

# SOMMAIRE

---

<b>I. PRÉSENTATION DE L'ÉTUDE DE DANGERS .....</b>	<b>3</b>
<b>I.1. Objectif et contenu de l'étude de dangers.....</b>	<b>3</b>
<b>I.2. Structure de l'étude de dangers et textes réglementaires .....</b>	<b>3</b>
<b>II. PRÉSENTATION DE L'INSTALLATION ET DE SON ENVIRONNEMENT .....</b>	<b>4</b>
<b>II.1. Rappel des activités exercées.....</b>	<b>4</b>
<b>FICHE DE SYNTHÈSE.....</b>	<b>5</b>
<b>II.2. Descriptif de l'exploitation.....</b>	<b>6</b>
<b>II.3. Contexte environnant.....</b>	<b>7</b>
<b>III. METHODOLOGIE DE L'ANALYSE DES RISQUES.....</b>	<b>7</b>
<b>III.1. Méthodologie d'identification des dangers.....</b>	<b>8</b>
<b>III.2. Méthodologie de l'analyse préliminaire des risques (APR) .....</b>	<b>8</b>
III.2.1. Estimation de la probabilité initiale (PI).....	9
III.2.2. Estimation de l'intensité des effets .....	9
III.2.3. Estimation de la gravité .....	9
III.2.4. Estimation de la criticité initiale.....	10
<b>III.3. Méthodologie de l'étude détaillée de réduction des risques (EDRR).....</b>	<b>11</b>
III.3.1. Cinétique .....	11
III.3.2. Évaluation de la probabilité .....	13
III.3.3. Détermination de la criticité .....	19
<b>IV. ANALYSE DES RISQUES.....</b>	<b>20</b>
<b>IV.1. Identification des dangers présents sur site.....</b>	<b>20</b>
IV.1.1. Dangers liés aux procédés d'exploitation .....	20
IV.1.2. Dangers liés aux produits présents sur le site .....	20
IV.1.3. Danger autres.....	21
IV.1.4. Accidentologie / Retour d'expérience .....	22
IV.1.5. Réduction des potentiels de dangers .....	24
IV.1.6. Risques d'agression externes .....	25
<b>IV.2. Analyse Préliminaire des Risques (APR) .....</b>	<b>26</b>
IV.2.1. Identification des événements dangereux .....	27
IV.2.2. Synthèse des événements redoutés .....	27
IV.2.3. Estimation de l'intensité et de la gravité des phénomènes retenus .....	28
<b>IV.3. Conclusion générale de l'analyse des risques.....</b>	<b>32</b>
<b>V. MOYENS DE PREVENTION ET D'INTERVENTION.....</b>	<b>33</b>
<b>V.1. Moyens de prévention.....</b>	<b>33</b>
V.1.1. Prévention contre les incendies.....	33
V.1.2. Prévention contre les pollutions accidentelles .....	33
V.1.3. Emploi de substances dangereuses (explosifs) .....	33
V.1.4. Prévention contre les éboulements, effondrements, chutes .....	34
V.1.5. Prévention contre les collisions .....	34
V.1.6. Protection contre la foudre .....	34
V.1.7. Actes de malveillance.....	34
V.1.8. Contrôles.....	34
<b>V.2. Moyens d'intervention.....</b>	<b>35</b>
V.2.1. Moyens d'intervention internes.....	35
V.2.2. Moyens d'intervention externes.....	35
<b>VI. ANNEXES.....</b>	<b>36</b>

# INDEX DES TABLEAUX ET FIGURES

---

## ➤ LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Cartographie des flux thermiques .....	31
---	----

## ➤ LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Implantation des riverains autour du projet .....	7
Tableau 2 : Grille de cotation de la probabilité initiale pour l'APR.....	9
Tableau 3 : Grille d'évaluation de la gravité d'un événement issue de l'Arrêté du 29/09/2005 et de la circulaire du 10/02/2010 .....	10
Tableau 4 : Règles de calculs du nombre de personnes exposées selon l'occupation des sols.....	10
Tableau 5 : Matrice des risques pour la hiérarchisation de l'APR.....	10
Tableau 6 : Cinétique pré-accidentelle des événements initiateurs.....	12
Tableau 7 : Cinétique post-accidentelle des événements.....	13
Tableau 8 : Tableau de cotation et d'appréciation des classes de probabilité - Arrêté du 29/09/05.....	13
Tableau 9 : Niveaux de confiance pour des systèmes techniques simples de sécurité (Extrait et adapté de la norme CEI-EN-61508/Tab.1 de l'Omega 10) .....	17
Tableau 10: Niveaux de confiance pour des systèmes techniques complexes de sécurité (Extrait et adapté de la norme CEI-EN-61508/Tab.2 de l'Omega 10) .....	17
Tableau 11 : Évaluation d'un niveau de confiance en fonction de sa probabilité moyenne de défaillance (Tab.5 de l'Omega 10) .....	17
Tableau 12 : Classes de probabilités définies par l'Arrêté du 29 septembre 2005 .....	18
Tableau 13 : Grille de criticité des événements (couple Gravité – Probabilité).....	19
Tableau 14 : Évènements dangereux accidentels liés aux activités du site .....	27
Tableau 15 : Synthèse des événements dangereux critiques redoutés de l'APR .....	28
Tableau 16 : Flux thermiques rayonnés pour les scénarii d'incendie.....	30

# **I. PRÉSENTATION DE L'ÉTUDE DE DANGERS**

## **I.1. OBJECTIF ET CONTENU DE L'ETUDE DE DANGERS**

L'étude de dangers doit permettre une approche rationnelle et objective des risques encourus par les personnes ou l'environnement. Elle a pour le législateur trois objectifs :

- Améliorer la réflexion sur la sécurité à l'intérieur de l'entreprise.
- Favoriser le dialogue technique avec les autorités d'inspection pour la prise en compte des parades techniques et organisationnelles, dans l'Arrêté d'autorisation.
- Informer le public dans la meilleure transparence possible en lui fournissant des éléments d'appréciation clairs sur les risques.

Pour cela, l'étude de dangers doit mettre en évidence les accidents susceptibles d'intervenir, les conséquences prévisibles et les mesures de prévention propres à en réduire la probabilité et les effets. Elle décrit les moyens présents sur le site, pour intervenir sur un début de sinistre, et les moyens de secours publics qui peuvent être sollicités.

La description des accidents susceptibles d'intervenir découle du recensement des sources de risques, étant entendu que les accidents peuvent avoir une origine interne ou externe.

L'évaluation des conséquences d'un accident nécessite une description de la nature et de l'extension des impacts sur l'environnement. Cet examen prend en compte les caractéristiques du site et de l'installation.

Les mesures de prévention prises, compte tenu des causes et des conséquences des accidents possibles, sont précisées en vue d'améliorer la sûreté de l'installation. Enfin, les moyens de secours privés disponibles en cas de sinistre sont recensés.

## **I.2. STRUCTURE DE L'ETUDE DE DANGERS ET TEXTES REGLEMENTAIRES**

L'étude de dangers est structurée de la manière suivante :

- Un rappel des activités développées sur l'installation étudiée.
- La méthodologie d'analyses des risques utilisée.
- L'analyse des risques incluant une identification des dangers, puis une analyse préliminaire des risques (APR) et enfin une étude détaillée de réduction des risques (EDRR).
- Une description des moyens de prévention et d'intervention.

Elle s'articule autour des principaux textes réglementaires suivants :

- Le Code de l'Environnement, et notamment ses articles L.511-1 et suivants relatifs aux Installations Classées et l'article D181-15-2 relatif à l'autorisation environnementale.
- L'Arrêté du 29 septembre 2005 relatif à l'évaluation et à la prise en compte de la probabilité d'occurrence, de la cinétique, de l'intensité des effets et de la gravité des conséquences des accidents potentiels dans les études de dangers des installations classées soumises à autorisation,
- Les fiches techniques de la circulaire DEVP 1013-7612C du 10 mai 2010 récapitulant les règles méthodologiques applicables aux études de dangers, à l'appréciation de la démarche de réduction du risque à la source et aux plans de prévention des risques technologiques (PPRT) dans les installations classées en application de la loi du 30 juillet 2003.

## II. PRÉSENTATION DE L'INSTALLATION ET DE SON ENVIRONNEMENT

### II.1. RAPPEL DES ACTIVITES EXERCEES

*Note : l'installation classée et son contexte ont déjà fait l'objet de descriptifs détaillés dans la demande d'autorisation environnementale et dans l'étude d'impact, auxquelles le lecteur pourra se reporter. Il sera rappelé dans ce paragraphe les principaux éléments permettant de cadrer le projet, au regard de la nature des dangers potentiels susceptibles d'être induits par le fonctionnement de ce type d'exploitation.*

Le présent projet porté par la société AM3C concerne l'exploitation de stocks de déchets de carrière sur la commune de Maël-Carhaix, dans le département des Côtes d'Armor (22).

La société AM3C sollicite dans le cadre de la présente demande pour une durée de 20 ans :

- L'emploi par campagne d'une installation mobile de transformation des matériaux d'une puissance totale installée de 412 kW (entreprise extérieure).
- Une production commercialisée fixée à 15 000 t/an en moyenne et 20 000 t/an au maximum.
- L'utilisation d'une station de transit de produits minéraux pour une capacité maximale de stockage de 1 ha 18 a 70 ca.
- Le droit d'exploiter des stocks ardoisiers sur une surface d'environ 1,7 ha.

Au final, le site du Moulin de la Lande représentera une surface de 13 ha 89 a 20 ca englobant ces activités ainsi que des bâtiments annexes et des zones naturelles préservées.

Les activités envisagées sur le site du Moulin de la Lande sont inscrites à la nomenclature des Installations Classées pour la Protection de l'Environnement sous les rubriques n°2510 (régime de l'autorisation), 2515, 2517 (régime de l'enregistrement).

Les principales caractéristiques d'exploitation associées à ce projet sont détaillées dans la demande d'autorisation environnementale. Elles sont synthétisées dans la fiche de synthèse jointe ci-après.

# FICHE DE SYNTHÈSE

## IDENTIFICATION DU DEMANDEUR

Raison sociale :	SAS AM3C
Adresse du siège et du site :	2 rue des ardoisières 22340 MAËL-CARHAIX
Coordonnées :	Tél : 02.96.29.18.67 / Fax : 02.96.29.48.31
N° immatriculation :	Saint-Brieuc B 789 957 222
Personne suivant la demande :	Mme Gwenaëlle BARAZER
Signataire de la demande :	Mme Gwenaëlle BARAZER

## LOCALISATION

Département :	Côtes d'Armor (22)		
Commune :	Maël-Carhaix		
Nom du site :	Site du Moulin de la Lande		
Coordonnées du site (Lambert 93) :	X = 174 073 à 174 286 km	Y = 2 381 786 à 2 382 034 km	Z = 160 à 170 m NGF
Nature du gisement :	Schistes ardoisiers		

## RÉGIME ICPE

Rubrique ICPE concernées	Autorisation	2510-4	Exploitation de déchets de carrière	
	Enregistrement	2515-1b	Installations de traitement des matériaux	
		2517-2	Station de transit de produits minéraux	
	Autres rubriques	2930	Atelier de réparation et d'entretien de véhicules et engins à moteurs – Non classé	
		1435	Stations-service – Non classé	
		4734	Produits pétroliers spécifiques et carburants de substitution (dont gazoles et fuels) – Non classé	

## NATURE ET VOLUME DES ACTIVITÉS

	<i>Futur sollicité</i>
Durée sollicitée :	20 ans
Surface totale du projet :	13 ha 89 a 20 ca
Surface totale de la zone de reprise des déchets de carrière	1 ha 63 a 90 ca
Puissance des installations de traitement :	Installation mobile : 412 kW
Nature du traitement :	concassage-criblage
Hauteur des stocks à valoriser :	3 m à 28 m (10 m en moyenne)
Production commercialisée moyenne / maximale annuelle :	15 000 t/an / 20 000 t/an

## SENSIBILITÉ ENVIRONNEMENTALE

Eau :	Absence de captage AEP à proximité du site.
Milieu naturel :	Absence de zonage de protection sur l'emprise ou à proximité immédiate du projet. Mise en place de mesures visant à la protection des espèces protégées fréquentant l'environnement local au projet.
Paysage :	Fenêtres visuelles limitées aux abords proches et immédiats du projet.
Natura 2000 :	Site FR53000007 « Têtes de bassin du Blavet et de l'Hyères » à environ 1,6 km au Nord-Est du projet.

## RAISON DU CHOIX DU PROJET

Le projet a pour but de valoriser par concassage-criblage des déchets de carrière (schistes ardoisiers) issus de l'ancienne exploitation des ardoisières de Maël-Carhaix et de les proposer au négoce. A terme, ceci permettra la remise en état et la sécurisation de ces terrains anciennement exploités.

## **II.2. DESCRIPTIF DE L'EXPLOITATION**

*Note : Une présentation détaillée du projet est disponible aux chapitres III et IV de la demande.*

Le projet de la société AM3C intègre les éléments suivants :

### ■ **Une zone à exploiter**

Le projet de la société AM3C se situe sur une partie de l'emprise des anciennes Ardoisières de Maël-Carhaix. Le gisement exploité de 1890 à 2000 sur cette carrière souterraine était du schiste ardoisier renfermant de rares petits lits de grauwackes.

Du fait de l'extraction qui s'effectuait par la méthode dite « en descendant », qui nécessite la montée au jour de tous les blocs de schiste même inutilisables, un stockage de déchets de carrière s'est progressivement formé autour des puits de l'exploitation minière.

Dans le cadre du présent projet, la société AM3C souhaite recycler ces déchets de carrière par concassage-criblage afin de les proposer à la vente et par la même de contribuer à la remise en état du site.

Ainsi, par la présente demande, la société AM3C souhaite recycler environ 164 000 m<sup>3</sup> de déchets de carrière stockés sur une hauteur moyenne de 10 m.

### ■ **Une zone de production et de stockage des matériaux produits**

Cette zone de production est localisée en limite Nord de la plateforme de stockage et accueille notamment par campagne une installation mobile de traitement des matériaux. L'ensemble occupe une surface de l'ordre de 11 870 m<sup>2</sup>.

Dans le cadre du présent projet, le positionnement de l'installation mobile sera variable en fonction de l'évolution de l'espace disponible au sein de la plateforme de stockage. Dans la mesure du possible, une localisation enclavée au sein des stocks sera privilégiée ceci afin de réduire les émissions de poussières et sonores dans l'environnement local au site.

### ■ **Un atelier**

L'atelier du site d'une surface de 580 m<sup>2</sup> permet l'entretien courant des deux manuscopics de la société AM3C (entretien de la pelle et de la chargeuse de l'entreprise LE PAPE assuré par leur soin) et sert de lieu de stockage pour le carburant nécessaire à son fonctionnement ainsi que pour les pièces de rechange éventuelles.

La pelle et la chargeuse intervenant sur le site du Moulin de la Lande appartiennent à une entreprise sous-traitante (Entreprise LE PAPE). L'entretien de ces engins est assuré par leur soin hors du site du Moulin de la Lande.

### ■ **Des bâtiments annexes construits à l'époque de l'exploitation des Ardoisières de Maël-Carhaix**

Il s'agit d'anciennes habitations, de bâtiments à l'abandon ou réhabilités pour l'accueil du site et du public, des anciens puits d'exploitation et de leur locaux techniques associés.

### ■ **Des zones naturelles**

Les zones naturelles localisées au sein du présent projet sont représentées par des secteurs boisés notamment en bordure du ruisseau de Kerdourc'h (traversant le site du Sud-Est au Nord) ou cultivées (dans la partie Sud du site).

Hormis la végétation arborée ayant repris sur les stocks de déchets de carrière, ces zones naturelles seront conservées en état dans le cadre du présent projet.

## II.3. CONTEXTE ENVIRONNANT

*Note :* une description détaillée de l'environnement humain du projet est présentée au chapitre II.2 de l'étude d'impact, à laquelle le lecteur se reportera pour de plus amples informations.

Le projet de la société AM3C est localisé en milieu rural. Il n'existe pas d'activités industrielles ou commerciales dans les abords du projet. Celles-ci se concentrent principalement dans le centre bourg communal à plus d'1 km de l'emprise du site du Moulin de la Lande.

Concernant l'habitat périphérique au site, celui-ci apparaît dispersé et faible. Le tableau ci-après récapitule la situation des hameaux les plus proches du projet de la société AM3C :

Tableau 1 : Implantation des riverains autour du projet

Commune	Lieu-dit	Situation par rapport au projet	Distance de l'emprise du projet
Maël-Carhaix (22)	Moulin de la Lande	Nord-Ouest	en limite de projet
	Lann Kergonan	Sud-Sud-Ouest	110 m
	Kerbiquet	Sud-Sud-Est	325 m
	Le C'hra	Est	380 m
	Kergonan	Sud-Ouest	390 m
	Poull Bail	Ouest	400 m
	Menez Crec'h ar Bellec	Est	430 m
	Kervabconan	Nord	560 m
	Kerviaderien	Nord-Nord-Est	650 m
	Kerdoupin	Nord-Ouest	660 m
	Kerguevel	Sud	710 m
	Kermaria	Sud-Sud-Ouest	730 m
	Croaz-Hent Hamonou	Sud-Sud-Est	880 m

Avec le hameau de « Lann Kergonan », les habitations les plus proches de l'emprise du projet de la société AM3C sont celles localisées au lieu-dit « Moulin de la Lande ». L'une de ces habitations est notamment présente en limite Nord-Ouest du site.

Il est précisé également qu'aucun chemin de randonnée ou activités de tourisme ou de loisirs n'est présent à proximité du site du Moulin de la Lande. Les activités de tourisme ou de loisirs les plus proches sont situées à plus d'1 km du projet de la société AM3C (voie verte, camping et étang de promenade, circuits pédestres).

## III. METHODOLOGIE DE L'ANALYSE DES RISQUES

L'analyse des risques est réalisée en trois grandes étapes dont la méthodologie est précisée ci-après :

- ⇒ Dans un premier temps, l'**identification des dangers** potentiels associés à l'installation étudiée.
- ⇒ Dans un second temps, une **Analyse Préliminaire des Risques (APR)**, destinée à identifier les principaux événements redoutés.
- ⇒ Dans un troisième temps, une **Étude Détaillée de Réduction des Risques (EDRR)**, destinée à étudier de façon plus précise les phénomènes dangereux redoutés résultant de l'APR et permettre d'en évaluer la probabilité.

*Note :* Pour une meilleure compréhension de cette approche d'évaluation des risques, il convient de distinguer la notion de « danger » (qui correspond à l'élément source de risque, comme par exemple une bonbonne de gaz) de la notion de « risque » (qui correspond à la mise en œuvre du danger et qui aura des conséquences plus ou moins graves selon l'exposition des personnes, comme par exemple l'explosion d'une bonbonne de gaz).

## III.1. METHODOLOGIE D'IDENTIFICATION DES DANGERS

Cette étape de l'étude a pour objectif d'identifier les dangers potentiels associés à l'exploitation de l'installation étudiée (dans le cas présent un site exploitant des stocks de déchets de carrière) en recensant :

- ⇒ Les dangers liés aux types d'activités exercées.
- ⇒ Les dangers liés aux process et aux équipements en place.
- ⇒ Les dangers liés aux produits employés.

Cette identification des dangers pourra en outre s'appuyer sur les retours d'expérience en matière d'incidents ou d'accidents, survenus soit dans l'établissement étudié, soit sur des établissements similaires.

Enfin, l'appréciation pourra également être mesurée au regard de la réduction des potentiels de dangers inhérents aux modalités d'exploitation permettant de réduire voire supprimer un danger.

---

*Note : Concernant des événements ou des éléments externes au site d'exploitation et susceptibles d'avoir des répercussions sur les dangers propres à cette installation, ceux-ci constituent des causes indirectes d'incidents ou d'accidents qui seront le cas échéant pris en compte dans l'analyse des risques de l'installation. Ils ne seront donc pas identifiés ici comme des dangers propres à l'établissement étudié.*

---

## III.2. METHODOLOGIE DE L'ANALYSE PRELIMINAIRE DES RISQUES (APR)

**L'Analyse Préliminaire des Risques (APR)** a pour objectif, sur la base des dangers potentiels identifiés lors de la première étape et de l'accidentologie (interne et externe), d'identifier de la manière la plus exhaustive possible l'ensemble des phénomènes dangereux susceptibles de se produire et de les caractériser.

L'APR présente l'intérêt de pouvoir préciser les éléments de maîtrise des risques qui permettent d'en limiter l'occurrence (diminution de la probabilité) ou l'intensité, l'existence de mesures préventives se traduisant par **l'absence de répercussion hors de l'établissement étudié**, permettant ainsi de considérer que le risque est maîtrisé.

Les événements redoutés qui sont quant-à-eux retenus pour être étudiés de façon plus approfondie dans l'Étude Détaillée de Réduction des Risques (EDRR) sont les événements pour lesquels :

- ⇒ les éléments préventifs ne permettent pas de maîtriser convenablement les risques (ce qui entraîne une possible répercussion hors des limites de l'établissement étudié),
- ⇒ la gravité des conséquences n'est pas clairement explicite (étendue du risque non déterminée, nombre de personnes susceptibles d'être impacté non défini, ...).

Cette caractérisation est réalisée sous la forme d'une cotation initiale des phénomènes dangereux identifiés en termes de probabilité, d'intensité des effets et de cinétique de développement, sur la base de la méthodologie détaillée dans les paragraphes ci-après.

La cotation initiale est effectuée par le groupe de travail et en conséquence, libre à ce dernier de retenir les échelles qui lui semblent le mieux adaptées. Il convient néanmoins que les échelles retenues soient compatibles avec les objectifs de l'étude des dangers (protection des tiers).

Les échelles retenues dans cette étude sont présentées ci-après.

### **III.2.1. ESTIMATION DE LA PROBABILITE INITIALE (PI)**

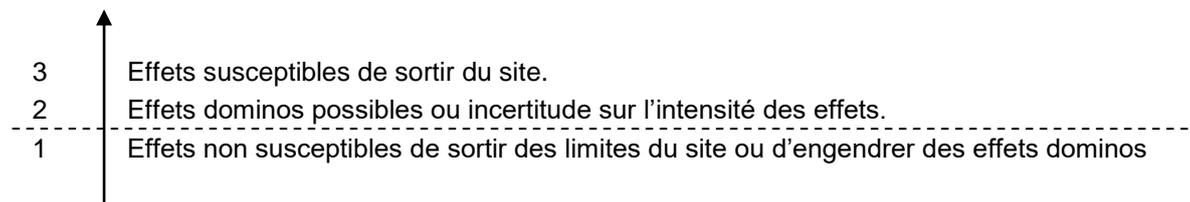
Pour l'estimation de la probabilité initiale (PI), une échelle de classification à 5 niveaux, basée sur le niveau qualificatif de la grille qui découle de l'Arrêté du 29/09/2005, est retenue :

Tableau 2 : Grille de cotation de la probabilité initiale pour l'APR

Échelle Qualitative	
Évènement courant	Qui s'est produit sur le site considéré et/ou peut se produire à plusieurs reprises pendant la durée de vie de l'installation, malgré d'éventuelles mesures correctives
Évènement probable	Qui s'est produit et/ou peut se produire pendant la durée de vie de l'installation
Évènement improbable	Qui s'est déjà produit dans le secteur d'activité ou dans ce type d'organisation au niveau mondial, sans que les éventuelles corrections intervenues depuis apportent une garantie de réduction significative de sa probabilité
Évènement très improbable	Évènement qui s'est déjà produit dans ce secteur d'activité mais à fait l'objet de mesures correctives réduisant significativement sa probabilité
Évènement possible mais extrêmement peu probable	Évènement qui n'est pas impossible au vu des connaissances actuelles, mais non rencontré au niveau mondial sur un très grand nombre d'années et d'installations

### **III.2.2. ESTIMATION DE L'INTENSITE DES EFFETS**

Pour l'estimation de l'intensité des effets, une échelle simple est retenue, à savoir :



Dans cette échelle, les phénomènes dangereux, dont l'intensité des effets estimée est 1 (effets internes à l'établissement et relevant par conséquent du domaine du Code du Travail), ne sont pas retenus pour l'EDRR.

La modélisation des phénomènes dangereux à l'origine d'effets éventuels d'intensité 2 permettra de lever d'éventuelles incertitudes et d'identifier ceux susceptibles d'occasionner des effets dominos.

Ils pourront ainsi être retenus comme phénomènes dangereux si leurs effets sont susceptibles de sortir des limites de site ou comme évènement initiateur d'un autre phénomène dangereux.

### **III.2.3. ESTIMATION DE LA GRAVITE**

Pour chacun des phénomènes dangereux identifiés et pour lesquels les effets sont susceptibles de sortir des limites du site, une évaluation de la gravité est également réalisée.

En particulier, les effets thermiques, rayons de surpression, distances des seuils d'effets pour les émissions atmosphériques peuvent être quantifiés par des modélisations et comparés aux seuils de référence définis dans l'Arrêté du 29 septembre 2005 et la circulaire du 10 mai 2010. En parallèle, une évaluation de la sensibilité de l'environnement humain de l'établissement est réalisée.

Ces éléments permettent de définir les niveaux de gravité selon le tableau ci-après.

**Tableau 3 : Grille d'évaluation de la gravité d'un événement issue de l'Arrêté du 29/09/2005 et de la circulaire du 10/02/2010**

Niveau de gravité des conséquences	Zone délimitée par le seuil des effets létaux significatifs (SELS)	Zone délimitée par le seuil des effets létaux (SEL)	Zone délimitée par le seuil des effets irréversibles sur la vie humaine (SEI)
<b>Désastreux</b>	Plus de 10 personnes exposées*	Plus de 100 personnes exposées	Plus de 1 000 personnes exposées
<b>Catastrophique</b>	Moins de 10 personnes exposées	Entre 10 et 100 personnes	Entre 100 et 1 000 personnes exposées
<b>Important</b>	Au plus 1 personne exposée	Entre 1 et 10 personnes	Entre 10 et 100 personnes exposées
<b>Sérieux</b>	Aucune personne exposée	Au plus 1 personne exposée	Moins de 10 personnes exposées
<b>Modéré</b>	Pas de zone de létalité hors de l'établissement		Présence humaine exposée à des effets irréversibles inférieure à « une personne »

\* *Personne exposée* : en tenant compte le cas échéant des mesures constructives visant à protéger les personnes contre certains effets et la possibilité de mise à l'abri des personnes en cas d'occurrence d'un phénomène dangereux si la cinétique de ce dernier et de la propagation de ses effets le permettent.

