que la zone en pied de falaise sur laquelle les blocs éboulés vont se répandre.

Ne connaissant pas précisément la hauteur des fronts, une distance forfaitaire de recul et d'épandage, égale à  $H$  (hauteur) / 3 a été définie en prenant la hauteur maximale connue sur le site (50 m, soit 17 m) puis appliquée à l'ensemble des fronts quelle que soit leur hauteur.

L'emprise de la zone est définie suivant la figure 21.

### **3.6 STABILITE DES VERSES**

Les phénomènes redoutés pour les verses sont généralement les glissements et les tassements.

Dans le cas particulier de la mine de Saint-Rémy-sur-Orne, les talus des verses ne présentent aucun signe de glissement. On peut l'expliquer du fait de la granulométrie très importante de ces dépôts ainsi que par leur pente (inférieure à 30°) finalement à l'équilibre.

On ne retiendra donc que le phénomène de tassement comme possible instabilité à long terme de ces dépôts.

L'intensité d'un éventuel mouvement est qualifiée de faible, la probabilité d'occurrence, du même ordre. Les verses seront donc cartographiées en aléa tassement de niveau faible. L'emprise de la zone sera la limite cartographiée par le BRGM et agrandie d'une incertitude de 10 mètres.



## **CONCLUSIONS**

La présente analyse a conduit à la définition de l'aléa pour les risques « mouvements de terrains » liés aux exploitations souterraines et aux travaux de surface sur tout le secteur du bassin minier ferrifère de la commune de Saint-Rémy-sur-Orne.

Quatre phénomènes ont été retenus sur le site :

- le phénomène d'effondrement localisé qui a différentes origines dont la rupture des toits des chambres exploitées et la rupture des puits ou l'éboulement de galeries isolées proches de la surface (moins de 30 m) ;
- le phénomène d'affaissement des terrains au droit des travaux situés à plus de 50 m de profondeur ;
- le phénomène d'écroulement des fronts rocheux des anciennes minières ;
- le phénomène de tassement des anciennes verses.

L'analyse des différentes configurations d'exploitation a permis d'exclure l'occurrence d'effondrements généralisés sur l'ensemble des secteurs sous-minés du synclinal de Saint-Rémy-sur-Orne.

### ***Effondrements localisés à l'aplomb des chantiers exploités dans l'hématite et les carbonates***

Ces chantiers, chambres, galeries de niveau sont situés sous un recouvrement dont la hauteur varie entre quelques mètres seulement à environ 150 mètres.

Le caractère défavorable de ces travaux vis-à-vis de la stabilité de la surface est liée à la forte probabilité de rupture du toit au droit des chambres exploitées en bicouche ainsi que la ruine des stots de protection entre les niveaux.

L'élément déterminant la probabilité d'occurrence du phénomène est la présence ou non d'éboulements anciens ainsi que la profondeur des travaux.

Les niveaux d'aléas ont donc été fixés en fonction de ce paramètre :

- les travaux non encore éboulés en 1966 (tous situés à moins de 100 m de profondeur) ont été classés en aléa fort ;
- les travaux éboulés au fond en 1966, situés à moins de 100 m de profondeur, ont été classés en aléa moyen ;

De ce fait une majorité des travaux de la mine de Saint-Rémy-sur-Orne est concernée par un aléa effondrement localisé (carte 2).

### ***L'affaissement***

Les travaux du fond, éboulés ou non, situés à plus de 50 m de profondeurs ont été cartographiés en aléa affaissement de niveau moyen. Notons quand même que le mécanisme d'affaissement sur le site de Saint-Rémy-sur-Orne n'est pas « classique ». Il ne résulte probablement pas de la ruine de piliers au fond mais est plutôt concomitant aux effondrements localisés de tête de chantiers. Les affaissements traduisent ainsi la répercussion en surface des éboulements des toits des chambres au fond, sans qu'il n'y ait apparition de fontis au jour. Les

déformations de la surface peuvent donc ne pas être très souples et progressives mais plutôt encadrées de fractures (éboulement de juillet 1931) (carte 4).

### ***Effondrements localisés par rupture des têtes de puits***

La phase informative a mis en évidence qu'aucun puits n'a été mis en sécurité après l'arrêt des travaux.

L'aléa a donc été classé au niveau fort pour tous les ouvrages de type puits (carte 2).

### ***Effondrements localisés par éboulement de galeries***

Une hauteur de recouvrement de 30 m a été retenue, comme limite de protection de la surface vis-à-vis du risque de fontis.

En ce qui concerne le tunnel de l'Orne, l'aléa y est cartographié à un niveau moyen sur toute sa longueur sauf la traversée de la route départementale D 562 qui a été mise en sécurité (remblayée). Même si le remblayage n'est que partiel, on peut considérer que la route est mise en sécurité. Cependant, la présence d'un vide résiduel que nous n'avons pu évaluer au cours de cette étude implique un classement de ce petit secteur en aléa faible sur les 25 premiers mètres.

Le niveau de l'aléa a été considéré comme moyen si la galerie est située à moins de 30 m de la surface (prédisposition favorable à la remontée). Par contre, à plus de 30 m de profondeur, l'aléa est considéré comme nul (processus bloqué par autocomblement) (carte 2).

### ***Écroulement de fronts rocheux***

L'ensemble des fronts rocheux correspondant à d'anciennes exploitations à ciel ouvert a été cartographié en aléa écroulement rocheux de niveau moyen (carte 3). Le zonage inclus à la fois le recul de la crête et la zone d'épandage sans distinction.

### ***Tassement des verses***

L'ensemble des verses a été cartographié en aléa tassement de niveau faible (carte 3).

### ***Remarques complémentaires***

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

## **BIBLIOGRAPHIE**

### ***Dossiers et articles relatifs à l'exploitation ferrifère :***

Les mines de fer normandes. Université Inter-Ages de Basse-Normandie, antenne de Caen.

M. LOISLARD : concession des mines de fer de Saint-Rémy-sur-Orne (Calvados). Cartographie informative. BRGM /RP-53993-FR, 43 p., 22 ill., 1 pl. h.t.

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

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

HISTOIRE D'UN PAYS MINIER (2002) : Autour de May-sur-Orne. Collège Paul Verlaine Evrecy et Amicale des anciens mineurs. Editeur local, 2<sup>e</sup> édition, 175 pages, avril 2002.

J. HUTCHINSON, C. PHILLIPS et G. CASCANTE (2002) : Risk considerations for crown pillar stability assessment for mine closure planning. Geotechnical and Geological Engineering, n° 20, p.41-63, 2002.

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

J-J. TRITSCH, T. DELAUNAY (2004) : Evaluation et cartographie des aléas mouvements de terrain sur le bassin minier de May-sur-Orne. Rapport INERIS-DRS-04-48514/R02bis, 67 p., 25 juin 2004.

X. DAUPLEY (2005) : Bassin ferrifère de la Ferrière-aux-Etangs. Etude préliminaire à la réalisation d'un Plan de Prévention des Risques Miniers sur le territoire des concessions de la Ferrière-aux-Etangs et de Mont-en-Gérôme. Rapport INERIS-DRS-05-56323/R01, 56 p., 7 janvier 2005

L. CAUVIN (2005) : Bassin ferrifère de Normandie : Evaluation et cartographie des aléas « mouvements de terrain » dans l'emprise des concessions d'Estrées-la-Campagne, Cinglais, Urville et Gouvix (Calvados). Rapport INERIS-DRS-05-55973/R01, 36 p., 17 février 2005

J-J. TRITSCH (2005) : Etude préliminaire à la réalisation d'un Plan de Prévention des Risques Miniers sur le territoire des Communes de la Chapelle-sur-Oudon, Sainte-Gemmes-d'Andigné, Segré, Chazé-Henry et Pouancé (Maine-et-Loire). Rapport INERIS-DRS-05-55971/R01, 63 p., 7 janvier 2005.