Pour les événements étudiés, autres que ceux pour lesquels l'Arrêté du 29 septembre 2005 fixe des seuils de références ou difficilement modélisables, le risque pourra être apprécié sur un mode qualitatif ou semi-quantitatif et être comparé à cette grille d'évaluation de la gravité.

Le nombre de personne exposée est calculé à partir de la fiche technique N°1 « Éléments pour la détermination de la gravité des accidents » de la circulaire du 10 mai 2010, qui définit les règles de comptages des personnes susceptibles d'être exposées à des effets létaux ou irréversibles.

Pour exemple, on précisera ci-après la détermination du nombre de personnes potentiellement exposées en fonction de différents types d'occupation des sols :

**Tableau 4 : Règles de calculs du nombre de personnes exposées selon l'occupation des sols**

Type de zone	Nombre de personnes exposées
Habitat en zone rurale	20 personnes / ha
Habitat en zone semi-rurale	40-50 personnes / ha
Habitat en zone urbaine	400-600 personnes / ha
Champs, prairies, forêts, friches...	1 personne / 100 ha
Voie routière non saturée	0,4 personnes / km / 100 véhicules-jour
Voie ferrée	0,4 personnes / km / train de voyageurs
Chemins de randonnées, de promenade	2 personnes / km / 100 promeneurs-jour

### **III.2.4. ESTIMATION DE LA CRITICITE INITIALE**

Les phénomènes identifiés au cours de l'analyse préliminaire des risques, une fois évalués en termes de probabilité initiale et gravité, peuvent alors être hiérarchisés grâce à une « matrice des risques ». La matrice utilisée est la suivante :

**Tableau 5 : Matrice des risques pour la hiérarchisation de l'APR**

Probabilité \ Gravité	Extrêmement peu probable	Très improbable	Improbable	Probable	Courant
<b>Désastreux</b>					
<b>Catastrophique</b>					
<b>Important</b>					
<b>Sérieux</b>					
<b>Modéré</b>					



Évènement nécessitant d'être retenu dans l'étude détaillée de réduction des risques (analyse semi-quantitative de la probabilité d'occurrence avec prise en compte des mesures de maîtrise des risques).



Évènement non retenu pour l'étude détaillée de réduction des risques, pouvant être estimé comme acceptable.

### **III.3. METHODOLOGIE DE L'ETUDE DETAILLEE DE REDUCTION DES RISQUES (EDRR)**

L'objectif de l'**Étude Détaillée de Réduction des Risques (EDRR)** est de démontrer le degré de maîtrise des risques pour chacun des évènements redoutés identifiés dans l'APR de l'étape précédente.

Pour cela, l'objectif est de pouvoir préciser les éléments de maîtrise des risques qui permettent d'en limiter l'occurrence ou la gravité (l'existence de mesures préventives se traduisant par l'absence de répercussion hors de l'établissement étudié permet ainsi de considérer que le risque est maîtrisé). A ce titre, elle est appliquée suivant la méthodologie suivante :

- ⇒ **1** : Apprécier la probabilité des phénomènes redoutés identifiés au niveau de l'APR comme nécessitant cette analyse détaillée (cases « rouges » dans la matrice des risques précédente) :
  - Une évaluation plus précise de la probabilité en déterminant l'ensemble des scénarios pouvant mener aux accidents et phénomènes identifiés, et en établissant des arbres en causes,
  - Une estimation de la fiabilité des éléments de prévention permettant de réduire la probabilité de l'évènement redouté.
- ⇒ **2** : Déterminer la criticité d'un évènement redouté et ainsi mettre en évidence (ou non) les évènements majeurs à partir des couples probabilité / gravité obtenus.
- ⇒ **3** : En cas d'évènements majeurs, proposer des mesures complémentaires permettant de supprimer le risque d'accident majeur.

Cette méthodologie est issue de l'Arrêté ministériel du 29 septembre 2005 et de la circulaire du 10 mai 2010.

L'Arrêté ministériel du 29 septembre 2005 détermine les seuils réglementaires pour apprécier l'intensité des effets physiques des phénomènes dangereux, la gravité des accidents et les classes de probabilité de ces phénomènes et accidents.

#### **III.3.1. CINETIQUE**

L'estimation de la cinétique permet de quantifier de façon plus ou moins précise le temps d'apparition d'un évènement. Deux types de cinétique peuvent être déterminés :

- ⇒ la cinétique pré-accidentelle, qui est la durée nécessaire pour aboutir à l'évènement redouté central, c'est à dire le délai entre l'évènement initiateur et la libération du potentiel de danger,
- ⇒ la cinétique post-accidentelle, qui est déterminée par la dynamique du phénomène dangereux et l'exposition des cibles.

#### **➤ CINETIQUE PRE ACCIDENTELLE**

##### **■ Cinétique d'un incendie et de l'explosion**

Afin de déterminer la cinétique pré-accidentelle, il faut prendre en compte la cinétique de l'ensemble des évènements initiateurs puisqu'elle peut être différente selon les cas.

Par exemple, entre un échauffement et une étincelle, le délai avant d'atteindre une chaleur suffisante pour le déclenchement d'un incendie ou d'une explosion pourra varier de manière importante.

Le tableau ci-après précise le délai de formation de l'évènement indésirable, c'est-à-dire le point d'ignition qui sera à l'origine d'une explosion ou d'un incendie si les autres conditions de déclenchement de cet évènement sont réunies :

- ⇒ pour une explosion : mise en suspension de poussières combustibles, atteinte de la LIE, confinement, présence d'air,
- ⇒ pour un incendie : présence d'un comburant et d'un combustible.

Tableau 6 : Cinétique pré-accidentelle des événements initiateurs

Évènements initiateurs	Délai avant libération du potentiel de danger	Cause
Foudre	quelques millisecondes	Atteinte de l'énergie minimale d'inflammation
Électricité statique	quelques secondes	
Travail par point chaud	quelques minutes	
Flamme nue	quelques minutes	
Étincelle électrique	quelques secondes	
Point chaud d'origine mécanique	quelques minutes	Atteinte de la température d'auto-échauffement

L'atteinte de l'énergie d'inflammation ou de la température d'auto-échauffement est variable selon les produits en cause. Il est donc nécessaire de rappeler les différentes caractéristiques d'inflammabilité vis-à-vis desquelles dépendra la cinétique pré-accidentelle :

- ⇒ **La combustibilité** est la capacité d'un produit à réagir avec un comburant (oxygène de l'air) avec développement de chaleur et de lumière.
- ⇒ **Le point d'éclair** est la plus faible température à laquelle il faut porter un liquide pour qu'une quantité suffisante de vapeurs soient émises pour obtenir une inflammation lorsqu'on applique une source d'allumage.
- ⇒ **La température d'auto-inflammation** est la température minimale à laquelle l'allumage est obtenu par chauffage en l'absence de toute source d'allumage auxiliaire.

La température d'auto-échauffement est la plus faible température d'un liquide ou d'un solide en l'absence d'air pour laquelle, dans des conditions spécifiées, des réactions avec dégagement de chaleur démarrent dans la substance ou à sa surface. Sous air, l'auto-échauffement peut conduire à l'auto-inflammation.

Avant l'incendie, la période d'induction plus ou moins longue est la durée pendant laquelle il est possible de détecter l'incendie. Il faut noter que les conditions de ventilation jouent également un rôle important dans l'évolution d'un incendie : quantité nécessaire de comburant (l'oxygène de l'air), pertes de chaleur par convection et par rayonnement.

### ■ Cinétique d'une pollution

Dans le cas d'une pollution, les événements initiateurs peuvent concerner :

- une cause humaine (renversement, vanne de manœuvre ouverte...),
- une rupture ou une fuite du contenant.

Dans le cas d'une cause humaine, la cinétique pré-accidentelle est de l'ordre de la seconde, puisque la libération du potentiel de danger est immédiate dès l'événement déclencheur.

Pour une rupture ou une fuite du contenant, la cinétique pré-accidentelle est généralement liée au degré d'usure du contenant et peut donc concerner plusieurs années. Cet événement découle d'un mauvais entretien ou de conditions de stockage dégradées qui vont entraîner une détérioration du contenant plus ou moins rapide.

### ■ Cinétique d'une émission toxique

La cinétique pré-accidentelle d'une émission toxique pourra être variable, dépendante de l'événement initiateur. Dans le cas d'émissions toxiques consécutives à un incendie (fumées), la cinétique pré-accidentelle est directement liée à la cinétique de l'incendie et donc de l'ordre de quelques millisecondes (foudre) à quelques minutes (point chaud, etc.).

Dans le cas d'un nuage de substance toxique, la cinétique pré-accidentelle varie en fonction de l'événement à l'origine de la création de ce nuage : fuite d'une substance liquide avec évaporation de nappe, fuite d'une substance gazeuse, décomposition d'un produit sous l'effet de la chaleur, réaction chimique d'incompatibilité ou liée à un emballement, etc.

Elle peut donc être de l'ordre de la seconde (fuite sur canalisation, rupture de stockage, etc.) à plusieurs minutes voire heures (réaction chimique incontrôlée puis ouverture de soupape ou rupture de capacité).

## ➤ CINETIQUE POST ACCIDENTELLE

Plusieurs délais caractérisent la cinétique post accidentelle :

- Le délai d'occurrence d1 qui a lieu dès que les conditions nécessaires à un évènement sont réunies.
- Le délai de montée en puissance d2 jusqu'à un état stationnaire.
- Le délai d'atteinte des cibles d3.
- La durée d'exposition des cibles d4.

**Tableau 7 : Cinétique post-accidentelle des évènements**

	<b>d<sub>1</sub> : délai d'occurrence</b>	<b>d<sub>2</sub> : délai de montée en puissance</b>	<b>d<sub>3</sub> : temps d'atteinte</b>	<b>d<sub>4</sub> : durée d'exposition</b>	<b>Cinétique de l'évènement</b>
<b>Incendie</b>	immédiat dès l'inflammation du produit	plusieurs minutes à plusieurs heures	immédiat car propagation du rayonnement à la vitesse de la lumière	immédiat à plusieurs heures selon les possibilités de mises à l'abri (l'estimation des conséquences est basée sur une durée inférieure ou égale à 2 minutes)	Plusieurs minutes à plusieurs heures. Phénomène immédiatement ressenti
<b>Explosion</b>	immédiat	quelques millisecondes car l'onde de choc provoquée par une explosion est instantanée	quelques millisecondes car les ondes de choc se transmettent à la vitesse du son dans l'atmosphère	quelques millisecondes	Immédiat. Phénomène immédiatement ressenti
<b>Pollution</b>	immédiat	plusieurs minutes	plusieurs minutes à plusieurs jours selon la distance des cibles, les compartiments touchés (eau/sol) et la configuration du terrain	plusieurs heures à plusieurs jours	Plusieurs heures à plusieurs jours. Phénomène immédiat pouvant être long selon la cible
<b>Émissions toxiques</b>	Immédiat dès formation des produits	plusieurs minutes à plusieurs heures	plusieurs minutes à plusieurs heures en fonction des conditions météorologiques notamment	plusieurs minutes à plusieurs heures selon les possibilités de mises à l'abri	Plusieurs minutes à plusieurs heures. Phénomène immédiat pouvant être long selon la cible

### III.3.2. ÉVALUATION DE LA PROBABILITE

#### ➤ CLASSES DE PROBABILITES

Le tableau ci-après met en relation les ordres de grandeur ainsi que les appréciations quantitatives des probabilités qui vont être calculées. Ce tableau découle de l'Arrêté du 29/09/2005.

**Tableau 8 : Tableau de cotation et d'appréciation des classes de probabilité - Arrêté du 29/09/05**

<b>Classe de probabilité</b>	<b>E</b>	<b>D</b>	<b>C</b>	<b>B</b>	<b>A</b>
<b>Semi-quantitative</b>	Échelle intermédiaire permettant de tenir compte des mesures de maîtrise des risques				
<b>Quantitative</b>	$10^{-5}$	$10^{-4}$	$10^{-3}$	$10^{-2}$	

L'objectif de ce tableau est de positionner chaque évènement dans une classe de probabilité allant de A à E, sur la base de l'évaluation semi quantitative ou quantitative de la probabilité.

Pour la réalisation de la présente étude de dangers, une évaluation semi-quantitative a été retenue. La méthode utilisée est décrite ci-dessous.

## ➤ REALISATION DES NŒUDS PAPILLON

Une méthode de représentation des scénarii d'évènements dangereux par un système d'arborescence peut être utilisée. Ce type de représentation présente l'avantage d'une lecture simple et immédiate qui permet de faire ressortir les différentes causes pouvant être à l'origine d'un événement majeur et leurs interrelations.

Le nœud papillon est un outil qui contient un arbre de défaillances et un arbre d'événements. Il s'articule autour d'un événement redouté central, avec :

- du côté gauche, l'arbre de défaillances qui s'attache à identifier les causes ou événements initiateurs. Les liens entre ces événements sont figurés par des portes « ET » ou « OU ». La porte « ET » signifie que l'ensemble des conditions amont doivent être présentes, tandis que la porte « OU » signifie que l'un des événements amont suffit pour l'apparition de l'événement indésirable.
- du côté droit, l'arbre des événements dans lequel sont précisés les éventuels événements redoutés secondaires et les phénomènes dangereux qu'ils peuvent entraîner ainsi que leurs conséquences (arbre des conséquences).

Ce type de représentation permet également de démontrer la bonne maîtrise des risques, avec la possibilité de superposer à ce logigramme les différentes barrières de sécurité préventive et de protection mises en œuvre.

Ces nœuds papillon permettent ainsi la détermination des probabilités d'occurrence via une méthode semi-quantitative d'« approche par barrières ».

## ➤ DETERMINATION DE LA PROBABILITE

### ■ Généralités

L'approche par barrière consiste tout d'abord à vérifier, sur la base de certains critères, si la barrière de sécurité peut être retenue pour le scénario étudié. Il est ensuite attribué un niveau de confiance aux barrières de sécurité retenues.

La combinaison de la fréquence d'occurrence de l'événement initiateur et des niveaux de confiance des barrières de sécurité participant à la maîtrise d'un même scénario, permet d'estimer une classe de probabilité d'occurrence du scénario.

Cette démarche découle de travaux menés par l'INERIS dans le cadre de programmes de recherche financés par le Ministère chargé de l'environnement, à savoir le DRA 39 « *Évaluation des barrières de sécurité de prévention et de protection utilisées pour réduire les risques d'accidents majeurs* », le DRA-34 « *Analyse des risques et prévention des accidents majeurs* », ainsi que de diverses études réalisées par la Direction des Risques Accidentels.

La probabilité d'un évènement initiateur est issue de l'expérience et elle inclut des barrières de sécurité et leur efficacité. On considère notamment :

- La résistance des matériels mis en jeu.
- Les procédures internes de sécurité mises en œuvre.
- Les procédures de sécurité qui permettent d'éviter l'évènement initiateur (source d'ignition par exemple).

Cependant, la probabilité des événements initiateurs reste très souvent aléatoire, en l'absence de données bibliographiques suffisantes à l'heure actuelle.

En conséquence, dans la présente étude, la démarche suivante a été retenue :

- ⇒ **1** : Prise en compte de la probabilité de l'événement initiateur lorsque celle-ci existe et s'avère fiable.
- ⇒ **2** : Prise en compte des barrières organisationnelles et techniques (ainsi que des caractéristiques intrinsèques) mises en place au regard des événements courants pour déterminer la probabilité de l'événement initiateur, chaque événement courant ayant par défaut une probabilité initiale de classe A (événement courant).
- ⇒ **3** : Comparaison, lorsque cela s'avère possible, de la probabilité de l'événement initiateur avec la probabilité du même événement initiateur déterminé pour une autre branche d'activité.

## ■ Définitions

Afin de faciliter la compréhension de la démarche d'évaluation de la probabilité d'un événement dangereux, on précisera ci-après quelques définitions sur les termes employés :

- ⇒ **Barrière technique de sécurité (BTS)** : barrière qui permet d'assurer une fonction de sécurité. Elle est constituée d'un dispositif de sécurité ou d'un système instrumenté de sécurité qui s'oppose à l'enchaînement d'événements susceptibles d'aboutir à un accident.
- ⇒ **Dispositif de sécurité** : c'est en général un élément unitaire, autonome, ayant pour objectif de remplir une fonction de sécurité, dans sa globalité. On distingue :
  - le dispositif passif, qui ne met en jeu aucun système mécanique,
  - le dispositif actif, qui met en jeu un dispositif mécanique (ressort, levier...).
- ⇒ **Efficacité** : l'efficacité d'une BTS est évaluée au regard de son aptitude à remplir la fonction de sécurité pour laquelle elle a été choisie, dans son contexte d'utilisation et pendant une durée donnée de fonctionnement. Cette aptitude s'exprime en pourcentage d'accomplissement de la fonction définie, en considérant un fonctionnement normal (non dégradé). Ce pourcentage peut varier pendant la durée de sollicitation de la barrière technique de sécurité.
- ⇒ **Système instrumenté de sécurité (SIS)** : combinaison de capteurs, d'unité de traitement et d'actionneurs (équipements de sécurité) ayant pour objectif de remplir une fonction ou sous fonction de sécurité.
- ⇒ **Équipement de sécurité** : élément d'un SIS qui remplit une sous-fonction de sécurité.
- ⇒ **Fonction de sécurité** : fonction ayant pour but la prévention et la protection d'événements redoutés. Les fonctions de sécurité identifiées peuvent être assurées à partir de barrières techniques de sécurité, de barrières organisationnelles (activités humaines), ou plus généralement par la combinaison des deux.
  - une même fonction de sécurité peut être réalisée par différentes barrières de sécurité,
  - une fonction de sécurité peut se décomposer en sous-fonctions de sécurité liées.
- ⇒ **Niveau de confiance (NC)** : c'est une adaptation par l'INERIS des exigences des normes NF-EN 61508 et CEI 61511, notamment quant aux architectures des systèmes pour tous les équipements de sécurité, quelle que soit leur technologie.
- ⇒ **Principe de concept éprouvé** : un équipement simple est de conception éprouvée soit, lorsqu'il a subi des tests de « qualification » par l'utilisateur ou d'autres organismes, soit lorsqu'il est utilisé depuis plusieurs années sur des sites industriels et que le retour d'expérience sur son application est positif. Pour cela, on peut s'appuyer sur :
  - le retour d'expérience de l'utilisateur (exploitant, service maintenance, inspection...), voire du fournisseur,
  - l'accidentologie (retour d'expérience des accidents et incidents),
  - les standards indiqués par des syndicats professionnels.
- ⇒ **Redondance** : existence, dans une entité, de plus d'un moyen pour accomplir une fonction requise.
- ⇒ **Temps de réponse** : il correspond à l'intervalle de temps entre le moment où une barrière de sécurité, dans un contexte d'utilisation, est sollicitée et le moment où la fonction de sécurité assurée par cette barrière de sécurité est réalisée dans son intégralité. Il s'exprime en secondes.

## ■ Critères de prise en compte des barrières

Les performances des mesures de maîtrise des risques doivent être évaluées et justifiées. Plus généralement, pour être prises en compte dans l'évaluation de la probabilité, les mesures de sécurité indépendantes doivent répondre à quatre critères :

### **Efficacité, Cinétique, Maintenabilité, Testabilité**

L'INERIS a par exemple proposé deux méthodes d'évaluation de la performance des mesures de maîtrise des risques (cf. guide OMEGA 10 ci-dessous) : l'une adaptée aux mesures techniques et la seconde méthode concernant les mesures organisationnelles, à travers des critères d'efficacité, d'indépendance, de temps de réponse et enfin, par l'attribution d'un niveau de confiance :

⇒ **L'indépendance** : il faut s'assurer que la mesure de sécurité est bien indépendante du procédé, des autres dispositifs et de l'exploitation.

L'efficacité ou capacité de réalisation (cf. définitions ci-dessus) : elle est liée au dimensionnement du dispositif. L'évaluation en termes de capacité de réalisation passe par l'étude de trois critères :

- Concept éprouvé,
- Dimensionnement adapté,
- Résistance aux contraintes spécifiques.

⇒ **Le temps de réponse** (cf. définitions ci-dessus) : le temps de réponse est à comparer à la cinétique du phénomène.

⇒ **Le niveau de confiance (ou intégrité de sécurité)** : c'est la probabilité de défaillance à la sollicitation de la mesure de sécurité, dans son environnement d'utilisation, soit la probabilité qu'elle n'assure pas la fonction de sécurité pour laquelle elle a été choisie lorsqu'elle est sollicitée. Cette probabilité est calculée pour une capacité de réalisation et un temps de réponse donnés. La probabilité de défaillance est liée aux paramètres suivants :

- Type d'architecture,
- Principe de sécurité positive,
- Tolérance à la première défaillance,
- Comportement sur défaut (mise hors service, blocage ou dérive possible),
- Maintien dans le temps de la qualité de la mesure (existence de procédures de tests réguliers, de maintenance préventive, de procédures d'installation ou d'inspection/audits internes).

Ainsi, ces mesures doivent tout d'abord répondre au même critère d'indépendance et sont regroupées en deux catégories : **les mesures de pré-dérive** (ex : contrôle d'une température avant la mise en œuvre du process) et **les mesures de rattrapage de dérive** (ex : extinction d'un incendie par un opérateur).

Pour évaluer la performance de ces mesures, des pré-requis sont indispensables : la formation et l'habilitation des opérateurs, la coordination et la communication opérationnelle des acteurs (notamment dans le cas d'un travail d'équipe), l'entraînement et les exercices, l'encadrement du recours à la sous-traitance, ainsi que le critère de disponibilité des opérateurs. Ces critères sont impératifs pour considérer qu'une mesure de ce type est efficace.

## ■ Détermination du niveau de confiance (NC)

Le niveau de confiance des barrières de sécurité est déterminé selon la méthode définie par l'INERIS. Le niveau de confiance ne se substitue pas aux normes NF-EN 61508 et CEI 61511 relatives à la sécurité fonctionnelle. La démarche proposée est une méthode d'évaluation qualitative « simple » en vue d'évaluer la performance des barrières techniques et humaines de sécurité. Les niveaux de confiance des barrières de sécurité sont basés sur :

- La fiche N°7 de la circulaire du 10 mai 2010.
- Le guide OMEGA 10 de l'INERIS portant sur l'évaluation des barrières techniques de sécurité.
- Le guide OMEGA 20 de l'INERIS portant sur l'évaluation des barrières humaines de sécurité.

### ❖ Cas des barrières techniques de sécurité

Avant de déterminer ce niveau de confiance pour les barrières techniques de sécurité (BTS), il est important de vérifier que cette BTS est de concept éprouvé, qu'elle est indépendante du procédé et qu'elle est indépendante d'une autre BTS. Le niveau de confiance est ensuite déterminé par :

- une proportion de défaillance en sécurité (ou Safe Failure Fraction – SFF) qui correspond au rapport du taux de défaillances détectées sur la somme des taux de défaillances du système. Cette valeur est généralement inférieure à 60% mais qui selon les cas (bon retour d'expérience, essais, niveau SIL selon la norme NF-EN 61511, etc.) peut augmenter vers des niveaux (SFF) de l'ordre de 99% ;
- une tolérance aux anomalies matérielles qui est l'équivalent d'une redondance.

On obtient alors un niveau de confiance défini selon les grilles données dans le rapport Omega 10 de l'INERIS pour les systèmes techniques dits « simples » (vannes, relais, interrupteurs...) ou « complexes » (système capable de traiter une information).

**Tableau 9 : Niveaux de confiance pour des systèmes techniques simples de sécurité**  
(Extrait et adapté de la norme CEI-EN-61508/Tab.1 de l'Omega 10)

Proportion de défaillances en sécurité	Tolérances aux anomalies matérielles (redondance de barrières de sécurité)		
	0	1	2
<60%	NC1	NC2	NC3
60 – 90 %	NC2	NC3	NC4
90 – 99 %	NC3	NC4	NC4
> 99 %	NC3	NC4	NC4

**Tableau 10: Niveaux de confiance pour des systèmes techniques complexes de sécurité**  
(Extrait et adapté de la norme CEI-EN-61508/Tab.2 de l'Omega 10)

Proportion de défaillances en sécurité	Tolérances aux anomalies matérielles (redondance de barrières de sécurité)		
	0	1	2
<60%	NC0	NC1	NC2
60 – 90 %	NC1	NC2	NC3
90 – 99 %	NC2	NC3	NC4
> 99 %	NC3	NC4	NC4

### ❖ Cas des dispositifs passifs de sécurité

Pour déterminer le niveau de confiance d'un dispositif passif de sécurité (cuvette de rétention, mur coupe-feu, etc.), il faut déterminer sa probabilité moyenne de défaillance (ou taux de défaillance à la sollicitation/PFD). Une fois celle-ci estimée, le tableau suivant qui est inspiré de la norme NF EN 61508 permet de faire le lien avec le niveau de confiance.

**Tableau 11 : Évaluation d'un niveau de confiance en fonction de sa probabilité moyenne de défaillance (Tab.5 de l'Omega 10)**

Probabilité moyenne de défaillance	Sens d'évolution de la probabilité de défaillance	Niveau de confiance
$10^{-5} \leq \text{PFD} < 10^{-4}$	↓	NC4
$10^{-4} \leq \text{PFD} < 10^{-3}$		NC3
$10^{-3} \leq \text{PFD} < 10^{-2}$		NC2
$10^{-2} \leq \text{PFD} < 10^{-1}$		NC1

L'exploitation des bases de données montre que le NC pour les murs coupe-feu et les cuvettes de rétention serait de 2.

Le niveau de confiance pourra être maintenu ou décoté en fonction des procédures et des moyens (maintenance, inspection...) mis en œuvre par l'industriel pour maintenir dans le temps le niveau de confiance du dispositif.

---

*Note : en l'absence d'études spécifiques ou d'un retour d'expérience suffisant permettant d'apprécier la probabilité de défaillance d'un système, le niveau de confiance retenu par défaut sera NC1.*

---

#### ❖ Cas des barrières humaines organisationnelles

Pour les barrières organisationnelles et selon la fiche N°7 de la circulaire du 28/12/2006, le niveau de confiance initial à retenir est déterminé selon les critères suivants :

- **NC2**, dans le cas d'une mesure de pré-dérive réalisée par une personne dédiée spécifiquement à cette action (spécialiste),
- **NC1**, dans le cas d'une mesure de pré-dérive réalisée par l'opérateur chargé du process,
- **NC1**, dans le cas de mesures de rattrapage de dérive (intervention sur un incident).

Dans un second temps, conformément aux recommandations de l'INERIS, ce niveau de confiance pourra être maintenu ou décoté, en fonction :

- de la simplicité de détection de l'évènement anormal,
- de la simplicité du diagnostic, quant aux choix de l'opération à mener pour empêcher le scénario redouté de se produire,
- de la simplicité de l'action de sécurité à conduire pour éviter ou en réduire les effets,
- de la pression temporelle à laquelle sont soumis les intervenants, si le temps d'intervention doit être bref ou si la cinétique des événements menant à l'accident est rapide.

#### ❖ Formations et consignes

Les formations et consignes de sécurité sont des éléments qui participent à la fiabilité et au maintien du niveau de confiance d'autres barrières de sécurité. De ce fait, **aucun niveau de confiance ne leur est appliqué** de manière spécifique et elles ne sont pas prises en compte dans la détermination de la probabilité.

#### ■ Détermination de la probabilité

Pour rappel, il existe 5 classes de probabilités définies dans l'Arrêté du 29/09/2005. Elles sont indiquées ci-dessous :

Tableau 12 : Classes de probabilités définies par l'Arrêté du 29 septembre 2005

Classe	E	D	C	B	A
Probabilité	$10^{-5}$	$10^{-4}$	$10^{-3}$	$10^{-2}$	

Le passage d'une classe à une autre sous-entend une réduction de probabilité d'un facteur 10.

La probabilité d'occurrence est déterminée à partir des arbres des causes et des conséquences. Pour chaque branche de l'arbre, on part de la probabilité définie pour l'évènement initiateur (classe A prise par défaut, en l'absence de données bibliographiques précises) que l'on décote en fonction des niveaux de confiance des différentes barrières de sécurité mises en œuvre pour en réduire l'occurrence :

- En présence d'une barrière NC1 : décote d'une classe (A donnera B ; B donnera C ...).
- En présence d'une barrière NC2 : décote de deux classes (A donnera C).
- En présence d'une barrière NC1 et d'une barrière NC2 : décote de trois classes (A donnera D), etc.

Lors de passage de portes « ET » ou « OU », les règles de détermination de probabilités suivantes sont appliquées :

- portes « ET » : une multiplication des deux classes de probabilité est réalisée. Par exemple : classe B ( $10^{-2}$ ) x classe C ( $10^{-3}$ ) = classe E ( $10^{-5}$ ),
- portes « OU » : la probabilité de classe la plus élevée est retenue. Par exemple une probabilité de classe A ou une probabilité de classe B découleront sur la prise en compte d'une probabilité de classe A.

### III.3.3. DETERMINATION DE LA CRITICITE

Une évaluation de la gravité et de la probabilité sera réalisée pour chaque phénomène dangereux étudié, selon les grilles définies dans l'Arrêté du 29/09/2005.

Ces deux paramètres forment un couple « gravité – probabilité » qui est alors placé dans la matrice ci-après, définie par la circulaire du 10/05/2010, en vue de hiérarchiser le risque et définir la criticité du phénomène dangereux.

Tableau 13 : Grille de criticité des événements (couple Gravité – Probabilité)

Gravité sur les personnes exposées au risque	Probabilité (sens croissant de E vers A)				
	E	D	C	B	A
<b>Désastreux</b>	Non partiel (établissements nouveaux) MMR rang 2 (pour site existant)	NON Rang 1	NON Rang 2	NON Rang 3	NON Rang 4
<b>Catastrophique</b>	MMR rang 1	MMR rang 2	NON Rang 1	NON Rang 2	NON Rang 3
<b>Important</b>	MMR rang 1	MMR rang 1	MMR rang 2	NON Rang 1	NON Rang 2
<b>Sérieux</b>			MMR rang 1	MMR rang 2	NON Rang 1
<b>Modéré</b>					MMR rang 1



**Risque élevé** : Évènement nécessitant de modifier certaines dispositions d'exploitation



**Risque intermédiaire** : Évènement nécessitant des **mesures de maîtrise des risques (MMR)** complémentaires spécifiques.



**Risque moindre** : le risque résiduel est modéré et n'implique pas d'obligation de réduction complémentaire du risque d'accident au titre des installations classées

Des mesures compensatoires doivent être proposées et une réévaluation de leur gravité ou de leur probabilité réalisée pour pouvoir tendre vers une criticité moindre

## **IV. ANALYSE DES RISQUES**

### **IV.1. IDENTIFICATION DES DANGERS PRESENTS SUR SITE**

#### **IV.1.1. DANGERS LIES AUX PROCEDES D'EXPLOITATION**

Les dangers liés aux activités prévues sur le site du Moulin de la Lande sont :

##### **➤ LES STRUCTURES D'EXPLOITATION (RISQUE : EFFONDEMENTS DE TOUT OU PARTIE DES STRUCTURES D'EXPLOITATION SUR UN TIERS)**

Les structures susceptibles de présenter un risque d'effondrement concernent les différents bâtiments (atelier, bureaux, anciens bâtiments) présents au sein du site du Moulin de la Lande. Le risque d'effondrement serait associé à un défaut de montage, de génie civil au niveau des éléments de soutien, voire à une moindre résistance de ces structures suite par exemple à un incendie ou à l'usure naturelle des murs de soutènement ainsi qu'à la vétusté de ces bâtiments.

##### **➤ LES STOCKS DE DECHETS DE CARRIERE A EXPLOITER (RISQUE : ÉBOULEMENTS SUR UN TIERS ET CHUTES DE TIERS)**

Le projet de la société AM3C vise le recyclage de stocks de déchets de carrière issus de l'exploitation des anciennes Ardoisières de Maël-Carhaix. Dans le cas présent, ces stocks présentent une hauteur moyenne de 10 m. L'instabilité éventuelle de ces stocks contribuerait à accentuer les risques d'**éboulements** ou de **chutes** et constituerait donc un danger pour toute personne évoluant à proximité ou au sein de ces stocks.

##### **➤ LES INSTALLATIONS DE TRANSFORMATION**

Lors de sa présence sur le site du Moulin de la Lande, l'installation mobile de transformation peut représenter un danger pour les tiers s'aventurant sur le site (risque d'électrocution à hauteur des installations électriques, risque de chute dans le concasseur en fonctionnement lors des horaires d'ouvertures). Elle peut également représenter un danger en cas d'incendie et de rayonnement de flux thermiques en dehors des limites du site.

##### **➤ LES ENGINS ROULANTS**

Les engins roulants présents sur le site du Moulin de la Lande peuvent représenter un danger pour les tiers s'aventurant sur le site (risque de collision avec des tiers se trouvant sur le site, qu'ils soient piétons ou en voiture). Ils pourront également représenter un danger en cas d'incendie et de rayonnement de flux thermiques en dehors des limites du site.

#### **IV.1.2. DANGERS LIES AUX PRODUITS PRESENTS SUR LE SITE**

##### **➤ IDENTIFICATION DES PRODUITS DANGEREUX**

La présence de produits dangereux au sein du site du Moulin de la Lande sera limitée dans le cadre du présent projet. En effet, l'exploitation du site ne nécessitera pas l'emploi ou le stockage d'explosifs.

En termes de produits dangereux, le site du Moulin de la Lande accueillera donc uniquement un stockage de carburant au sein de l'atelier du site. Il s'agira plus précisément d'une cuve double paroi munie d'un détecteur de fuite accueillant du gasoil pour une capacité de 700 litres.

Du fait des modalités de stockage du carburant au sein du site du Moulin de la Lande, le principal risque identifié concerne un éventuel incendie en cas de déversement accidentel lors du ravitaillement de l'engin au sein de l'atelier et en présence d'une source d'ignition.

## ➤ **AUTRES PRODUITS**

### ■ **Déchets Industriels Banals (DIB) ou Dangereux (DID)**

Les déchets industriels produits seront liés à la présence de personnel sur le site du Moulin de la Lande générant des déchets industriels banals de type ordures ménagères. Ces déchets sont et seront stockés au sein d'une poubelle et évacués du site par la collecte communale.

Concernant les déchets industriels dangereux, leur production est et sera liée à l'entretien courant du matériel du site (huiles usagées, chiffons souillés...). Ces déchets sont et continueront à être entreposés dans des contenants étanches dans l'attente de leur évacuation par des récupérateurs agréés.

### ■ **Incompatibilité entre les produits**

Aucune incompatibilité entre les produits stockés ou utilisés sur le site du Moulin de la Lande n'est à signaler.

## **IV.1.3. DANGER AUTRES**

Les stocks de déchets de carrière sollicités à l'exploitation par la société AM3C sont localisés au dessus d'une ancienne carrière souterraine : les ardoisières de Maël-Carhaix.

Suite à l'arrêt de l'exploitation des ardoisières souterraines de Maël-Carhaix en 2000, la société AM3C a sollicité les services d'un conseiller en géotechnique et exploitation du sous-sol de l'école nationale supérieure des mines de Paris afin d'évaluer les conséquences de l'arrêt de l'exploitation sur le plan hydrogéologique et géotechnique.

Dans son rapport en date du 2 mai 2001, ont été analysées les données géologiques et techniques disponibles de l'exploitation couplées à l'étude de données géotechniques et hydrogéologiques.

Ces conclusions sont les suivantes :

- ✓ *Sur le plan hydrogéologique, les vides seront ennoyés et il se produira un exutoire vers le ruisseau s'écoulant dans la rivière de Kersault. Cet exutoire se fera probablement au travers des terrains superficiels. Aucune pollution n'est à craindre à la condition de ne pas laisser au fond des résidus d'hydrocarbures ou d'huiles. Les vides souterrains pourraient constituer un réservoir d'eau potable.*

=> Dans le cadre du présent dossier, l'analyse d'eau réalisée à hauteur du puits de la prairie n'a pas révélée de pollution particulière notamment aux hydrocarbures.

- ✓ *Sur le plan géotechnique, la probabilité d'effondrement des vides conduisant à un affaissement de surface est jugée extrêmement faible, à court terme comme à long terme. Néanmoins, si l'on ne voulait pas tenir compte de ce diagnostic, on peut définir une zone d'influence au delà de laquelle aucun risque ne serait encouru si les chambres souterraines s'effondraient.*

=> Depuis l'arrêt du site en 2000, il n'a pas été constaté d'effondrements au sein de l'ancienne exploitation minière.

Par la suite, l'INERIS (Institut national de l'environnement industriel et des risques) a été mandaté par les services de l'état « pour déterminer les mesures minimales qui permettraient d'assurer la sécurité du site notamment au regard de la stabilité des terrains, de la sécurité publique et de l'inaccessibilité des cavités souterraines ».

Dans son étude en date du 30 juin 2003, l'INERIS s'est appuyée sur le retour d'expérience sur d'autres sites similaires (Angers et Segré) ainsi que sur les données disponibles sur l'exploitation des ardoisières de Maël-Carhaix à défaut de documents d'exploitation récents et tangibles et faute d'accessibilité aux travaux souterrains, abandonnés et ennoyés.

L'analyse des conditions d'exploitation menées à l'époque sous le site du Moulin de la Lande fait apparaître différentes configurations à risques susceptibles de provoquer des désordres, voire des effondrements en surface.

En ce qui concerne les puits visibles sur le site, les constatations de l'époque faisaient état de leur accessibilité et de ce fait de la dangerosité pour un tiers s'aventurant sur le site (risque de chute).

En ce sens, le rapport d'étude INERIS de 2003 préconise :

- ✓ *Des mesures de prévention visant à destiner les terrains de surface, dans l'emprise des secteurs sous-minés, en zones à vocation exclusivement naturelles, sans activités agricoles, qui seront considérées comme inconstructibles.*
- ✓ *Au vu du contexte environnemental et socioéconomique du site, des mesures de prévention similaires aux précédentes visant à faire des terrains de surface des zones exclusivement naturelles, sans activités agricoles, considérées comme inconstructibles.*

=> Le projet de la société AM3C ne prévoit aucune nouvelle construction. Par ailleurs l'emprise du projet intègre environ 9 ha de zones naturelles sur les 13,9 ha sollicités soit plus de 60 % de terrains qui seront conservés en l'état. L'espace restant est nécessaire à l'exploitation du site qui contribue à sa remise en état via l'évacuation des anciens déchets ardoisiers. Cette activité aura un effet bénéfique sur les galeries souterraines en permettant notamment l'allègement du poids pesant en surface.

- ✓ *Sur l'ensemble du périmètre d'exploitation des mesures qui répondent à l'obligation d'information du public sur l'existence d'anciennes cavités dans le tréfonds (panneaux d'affichage) assorties de dispositions d'interdiction d'accès, comme des barrières, sur les voies pénétrant le site.*

=> Consciente des risques inhérents au site du Moulin de la Lande, la société AM3C a d'ores et déjà mis en place des dispositifs de sécurité visant à protéger les tiers évoluant au sein de l'exploitation. Ainsi, le site actuel dispose d'ores et déjà de portails fermés en dehors des horaires d'ouverture. Dans le cadre du présent projet, la société AM3C prévoit par ailleurs l'installation de panneaux supplémentaires interdisant l'accès au site et informant de la nature des dangers présents.

- ✓ *Pour les puits, des mesures techniques complémentaires de traitement par dalles bétonnées pour les puits encore ouverts (Puits Connan, Puits de la Prairie et éventuellement Puits d'en Haut) accompagnées de la mise en place d'une ceinture grillagée interdisant l'accès à la dalle et de panneaux d'affichage du risque. Pour le Puits du Milieu, les solutions minimales consisteraient à interdire les accès du site par une ceinture de grillage à laquelle serait associée une végétalisation dense d'arbustes épineux.*

=> Les puits encore ouverts seront condamnés par la mise en place d'une clôture couplée à une signalisation de danger. Le traitement par dalles bétonnées sera appliqué si faisabilité technique (possible en cas de largeur restreinte de l'ouverture du puits). Toutefois, il est précisé que la société AM3C ne souhaite pas obturer définitivement les puits d'extraction eu égard à l'éventualité d'une réutilisation ultérieure.

#### **IV.1.4. ACCIDENTOLOGIE / RETOUR D'EXPERIENCE**

Le site internet <http://aria.environnement.gouv.fr> du ministère de l'écologie et du développement durable permet d'obtenir la liste des accidents recensés pour différents secteurs d'activité (base de données ARIA de recensement des évènements accidentels d'origine industrielle).

Ce site a été consulté le 24/01/2018 pour identifier les principaux évènements accidentels susceptibles de résulter de l'exploitation d'un site tel que celui du Moulin de la Lande.

La liste des évènements accidentels ci-après (liste non exhaustive) a pour objectif de préciser les dangers les plus représentatifs potentiellement transposables à l'exploitation du site du Moulin de la Lande. Les critères suivants de recherche ont été retenus :

- Activités similaires au projet de la société AM3C.
- Engins et matériels employés.
- Nombre de salariés présents sur site.
- Présence d'un stockage d'hydrocarbures.

Titre	Date	Département	Commune	Contenu
Accident lors d'un déchargement sur une carrière	14/06/2017	39	LES ROUSSES	<p>Un camion se renverse lors du déchargement d'une benne de terre sur une carrière vers 14h45. L'accident survient sur une zone de la carrière en réaménagement. Le chauffeur est un sous-traitant de second rang. Le chef de carrière, alerté par le conducteur d'une chargeuse, extrait, de son véhicule, le chauffeur du camion inconscient. L'exploitant prévient les secours qui transportent la victime vers l'hôpital pour qu'elle soit examinée. Elle en sort le soir même. L'exploitant place du papier absorbant à proximité du réservoir du véhicule pour prévenir un éventuel renversement de carburant.</p> <p>La zone de déchargement ne présente ni ornières ni dévers. Le terrain était boueux suite à des orages. La mauvaise répartition du chargement dans la benne pourrait avoir créé un déséquilibre de l'ensemble lors de l'opération de levage.</p>
Incendie d'engin sur un centre de stockage de déchets non dangereux	11/05/2017	77	ISLES-LES-MELDEUSES	<p>Vers 10 h, un feu se déclare sur un engin de compactage des déchets durant sa manœuvre sur un talus d'un centre de stockage de déchets non dangereux. Les employés arrosent les déchets avec des extincteurs et déposent une couche de matériau inerte autour du véhicule pour éviter la propagation du sinistre. Les pompiers, appelés en renfort, éteignent l'incendie après 2 h d'intervention. Une surveillance est mise en place par l'exploitant (gardiennage pendant la nuit).</p> <p>Après l'incendie, l'activité est arrêtée sur l'alvéole de stockage impactée, du fait de la présence de l'engin incendié. Les membranes d'étanchéité de l'alvéole ne sont pas endommagées. Les eaux d'extinction se sont entièrement infiltrées dans la masse de déchets, sans écoulement à l'extérieur. Elles sont traitées avec les lixiviats de l'installation.</p>
Accident mortel dans une carrière	15/03/2017	43	SAINT-JULIEN-DU-PINET	<p>Dans une carrière, un ouvrier d'une entreprise extérieure est retrouvé inanimé en anoxie par un opérateur, vers un bassin de décantation sur la zone d'installation de lavage des matériaux. La victime refaisait l'étanchéité du bassin. La mort serait de cause naturelle : un malaise, puis un arrêt cardiaque.</p> <p>L'exploitant prévoit de s'équiper d'un nombre suffisant de dispositif d'alarme de travailleur isolé (DATI). Ces dispositifs seront mis en réseau de manière à ce que l'alerte soit communiquée à l'ensemble du personnel présent et équipé d'un DATI.</p>

D'une manière générale, les accidents les plus souvent recensés sur des exploitations similaires à celle envisagée sur le site du Moulin de la Lande ont pour cause les éléments suivants :

- Le risque de départ d'incendie constitue l'évènement le plus courant et peut avoir diverses origines : éléments des installations (convoyeurs à bandes le plus souvent), engins de chantiers...
- La seconde principale cause d'accidents met en cause le personnel d'exploitation dans le cadre de ses affectations : intervention sur matériel, circulation interne au site, ensevelissement, chute...
- Les autres accidents concernent des pollutions d'origine accidentelle (hydrocarbures essentiellement) depuis les stockages ou les engins.

#### **IV.1.5. REDUCTION DES POTENTIELS DE DANGERS**

L'INERIS propose 4 principes pour l'amélioration de la sécurité (rapports DRA-35 sur « la formalisation du savoir et des outils dans le domaine des risques majeurs » et  $\Omega$  9 du 10 avril 2006 sur « l'étude de dangers d'une installation classée ») :

- ⇒ **Le principe de substitution** : substituer les produits dangereux utilisés par des produits aux propriétés identiques mais moins dangereux.
- ⇒ **Le principe d'intensification** : intensifier l'exploitation en minimisant les quantités de substances dangereuses mises en œuvre. Il s'agit, par exemple, de réduire le volume des équipements au sein desquels le potentiel de danger est important, par exemple minimiser les volumes de stockage. Dans le cas d'une augmentation des approvisionnements, la question du transfert des risques éventuels doit être posée en parallèle, notamment par une augmentation du transport ou des opérations de transfert de matières dangereuses.
- ⇒ **Le principe d'atténuation** : définir des conditions opératoires ou de stockage (température et pression par exemple) moins dangereuses.
- ⇒ **Le principe de limitation des effets** : concevoir l'installation de telle façon à réduire les impacts d'une éventuelle perte de confinement ou d'un événement accidentel, par exemple en minimisant la surface d'évaporation d'un épandage liquide ou en réalisant une conception adaptée aux potentiels de dangers (dimensionnement de la tenue d'un réservoir à la surpression par exemple).

##### **➤ PRINCIPE DE SUBSTITUTION**

Le seul produit à risque employé sur le site du Moulin de la Lande sera du carburant (Gasoil) nécessaire au fonctionnement des engins et de l'installation mobile lors de la venue sur site. Le matériel d'exploitation ayant nécessairement besoin de carburant pour fonctionner, le principe de substitution ne peut être appliqué à ce produit.

##### **➤ PRINCIPE D'INTENSIFICATION**

La poursuite de l'exploitation du site du Moulin de la Lande ne nécessitera pas l'augmentation du volume en carburant stocké sur le site. Celui-ci restera semblable à la situation actuelle.

##### **➤ PRINCIPE D'ATTENUATION**

Le carburant employé sur le site du Moulin de la Lande sera stocké au niveau de l'atelier dans une cuve double paroi avec détecteur de fuite d'une capacité de 700 litres. Ces modalités de stockage limitent les risques de pollution accidentelle et d'incendie.

##### **➤ PRINCIPE DE LIMITATION DES EFFETS**

Le remplissage des engins en carburant est et sera réalisé de la façon suivante sur le site du Moulin de la Lande :

- Ravitaillement en carburant des manuscopics de la société AM3C sur dalle étanche au niveau de l'atelier du site. Dans le cas d'un éventuel déversement accidentel de carburant lors du remplissage de l'engin, les hydrocarbures seraient collectés via l'emploi de produits absorbants. Par ailleurs, dans le cas d'un éventuel départ d'incendie (en cas de déversement accidentel en présence d'une source d'ignition), le caractère ininflammable de la dalle béton de l'atelier permettra de limiter la propagation des flammes.
- Ravitaillement du matériel de l'entreprise LE PAPE en bord-à-bord par un camion de livraison extérieur. Lors de cette opération, la distribution en carburant est assurée au dessus d'une rétention amovible permettant le recueil des égouttures éventuelles.

#### **IV.1.6. RISQUES D'AGRESSION EXTERNES**

Les agressions externes susceptibles de porter atteinte à la sécurité du site incluent :

- les risques naturels,
- les risques liés aux activités humaines.

##### **➤ LES RISQUES NATURELS**

###### **■ Facteurs climatiques (vent, neige, gel)**

Les vents violents peuvent constituer un danger potentiel vis-à-vis de l'intégrité des superstructures d'exploitation en cas de défaut de construction ou d'entretien (effondrement, envol de bardage).

Dans le cadre du présent projet, ce risque peut concerner les bâtiments présents sur le site du Moulin de la Lande et en moindre mesure l'installation mobile lors de sa venue sur site. Toutefois, ce risque peut être considéré comme faible du fait de la hauteur limitée de ces éléments.

Les autres paramètres climatiques tels que neige ou gel ne constituent pas non plus des phénomènes aggravants de dangers au regard de la nature des activités exercées sur le site.

###### **■ Inondations**

Les terrains du site du Moulin de la Lande ne présentent pas de sensibilité particulière au risque inondation.

###### **■ Foudre**

Un impact de foudre, s'il n'est pas maîtrisé, peut être à l'origine de déflagrations importantes au niveau des bâtiments ou d'un départ d'incendie.

L'Arrêté du 4 octobre 2010 modifié par l'Arrêté du 19 juillet 2011, relatif à la protection contre la foudre de certaines installations classées, précise toutefois que les installations classées soumises à autorisation sous la rubrique sollicitée dans la présente demande (rubriques 2510, 2515 et 2517) ne rentrent pas dans le champ d'application de l'Arrêté sus-visé.

###### **■ Glissements de terrains**

D'après le Document Départemental des Risques Majeurs des Côtes d'Armor, la commune de Maël-Carhaix n'est pas concernée par le risque de mouvement de terrain.

###### **■ Séismes**

Depuis le 22 octobre 2010, la France dispose d'une nouvelle carte d'aléa sismique divisant le territoire national en cinq zones de sismicité croissante de 1 (risque très faible) à 5 (risque fort) en fonction de la probabilité d'occurrence des séismes.

Les décrets n°2010-1254 et n°2010-1255 modifiant les articles R. 563-1 à R.563-8 du Code de l'Environnement définissent le nouveau classement de l'ensemble des communes de France et les nouvelles règles de constructions parasismiques associées applicables au 1<sup>er</sup> mai 2011.

La commune de Maël-Carhaix appartient à la zone de sismicité n°2 « aléa faible » qui ne nécessite pas de dispositions particulières d'après l'Arrêté ministériel du 22 octobre 2010.

**Les risques naturels présentés ne constituent pas de facteurs aggravants des potentiels de dangers. Ils ne seront donc pas retenus comme évènement initiateur dans la suite de l'analyse des risques.**

## ➤ LES RISQUES LIES AUX ACTIVITES HUMAINES

### ■ Actes de malveillance

Les risques liés aux actes de malveillance sont variables suivant l'objet visé. Le site du Moulin de la Lande ne représentera pas une cible particulière au point d'y porter atteinte.

Néanmoins aucun dispositif ne peut empêcher un acte de malveillance délibéré. A cet effet, des mesures sont d'ores et déjà prises pour limiter l'accessibilité au site (portails d'accès cadenassés).

### ■ Voies de circulation

Les pistes et aires d'exploitation du projet seront en retrait des axes routiers limitrophes au site (RD 11 et VC n°2).

Par ailleurs, le projet n'est pas localisé à proximité d'un aéroport. En ce sens, le site du Moulin de la Lande ne fait pas l'objet de prescriptions particulières associées aux servitudes aéronautiques de dégivrage et de balisage des aéroports.

### ■ Installations industrielles

Le projet est envisagé en milieu rural. Aucune installation industrielle n'est présente à proximité du projet.