C. LAMBERT (2005) : Contribution au développement d'outils d'aide à l'évaluation des aléas dans le cadre des PPRM Aléa « mouvements de terrain » pour les gisements pentés et filoniens. Rapport interne INERIS-DR-05-55102/R02 (à paraître).

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

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.

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.

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

LES GISEMENTS MINIERES DE BASSE-NORMANDIE (1998) : Document DRIRE de Basse-Normandie Division Environnement Sous-sol, 1998.

J-J. TRITSCH, T. DELAUNAY (2004) : Evaluation et cartographie des aléas mouvements de terrain sur le bassin minier de May-sur-Orne. Rapport INERIS-DRS-04-48514/R02bis, 67 p., 25 juin 2004.

#### ***Autres références :***

- [1] Rapport de l'Ingénieur des Mines, 28/01/1935.
- [2] Rapport de l'Ingénieur des Mines, 08/06/1935.
- [3] Note sur la genèse des éboulements, 24/05/1935
- [4] Procès-verbal de visite de l'Ingénieur des Mines, 04/09/1931

#### ***Documents consultés :***

##### ***Archives Départementales du Calvados :***

Cartons côtés 2003/1008 1981 JP.1, carton 1, carton 2 et carton 12.

Archives de la DRIRE Basse-Normandie, Dossiers archives des mines de fer de Saint-Rémy-sur-Orne.

## LISTE DES FIGURES, PHOTOGRAPHIES, ANNEXES ET CARTES

Repère	Désignation	Nombre de pages
<b>Figures</b>		
Figure 1	Carte de localisation de la concession de Saint-Rémy-sur-Orne	1 A4
Figure 2	Carte de localisation des bassins ferrifères d'Anjou et de Normandie (modifiée d'après Varoquaux et Gérard)	
Figure 3	Coupe géologique des synclinaux normands (d'après procès-verbal de visite au fond, archives de la DRIRE Basse-Normandie)	1 A4
Figure 4	Bloc diagramme de la terminaison périclinale de Saint-Rémy-sur-Orne (d'après procès-verbal de visite au fond, archives de la DRIRE Basse-Normandie)	
Figure 5	Carte simplifiée de la mine et coupes méridiennes du gisement (d'après procès-verbal de visite au fond, archives de la DRIRE Basse-Normandie)	1 A4
Figure 6	Coupe de l'exploitation (d'après procès-verbal de visite au fond, archives de la DRIRE Basse-Normandie)	1 A4
Figure 7	Exploitation de la couche d'hématite (d'après procès-verbal de visite au fond, archives de la DRIRE Basse-Normandie)	
Figure 8	Taille chassante dans la couche d'hématite (d'après procès-verbal de visite au fond, archives de la DRIRE Basse-Normandie)	1 A4
Figure 9	Taille chassante dans la couche carbonatée en plateure (d'après procès-verbal de visite au fond, archives de la DRIRE Basse-Normandie)	
Figure 10	Taille montante dans la couche carbonatée (d'après procès-verbal de visite au fond, archives de la DRIRE Basse-Normandie)	1 A4
Figure 11	Chambres magasins dans l'hématite (d'après procès-verbal de visite au fond, archives de la DRIRE Basse-Normandie)	1 A4
Figure 12	Schéma général d'un pilier « couronne »	
Figure 13	Projection des zones éboulées sur un graphe pente / profondeur. Evaluation à partir d'une grille de 40 m par 40 m. Mécanisme de rupture d'éboulement des travaux et conséquences en surface.	1 A4
Figure 14	Figure du haut : rupture du toit gréseux ; Figure du bas : rupture et glissement du banc de carbonates pendant son exploitation (d'après procès-verbal de visite au fond, archives de la DRIRE Basse-Normandie)	1 A4