**Au regard de ces éléments, aucun risque lié aux activités humaines n'est présent dans l'emprise ou à proximité du projet de la société AM3C.**

## IV.2. ANALYSE PRELIMINAIRE DES RISQUES (APR)

On rappellera que l'objectif de l'Analyse Préliminaire des Risques (APR) est d'identifier l'ensemble des scénarii d'évènements à caractère dangereux en lien avec l'exploitation étudiée et susceptibles de présenter un risque vis-à-vis de tiers. Ces évènements à risques sont établis sur la base des dangers potentiels identifiés lors de l'étape précédente.

Cette APR permet également de mettre en relation avec chaque évènement les éléments de maîtrise des risques (préventifs ou curatifs) qui permettent d'en limiter la probabilité d'apparition ou la gravité, en vue de déterminer les principaux évènements dangereux redoutés et nécessitant une analyse plus approfondie du risque encouru.

Ces derniers feront alors l'objet d'une Étude Détaillée de Réduction des Risques (EDRR) basée sur la détermination de leur gravité (en fonction de l'exposition des tiers) et de leur probabilité (réalisation d'arbres de défaillance).

**Les évènements redoutés étudiés dans l'EDRR sont ceux pour lesquels un risque peut potentiellement avoir des répercussions hors du périmètre d'exploitation.**

Les tableaux suivants recensent les différents évènements à risques associés aux procédés / produits qui sont et seront réalisés / employés sur le site du Moulin de la Lande, ainsi que leurs éléments de maîtrise préventive ou curative. Au regard des activités développées sur cette exploitation, les évènements ont été distingués de la manière suivante :

- les opérations de reprise des stocks de déchets de carrière,
- les opérations de traitement des matériaux extraits,
- les différentes activités annexes.

Les évènements communs aux différentes activités (par exemple : fuite de carburant depuis un engin) ne sont mentionnés qu'une seule fois dans le tableau.

**Les mesures de prévention et/ou d'intervention figurant en gras dans le tableau de l'APR ci-après constituent les principaux éléments de maîtrise des risques garantissant l'absence de répercussions sur l'environnement naturel et humain (répercussions hors du périmètre de l'établissement).**

## IV.2.1. IDENTIFICATION DES EVENEMENTS DANGEREUX

Tableau 14 : Évènements dangereux accidentels liés aux activités du site

N°	Activité	Source du risque (CAUSE)	Nature du risque (CONSÉQUENCE)	Mesures de maîtrise des risques (prévention / intervention)	Cotation initiale		Commentaire
					Intensité	Probabilité	
<b>REPRISE DE MATÉRIAUX</b>							
1.1	Reprise de stocks	Instabilité du stock	Éboulement, ensevelissement	<b>Site interdit aux tiers (portail, panneaux)</b> Hauteur limitée des stocks (hauteur moyenne de 10 m)	1	Probable	Un évènement accidentel lié à la reprise des stocks resterait confiné au site
1.2		Présence de fronts	Chute depuis le front	<b>Site interdit aux tiers (portail, panneaux)</b>	1	Probable	
1.3		Collision entre véhicules (Source d'ignition)	Incendie	<b>Reprise de matériaux minéraux non propices à propager un incendie</b> Entretien et contrôle périodique du matériel	1	Probable	
1.4		Incendie	Atteinte à la qualité de l'air (fumées de combustion)	Présence d'extincteurs sur le site Respect du plan de circulation	1	Probable	
1.5		Collision entre véhicules (Fuite, épandage de carburant)	Pollution du sol et des eaux	<b>Présence de produits absorbants</b> Entretien régulier des engins Respect du plan de circulation	1	Probable	
<b>TRAITEMENT DES MATERIAUX</b>							
2.1	Traitement des matériaux au sein de l'installation mobile du site	Présence d'une installation mobile de traitement des matériaux	Chute de personne	<b>Site interdit aux tiers (portail, clôture),</b> Installation arrêtée et fermée en dehors des périodes d'activité Installation présente par campagne sur le site	1	Probable	L'installation mobile de traitement ne sera pas accessible aux tiers
2.2			Chute de matériaux		1	Probable	
2.3			Ecrasement, coupure		1	Probable	
2.4		Incendie (départ de feu accidentel)	Atteinte à la qualité de l'air (fumées de combustion)	Entretien et contrôle régulier du matériel, des installations électriques et des dispositifs de sécurité. Respect des consignes de sécurité et des procédures d'intervention sur matériel (permis de feu délivré). Présence d'extincteurs sur le site.	2	Probable	<b>Un éventuel départ d'incendie au niveau d'un convoyeur est susceptible de se propager à l'ensemble de l'installation (possibilité d'effets dominos)</b>
<b>ACTIVITÉS ANNEXES</b>							
3.1	Chargement et stockage des matériaux	Déstockage, chargement	Chute de matériaux	<b>Site interdit aux tiers (portail, panneau)</b> <b>Respect du plan de circulation</b> (restriction de l'accessibilité aux zones de chargement et de stockage)	1	Probable	Les aires de chargement et de stockage ne sont pas accessibles aux tiers
3.2		Ravinement des stocks	Ensevelissement		1	Probable	
3.3	Maintenance du matériel dans l'atelier	Incendie (départ de feu accidentel)	Atteinte à la qualité de l'air (fumées de combustion)	<b>Structure adaptée de l'atelier</b> (sol béton / ossature métallique). Présence d'extincteurs et de produits absorbants dans l'atelier du site.	1	Probable	Un évènement accidentel lié à la maintenance du matériel resterait confiné dans l'atelier.
3.4		Déversement de produits	Pollution du sol et des eaux		1	Probable	
3.5	Remplissage en carburant des engins	Source d'ignition	Incendie	<b>Alimentation en carburant des engins réalisée par un prestataire extérieur sur une aire de rétention amovible ou sur la dalle étanche de l'atelier</b> Présence de produits absorbants	2	Probable	Un évènement accidentel intervenant lors de cette opération serait pris en charge par le prestataire extérieur apte à sa résolution ou traité par les produits absorbants présents dans l'atelier du site.
3.6		Incendie	Atteinte à la qualité de l'air (fumées)		1		
3.7		Déversement accidentel	Pollution du sol et des eaux		1		

## IV.2.2. SYNTHÈSE DES EVENEMENTS REDOUTES

Les évènements redoutés considérés comme critiques et qui seront retenus pour être étudiés de façon plus approfondie dans l'Analyse Préliminaire des Risques (APR) regroupent les évènements pour lesquels :

- les éléments préventifs et/ou curatifs mis en œuvre ne permettent pas de maîtriser convenablement les risques,
- une incertitude existe sur l'intensité des effets,
- les effets sont susceptibles d'engendrer des effets dominos.

D'une manière générale, ces événements redoutés ont des répercussions potentielles hors de l'exploitation et peuvent donc mettre en danger les tiers (voisinage de l'exploitation). Les événements redoutés nécessitant une analyse plus approfondie de l'intensité des effets potentiels sont les suivants :

**Tableau 15 : Synthèse des événements dangereux critiques redoutés de l'APR**

Référence de l'évènement redouté	Type de danger	Identification du risque
2.4 – Traitement des matériaux	Incendie	Flux thermiques rayonnés pouvant potentiellement sortir du site en cas d'effet dominos
3.5 - Remplissage en carburant des engins		

**Pour le présent projet, le principal évènement dangereux redouté concerne le risque d'incendie qui interviendrait sur le matériel d'exploitation notamment lors de son ravitaillement en carburant. Les conséquences d'éventuels effets dominos affectant les matériaux inflammables présents sur le site sont à préciser dans la suite de l'APR.**

**A noter que du fait de la présence ponctuelle de l'installation mobile de transformation sur le site et de la faible quantité de matériaux combustibles la composant, qui limite fortement la durée d'un éventuel incendie, le risque d'exposition aux fumées d'incendie issues de la combustion de l'installation mobile de transformation n'apparaît pas significatif et n'est donc pas retenu pour la suite de l'APR.**

Rappelons que les autres événements vis-à-vis desquels les mesures préventives ou curatives associées permettent une maîtrise des risques se traduisant par l'absence de répercussions possibles vis-à-vis de l'environnement naturel et humain (effets hors site) ne sont pas retenus pour l'EDRR :

- ⇒ Zones ou activités dangereuses présentant des risques qui demeurent internes à l'exploitation (accès au site interdit sans autorisation avec restriction de l'accessibilité (portails, panneaux)).
- ⇒ Pollutions d'origine accidentelles (eau, air, sol) vis-à-vis desquelles les mesures en place permettent leur confinement au sein de l'exploitation pour un traitement curatif.

#### **IV.2.3. ESTIMATION DE L'INTENSITE ET DE LA GRAVITE DES PHENOMENES RETENUS**

##### **➤ RISQUE D'INCENDIE ET FLUX THERMIQUES RAYONNES**

###### **■ Valeurs de référence des flux thermiques**

Les valeurs de référence des seuils thermiques retenues pour les installations classées sont définies dans l'Arrêté du 29 septembre 2005 relatif à l'évaluation et à la prise en compte de la probabilité d'occurrence, de la cinétique, de l'intensité des effets et de la gravité des conséquences des accidents potentiels dans les études de dangers. Ces valeurs seuils sont les suivantes :

- ⇒ Pour les effets sur les structures :
  - **5 kW/m<sup>2</sup>**, seuil des destructions de vitres significatives ;
  - **8 kW/m<sup>2</sup>**, seuil des effets dominos et correspondant au seuil de dégâts graves sur les structures ;
  - **16 kW/m<sup>2</sup>**, seuil d'exposition prolongée des structures et correspondant au seuil des dégâts très graves sur les structures, hors structures béton ;
  - **20 kW/m<sup>2</sup>**, seuil de tenue du béton pendant plusieurs heures et correspondant au seuil des dégâts très graves sur les structures béton ;
  - **200 kW/m<sup>2</sup>**, seuil de ruine du béton en quelques dizaines de minutes.
- ⇒ Pour les effets sur l'homme :
  - **3 kW/m<sup>2</sup>** ou 600 [(kW/m<sup>2</sup>)<sup>4/3</sup>]. s, seuil des effets irréversibles correspondant à la zone des dangers significatifs pour la vie humaine ;
  - **5 kW/m<sup>2</sup>** ou 1000 [(kW/m<sup>2</sup>)<sup>4/3</sup>]. s, seuil des premiers effets létaux correspondant à la zone des dangers graves pour la vie humaine ;
  - **8 kW/m<sup>2</sup>** ou 1800 [(kW/m<sup>2</sup>)<sup>4/3</sup>]. s, seuil des effets létaux significatifs correspondant à la zone des dangers très graves pour la vie humaine.

## ■ Modèle de calcul des flux thermiques

### ❖ Équation générale du rayonnement thermique

L'équation générale se présente sous la forme :

$$\Phi = \Phi_0 \cdot f \cdot \tau$$

avec :  $\Phi$  = flux reçu par une cible en kW/m<sup>2</sup>  
 $\Phi_0$  = flux émis à la surface de la flamme en kW/m<sup>2</sup>  
 $\tau$  = coefficient d'atténuation dans l'air,  $f$  = facteur de forme

Pour pouvoir calculer la valeur numérique du flux thermique reçu par une cible, il est nécessaire de connaître le facteur de forme, le coefficient d'atténuation dans l'air ainsi que la valeur du flux thermique émis par la source.

### ❖ Paramètres de calculs des flux thermiques

- Flux émis par la source  $\Phi_0$

Les valeurs des flux  $\Phi_0$  ont été déterminées expérimentalement par certains organismes et sont issues de la littérature.

- Détermination du coefficient d'atténuation atmosphérique  $\tau$

La relation de Brzustowski-Sommer est utilisée pour calculer ce coefficient. Elle prend en compte différents facteurs comme notamment le taux d'humidité dans l'air.

- Détermination du facteur de forme  $f$

Le facteur de forme représente la fraction d'énergie émise par une surface A (incendie) et reçue par une surface B (la cible).

Il dépend des dimensions de la source de chaleur, de sa forme ainsi que de la distance entre la source et la cible. Il prend en compte la vision du feu en fonction de l'endroit où se trouve la cible.

Le facteur de forme est déterminé par la formule de Sparrow et Cess.

La hauteur de flamme est un élément important du dimensionnement d'un feu et de ses flammes. Le diamètre équivalent est utilisé dans le cas où le feu ne serait pas représenté sous la forme d'un cylindre vertical. Le diamètre équivalent permet de se rapporter à un cas simple (cas cylindrique) :

$$D_{eq} = 4 \cdot \frac{\text{surface du feu}}{\text{périmètre du feu}} \quad (D_{eq} = \text{Diamètre équivalent en mètre})$$

Pour le calcul de la hauteur de flamme, la corrélation de THOMAS est généralement utilisée. Quand cette relation est hors de son domaine de validité, une corrélation plus adaptée est prise parmi celles fournies par la bibliographie (The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 3rd Edition - Zukoski, Heskestad).

Cette hauteur de flamme dépend du diamètre équivalent calculé précédemment, du produit considéré et de l'endroit où il se consume (les vitesses de combustion sont issues de la littérature).

De plus, il est possible, lorsque la surface occupée par les matières combustibles est inférieure à la surface globale de la cellule, d'introduire un coefficient pondérateur.

Il est également possible de prendre en compte la présence de murs coupe-feu : les facteurs de forme sont alors recalculés pour les zones occultées par le mur coupe-feu.

## ■ Détermination de la gravité des incendies

### ❖ Intensité d'un incendie

Les principaux évènements d'incendie redoutés identifiés dans l'APR concerne :

- un incendie au niveau de l'aire étanche bétonnée lors du ravitaillement des engins (3.5),
- un incendie au niveau de l'installation de traitement des matériaux (2.4).

Les tableaux ci-après synthétisent, pour ces scénarii d'incendie, les calculs des flux thermiques réalisés à partir de l'équation générale du rayonnement thermique présentée au point précédent :

**Tableau 16 : Flux thermiques rayonnés pour les scénarii d'incendie**

Évènement redouté	Typologie des cellules à risques – Calculs des flux thermiques					
<b>3.5</b>  Incendie lors du remplissage des engins en carburant	<b>Déversement accidentel d'hydrocarbures au sol</b>					
	<b>Évènement</b>	Départ de feu en cas de déversement accidentel lors des opérations de remplissage d'un engin ou véhicule en carburant depuis la cuve de gasoil présente dans l'atelier du site ou depuis le camion de livraison.				
	<b>Cellule*</b>	Zone occupant une surface au sol de l'ordre de 4 m <sup>2</sup> (2mx2m).				
	<b>Taux de combustion et flux initial</b>	Taux de combustion : 0,035 kg/m <sup>2</sup> .s Flux initial : 30 kW/m <sup>2</sup> Un liquide inflammable de 2 <sup>ème</sup> catégorie (point d'éclair > 55°C) est considéré : GNR utilisé comme carburant.				
	<b>Flux thermique</b>	20 kW/m <sup>2</sup>	16 kW/m <sup>2</sup>	8 kW/m <sup>2</sup>	5 kW/m <sup>2</sup>	3 kW/m <sup>2</sup>
	<b>Face (2 m)</b>	0 m	0 m	0 m	3,0 m	4,5 m
	<b>Face (2 m)</b>	0 m	0 m	0 m	3,0 m	4,5 m
Hauteur de flamme : 3,4 m						
Évènement redouté	Typologie des cellules à risques – Calculs des flux thermiques					
<b>2.4</b>  Incendie sur l'installation de transformation	<b>Bande transporteuse</b>					
	<b>Évènement</b>	Départ de feu au niveau d'une bande transporteuse.				
	<b>Cellule</b>	Linéaire de bande de 100 m (linéaire considéré en feu de manière simultanée), pour une largeur de 1 m. <i>On notera que la longueur totale de tapis est supérieure à 100 m. Toutefois, les distances de perception des flux thermiques sont plafonnées pour de très grandes dimensions de zone en feu. La distance maximale atteinte par les flux est donc identique pour la longueur d'un tapis (100 m) ou la longueur totale de tapis sur l'installation.</i>				
	<b>Taux de combustion et flux initial</b>	Taux de combustion : 0,014 kg/m <sup>2</sup> .s Flux initial : 32,6 kW/m <sup>2</sup> Le matériau combustible considéré est du polyéthylène.				
	<b>Flux thermique</b>	20 kW/m <sup>2</sup>	16 kW/m <sup>2</sup>	8 kW/m <sup>2</sup>	5 kW/m <sup>2</sup>	3 kW/m <sup>2</sup>
	<b>Linéaire (100 m)</b>	0 m	0 m	2,0 m	4,0 m	6,50 m
	Hauteur de flamme : 10 m					

\* le cas le plus défavorable est retenu. Il est considéré une surface maximale de 4 m<sup>2</sup> dédiée à cette opération.

## ❖ Illustration des flux thermiques rayonnés

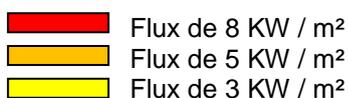
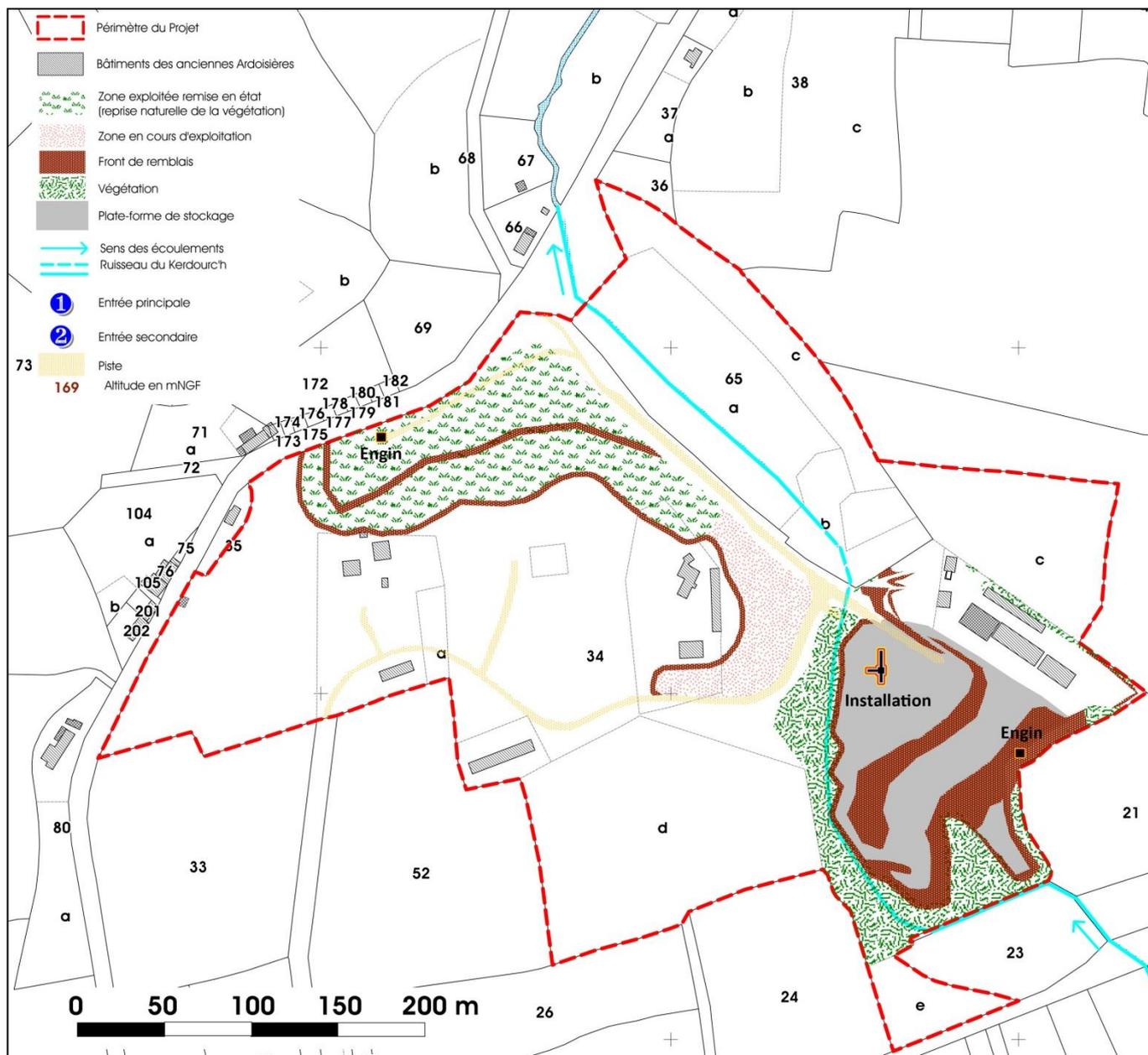


Figure 1 : Cartographie des flux thermiques

## ❖ Exposition humaine

Au regard de l'implantation de l'installation mobile et de l'évolution des engins sur le site du Moulin de la Lande, les flux thermiques de 3 kW/m<sup>2</sup>, 5 kW/m<sup>2</sup> de 8 kW/m<sup>2</sup> restent confinés à l'intérieur du site.

## ❖ Conclusion sur la gravité de l'évènement « incendie »

**L'étude de ce scénario d'incendie permet de considérer l'absence de zone d'effets létaux ou irréversibles hors de l'établissement, c'est-à-dire susceptibles de toucher des personnes tierces (autres que le personnel d'exploitation).**

### **IV.3. CONCLUSION GENERALE DE L'ANALYSE DES RISQUES**

L'analyse des risques réalisée pour la prise en compte des dangers associés à l'exploitation du site du Moulin de la Lande a eu pour objectif d'identifier dans un premier temps différents scénarios d'évènements potentiellement dangereux.

La prise en compte des éléments préventifs simples de maîtrise des risques a permis de retenir les principaux évènements dangereux redoutés et considérés comme critiques par rapport aux effets potentiels vis-à-vis des tiers (c'est-à-dire hors périmètre d'exploitation).

Cet évènement critique, qui a fait l'objet d'une Analyse Détaillée des Risques (ADR), concerne le risque d'incendie au niveau du matériel d'exploitation du site notamment lors de son ravitaillement en carburant. L'étude des flux thermiques inhérents à ce risque a permis de statuer sur l'absence de flux sortant en dehors de l'emprise du projet.

Cette appréciation du risque traduit des évènements accidentels pour lesquels la faible probabilité d'occurrence et/ou la faible gravité ne justifient pas la mise en œuvre de mesures spécifiques complémentaires à celles déjà envisagées.

## V. MOYENS DE PREVENTION ET D'INTERVENTION

### V.1. MOYENS DE PREVENTION

L'analyse des risques réalisée précédemment montre que l'intervention préventive vis-à-vis de l'exploitation et des activités exercées permet de réduire, voire éliminer de nombreuses causes de risques accidentels. La prévention repose avant toute chose sur une maintenance sérieuse et efficace à la fois des équipements et de l'exploitation.

#### V.1.1. PREVENTION CONTRE LES INCENDIES

Dans le cadre du présent projet, la prévention contre les incendies repose sur la mise en œuvre de règles simples de sécurité :

- ⇒ Des consignes de sécurité sont données au personnel intervenant sur le site (par voie orale et voie d'affichage) sur les actes de malveillance susceptibles de déclencher un départ d'incendie.

Ces consignes portent notamment sur :

- L'interdiction d'approcher des points chauds ou de fumer à proximité des zones à risques.
  - L'interdiction de procéder à toute forme de brûlage au sein de l'exploitation.
- ⇒ Des signalétiques appropriées sont mises en place au niveau de chaque zone d'exploitation susceptible de présenter un risque.



#### V.1.2. PREVENTION CONTRE LES POLLUTIONS ACCIDENTELLES

La prévention contre les risques de pollutions accidentelles a déjà été abordée dans l'étude d'impact jointe à la présente demande d'autorisation, au chapitre relatif aux mesures concernant les eaux ainsi que dans le volet sanitaire de l'étude d'impact.

Le ravitaillement des engins est et sera effectué au niveau de l'atelier sur une dalle étanche ou par un camion de livraison extérieur au dessus d'une rétention amovible.

Des produits absorbants sont et seront présents sur site pour pallier à d'éventuelles salissures du sol par des produits polluants (rupture de flexible sur un engin par exemple).

#### V.1.3. EMPLOI DE SUBSTANCES DANGEREUSES (EXPLOSIFS)

L'exploitation des stocks de déchets de carrière sur le site du Moulin de la Lande ne nécessite et ne nécessitera pas l'emploi d'explosifs.

#### **V.1.4. PREVENTION CONTRE LES EBOULEMENTS, EFFONDREMENTS, CHUTES**

Dans le cadre du projet de la société AM3C, les risques associés aux éboulements, effondrements et chutes seront liés à la reprise des stocks de déchets de carrière. Concernant ces risques, ils concerneront essentiellement le personnel du site ou les personnes extérieures autorisées à y accéder.

La prévention contre ce type d'incident reposera avant tout sur les modalités d'exploitation des stocks de déchets de carrière. Ainsi, il a été retenu une reprise des stocks à leur base lorsque ceux-ci ne dépassent pas 10 m de hauteur. Au-delà et afin d'assurer leur stabilité, les stocks seront tout d'abord scalper en leur sommet afin de réduire leur hauteur puis repris à leur base.

#### **V.1.5. PREVENTION CONTRE LES COLLISIONS**

La prévention contre les risques de collisions, et en particulier les risques liés au trafic induit par le site du Moulin de la Lande vis-à-vis des axes routiers locaux, est traitée dans un chapitre de l'étude d'impact auquel le lecteur pourra se reporter.

Les risques d'accident provoqués par une collision au sein de l'exploitation seront prévenus par l'adoption des mesures suivantes :

- la limitation de la vitesse sur site,
- des aires de circulation et de manœuvre suffisamment larges,
- une bonne visibilité sur le site,
- une matérialisation des voies de circulation,
- un plan affiché en entrée de site identifiant les zones de circulation et l'accessibilité des zones aux engins ou véhicules de transport.

#### **V.1.6. PROTECTION CONTRE LA Foudre**

Les installations soumises à autorisation au titre de la législation des installations classées et sur lesquelles une agression par la foudre pourrait être à l'origine d'événements susceptibles de porter atteinte à la sûreté des installations, à la sécurité des personnes ou à la qualité de l'environnement doivent être protégées contre la foudre (Arrêté du 4 octobre 2010 modifié par l'Arrêté du 19 juillet 2011, relatif à la protection contre la foudre de certaines installations classées).

L'annexe de l'Arrêté du 4 octobre 2010 modifié précise toutefois que les installations classées soumises à autorisation sous les rubriques sollicitées dans la présente demande (rubrique 2510, 2515 et 2517) ne rentrent pas dans le champ d'application de l'Arrêté sus-visé.

#### **V.1.7. ACTES DE MALVEILLANCE**

La prévention contre de tels actes consiste à limiter l'accessibilité du site aux personnes non autorisées :

- mise en place en périphérie du site de panneaux interdisant l'accès au site et informant de la nature des dangers,
- sécurisation du site en dehors des horaires d'ouverture (fermeture des portails d'accès).

#### **V.1.8. CONTROLES**

Le site du Moulin de la Lande fera l'objet d'un contrôle régulier exercé par les services de l'État chargés de l'inspection des Installations Classées pour la protection de l'Environnement (DREAL).

Par ailleurs, d'autres contrôles préventifs en matière de sécurité seront réalisés périodiquement par des organismes extérieurs agréés. Il s'agit notamment :

- du contrôle des installations de lutte contre les incendies par un organisme agréé : contrôle annuel des extincteurs,
- du contrôle par un organisme extérieur de prévention (OEP).

## **V.2. MOYENS D'INTERVENTION**

Dans l'hypothèse où les moyens de prévention visés précédemment s'avéraient insuffisants et qu'un incident venait à mettre en péril les personnes ou les biens matériels présents au sein de l'exploitation ou dans le voisinage, il peut être fait appel à des moyens d'intervention internes et, le cas échéant, des moyens externes. Les mesures et consignes de sécurité sont portées à la connaissance du personnel.

En cas de sinistre, la procédure d'intervention suivante serait mise en œuvre :

- 1) : Information de l'ensemble des personnes présentes au sein de l'établissement (personnel d'exploitation, intervenants extérieurs...).
- 2) : Mise en œuvre des moyens internes d'intervention, visant à réduire le développement d'un sinistre et son éventuelle propagation.
- 3) : Appel des moyens d'intervention et de secours extérieurs (si la gravité du sinistre l'exige et met en péril la sécurité du personnel d'exploitation).
- 4) : Délimitation d'un périmètre de sécurité et de la zone d'intervention des secours (le cas échéant, bouclage du site ou des abords, dans l'attente des secours extérieurs).
- 5) : Information du voisinage et de toute personne, service d'État (DREAL...), ou autre (mairie...), susceptibles d'être concernés par le sinistre et sa gravité.

### **V.2.1. MOYENS D'INTERVENTION INTERNES**

#### **➤ PREMIERS SOINS EN CAS D'URGENCE**

Afin de procéder aux premiers soins d'urgence, en cas d'accident ou d'incident, des trousseaux de premières urgences (régulièrement vérifiées et complétées) seront présentes sur l'exploitation.

#### **➤ MOYENS DE COMMUNICATION**

Le personnel du site dispose de moyens de communication mobiles (radio, téléphones portables).

#### **➤ MATERIEL DE LUTTE CONTRE LES INCENDIES**

Des extincteurs conformes aux normes en vigueur et régulièrement contrôlés sont et seront présents sur le site.

### **V.2.2. MOYENS D'INTERVENTION EXTERNES**

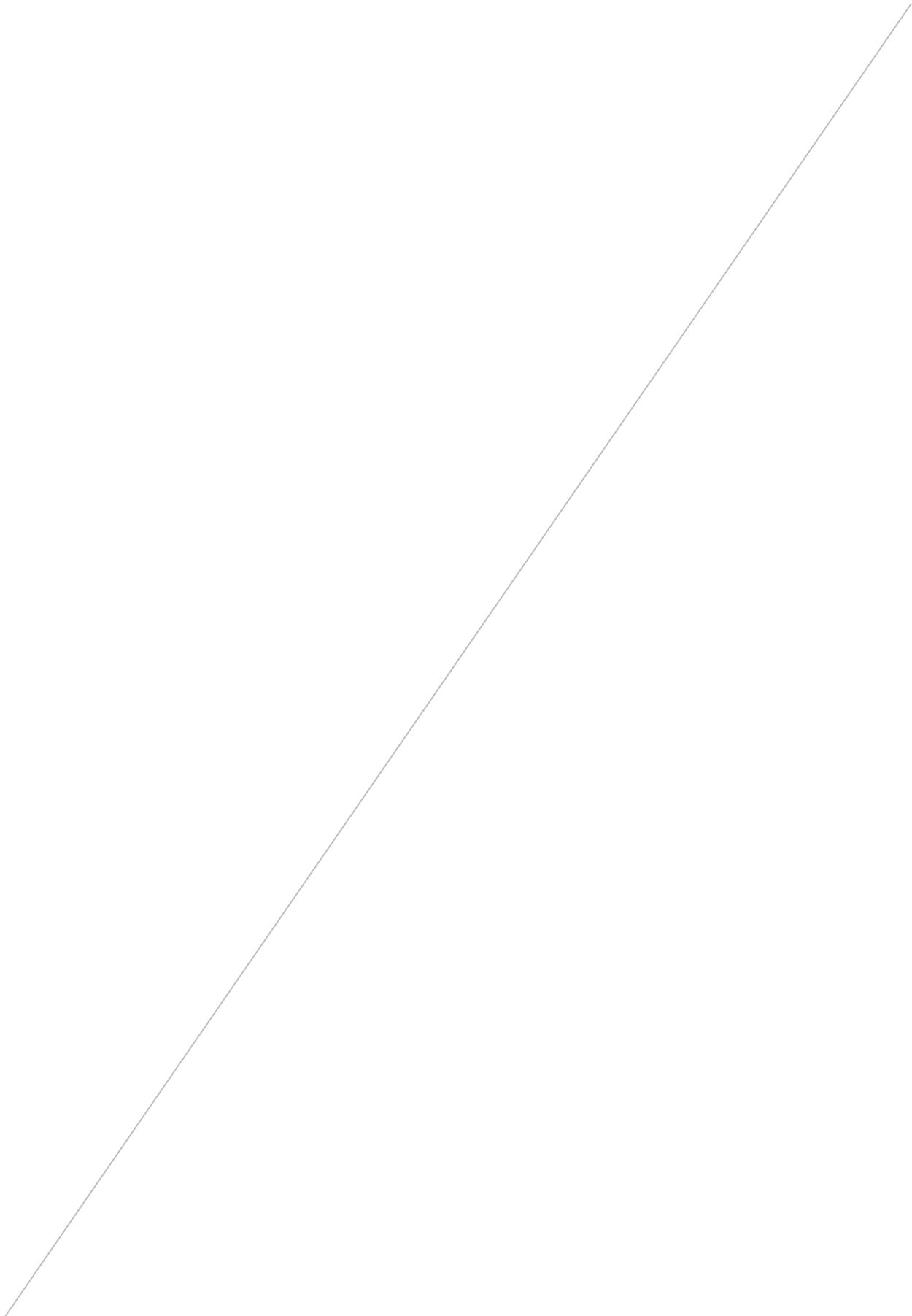
Dans l'éventualité où les moyens de premiers secours visés précédemment s'avéreraient insuffisants, compte tenu de l'ampleur d'un accident, il serait alors fait appel aux services publics d'intervention qui disposent de moyens spécifiques adaptés à chaque type d'événement.

## VI. ANNEXES

---

Annexe 1 : Etude INERIS de 2003 – Mise en sécurité de l'Ardoisière de Maël-Carhaix .....	37
Annexe 2 : Etude de l'école nationale supérieure des mines de Paris – 2001 – Ardoisières de Maël-Carhaix – Conséquences de l'arrêt de l'exploitation sur le plan hydrogéologique et géotechnique .....	39

**Annexe 1 : Etude INERIS de 2003 – Mise en sécurité de l’Ardoisière de Maël-Carhaix**

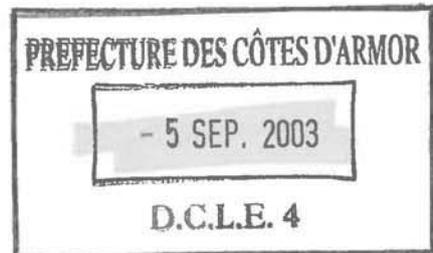


**INERIS**

ORIGINAL

INSTITUT NATIONAL DE L'ENVIRONNEMENT INDUSTRIEL ET DES RISQUES

DEFINITIF



## Mise en sécurité de l'Ardoisière de Maël-Carhaix (Côtes d'Armor)

DRIRE de Bretagne

J.J. TRITSCH

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

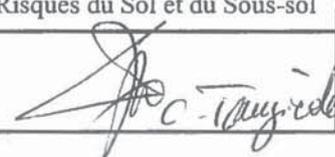
30 JUIN 2003

# Mise en sécurité de l'Ardoisière de Maël-Carhaix (Côtes d'Armor)

## DRIRE de Bretagne

30 JUIN 2003

Ce document comporte 35 pages (hors couverture, figures, photos, annexes et plans)

	Rédaction	Vérification	Approbation
<b>NOM</b>	J.J. TRITSCH	C. DIDIER	C. TAUZIEDE
<b>Qualité</b>	Responsable d'études et de Recherches, Délégué Expertise et Appui Technique à l'Administration	Responsable de l'Unité Modélisation et Evaluation des Risques de la Direction des Risques du Sol et du Sous-sol	Directeur des Risques du Sol et du Sous-sol
<b>Visa</b>			

## TABLE DES MATIERES

<b>1.</b>	<b>OBJECTIF ET CONTEXTE DE L'ETUDE.....</b>	<b>4</b>
<b>2.</b>	<b>MÉTHODE D'ÉTUDE .....</b>	<b>4</b>
<b>3.</b>	<b>CONTEXTE ET SITUATION DE L'EXPLOITATION .....</b>	<b>5</b>
3.1	CADRE GÉOGRAPHIQUE .....	5
3.2	CADRE ADMINISTRATIF DE L'EXPLOITATION .....	6
3.3	CONTEXTE GÉOLOGIQUE.....	6
3.4	CONTEXTE D'EXPLOITATION .....	7
<b>4.</b>	<b>MÉTHODES D'EXPLOITATION ET MÉCANISMES DE RUPTURE SYMPTOMATIQUES DES ARDOISIÈRES .....</b>	<b>9</b>
<b>5.</b>	<b>HISTORIQUE ET CONFIGURATIONS D'EXPLOITATION DE L'ARDOISIÈRE DE MAËL-CARHAIX.....</b>	<b>9</b>
5.1	LA PÉRIODE ARCHAÏQUE DES FONDS SOUS VOÛTE (1903 -1928).....	10
5.2	LES CHAMBRES DESCENDANTES (1928-1952).....	11
5.3	LES DERNIÈRES CHAMBRES DESCENDANTES (1952-2000) .....	12
<b>6.</b>	<b>SYNTHÈSE : EVALUATION DES ALÉAS.....</b>	<b>14</b>
6.1	PRINCIPE DE L'ANALYSE.....	14
6.2	IDENTIFICATION DES CONFIGURATIONS DÉFAVORABLES ET DES SCÉNARIOS ACCIDENTELS PRÉVISIBLES	15
6.3	ZONAGE ET QUALIFICATION DES ALÉAS .....	16
a)	Le secteur de Kergonan à l'ouest.....	16
b)	Le secteur du Puits du Milieu de Moulin-Lande .....	17
c)	Le secteur du Puits de la Prairie ou secteur est de Moulin-Lande .....	18
6.4	CAS DES OUVRAGES DÉBOUCHANT AU JOUR (PUITS).....	19
6.5	IMPACTS LIÉS A LA REMONTÉE DES EAUX .....	20
a)	Impacts quantitatifs .....	20
b)	Impacts sur la qualité des eaux.....	20
<b>7.</b>	<b>CARTOGRAPHIE DES ALÉAS .....</b>	<b>21</b>
<b>8.</b>	<b>PRINCIPES DE MISE EN SÉCURITÉ DU SITE À LONG TERME .....</b>	<b>22</b>
8.1	PRINCIPES GÉNÉRAUX DE MISE EN SÉCURITÉ .....	22
8.2	ANALYSE DE MESURES DE MISE EN SÉCURITÉ DE LA SURFACE.....	22
8.2.1	<i>Zones d'aléas moyen et fort.....</i>	<i>22</i>
8.2.2	<i>Zones d'aléa faible .....</i>	<i>24</i>
8.2.3	<i>Information du public et interdiction d'accès .....</i>	<i>24</i>
8.3	ANALYSE DE MESURES DE SÉCURITÉ POUR LES PUIITS .....	24
8.3.1	<i>Les serrements et bouchons bétonnés en colonne de puits .....</i>	<i>24</i>
a)	Serrements bétonnés ancrés.....	24
b)	Bouchons autoportants .....	25
8.3.2	<i>Dalles bétonnées .....</i>	<i>26</i>
a)	Dalles bétonnées de surface.....	26
b)	Panneaux préfabriqués de béton .....	26
c)	Dalles enterrées .....	26
8.3.3	<i>Remblayage.....</i>	<i>27</i>
8.3.4	<i>Méthodes de fermeture légères.....</i>	<i>27</i>
a)	Grilles métalliques.....	27
b)	Rails en acier .....	27
8.3.5	<i>Mesures d'interdiction d'accès et d'affichage du risque.....</i>	<i>28</i>
8.3.6	<i>Proposition de mesures pour les puits adaptées au contexte du site.....</i>	<i>28</i>
<b>9.</b>	<b>CONCLUSION .....</b>	<b>29</b>
<b>10.</b>	<b>LEXIQUE.....</b>	<b>32</b>

11. ARCHIVES ET BIBLIOGRAPHIE SPÉCIALISÉES.....	33
12. LISTE DES FIGURES ET PHOTOS .....	35
13. LISTE DES ANNEXES.....	35
14. LISTE DES PLANS.....	35

## 1. OBJECTIF ET CONTEXTE DE L'ETUDE

---

La société « Ardoisières de Maël-Carhaix » a exploité, à Moulin-Lande, à deux kilomètres au nord de Maël-Carhaix (Côtes d'Armor), jusqu'en 2000, une carrière souterraine de schistes ardoisiers ouverte depuis le début du XXème siècle. Jusqu'à cette date, l'exploitation fut menée d'une façon désordonnée et « artisanale » par la méthode des « chambres descendantes » (non remblayées) rappelant celle des « fonds descendants sous voûte » largement employée au XIXème siècle.

Pendant les dernières années d'exploitation (1992 à 2000), le Préfet des Côtes d'Armor, comme la Direction Régionale de l'Industrie, de la Recherche et de l'Environnement de Bretagne, ont engagé diverses procédures (pénales et administratives) pour obtenir de l'exploitant qu'il se conforme aux réglementations applicables aussi bien au titre de l'hygiène et de la sécurité (notamment surveillance de la stabilité de l'exploitation) que de celui des Installations Classées pour la Protection de l'Environnement dont cette carrière souterraine relève depuis 1993.

En avril 2000 et après de successives périodes de difficultés financières, compte tenu de la situation de la trésorerie de cette société, le tribunal de Grande Instance de Guingamp –section commerciale- prononçait la mise en liquidation judiciaire de la SARL « Ardoisières de Maël-Carhaix ».

Afin de prescrire à l'exploitant ou, à défaut, au détenteur du site, les mesures de sécurité nécessaires, la DRIRE de Bretagne a demandé l'avis de l'INERIS « *pour déterminer les mesures minimales qui permettraient d'assurer la sécurité du site notamment au regard de la stabilité des terrains, de la sécurité publique et de l'inaccessibilité des cavités souterraines* ».

Pour remédier aux difficultés juridiques, techniques et financières de cette affaire, la présente étude a pour objectif d'analyser :

- les conditions de la stabilité d'ensemble de l'exploitation et la détermination des zones d'influence (sous l'angle de la maîtrise de l'occupation locale des sols) ;
- les mesures techniques « minimales » de mise en sécurité du site (en particulier des têtes de puits) vis-à-vis des personnes pouvant y pénétrer de façon illicite ;
- les contraintes éventuelles de surveillance et d'urbanisme associées.

La mise en sécurité du site repose sur l'identification et la qualification des impacts résiduels prévisibles en surface liés à la présence des travaux souterrains susceptibles d'affecter à long terme les terrains au sein du périmètre concerné. En conséquence, il s'agit également de définir les mesures compensatoires de prévention permettant une mise en sécurité satisfaisante et adaptée au contexte.

## 2. METHODE D'ETUDE

---

Le présent rapport technique synthétise les travaux et analyses des données menés sur ce site par l'INERIS, en collaboration étroite avec la DRIRE de Bretagne. Il s'appuie sur plusieurs phases d'étude :

- une synthèse documentaire historique et informative avec consultation des plans et archives de la DRIRE de Bretagne et du fonds documentaire propre de l'INERIS. Elle vise à identifier les différentes méthodes d'exploitation opérées sur le site et à analyser les mécanismes de rupture potentiels au travers des événements passés ;

- une estimation des conditions de stabilité des cavités souterraines reposant sur l'analyse des plans d'exploitation et surtout sur les connaissances acquises par retour d'expérience sur les grands bassins ardoisiers d'Angers - Trélazé et de Segré (annexes 1 et 2) ;
- une évaluation des aléas du site et des impacts prévisibles sur la surface fondée sur l'identification des configurations d'exploitation et des scénarios de rupture susceptibles d'affecter chacune d'elles ;
- une représentation cartographique des aléas reposant sur une hiérarchisation des effets prévisibles dans le long terme ;
- une proposition de mesures compensatoires pour la mise en sécurité des personnes adaptées au contexte de l'exploitation et de ses conditions d'abandon ;
- une représentation cartographique des dispositions conservatoires de sauvegarde et d'aménagement de la surface.

On notera que la méthode d'évaluation du risque employée est fondée essentiellement sur l'analyse en retour d'expérience. Elle s'appuie d'abord sur une approche documentaire par dépouillement des archives et des données disponibles puis sur une analyse comparée de la géométrie des travaux d'exploitation au vu des plans et coupes disponibles mis à disposition par la DRIRE. Les résultats sont confrontés aux connaissances acquises par ailleurs sur les autres bassins de risques et types d'exploitation comparables.

### **3. CONTEXTE ET SITUATION DE L'EXPLOITATION**

---

#### **3.1 CADRE GEOGRAPHIQUE**

L'ardoisière de Moulin Lande est située sur la commune de Maël-Carhaix, au centre de la péninsule de Bretagne, à la limite sud-ouest des Côtes d'Armor (voir le plan de situation sur la figure 1).

Les Côtes-d'Armor recèlent un très petit nombre d'exploitations d'ardoise qui ont connu des fortunes diverses. Les plus importantes sont les ardoisières de Maël-Carhaix exploitées depuis le début du XXème siècle et celles de Plévin, plus récentes, mais aujourd'hui abandonnées, à l'exception de deux sites artisanaux exploités à ciel ouvert.

Le gisement de Maël-Carhaix fut l'objet, au cours du XXème siècle, de plusieurs exploitations et travaux de recherche. L'ardoisière de Moulin-Lande, à laquelle il faut rattacher celle de Kergonan (arrêtée en 1959), forme l'ensemble le plus connu, sous le nom « ardoisières de Maël-Carhaix » et qui fut, dans les années 1970, la plus importante de Bretagne. D'autres travaux, plus ou moins bien connus, sont repérés sur les sites de Coât-Maël, Kervaconan, Kervaderien, Bel-Air et Le C'hra (inventaire du BRGM, 1991).

Le site de l'ardoisière de Moulin Lande se présente dans un cadre environnemental typiquement rural qui s'inscrit dans le bocage breton. Légèrement vallonné, il est entouré de champs et de prairies.

La surface de l'ardoisière proprement dite n'est pas urbanisée, exception faite des anciens bureaux et bâtiments d'exploitation, aujourd'hui à l'état d'abandon. Aux alentours, on n'observe pas d'exploitations agricoles ou d'habitations en bordure du périmètre de l'exploitation, à l'exception de 5 ou 6 maisons pavillonnaires situées en bordure de la RD 11, au lieu-dit « Moulin de la Lande », dont la plus proche est située à environ 70 m des anciens travaux de Kergonan (puits Connan).

### 3.2 CADRE ADMINISTRATIF DE L'EXPLOITATION

La société des Ardoisières de Maël-Carhaix exploitait (jusqu'à l'année 2000) une carrière souterraine d'ardoise sur la commune Maël-Carhaix, au lieu-dit Moulin-Lande, conformément à l'arrêté préfectoral d'autorisation du 23 mai 1977, modifié les 23 novembre 1988 et 11 août 1998.

L'exploitation était autorisée sur une surface de 120 250 m<sup>2</sup> (parcelle cadastrale YD n° 34) pour une production maximale de 10 000 tonnes et une durée d'autorisation de 30 ans (figure 2 : limites d'exploitation).

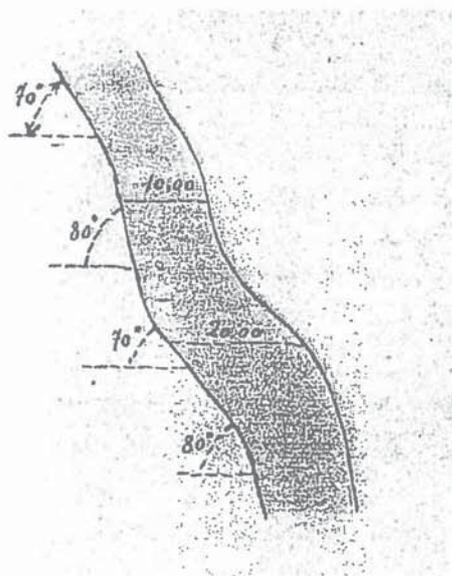
La société produisait trois qualités d'ardoises : fine, semi-épaisse et rustique, avec des caractéristiques « haut de gamme » (absence de pyrite et de carbonate de calcium). Le rendement de l'exploitation était exceptionnel (égal voire supérieur à 30%).

### 3.3 CONTEXTE GEOLOGIQUE

Le gisement de Maël-Carhaix comporte une veine d'ardoise orientée est-ouest, fortement pentée et assez puissante qui fut exploitée sur deux unités, Kergonan à l'ouest et Moulin Lande à l'est, sur une distance de 500 m environ et une profondeur de l'ordre de 200 m.

Le site ardoisier de Kergonan et Moulin-Lande, à Maël-Carhaix, appartient à la formation des schistes et grès du bassin de Châteaulin, rattachée au Carbonifère inférieur (Viséen-Namurien). La structure du gisement, fortement tectonisée, est complexe. Les veines ardoisières du bassin y sont toujours très redressées.

Par le déversement d'ensemble vers le nord du gisement, la veine pend vers le sud avec un pendage généralement compris entre 70 et 80° ; sa puissance (épaisseur) variant de 10 à près de 20 m, localement. La structure fortement plissée du gîte donne lieu à des configurations locales complexes formant des « plis en genou » (figure 3 : coupe BRGM).



*Schéma de la veine montrant les « plis en genou »  
(archives DRIRE)*

En effet, la veine, descendant presque verticalement jusqu'aux étages -85 ou -90 m, avec un léger pendage sud, se redresse en formant un « pli en genou » et se décale vers le nord de près de 30 m, voire 50 m. Après ce pli, elle reprend un pendage subvertical jusqu'à l'étage -160 m. Ces plis ne s'accompagnent pas d'une fracturation secondaire franchement marquée.

Cette veine est encaissée dans des terrains schisto-gréseux (formant les « épontes »), très mal reconnus, dont on ne connaît pas ou très peu les propriétés lithologiques et mécaniques (résistance).

La fracturation observée dans les chambres est celle de tout gisement ardoiser, mais apparaît assez régulière et espacée.

A l'échelle du bassin, les délits constituant les plus gros accidents sont des failles (« biais » ou « torsins ») formant des zones broyées sensiblement orientées NS ou NE-SW en direction, avec un pendage qui varie autour de 60° à 70°. Deux failles majeures séparent ainsi l'exploitation en deux, le secteur de Kergonan à l'ouest et de celui de Moulin Lande à l'est. Une autre grande faille subverticale, orientée NS, affecte la paroi ouest du « puits du milieu ».

Comme dans la plupart des gisements ardoisiers de ce type, on retrouve les trois familles de fractures habituelles des formations ardoisières : les fractures directionnelles (suivant sensiblement la direction de la veine, comme les « chauves » et les « rembrayures »), transverses (comme les « chefs » et les « feuilletis ») et subhorizontales (comme les « pladens »). Parmi ces fractures, les « chefs » sont très souvent pris pour former les parois est et ouest des chambres. A noter que les fractures transverses comme les « chefs » ou les « feuilletis » peuvent être dangereux pour la stabilité des « bardeaux » (piliers) dès qu'ils s'écartent de la verticalité. De leur côté, les fractures obliques ou plates, telles sur les « rembrayures » et les « pladens », peuvent affecter gravement la stabilité des voûtes et des stots (planches séparant des cavités superposées).

### 3.4 CONTEXTE D'EXPLOITATION

L'exploitation de Maël-Carhaix n'a jamais fait l'objet d'une étude géotechnique de stabilité. On ne dispose, en outre, que de très peu d'éléments permettant de qualifier la géométrie des travaux. Les plus tangibles sont les suivants :

- trois anciens plans d'ensemble datés de 1925 (figure 4), 1938 (figure 5) et 1942 ;
- un plan d'exploitation (à l'échelle du 1/500) daté de 1958, mis à jour en 1964. Sur ce plan, sont dessinés les bâtiments de surface, les chambres souterraines et les puits ;
- une coupe de la veine et un plan des travaux annexés au rapport du BRGM de 1971 ;
- un plan de géomètre daté de 1995. Ce plan très partiel ne concerne que trois chambres : la chambre en cours d'exploitation et deux anciennes chambres (n° 2 et 3). Ce plan n'aurait pas été achevé pour des raisons financières ;
- trois comptes rendus de visites effectuées avec les représentants de la DRIRE : visite de MM. Tincelin et Duchêne du 2 mai 1984 (ENS Mines de Paris), visite de MM. Tritsch et Al Heib du 24 novembre 1998 (INERIS), visite de M. Fine du 18 décembre 1998 (ENS Mines de Paris) ;
- des rapports des ingénieurs de la DRIRE de Bretagne (voir références bibliographiques).