<b>Repère</b>	<b>Désignation</b>	<b>Nombre de pages</b>
	<b>Figures</b>	
Figure 15	Passage du tunnel de l'Orne sous la route départementale, vue en plan (DRIRE Basse-Normandie)	1 A4
Figure 16	Passage du tunnel de l'Orne sous la route départementale, vue en coupe, mise en sécurité (DRIRE Basse-Normandie)	
Figure 17	Plans des éboulements au fond de 1931 et 1937 (d'après procès-verbal de visite au fond, archives de la DRIRE Basse-Normandie)	1 A4
Figure 18	Définition de la marge de sécurité (marges d'influence) concernant les puits et cheminées d'aérage.	
Figure 19	Définition de l'emprise de la zone d'aléa effondrement localisé sur galerie isolée.	1 A4
Figure 20	Définition de l'emprise de la zone d'aléa effondrement localisé	
Figure 21	Définition de l'emprise de la zone d'aléa écoulement rocheux des fronts des minières	1 A4

	<b>Planches photographiques</b>	
Photo 1	Front de taille sur Mont Beaumont	1 A4
Photo 2	Minières à flanc de coteau	
Photo 3	Minière (Mont-de-Vêpres)	1 A4
Photo 4	Minière (Mont-de-Vêpres)	
Photo 5	Minière (Mont-de-Vêpres) recoupant probablement des chantiers souterrains proches de la surface	1 A4
Photo 6	Galerie éboulée	
Photo 7	Trémie de chargement dans galerie (photo BRGM)	1 A4
Photo 8	Galerie débouchant dans une minière (Mont-de-Vêpres) reconnue sur 100 m par le BRGM	
Photo 9	Entrée proche du TB 61 (photo BRGM)	1 A4
Photo 10	Tunnel entre deux exploitations à ciel ouvert (Beaumont)	
Photo 11	Entrée du TB 45 (photo BRGM)	1 A4
Photo 12	Intérieur du TB 45	
Photo 13	Effondrement d'une tête de puits (Beaumont)	1 A4
Photo 14	Ancien puits (Beaumont)	
Photo 15	Intérieur du puits (profondeur 10 m)	1 A4
Photo 16	Puits de descente du minerai du ciel ouvert vers les galeries de roulage (Mont-de-Vêpres)	

Photo 17	Puits recouvert de tôles au fond d'une minière (photo BRGM)	1 A4
Photo 18	Verse (Mont-de-Vêpres)	
Photo 19	Verse (Mont-de-Vêpres), photo BRGM	1 A4
Photo 20	Trémie de descente du minerai	
Photo 21	Entrée du tunnel de l'Orne sous la route départementale	1 A4
Photo 22	Effondrements localisés du champ Potier	
Photo 23	Effondrements du champ Potier (au fond) et possible effondrement	1 A4
Photo 24	Effondrement localisé (Mont-de-Vêpres)	
Photo 25	Effondrement vu de près	1 A4
Photo 26	Effondrement localisé (Mont-de-Vêpres)	
Photo 27	Eboulement d'une galerie proche de la surface (photo BRGM)	1 A4

	<b>Annexe</b>	
Annexe A	Evaluation et cartographie de l'aléa Méthodologie	14 A4

	<b>Cartes</b>	
Carte 1	Carte informative de l'exploitation du fer sur Saint-Rémy-sur-Orne (flanc nord) (échelle 1/2500 <sup>ème</sup> )	1 plan hors texte
Carte 2	Carte de l'aléa effondrement localisé (échelle 1/2500 <sup>ème</sup> )	1 plan hors texte
Carte 3	Carte d'aléa tassement et écroulement rocheux (échelle 1/2500 <sup>ème</sup> )	1 plan hors texte
Carte 4	Carte de l'aléa affaissement (échelle 1/2500 <sup>ème</sup> )	1 plan hors texte
Carte 5	Carte de localisation des zones éboulées (archives DRIRE Basse-Normandie), sans échelle	1 plan hors texte