L'ensemble des travaux d'exploitation (Moulin Lande et Kergonan) sous-mine les terrains de surface sur un peu plus de 2 hectares. On dénombre, sur le plan d'exploitation de 1958 (figure 6), une quinzaine de chambres, dont les plus profondes (« nouvelle chambre » de Kergonan et « chambre 0 ») sont descendues jusqu'au niveau -200 m environ. Les chantiers ont toujours été menés par la méthode des chambres descendantes non remblayées et laissent des cavités de grandes dimensions, vides ou ennoyées. Les plans ne révèlent ni de véritable stratégie d'exploitation ni de schéma de dimensionnement précis. Ils indiquent la présence sur le site d'au moins 4 puits, plus un ancien fond dit « puits Lucas ». L'exploitant fournit les renseignements suivants :

- le Puits Connan à Kergonan (hauteur : 90 m, travaux à -220 m) de section rectangulaire (6 m x 3 m, environ), fut foncé en 1919 et arrêté en 1958 ;
- le « Puits du Milieu », ou puits n° 1, (travaux à -178 m, environ) correspond en fait à un ancien fond (équipé en surface d'un pont roulant) plutôt qu'à un véritable puits. Ouvert en 1920 et arrêté en 1959, les abords de ce puits se présentent en surface sous forme d'un entonnoir de 25 m de diamètre. La tête de puits proprement dite, actuellement inaccessible pourrait, d'après le plan d'exploitation, atteindre 8 m de côté ;
- le « Puits d'en Haut » ou « Puits du Haut » ou encore puits n° 3 (-70 m), fut foncé en 1930, arrêté en 1938 et repris temporairement vers 1970. Il s'agit d'un puits rectangulaire de 7 m x 4 m. Il serait remblayé avec des déchets d'ardoise (ce qui n'apparaît pas sur les plans) ;
- le « Puits de la Prairie », ou puits n° 2, (palier à 60 m, fond à 200 m), foncé en 1928 et arrêté en 2000, est un puits carré de 4 m x 4 m ;
- l'ancien fond dit « Puits Lucas » (fond descendant sous voûte à 92 m), foncé en 1903 et arrêté en 1928, serait aujourd'hui comblé.

La visite au fond réalisée par l'INERIS en 1998 avait permis de se faire une idée de la situation de l'époque. Le parcours fut le suivant : descente par le puits dit « Puits du Milieu » (niveau -60 m), visite des chambres 2, 3 et 4, ainsi que du puits de secours se trouvant dans le secteur de la chambre 7, de la chambre en cours d'exploitation (« chambre 0 ») au niveau actuel (-200 m), des chambres I, II et III. Les observations principales furent les suivantes :

- le pilier entre les chambres 2 et 3 était très endommagé, avec des ruptures suivant un plan de discontinuité. Cette zone avait été renforcée par boulonnage avec une densité très variable ;
- un plan d'eau existait dans la chambre 3 (de profondeur inconnue). Cette chambre, remblayée d'après le plan, aurait (d'après l'exploitant) été déblayée afin d'en reprendre l'exploitation ;
- la chambre 0, la seule en cours d'exploitation à l'époque de la visite (niveau -200 m) montrait des instabilités locales (porte-à-faux d'une longueur importante sans boulonnage). Nous avons noté que la reprise de la chambre 0 fut à l'origine de l'accident mortel de 1979 par éboulement d'un bloc de 50 à 60 m<sup>3</sup> au niveau du stot la séparant de la chambre n° 5, dite « chambre noyée » (archives DRIRE, 1980) ;
- les chambres I, II et III étaient invisibles en raison de l'humidité ambiante. D'après un rapport du BRGM (1971), les chambres I, II, et III furent abandonnées à cause de la mauvaise tenue de la roche ;
- l'exploitant utilisait des boulons à ancrage ponctuel, de longueurs variables (entre 1,5 et 5 m), en fonction du besoin.
- la surveillance de la stabilité était assurée par l'exploitant au moyen de témoins au suif

placés dans une galerie entre les chambres II et III.

D'une façon plus générale, de l'avis de tous les experts, on peut en tirer les principaux enseignements suivants :

- l'exploitation du gisement fut désordonnée et archaïque (vieux fonds sous voûtes et chambres exploitées par la méthode descendante sans remblayage) ;
- le suivi topographique fut très insuffisant et le schéma d'exploitation général des ouvrages souterrains trop imprécis et donc non fiable. D'autre part, les plans d'archives disponibles (1925, 1938, 1942) ne concordent pas toujours avec le plan d'exploitation en vigueur (1958) sur la géométrie et le dimensionnement des ouvrages des vieux travaux (Puits du Milieu, 1920 à 1959) ;
- la surveillance des travaux fut insuffisante ;
- la sécurité des chantiers fut précaire, etc.

#### **4. METHODES D'EXPLOITATION ET MECANISMES DE RUPTURE SYMPTOMATIQUES DES ARDOISIÈRES**

---

La méthode d'évaluation des aléas, déclinée par la suite, repose sur deux approches (Guide Méthodologique PPR, 1999).

La première approche, fondée sur le retour d'expérience (historique de l'exploitation et des événements accidentels passés), consiste à étudier les méthodes d'exploitation et les mécanismes de rupture symptomatiques qui leur sont rattachés. En l'absence d'antécédents identifiés sur le site, on peut, par « similitude », se référer à d'autres bassins de risque présentant des configurations similaires sur les plans géologique, géomorphologique, hydrogéologique et structural. Les bassins de risque de référence correspondent ici aux bassins ardoisiers d'Angers et de Segré. L'objectif recherché est d'identifier et qualifier des configurations d'exploitation caractéristiques et leur « prédisposition » face à un risque de rupture. Cette analyse est décrite dans les annexes 1 et 2.

La seconde approche repose sur la vraisemblance de scénarios accidentels hypothétiques, analysés à partir de l'histoire et la description des configurations d'exploitation propres au site. L'objectif recherché est de définir, selon les différentes configurations, le plus fort événement potentiel vraisemblable, même en l'absence d'antécédents identifiés. Cette analyse est développée ci-dessous.

#### **5. HISTORIQUE ET CONFIGURATIONS D'EXPLOITATION DE L'ARDOISIÈRE DE MAËL – CARHAIX**

---

Les données historiques relatives aux travaux souterrains de l'ardoisière de Maël-Carhaix sont tirées du rapport du BRGM de 1971 et complétées par des renseignements de nature géométrique (dimensions des ouvrages) et d'exploitation, consignés dans les diverses archives de la DRIRE (notes, rapports et plans 1925, 1938 et 1942).

Cet historique permet de mieux comprendre le développement de l'exploitation et de définir une typologie des cavités à partir des configurations des travaux. La synthèse, traduite dans l'optique d'une évaluation des risques à long terme, est établie au chapitre 6. Elle se base sur l'analyse des scénarios d'accident examinés précédemment (chapitre 4) et des configurations

d'exploitation du site identifiées dans ce chapitre.

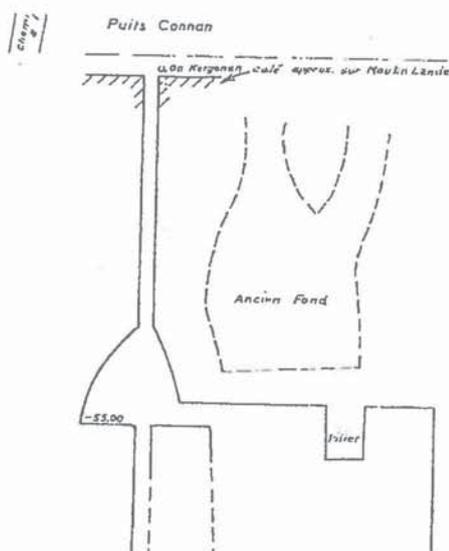
On se reportera au plan d'ensemble de l'ardoisière de 1958 (représenté sur la figure n° 6) pour mieux comprendre l'historique des travaux détaillée dans les paragraphes suivants.

### 5.1 LA PERIODE ARCHAÏQUE DES FONDS SOUS VOUTE (1903 –1928)

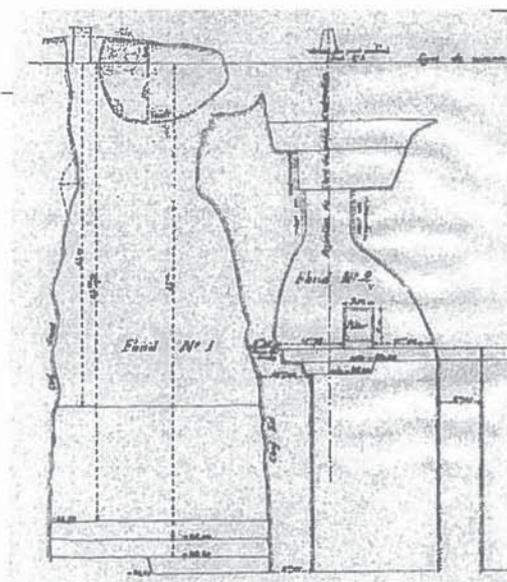
Le début des travaux sur les exploitations de Moulin-Lande et Kergonan semble remonter au début du XXème siècle. L'ardoise était extraite dans deux carrières exploitées par « fonds descendants sous voûte » (ou « puits bouteilles »), méthode archaïque utilisée au XIXème siècle et définitivement abandonnée dès 1901 dans les bassins ardoisiers du Maine-et-Loire (annexe 1). Ces deux premières carrières sont : l'ancien fond de Kergonan à l'ouest (profondeur de 50 m) et celui de Moulin-Lande dit « Puits Lucas », plus à l'est (voir plan, figure 6). Ce dernier fond atteignit une centaine de mètres de profondeur (archives DRIRE, 1925). Les voûtes étaient établies très près de la surface (une dizaine de mètres environ).

On ne connaît pas les conditions d'abandon du vieux fond de Kergonan.

Sur le site de Moulin-Lande, l'ouverture en 1920 du fond n° 2, dit « Puits n° 1 » (aujourd'hui « Puits du Milieu »), à l'est de l'ancien Fond Lucas, permit l'exploitation (anarchique) de la chambre n° 1 (« nouveau fond »), entre les niveaux -40 m et -100 m (les niveaux sont repérés par rapport à une cote zéro de référence située au Puits d'en Haut).



*Secteur de Kergonan  
Vue de l'ancien fond sous-miné par la première  
chambre descendante*



*Secteur du Puits du Milieu (détail du plan 1925)  
Vue des vieux fonds descendants sous voûte  
(fond n° 1 dit « Puits Lucas » et fond n° 2)*

La configuration particulière de ces travaux attira rapidement l'attention du Service des Mines qui précise dans son rapport de 1925 : « par suite de l'étendue exagérée des parois en surplomb (respectivement 37 et 28 m) et de l'insuffisance de l'épaisseur du bardeau séparant les deux chambres (moins de 6 m), il y aurait lieu, si l'exploitation se poursuivait dans ces conditions, de redouter un effondrement qui entraînerait la maison d'habitation située au-dessus de l'excavation » (figure 4).

Pour remédier à ce risque, on décida d'évacuer la maison, d'abandonner et de remblayer le vieux Fond Lucas. En outre, le Service des Mines (archives DRIRE, 1925) imposa que la

largeur minimale des bardeaux soit portée à plus de 8 m (elle devrait être en principe égale à 10 m), en précisant que : « *cette épaisseur est un minimum que nous n'admettons a priori qu'en raison de la solidité du schiste* ». Concernant les ouvertures dans les bardeaux : « *il conviendra que ces ouvertures soient, au double point de vue de leur nombre et de leur section, aussi limitées que possible et qu'elles soient pratiquées exclusivement au pic* ».

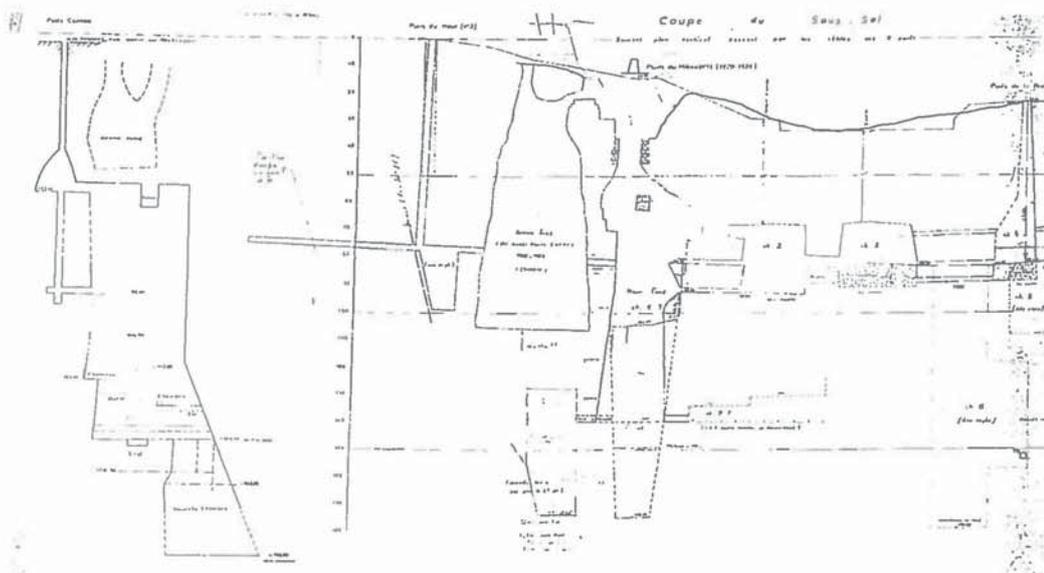
En outre, le Service des Mines jugeait indispensable « *qu'une issue de secours soit réalisée à l'extrémité du champ d'exploitation en cas d'effondrement de la chambre est actuelle* » (du fond n° 2). Le « puits de la Prairie » (puits n° 2) fut foncé dans cette optique en 1928, à 150 m de l'ancien puits.

## 5.2 LES CHAMBRES DESCENDANTES (1928-1952)

### *Site de Kergonan*

Le Puits Connan fut foncé en 1920 près de l'ancien fond sous voûte de Kergonan (du même âge que le Fond Lucas), à 200 m environ à l'ouest de Moulin-Lande. L'exploitation débuta par une première grande chambre descendante autour du niveau -80 m, qui s'approfondit en s'élargissant vers l'est (à la cote -120 m) par l'ouverture de deux chambres successives et contiguës est et ouest. La largeur de la cavité atteindra en 1943 une quarantaine de mètres à la cote -140 m. Cette chambre unique de près de 100 m de hauteur, et laissée vide, n'est séparée de l'ancien fond sous voûte que par un stot de moins de 10 m d'épaisseur (d'après le plan d'exploitation daté de 1958, figure 6, et le plan figurant dans le rapport BRGM de 1971, figure 7).

A cette date, une dernière chambre (« nouvelle chambre ») est exploitée en s'approfondissant jusqu'au niveau -200 m. L'exploitation est définitivement arrêtée en 1959, à ce niveau, en abandonnant les chambres en l'état, c'est-à-dire vides et progressivement ennoyées jusqu'à la cote -50 m, environ (d'après le plan BRGM de 1971).



**Exploitation par chambres descendantes entre 1928 et 1952  
sur les secteurs de Kergonan (à gauche) et de Moulin-Lande (à droite)**

Cette exploitation a toujours eu tendance à obliquer vers l'est, l'ouest se révélant assez défavorable, sans que l'on sache vraiment pourquoi (fracturation importante du rocher ou mauvaise qualité de l'ardoise ?).

### **Site de Moulin-Lande**

C'est à la suite de l'intervention du Service des Mines en 1925, relative aux dimensions des ouvrages (§ 5.1), que furent ouvertes, à la cote -68 m environ, les trois chambres (n° 2, 3 et 4), à l'est du Puits du Milieu. Ces trois chambres situées à la profondeur moyenne de -90 m furent rapidement abandonnées (vers 1936) pour des problèmes d'exploitation (mauvaise tenue du rocher) et (très) partiellement remblayées.

Probablement juste après, le Puits du Milieu était approfondi jusqu'au niveau -140 m et une grande chambre (n° 6 ?) était ouverte sous l'ancien « Fond Lucas » en laissant un stot séparatif de l'ordre de 10 m (au vu du plan d'archives DRIRE, daté 1938, représenté sur la figure 5). Puis deux petites chambres (chambre n° 7 et « 8 ? ») furent prises à l'est, en descendant, et rapidement abandonnées (en 1945), en dessous de la cote -140 m, sans que l'on ne sache pourquoi ni dans quelles conditions. Le puits fut approfondi jusqu'au niveau -170 m puis abandonné. D'après le plan annexé au rapport du BRGM (figure 7), ces anciens travaux semblent avoir été laissés en l'état (c'est-à-dire non remblayés) et ennoyés (jusqu'à la cote -110 m environ).

Pour améliorer la production, les exploitants de Moulin-Lande avaient décidé, autour de 1930, de foncer un nouveau puits (dit « Puits d'en Haut ») entre le Puits du Milieu et Kergonan, jusqu'au niveau -80 m. Le secteur se révéla faillé. Tout en exploitant une petite chambre très près de l'ancien Fond Lucas (séparée par un bardeau de moins de 8 m de large), ils tracèrent une galerie de reconnaissance vers les travaux de Kergonan. La galerie recoupa une roche de qualité médiocre (nombreux délits et failles) et toucha une importante fracture. L'exploitation du secteur fut abandonnée vers 1938 et reprise vers 1970, sans que l'on ne connaisse le traitement final des chantiers.

L'exploitation de Moulin-Lande se reporta alors vers l'est du gisement à partir du « Puits de la Prairie » (1928), qui était encore en fonctionnement en 2000. Ce puits débouchait au niveau -80 m dans l'ancienne chambre n° 4. Une grande chambre fut ouverte à ce niveau, en 1936, (chambre 5 dite « chambre noyée ») et abandonnée en l'état (vide) en 1952.

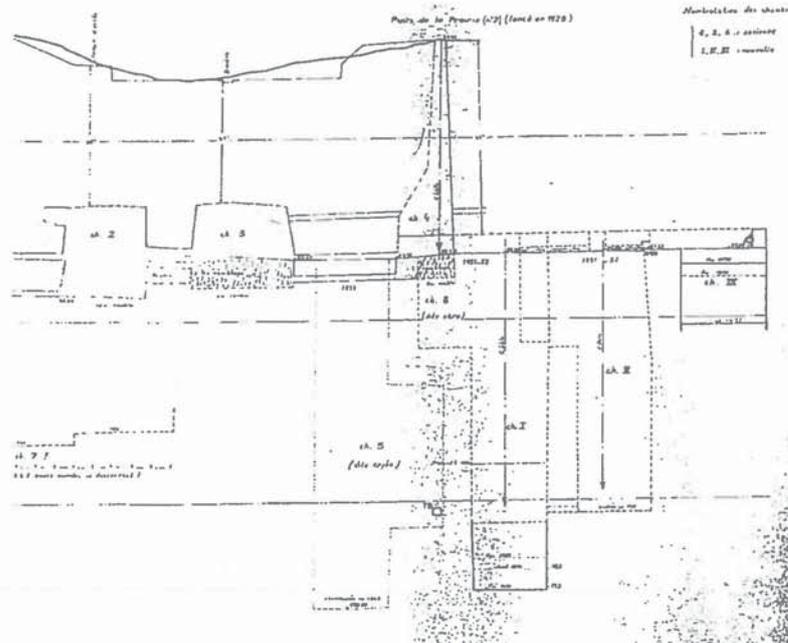
### **5.3 LES DERNIERES CHAMBRES DESCENDANTES (1952-2000)**

De 1952 à 1972, l'exploitation fut menée de façon plus rationnelle avec l'ouverture d'ouest en est de trois grandes chambres : les chambres I et II ouvertes vers 1952 et abandonnées respectivement en 1970 (à -178 m) et en 1966 (à -153 m), puis la chambre III (1970-1972) abandonnée prématurément à la cote -102 m.

Dans la période 1970-1989, nous n'avons, sur la poursuite de l'exploitation, que des informations très diffuses émanant des rapports des ingénieurs des Mines et de quelques courriers de l'exploitant (archives DRIRE citées en références bibliographiques).

Il semble que l'exploitation se heurta à de sérieux problèmes de gisement et fut conduite de façon désordonnée et probablement artisanale dans les dernières chambres encore exploitables. Elle fut même arrêtée provisoirement de 1985 à 1989.

Au début des années 1970, des travaux furent entrepris dans la chambre n° 8, dite « chambre 0 » dans des conditions délicates. Faute de gisement, ces travaux paraissaient de nature à permettre à la société exploitante de résoudre temporairement ses difficultés financières (archives DRIRE, 1971).



*Les dernières chambres descendantes prises à partir du Puits de la Prairie entre 1952 et 1970*

La chambre 0 constitue une partie « en repli » de l'exploitation de la chambre I et est située à l'ouest de celle-ci. Coincée entre les chambres I et n° 5 (dite « chambre noyée ») et en partie sous-cavée par cette chambre, son exploitation posait de sérieux problèmes par la forte imbrication des travaux et surtout par le manque de relevés géométriques précis. Le rapport de l'Ingénieur en Chef des Mines, M. Gonnet, de 1971, émit la décision d'arrêt des travaux dans la chambre 0 et souligna « *que la poursuite des travaux dans les conditions adoptées par l'exploitant ne pouvait que compromettre de façon définitive et à bref délai la sécurité de l'ensemble du personnel et la conservation même de l'exploitation de l'Ardoisière de Moulin-Lande* ».

Pour compenser ce manque de production, il semble que l'exploitation se soit poursuivie par l'approfondissement de plusieurs chambres. Ainsi, la chambre III fut reprise en passant l'accident structural mentionné par le BRGM (rapport de 1971). Une note de l'exploitant (datée de 1980) indique ainsi que cette chambre III a atteint la profondeur sous voûte de 50,6 m (soit la cote -132 m) et que la chambre 2 fut reprise également jusqu'à la profondeur de 27,8 m à partir de la collectrice (cote proche de -120 m ?), laissant un stot d'épaisseur inconnue au-dessus de l'ancienne chambre n° 7. Il est probable que l'ancienne chambre n° 3 ait également fait l'objet d'une reprise d'exploitation malgré la faible épaisseur du bardeau (6 m, environ) la séparant de la chambre 5 dite « chambre noyée » (archives DRIRE du 27 novembre 1972).

Tous ces importants travaux n'ont pas été représentés sur les plans d'exploitation fournis à la DRIRE. On ne connaît donc ni la géométrie exacte des cavités, ni leurs limites, ni les dimensions des bardeaux et des stots séparatifs, éléments qui conditionnent la stabilité générale de l'exploitation.

Pendant ce temps il est proposé un nouveau projet d'exploitation du second pli du gisement exploité dans la chambre I, mais non exploité dans la « chambre noyée », malgré une analyse défavorable du BRGM consignée dans le rapport de janvier 1972 (archives DRIRE, 1976). La poursuite des travaux de reconnaissance s'effectuera dans des conditions difficiles comme en témoigne l'éboulement localisé du stot séparant la « chambre noyée » de la « chambre 0 » se traduisant par l'accident mortel du 2 juillet 1979 (archives DRIRE, 1979).

En 1984, le rapport de l'ENS Mines de Paris (MM. Tincelin et Duchêne) indiquait que l'exploitant envisageait la mise en exploitation d'une chambre dite « chambre 0 prolongée » dans la masse du pli horizontal, en prolongement de la « chambre 0 ». Le rapport mentionnait le problème de la stabilité générale de l'exploitation en précisant que « *cet ensemble : chambre I, chambre 5, chambre 0 verticale et chambre 0 prolongée délimite un volume qui peut paraître trop exploité et donc susceptible de bouger et même de s'effondrer* ».

On ne connaît pas exactement la date de mise en exploitation de la chambre 0, mais la rentrée sous voûte dans le second pli de la veine était entamée en 1984 (rapport de visite de la DRIRE du 27 janvier 1984, archives DRIRE, 1984). Il indiquait que le bardeau laissé entre l'ancienne chambre noyée et la chambre 0 serait de 8 m environ. Toutefois la superposition du plan topographique de 1995 (plan Revenot) à l'ancien plan original de l'exploitation de 1958 au 1/500<sup>ème</sup> montre que la largeur résiduelle du bardeau devait être, en fait, très sensiblement inférieure à 8 m (peut-être moins de 5 m) en bien des endroits (voir plan 1958 modifié, figure 6). En 2000, la profondeur finale de la chambre se situait probablement légèrement en dessous de la cote -200 m.

A l'occasion d'une visite effectuée sur le site en 1998, M. Fine (ENS Mines de Paris) concluait dans son rapport que : « *les risques d'instabilité globale lui paraissaient très faibles sous réserve d'une meilleure connaissance de la géométrie des vides par un relevé topographique précis. En effet un risque d'instabilité existerait si l'épaisseur des bardeaux séparant les chambres adjacentes de la chambre 0 s'avérait inférieure à 10 m* » (Fine, 1998).

Cette dernière remarque est en parfait accord avec notre analyse relative à l'évaluation de la stabilité des ouvrages souterrains ardoisiers en fonction de leur dimensions (détaillée en annexe 2). Elle confirme aussi que le risque existe bien en l'occurrence puisque la largeur des bardeaux n'excède guère 7 à 8 m dans le secteur des chambres 5 à III, desservies par le Puits de la Prairie (au vu du plan d'exploitation de 1958).

## 6. SYNTHÈSE : EVALUATION DES ALEAS

---

### 6.1 PRINCIPE DE L'ANALYSE

L'évaluation des aléas résultant de la présence de cavités souterraines a pour but d'identifier les zones susceptibles de mettre en péril, à terme, les personnes et les biens exposés en surface.

Ce résultat est atteint en procédant, par sectorisation, à une analyse des scénarios d'accidents prévisibles et des conséquences attendues en surface. Cette analyse est établie à partir des configurations (typologie) et des dimensionnements (facteur de prédisposition) des exploitations. Chaque secteur est qualifié par un « *aléa de référence* » spécifique qui est classiquement évalué à partir du croisement de l'intensité ou de la gravité du phénomène attendu (dommages matériels ou pertes humaines potentiels) avec la probabilité d'occurrence qui lui est associée (matérialisée ici par la notion de prédisposition).

La notion d'aléa de référence est utilisée ici en se plaçant dans une optique d'analyse à long terme. En effet, l'aléa de référence est défini comme « *le plus fort événement historique connu dans le site, sauf si une analyse spécifique conduit à considérer comme vraisemblable à échelle centennale, ou plus en cas de danger humain, un événement de plus grande ampleur* » (Guide méthodologique PPR, 1999).

## 6.2 IDENTIFICATION DES CONFIGURATIONS DEFAVORABLES ET DES SCENARIOS ACCIDENTELS PREVISIBLES

En référence à la synthèse des phénomènes accidentels opérée sur les bassins ardoisiers de la région d'Angers (annexes 1 et 2), l'analyse historique des conditions d'exploitation menée sur le site de Maël-Carhaix fait apparaître plusieurs configurations à risques susceptibles de provoquer des désordres, voire des effondrements, en surface.

Ces configurations défavorables à la stabilité sont les suivantes :

- type I : anciens fonds (remblayés ou non) sous-minés par de grandes chambres descendantes laissées vides ;
- type II : anciens fonds sous voûtes (remblayés ou non) contigus, localement sous-minés par de grandes chambres descendantes laissées vides ;
- type III : chambres descendantes non remblayées, contiguës et fortement imbriquées, situées à relativement faible profondeur (30 à 40 m).

Configurations	Mécanismes de rupture possibles	Nature ou intensité du phénomène
Type I	Rupture du stot séparatif entraînant la rupture du fond (voir l'exemple donné sur la figure 5 de l'annexe 2)	Effondrement localisé
Type II	Rupture du stot séparatif ou des bardeaux entraînant la rupture du fond (voir l'exemple donné sur la figure 7 de l'annexe 2)	Effondrement localisé ou en masse
Type III	Rupture des bardeaux entre chambres entraînant la rupture des terrains de surface (voir l'exemple donné sur la figure 6 de l'annexe 2)	Effondrement en masse

*Tableau 1 : Intensité prévisible des phénomènes en fonction des configurations d'exploitation*

Ces configurations représentent la quasi-totalité des exploitations de Maël-Carhaix, à l'exception de la zone non exploitée comprise entre la limite de l'exploitation de Kergonan et le Puits n°3 (ou « Puits du Haut ») de Moulin-Lande.

En outre, la plupart des ces exploitations ne répondent pas aux critères dimensionnels de stabilité à long terme des ouvrages souterrains définis par rétro-analyse (annexe 2) et rappelés dans le tableau suivant :

Paramètres de dimensionnement (rétro-analyse historique)	Probabilité de rupture à long terme			
	forte	Moyenne	Faible	Nulle à très faible
Largeur des bardeaux (m)	< 7	7 - 10	10 - 15	> 15
Epaisseur des stots entre exploitations superposées (m)	< 15	15 - 20	>20	>> 20

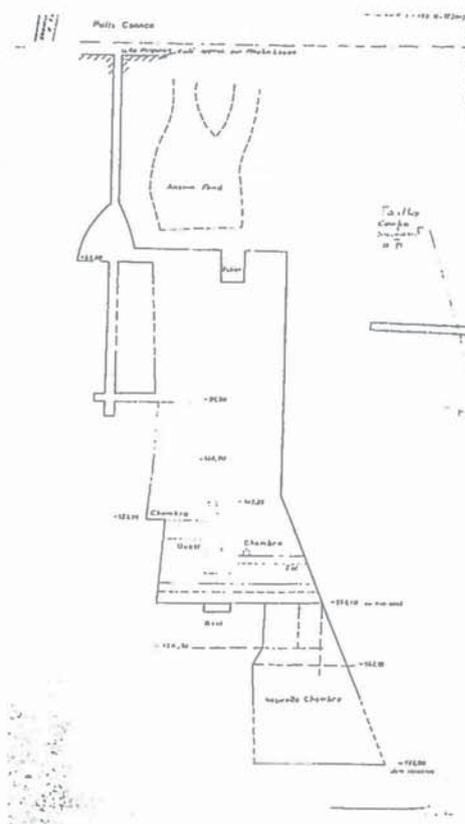
*Tableau 2 : Facteurs de prédisposition déduits des dimensions des ouvrages*

### 6.3 ZONAGE ET QUALIFICATION DES ALEAS

L'analyse de la typologie des configurations permet de décomposer l'exploitation de Maël-Carhaix en trois ensembles distincts :

#### a) Le secteur de Kergonan à l'ouest

Ces anciens travaux sont caractérisés par la présence, près de la surface (moins de 20 m), d'un vieux fond (au traitement inconnu) sous-miné par une très grande chambre descendante de près de 140 m de profondeur, laissée vide et ennoyée (configuration de type I).



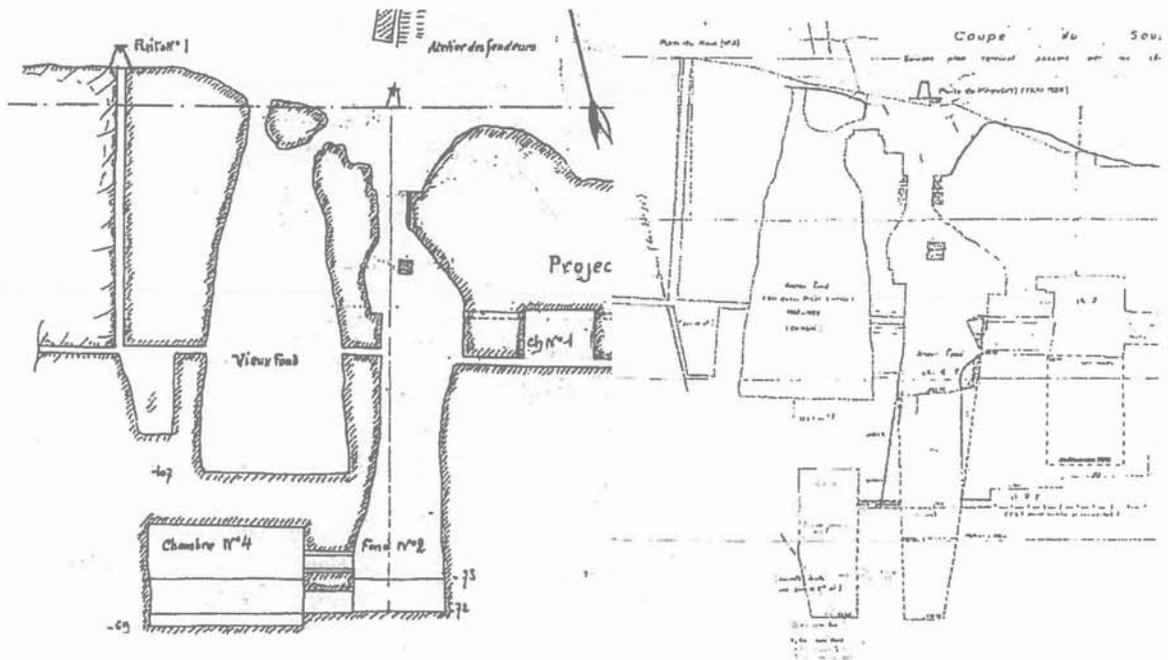
*Vue d'ensemble du secteur de Kergonan  
(Détail du plan établi en 1958)*

La distance entre épontes (longueur) est de l'ordre de 35 m et la largeur de 40 m environ. L'épaisseur du stot séparatif entre le vieux fond et la grande chambre serait d'une dizaine de mètres au vu du plan d'exploitation de 1958 (figure 6), mais seulement de 5 à 6 m au vu du plan au 1/2500<sup>ème</sup> du BRGM de 1971 (figure 7).

Ces éléments font considérer comme possible à probable, à long terme, le scénario d'une rupture du stot séparatif entraînant la rupture du vieux fond et l'effondrement des terrains de surface à l'aplomb de la chambre (tableaux 1 et 2). La zone effondrée pourrait alors atteindre une quarantaine de mètres de diamètre. Par son intensité et sa probabilité d'occurrence (prédisposition), l'aléa de ce secteur peut être qualifié de fort.

**b) Le secteur du Puits du Milieu de Moulin-Lande**

Ce secteur correspond à l'ensemble des travaux compris entre le Puits du Haut et l'ancienne chambre n° 2. Il intègre les vieux fonds sous voûte du Puits Lucas (ancien fond n° 1) et du Puits du Milieu (ancien fond n° 2), la chambre n° 2 et les chambres descendantes les sous-minant (chambres n° 1, 4 ou 6 et 7). Au vu du plan d'exploitation de 1958, seul l'ancien fond n° 1 (Puits Lucas) aurait été comblé (sur ordre du Service des Mines).



*2 coupes du même secteur du Puits du Milieu (détail du plan 1938, à gauche, et du plan 1958, à droite)*

L'analyse historique a montré que la stabilité de tous ces travaux pouvait être qualifiée de précaire en raison de leur forte imbrication, dont témoigne la trop faible épaisseur des bardeaux et des stots séparatifs, et de l'abandon des chambres descendantes laissées vides. On note, en particulier, que le bardeau entre les deux vieux fonds varie entre 5 et 10 m (au maximum) et que l'épaisseur des stots, séparant la chambre n° 4 du vieux fond n° 1 ou la chambre n° 7 de la chambre n° 2, ne dépasse pas 10 m. On notera, en outre, que la voûte du fond n° 1 n'excède pas 15 m d'épaisseur, ce qui est peu.

Un rupture locale du bardeau séparatif (ou du stot) entraînerait très probablement la ruine des deux vieux fonds, le déversement des remblais (du Puits Lucas) dans les chambres et l'effondrement des terrains de surface à l'aplomb des vieux travaux. Une rupture de cet ensemble pourrait déstabiliser la chambre adjacente n° 2 sous-minée par la chambre n° 7 (de profondeur inconnue).

Un tel scénario se traduisant par un effondrement en masse en surface ne peut être écarté à long terme au vu des données des tableaux 1 et 2. Là encore, par son intensité et sa probabilité d'occurrence (prédisposition), l'aléa de ce secteur peut être qualifié de fort.

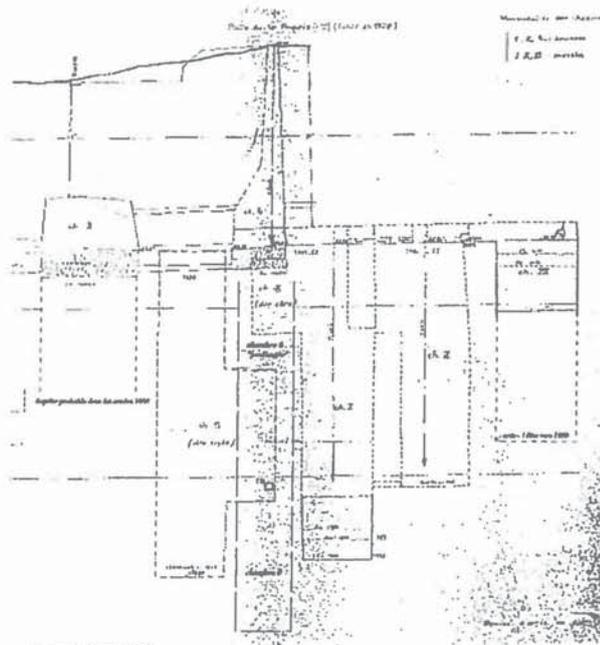
**Cas de chambres n° 2 et 3**

Les chambres n° 2 et 3 sont situées dans une zone apparemment moins exploitée, plus homogène et plus distante des vieux fonds. On peut raisonnablement penser que la chambre n° 2 présente moins de menace pour la surface, compte tenu de l'épaisseur des bardeaux

(10 à 12 m) et de la hauteur du recouvrement (35 m), lui-même moins perturbé par les exploitations. Il en est de même pour la chambre n° 3, à condition que les travaux d'approfondissement (opérés dans les années 1970-1980) n'aient pas trop entamé le bardeau (normalement large de 8 à 10 m) la séparant de la chambre n° 5 (dite « chambre noyée »). On pourrait alors considérer (tableau 2) que la situation de ces deux chambres est moins défavorable que celle des vieux fonds et qualifier l'aléa local, au droit de celles-ci, de moyen.

### c) Le secteur du Puits de la Prairie ou secteur est de Moulin-Lande

Ce secteur correspond aux derniers travaux menés essentiellement par grandes chambres descendantes à partir du Puits n° 2 (Puits de la Prairie). Il comprend l'ancienne chambre n° 4, prise à partir du puits n° 1, les chambres plus récentes n° 8, I, II, II et la dernière chambre exploitée dite « Chambre n° 0 prolongée », largement décrite dans l'historique (§ 5.3). La hauteur du recouvrement au-dessus des voûtes est comprise entre 35 et 50 m, ce qui représente approximativement la hauteur non exploitée de la veine du fait de l'altération du matériau (rapport BRGM, 1971).



*Vue du secteur du Puits de la Prairie  
montrant l'approfondissement supposé des chambres entre 1970 et 2000  
(détail du plan 1958, modifié)*

La caractéristique principale de cet ensemble est l'extrême imbrication des chambres, surtout à l'aplomb du puits d'accès, imbrication qui résulte en grande partie du creusement de la chambre n° 0, coincée entre les chambres n° 5 et I. On peut affirmer, sans risque de se tromper, que tous les bardeaux, séparant les chambres entre elles, ont systématiquement une largeur inférieure à 8 m. Il est même très probable, au vu du plan d'exploitation 1958 « modifié », que la largeur de certains bardeaux atteint localement 5 ou 6 m, ce qui est très insuffisant. Ceci est particulièrement vrai pour le bardeau séparant la chambre n° 0 de la chambre n° 5 et peut-être de celui séparant la chambre n° 5 et la chambre n° 3, reprise tardivement dans des conditions inconnues (archives DRIRE, 1997 et Tritsch – Al Heib, 1998).

Précisons que ces chambres laissées vides atteignent des hauteurs sous voûte relativement importantes (60 à 140 m environ).

L'évènement redouté serait une rupture des bardeaux les plus faibles au niveau de la chambre n° 0. Il aurait pour conséquence l'éboulement des chambres les plus imbriquées qui sont également les plus profondes (chambres n° 5, 0, I) dont on peut craindre une évolution du phénomène sur les chambres voisines n° 3 et II. Compte tenu du volume des vides des cavités concernées et de la relativement faible hauteur de recouvrement, le phénomène se traduirait par un effondrement en masse des terrains de surface au droit de celles-ci.

Pour ces raisons (très forte imbrication des travaux, largeur des bardeaux insuffisante, extension importante des travaux, altération du soutènement, en particulier des boulons), l'aléa de ce secteur peut être qualifié de fort en particulier dans la zone des chambres n° 4, 5, 0, I et II.

### *Cas de la chambre n° III*

La configuration de la chambre III paraît un peu moins défavorable et assez semblable à celle des chambres n° 2 et 3. L'aléa pourrait y être qualifié de moyen.

## **6.4 CAS DES OUVRAGES DEBOUCHANT AU JOUR (PUITS)**

Une visite du site, effectuée le 25 avril 2003 avec la DRIRE de Bretagne, a permis d'examiner les lieux (terrains de surface) et les têtes de puits encore accessibles. Les principales observations sont les suivantes :

- il y a bien 4 puits sur le site et très vraisemblablement seulement 4 puits (décrits au § 3.4) ;
- parmi ces 4 puits, 2 sont toujours facilement accessibles (le Puits Connan à Kergonan et le Puits de la Prairie). On peut, sans difficulté, en observer les chevalements et leurs orifices, toujours ouverts, en surface (photos n° 1 à 4). Un grillage léger en protège plus ou moins symboliquement les accès ;
- les deux autres puits, le Puits d'en Haut (ou puits n° 3) et le Puits du Milieu, sont actuellement rendus inaccessibles par une végétation (formée essentiellement d'ajoncs) difficilement pénétrable ;
- le Puits d'en Haut n'est plus observable. Son chevalement a été démantelé et la végétation masque la tête du puits. Il aurait été remblayé avec des déchets d'ardoise. Il serait nécessaire de débroussailler son emplacement (avec prudence) pour le localiser et examiner son état ;
- le Puits du Milieu est particulier et ne laisse d'observable que son chevalement situé au bord d'un pan vertical (photos n° 5 et 6). Le câble encore présent atteignait le puits proprement dit à une vingtaine de mètres sous le chevalement (photos n° 7 et 8). Ce puits correspondait, en fait, à un ancien fond, plutôt qu'à un véritable puits, qui se présentait en surface sous forme d'un entonnoir de 25 m de diamètre (d'après le plan d'exploitation et les descriptions d'archives). L'accès devait se faire par un sentier étroit et raide descendant sur les flancs de cet entonnoir qui n'est plus praticable du fait de la végétation. Cet endroit paraît très dangereux, pour une personne qui s'y aventurerait, par sa configuration et la présence de l'orifice du puits probablement toujours ouvert. La condamnation de l'accès à cette zone est indispensable.

## 6.5 IMPACTS LIES A LA REMONTEE DES EAUX

Nous ne disposons pas d'informations fiables sur l'hydrogéologie du site autres que quelques éléments fournis par l'exploitant qu'il convient de prendre avec prudence.

### a) Impacts quantitatifs

On peut raisonnablement considérer, au vu des plans d'exploitation, que les deux exploitations de Kergonan et de Moulin-Lande sont séparées et indépendantes sur le plan hydrologique, malgré la présence d'une galerie de reconnaissance tracée à partir du Puits d'en Haut mais arrêtée sur une faille majeure à une quinzaine de mètres des travaux de Kergonan.

D'après l'exploitant (note de mai 1999 concernant les garanties financières présentant en annexe 3 des résultats d'analyse), il semble que le niveau de remontée des eaux après l'abandon de l'exploitation se situerait à peu près à -20 m sous le terrain naturel (la fiabilité de cette indication est incertaine). On pourrait en conclure que l'ensemble des travaux est ou sera donc ennoyé par la remontée des eaux. Le niveau d'équilibre final serait donc situé à peu près au niveau de la cote de la rivière figurée sur le plan au 1/500<sup>ème</sup> de 1964 (cote -28 m donnée par rapport à la cote 0 de référence de la carte).

On sait que l'ennoyage des travaux est un facteur défavorable sur la stabilité à long terme des travaux, soit par remobilisation des remblais (comme par exemple dans l'ancien fond dit Puits Lucas), soit par altération physico-chimique du matériau (action probablement faible) ou des pièces métalliques de soutènement (tels que les boulons d'ancrage). Ce facteur aggravant s'inscrit de toute façon dans une prévision défavorable quant à la stabilité à long terme des travaux souterrains surtout dans les secteurs déjà fracturés et dégradés.

Précisons, en outre, que dans le cas d'un effondrement, même localisé, de l'exploitation de Maël-Carhaix (par exemple au niveau des vieux fonds sous-minés n°1 et 2 ou de la zone de la chambre n° 0), on peut craindre un effet d'expulsion violente d'eau en surface par les exutoires existants ou créés par la rupture des terrains. Ce phénomène est envisageable compte tenu de l'importance du volume des vides disponible et des masses rocheuses pouvant être mises en mouvement.

Enfin, le ruisseau désigné « Moulin de la Lande » qui alimente les eaux de la rivière de Kersault est en partie canalisé sous les remblais de l'ardoisière. Il pourrait disparaître « momentanément » si un effondrement des travaux dans le secteur des chambres n° 5 (« chambre noyée ») et n° 3 venait à se produire.

### b) Impacts sur la qualité des eaux

Concernant la qualité naturelle des eaux, il est précisé, d'autre part, dans la même note de l'exploitant, que les eaux alimentant le bassin en amont des travaux sont « *de très bonne qualité et répondent aux normes chimiques en vigueur et requises des eaux embouteillables* ». Rien n'est précisé sur la qualité des eaux d'exhaure, pompées au sein de l'exploitation, ni sur les conditions d'abandon des cavités (produits ou matériels divers laissés sur place). Seul un contrôle des eaux à l'équilibre (du niveau aquifère) permettrait de juger les impacts qualitatifs résiduels sur l'environnement du site.

## 7. CARTOGRAPHIE DES ALÉAS

La *carte des aléas* a été dressée à partir de l'évaluation prévisionnelle des aléas effectuée sur les différentes configurations d'exploitation (§ 6.3). L'analyse a montré que le site pouvait être découpé en trois secteurs qui, bien que présentant des configurations sensiblement différentes, pouvaient être considérés comme des secteurs à risque d'effondrement potentiel à long terme. Les aléas correspondants ont été qualifiés de fort (intensité du phénomène très forte conjuguée à une probabilité d'occurrence moyenne). Seules exceptions, les secteurs situés au-dessus des travaux des chambres n° 2, 3, II et III ont été classés en aléa moyen en considérant la plus faible probabilité d'occurrence du phénomène.

Pour simplifier la représentation cartographique du zonage rendu complexe par la structure du gisement (pendage et plis), la géométrie et l'imbrication des cavités, et compte tenu de l'incertitude forte des contours topographiques, nous avons délimité les limites de zonage par une approche forfaitaire, raisonnablement sécuritaire.

La figure 8 représente le schéma de détermination des marges de sécurité (incertitude et reculement) à l'aplomb des cavités vides.

La première limite, désignée « *marge d'incertitude* », correspond à l'erreur cartographique possible sur la position exacte des bordures de chambres par rapport aux parcelles de surface (erreur topographique supposée de l'ordre de 10 m). Nous avons inclus dans cette marge une deuxième limite correspondant à l'erreur possible sur l'angle de rupture (5 à 10°, environ, soit globalement une largeur en surface de 10 m) en considérant a priori que la limite supposée de rupture des terrains à l'aplomb des cavités devait s'opérer de façon subverticale en partant des replis de la couche. Cette marge a donc été fixée à 20 m au-delà des contours des cavités figurées sur le plan d'exploitation. Le niveau d'aléa défini à l'intérieur de cette marge correspond à celui de la zone considérée.

Nous avons défini, d'autre part, une seconde limite, dite « *marge de reculement* » qui correspond à l'extension latérale d'un désordre qui prendrait naissance en bordure d'exploitation par déstructuration des terrains superficiels. Cette marge de reculement a été fixée à 20 m, distance pondérée par la relativement faible épaisseur des terrains superficiels (terres végétales, remblais et schistes altérés de faible cohésion). Dans cet espace, les mouvements prévisibles du sol peuvent être de plusieurs types : rééquilibrages des terrains (retour à l'angle de pente naturelle en bordure de l'effondrement), tassements et phénomènes de décompression résiduels de faible ampleur, secousses dynamiques possibles dues à la rupture brutale. Ces mouvements, de plus ou moins grande ampleur, ne menacent pas directement la sécurité des personnes, mais sont susceptibles de provoquer des désordres non négligeables au bâti existant ou futur. Dans cette bande de terrain, les aléas ont été qualifiés de moyens à faibles.

### *Cas des têtes de puits*

La zone d'influence latérale des têtes de puits (proprement dites) est étroitement liée à la nature et à l'épaisseur des terrains altérés situés au-dessus des couches d'ardoise inexploitable (« cosses »). Pour une hauteur de terrains déconsolidés de l'ordre de 10 à 15 m (un angle d'influence moyen de 30° sur la verticale) surmontés de 3 à 6 m de terre végétale ou de remblais (angle d'influence de 45°), la largeur de la zone d'influence possible atteint 12 à 15 mètres. Elle est matérialisée forfaitairement sous forme d'un rayon de 15 m, centré sur le puits, dans le cas des puits localisés précisément (Puits Connan et Puits de la Prairie). Le Puits d'en Haut, pouvant être localisé après débroussaillage de la végétation qui le

masque, rentre également dans ce schéma.

Par contre, le Puits du Milieu doit être considéré comme un cas très particulier : situé dans un contexte topographique totalement différent, il se présente au fond d'un entonnoir de 25 à 30 m de diamètre (ancien fond ?), à une vingtaine de mètres en contrebas des bords de talus. Comme nous l'avons précisé au § 6.4, cet endroit paraît très dangereux par sa configuration et par la présence de l'orifice du puits probablement toujours ouvert. Le puits n'étant pas centré au milieu de l'entonnoir mais décalé en bordure (il est logiquement placé à l'aplomb du chevalement), la marge de sécurité proposée sur le plan est agrandie (cercle de 20 m de rayon) : elle englobe la zone d'influence du puits et la zone correspondant aux abords périlleux de l'entonnoir. En fait, la zone de protection réelle devrait être matérialisée sur place en fonction de la topographie du site.

## **8. PRINCIPES DE MISE EN SECURITE DU SITE A LONG TERME**

### **8.1 PRINCIPES GENERAUX DE MISE EN SECURITE**

Le principe fondamental de mise en sécurité d'un site lors de son abandon a pour principaux objectifs de prévenir les risques liés aux mouvements de terrain dangereux, d'assurer une fermeture efficace et durable des accès aux anciens travaux et d'éviter que les installations de surface ne compromettent la sécurité et la salubrité publiques ainsi que les caractéristiques essentielles du milieu environnant.

Dans le cadre d'une politique raisonnée de prévention des risques à long terme, différentes mesures de mise en sécurité et de protection du site peuvent être envisagées pour remédier aux désordres attendus. Le choix de ces mesures (préventives ou protectrices) repose sur l'analyse de critères fondamentaux comme :

- la nature des enjeux (« vulnérabilité » des personnes et des biens exposés) ;
- la destination du site (zone naturelle et agricole, zone destinée à l'urbanisation, etc.) ;
- les contraintes socio-économiques.

Trois types de mesures sont classiquement adoptés :

- les mesures de protection active qui consistent à s'opposer au phénomène en lui-même en le traitant à la source (remblayage, confortement) pour minimiser le danger jusqu'à le supprimer définitivement ;
- les mesures de protection passive qui consistent à adopter des dispositions constructives particulières sur les bâtiments ou les ouvrages d'art par un renforcement de la structure ou la réalisation de fondations spéciales ;
- les mesures d'aménagement ou d'urbanisme visant à limiter (voire interdire) l'occupation ou l'accès de la surface par les personnes.

### **8.2 ANALYSE DE MESURES DE MISE EN SECURITE DE LA SURFACE**

#### **8.2.1 Zones d'aléas moyen et fort**

L'existence, sur le périmètre des travaux, de nombreuses cavités souterraines de grande dimension, fortement imbriquées, laissées vides et situées à relativement faible profondeur fait apparaître l'occurrence possible, dans le moyen ou le long terme, de mouvements de

terrain de grande ampleur, potentiellement dangereux, et à l'aplomb des zones sous-minées (voir la cartographie des aléas). Il s'agit de zones identifiées comme à risque d'effondrement (d'intensité ou de gravité potentielle très forte) dont la probabilité d'occurrence à long terme est plus ou moins grande (faible ou moyenne).

Ces zones vierges ne sont pas véritablement urbanisées (en dehors des anciens ateliers de l'ardoisière) et correspondent à un environnement naturel laissé en friche et médiocrement boisé couvrant un sol constitué de déchets ardoisiers et d'anciens remblais. Le développement de l'urbanisation dans l'état actuel du site est à proscrire. Il augmenterait la vulnérabilité du site et induirait inévitablement une grave menace pour la sécurité des personnes dans ces zones.

La mise en sécurité totale et pérenne du site ne pourrait a priori être envisagée que par un remblayage systématique des cavités et vides résiduels (puits). Cette technique se révélerait toutefois rapidement lourde et onéreuse compte tenu du volume des vides et de la complexité de la géométrie des travaux qui imposerait de nombreux forages profonds pour y accéder. Elle poserait également, sur le plan technique, le problème de la mise en sécurité du personnel affecté aux travaux sur un site potentiellement dangereux.

#### *Exemple de coût de traitement par remblayage d'une chambre*

Prenons un cas géométriquement simple : les chambres descendantes vides mais ennoyées du Puits Connan, secteur de Kergonan (les chiffres hors taxes qui suivent sont indicatifs) :

- on suppose ce secteur isolé des travaux voisins de Moulin-Lande ;
- volume approximatif des vides : 100 000 m<sup>3</sup> ;
- opérations de dénoyage ou de récupération (voire traitement) des eaux à prévoir, mais difficilement chiffrables (coût d'un dénoyage de puits de 120 m : 30 000 euros environ) opérations d'installation et repli du chantier : 20 000 à 30 000 euros ;
- fonçage d'un puits de déversement des remblais (50 m) en diamètre 800 mm : supérieur à 15 000 euros ;
- opérations de remblayage simple sans liant avec les matériaux pris sur place par voie gravitaire (coût minimal de l'ordre de 5 euros le m<sup>3</sup>) : 500 000 euros.

Le total de ces travaux limités au secteur de Kergonan dépasserait donc très probablement 550 000 à 600 000 euros, en se plaçant délibérément dans les conditions les plus favorables et sans tenir compte des difficultés probables lors du fonçage dans les remblais du vieux fond sus-jacent ni des aspects de sécurité du personnel liés à ce type de chantier.

Cette solution ne paraît pas réaliste sur le site de Maël-Carhaix compte tenu de la faible vulnérabilité et du contexte environnemental et socio-économique du site.

*En conclusion, nous préconisons, sur ces deux zones, un abandon en l'état avec création de servitudes d'utilité publique (type PPRN ou autres) réglementant le droit d'occupation des sols sur les parcelles concernées. Nous proposons, à cet effet, d'adopter, dans les zones d'aléas moyen et fort, des mesures de prévention visant à restreindre l'utilisation des terrains de surface, dans l'emprise des secteurs sous-minés, à des zones à vocation exclusivement naturelles, sans activités agricoles (mesure peu pénalisante au regard de la nature du sol), et considérées, de fait, comme inconstructibles (zones « R » du plan de zonage des dispositions visant la sauvegarde de la surface).*

### 8.2.2 Zones d'aléa faible

Il s'agit des zones représentant la marge de reculement, formant une auréole autour des zones à risque proprement dites, identifiées comme des zones « influencées », à risque de mouvements de terrain résultant du rééquilibrage naturel en bordure de cuvette ou de phénomènes de décompression du sol.

Compte tenu du contexte environnemental et socio-économique du site, il ne semble pas raisonnable d'envisager un quelconque réaménagement à l'intérieur de ces zones même assorti de mesures ou dispositions conditionnelles. On imagine bien l'effet psychologique que pourrait produire la survenance d'un effondrement en limite de ces zones.

*Nous préconisons donc également, sur ces zones, un abandon en l'état avec création de servitudes d'utilité publique réglementant le droit d'occupation des sols sur les parcelles concernées assorties de mesures de prévention visant à restreindre l'utilisation des terrains de surface à des zones à vocation exclusivement naturelles, sans activités agricoles, qui seront considérées comme inconstructibles.*

### 8.2.3 Information du public et interdiction d'accès

*Enfin, nous recommandons d'adopter, sur l'ensemble du périmètre d'exploitation, des mesures qui répondent à l'obligation d'information du public sur l'existence d'anciennes cavités dans le tréfonds (panneaux d'affichage) et d'implanter des barrières d'interdiction d'accès sur les voies pénétrant le site.*

Le secteur particulier situé au voisinage du Puits du Milieu est examiné plus loin au § 8.3.6 consacré aux mesures de traitement visant les puits.

## 8.3 ANALYSE DE MESURES DE SECURITE POUR LES PUITIS

L'usage actuel est de traiter les puits de mines par des méthodes pérennes et définitives supprimant tout entretien (comme le remblayage, la mise en place d'ouvrages de béton au sein de la colonne du puits). Toutefois, dans des contextes socio-économiques très particuliers où ces modes de traitement ne peuvent être envisagés techniquement ou financièrement, on peut avoir recours à des solutions alternatives plus légères qui n'offrent donc évidemment pas les mêmes garanties de pérennité et d'efficacité.

Ces différentes méthodes sont examinées ci-dessous dans un ordre décroissant de sécurité, de pérennité et de coût.

Les chiffres donnés en exemple sont indicatifs et d'un ordre de grandeur moyen, fondés sur les travaux du chantier proprement dits. Les coûts réels, qui ne peuvent être établis qu'après une étude spécifique, pourraient varier considérablement en fonction de l'état, du dimensionnement et de la complexité géométrique des ouvrages, des volumes concernés et de l'importance des travaux préparatoires.

### 8.3.1 Les serrements et bouchons bétonnés en colonne de puits

#### a) Serrements bétonnés ancrés

La technique des serrements bétonnés, ancrés dans le massif rocheux sain à un niveau suffisamment profond du puits, est associée à la mise en place d'un remblayage au-dessus du serrement pour assurer la sécurité de la surface. C'est une solution efficace, employée surtout

pour la fermeture des mines dans les terrains massifs et résistants. Très délicate et complexe de mise en œuvre, périlleuse du fait de la réalisation des travaux à l'intérieur du puits, elle nécessite des travaux d'infrastructure extrêmement lourds, notamment lorsque le puits est de grandes dimensions. Elle implique de parfaites conditions d'accessibilité et de sécurité du puits. On l'utilise essentiellement lorsque l'on ne dispose pas de remblais en quantité suffisante ou dans le cas des puits très profonds. En outre, sa pérennité à très long terme peut poser problème au vu des propriétés de résistance et d'altération du béton en milieu séléniteux (action des eaux sulfatées).

Il s'agit d'une technique très coûteuse et difficile de mise en œuvre, même dans des puits entretenus. Elle exige de travaux de treuillage ou de grutage, de ventilation et de dénoyage éventuel, ainsi qu'une expertise préalable du puits. Cette technique ne paraît pas donc adaptée aux puits de l'ardoisière de Maël-Carhaix pour les raisons évoquées précédemment.

Exemple de coûts hors taxes (à titre indicatif) :

- serrement supportant un remblai : de l'ordre de 100 000 à 300 000 euros (en fonction des conditions de chantier et sans problèmes de gaz).

#### **b) Bouchons autoportants**

La technique de mise en sécurité par bouchon autoportant consiste d'abord à combler la partie inférieure du puits. Les bouchons autoportants coulés au-dessus de ce remblai s'appuient sur le revêtement du puits et doivent être capables d'assurer leur propre stabilité sous le poids des remblais sus-jacents en partant du principe que la stabilité des remblais sous-jacents n'est pas assurée à long terme. Ils sont généralement constitués de béton. Ces bouchons rigidifient les terrains qui l'environnent et permettent d'éviter, sur toute leur hauteur, l'effondrement du revêtement ou l'écoulement d'un matériau bouillant dans le puits.

Ils sont généralement coulés à la surface d'une colonne de remblai. Le remblayage préalable du puits demeure en effet la méthode la plus communément employée et permet la réutilisation d'éventuels stériles stockés sur le carreau. Il conforte l'intégrité du revêtement. Les caractéristiques du remblai (en particulier la granulométrie) doit s'accorder aux problèmes liés à la remontée des eaux ou aux ruissellements par un drainage efficace.

Toutes les opérations de traitement peuvent ainsi être faites depuis la surface, donc dans des conditions de sécurité satisfaisantes.

Lorsque ces bouchons sont correctement dimensionnés et réalisés, le tassement des remblais n'est pas néfaste à la stabilité de la structure. En contrepartie, le bouchon devra résister à la contrainte de succion pouvant résulter d'un débouillage de la colonne de remblai non mise en sécurité.

Exemple de coûts hors taxes :

- Bouchon autoportant (sans compter le remblai) : de l'ordre de 25 000 à 35 000 euros pour la fourniture et la pose du béton de 120 à 140 euros le m<sup>3</sup> (en fonction de la section du puits et des conditions de blocage des remblais au fond, hors surcoûts de mise en sécurité du personnel et des travaux préparatoires).

### 8.3.2 Dalles bétonnées

#### a) Dalles bétonnées de surface

Les dalles bétonnées de surface sont des traitements relativement peu coûteux qui permettent une mise en sécurité limitée des orifices en empêchant la chute des personnes et les déversements sauvages. Elles ne peuvent toutefois protéger les terrains de surface d'un affaissement ou d'un effondrement résultant d'une déstabilisation des terrains meubles dans la zone d'influence du puits ni d'une rupture des parois. Oubliées, elles peuvent, dans le temps, présenter des risques d'endommagement et de rupture si elles sont soumises à des sollicitations ou des surcharges non prévues initialement. On les associe donc généralement à un remblayage, pour limiter les dégâts en cas de rupture (souvent due au passage d'un engin lourd en surface).

Soulignons, par ailleurs les risques inhérents à cette méthode lorsque le puits n'a pas été remblayé ou que la stabilité du remblai n'est pas garantie à long terme.

Exemple de coûts hors taxes :

- dalle en béton armé avec ancrage : de l'ordre de 10 000 à 15 000 euros (comprenant les travaux de dégagement et d'élargissement de la tête de puits, hors surcoûts de mise en sécurité du personnel).

#### b) Panneaux préfabriqués de béton

Pour abaisser les coûts on peut utiliser des panneaux préfabriqués de béton présentant une épaisseur d'une trentaine de centimètres environ. Ces panneaux sont directement placés à même le sol ou sur des supports de béton. En principe, les dalles ainsi constituées doivent déborder du trou d'au moins un mètre. Il est préférable de les ancrer dans le massif rocheux à l'aide d'ancrages boulonnés.

#### c) Dalles enterrées

Leur conception est très semblable à celle des dalles de surface, mais elles sont réalisées sous la surface du sol de manière à reposer au sommet du massif rocheux sain, sous la couche de remblais ou de terrains superficiels meubles. Prévu pour interdire définitivement toute entrée dans un puits, les dalles couvertes assurent aussi une meilleure garantie contre l'affaissement des terrains de surface.

Comme les dalles en surface, les dalles enterrées doivent être construites en béton armé. Elles sont conçues pour supporter la surcharge des terrains ou des remblais sus-jacents ainsi que d'éventuelles surcharges résiduelles. Lorsqu'elles sont associées à un remblayage, les dalles enterrées doivent, elles aussi, pouvoir résister à l'effet d'aspiration que peut induire un éventuel débouillage brutal de la colonne de remblais.

Comme pour les dalles de surface, on préconise un diamètre (ou un côté) supérieur ou égal au double du diamètre extérieur du puits (ou au double de sa diagonale si celui-ci possède une ouverture rectangulaire) et une épaisseur minimale de 45 cm.

Les dalles enterrées étant généralement recouvertes d'une couche de remblais, il est délicat de vérifier leur évolution dans le temps.

### 8.3.3 Remblayage

Le remblayage simple de la colonne de puits est une technique simple qui, en supprimant le vide, élimine théoriquement le danger et le risque de pénétration à l'intérieur. Un remblayage bien réalisé permet de conforter l'intégrité du revêtement en s'opposant aux efforts horizontaux exercés par le massif rocheux. Néanmoins, les risques pour la surface ne sont pas totalement exclus à terme sous l'effet d'un éventuel débouillage ou d'une remobilisation des remblais lors de la remontée des eaux, après abandon de l'exploitation (cas des anciens puits). Il existe des techniques de mise en sécurité de la colonne permettant d'éviter ces phénomènes de débouillage mais elles impliquent des travaux très lourds aux niveaux des infrastructures (serrements bétonnés).

Compte tenu de l'état et de la complexité des chantiers du fond dans l'ardoisière (ennoyage des chambres, possibilités d'accès, etc.), cette solution paraît difficilement envisageable techniquement et économiquement sur le site de Maël-Carhaix. Ceci est particulièrement vrai pour les Puits de la Prairie et du Milieu qui débouchent dans des chambres vides fortement imbriquées qui nécessiteraient de nombreux forages en gros diamètre pour leur remblayage. Le Puits Connan pourrait faire l'objet d'un tel traitement, mais qui se révélerait très coûteux.

Exemple de coûts hors taxes (pour un seul puits) :

- chambres du Puits Connan (1600 m<sup>3</sup> environ) à 10 euros le m<sup>3</sup> : 16 000 euros, au minimum (mise en place avec les produits disponibles sur site, mais sans compter : les travaux préparatoires éventuels, le remblayage de la petite chambre sous voûte à la cote -55 m, les problèmes de blocage des remblais au niveau des galeries et la mise en sécurité du chantier).

### 8.3.4 Méthodes de fermeture légères

Les méthodes de fermeture légères peuvent s'avérer utiles en cas de mise en sécurité provisoire de la zone entourant un puits récemment remblayé en interdisant l'accès du site au public avant la réalisation de la couverture définitive.

Elles peuvent aussi, de manière tout à fait exceptionnelle, être utilisées pour traiter des orifices dans des zones inaccessibles où la mise en œuvre de méthodes plus lourdes s'avère difficilement envisageable mais elles ne peuvent constituer, à elles seules, un traitement pérenne pour la mise en sécurité des terrains de surface à proximité du puits.

#### a) Grilles métalliques

En acier inoxydable pour résister aux intempéries et aux attaques d'éventuelles émanations acides, les grilles sont scellées à un contour en acier, lui-même ancré, lorsque c'est possible, à la tête du puits par des boulons.

#### b) Rails en acier

Deux étages de rangées de rails sont placés en quinconces et soudés ensemble. On soude ensuite une grille de métal au-dessus de la rangée supérieure, puis on scelle l'ensemble aux armatures du béton du puits lorsqu'elles existent. Cette technique présente l'avantage d'une installation aisée, d'un coût relativement faible et d'une préservation possible de l'accès en cas de nécessité mais n'empêche pas, par contre, les déversements sauvages de produits divers au travers des ouvertures. Elle nécessite la mise en œuvre d'une maintenance visant à s'assurer que les rails résistent correctement à la corrosion.

### 8.3.5 Mesures d'interdiction d'accès et d'affichage du risque

Ces mesures s'appliquent normalement aux puits qui ont déjà été obturés d'une manière ou d'une autre et concernent la sécurité des personnes susceptibles d'évoluer dans la zone d'influence du puits (périmètre de sécurité défini au § 7). Elles consistent à :

- interdire la circulation des personnes en affichant le risque par des panneaux adaptés ;
- interdire la pénétration dans la zone, en rendant la zone inaccessible physiquement aux personnes, par des barrières défensives (grillage résistant dans le temps, rideau d'arbustes, épineux, etc.).

Exemples de coûts hors taxes de travaux :

- fourniture et pose d'une clôture grillagée : entre 40 et 80 euros le mètre linéaire (avec piquets en acier dans des plots de béton) ;
- signalisation par panneaux ou plaques et supports : de l'ordre de 100 à 300 euros l'unité.

### 8.3.6 Proposition de mesures pour les puits adaptées au contexte du site

En dehors des risques liés à la présence inopinée de personnes sur le site, la zone d'influence du puits peut être soumise à des tassements ou affaissements résiduels consécutifs à une déstabilisation des terrains de surface, voire à un effondrement de la tête de puits au niveau des sols meubles (terrains superficiels et/ou remblais) dont l'épaisseur est estimée ici autour de 10 à 15 m. Dans le contexte particulier du site de l'ardoisière de Maël – Carhaix, différentes dispositions de sauvegarde peuvent être préconisées et prises rapidement accompagnées d'un minimum de travaux de sécurité.

La première disposition de sauvegarde proposée, en terme d'occupation des sols, est ainsi de considérer ces zones comme des *zones inconstructibles* et matérialisées comme telles sur les documents d'urbanisme (P.O.S ou P.L.U). Cette mesure est déjà prise en compte de fait par le zonage établi sur les terrains de surface sous-minés (§ 8.2) qui englobe les secteurs influencés par les puits.

La seconde est d'interdire l'occupation du terrain pour ne pas augmenter la vulnérabilité et toute activité nocive (vibrations, passage d'engins lourds, activités agricoles, etc.).

Compte tenu du contexte socio-économique et de la destination du site, les solutions « a minima » qui pourraient être envisagées pour les têtes de puits sont les suivantes :

- *fermeture des orifices des Puits Connan et de la Prairie par des dalles bétonnées accompagnée de mesures d'interdiction d'accès matérialisées par la pose d'une ceinture grillagée résistante autour des puits et de panneaux d'affichage ;*
- *vérification de l'état de la tête du Puits d'en Haut, avec pose d'une dalle bétonnée si elle n'existe pas, ceinture grillagée et panneaux d'affichage ;*
- *pour le Puits du Milieu, il est difficilement envisageable de réaliser une dalle en béton et une ceinture grillagée pour des raisons techniques (très grande section du puits de 8 m de diamètre ou de côté, au vu du plan d'exploitation) mais aussi de sécurité (orifice situé au fond d'une cuvette en forme d'entonnoir) et donc de coût. Les solutions minimales consisteraient à interdire les accès du site par une ceinture de grillage à laquelle serait associée une végétalisation dense d'arbustes épineux.*

**Remarque :**

Précisons que les ceintures grillagées ne visent qu'à interdire l'accès aux abords immédiats du puits (matérialisé par la dalle bétonnée) aux personnes et aux engins qui pourraient y circuler inopinément. Comme les dalles bétonnées, les ceintures grillagées ne protègent en rien les terrains de surface dans le cas d'une éventuelle déstabilisation de la tête de puits, la zone d'effondrement potentielle pouvant alors déborder de la zone clôturée.

## 9. CONCLUSION

---

La société « Ardoisières de Maël-Carhaix » a exploité jusqu'en 2000 une carrière souterraine de schistes ardoisiers, ouverte au début du XX<sup>ème</sup> siècle, sur le site de Moulin-Lande situé à deux kilomètres au nord de Maël-Carhaix (Côtes d'Armor). Cette exploitation fut menée de façon « artisanale » par la méthode des « chambres descendantes » (non remblayées) rappelant celle des « fonds descendants sous voûte » largement employée au XIX<sup>ème</sup> siècle.

En avril 2000 et après de successives périodes de difficultés financières, compte tenu de la situation financière de cette société, le Tribunal de Grande Instance de Guingamp –section commerciale- prononçait la mise en liquidation judiciaire de la SARL « Ardoisières de Maël – Carhaix ».

Afin de prescrire à l'exploitant ou, à défaut, au détenteur du site, les mesures de sécurité nécessaires, la DRIRE de Bretagne a demandé l'avis de l'INERIS « *pour déterminer les mesures minimales qui permettraient d'assurer la sécurité du site notamment au regard de la stabilité des terrains, de la sécurité publique et de l'inaccessibilité des cavités souterraines* ».

Les terrains de surface de l'ardoisière de Moulin-Lande se présente dans un cadre environnemental typiquement rural qui s'inscrit dans le bocage breton. Légèrement vallonné, il est entouré de champs et de prairies. Le site de l'ardoisière proprement dite n'est pas urbanisé exception faite des anciens bureaux et bâtiments d'exploitation, aujourd'hui à l'état d'abandon, dont il faut, à terme, envisager le démantèlement. Aux alentours, on n'observe pas d'exploitations agricoles ou d'habitations en bordure du périmètre de l'exploitation, à l'exception de 5 ou 6 maisons pavillonnaires situées en bordure de la RD 11, au lieu-dit « Moulin de la Lande », dont la plus proche est située à environ 70 m des anciens travaux de Kergonan (Puits Connan).

Les travaux du fond de l'exploitation de Moulin-Lande - Kergonan sous-minent les terrains de surface sur un peu plus de 2 hectares. On dénombre, sur le plan d'exploitation (1958), une quinzaine de chambres, dont les plus profondes sont descendues au niveau -200 m environ. Les chantiers ont toujours été menés par la méthode des chambres descendantes non remblayées et laissent des cavités de grandes dimensions, vides ou ennoyées. Les plans ne révèlent ni de véritable stratégie d'exploitation ni de schéma de dimensionnement précis. Ils indiquent la présence sur le site de 4 puits et d'un ancien fond dit « Puits Lucas ».

La présente étude d'évaluation des risques liés aux travaux souterrains a été menée essentiellement selon une démarche d'analyse par retour d'expérience (à défaut de documents d'exploitation récents et tangibles et faute d'accessibilité aux travaux souterrains, abandonnés et ennoyés). Elle s'appuie sur une interprétation documentaire des archives et données disponibles ainsi que sur une analyse comparée de la géométrie des travaux d'exploitation au vu des plans et coupes disponibles mis à disposition par la DRIRE. Les résultats obtenus ont ensuite été confrontés aux connaissances acquises par ailleurs sur

d'autres bassins de risques et types d'exploitation comparables (comme les bassins ardoisiers de la région d'Angers et de Segré).

L'analyse des conditions d'exploitation menée sur le site de Maël-Carhaix fait apparaître différentes configurations à risques susceptibles de provoquer des désordres, voire des effondrements en surface. Ces configurations défavorables à la stabilité correspondent aux anciens fonds sous-minés par de grandes chambres descendantes laissées vides (type I), aux anciens fonds sous voûtes contigus, localement sous-minés (type II) et aux chambres descendantes non remblayées, contiguës et fortement imbriquées (type III). De façon plus générale, une autre condition défavorable en cas d'instabilité des travaux du fond est la faible profondeur des voûtes (30 à 40 m environ).

L'analyse des plans montre que ces différentes configurations représentent la quasi-totalité des travaux souterrains de Maël-Carhaix, à l'exception de la zone non exploitée comprise entre la limite de l'exploitation de Kergonan et le Puits d'en Haut de Moulin-Lande. En outre, la plupart des chantiers du fond ne répondent pas aux critères dimensionnels de stabilité à long terme des ouvrages souterrains ardoisiers définis par rétro-analyse (annexe 2).

La représentation synthétique des aléas sous forme d'un zonage hiérarchisé fait apparaître trois secteurs identifiés comme des secteurs à risque d'effondrement potentiel à long terme (aléa fort). Il s'agit :

- du secteur de Kergonan, à l'ouest, caractérisé par la présence d'un vieux fond sous-miné séparé par un stot d'épaisseur insuffisante d'une très grande chambre descendante de près de 140 m de profondeur ;
- du secteur du Puits du Milieu de Moulin-Lande marqué par une forte imbrication des chambres laissées vides traduisant un trop faible épaisseur des bardeaux et des stots séparatifs ;
- du secteur du Puits de la Prairie, à l'est, montrant également une très forte imbrication des travaux dans la zone des chambres n° 4, 5, 0, I et II, avec des largeurs de bardeaux insuffisantes et une trop forte extension des chantiers.

Deux zones peu étendues présentant des configurations d'exploitation moins défavorables ont été qualifiées à plus faible risque d'effondrement (aléa moyen) : il s'agit de la zone des chambres n° 2 et 3, et de la zone de la chambre III, la plus à l'est de l'exploitation.

En ce qui concerne les ouvrages débouchant au jour (puits), les observations effectuées en surface avec la DRIRE ont permis de montrer qu'il y avait bien 4 puits sur le site et, très vraisemblablement, seulement 4 puits. Deux puits sont toujours facilement accessibles (le Puits Connan à Kergonan et le Puits de la Prairie) pour lesquels on peut sans difficulté en observer les chevalements et orifices, toujours ouverts.

Le Puits d'en Haut n'est plus observable. Son chevalement a été démantelé et la végétation masque la tête du puits. Il aurait été remblayé avec des déchets d'ardoise.

Le Puits du Milieu ne laisse d'observable que son chevalement situé au bord d'un pan vertical. Le câble encore présent doit atteindre le puits proprement dit à une vingtaine de mètres sous le chevalement. Ce puits correspondant probablement à un ancien fond se présente en surface sous forme d'un entonnoir de 25 m de diamètre (d'après le plan d'exploitation et les descriptions d'archives). Le sentier, étroit et raide, descendant sur les flancs de cet entonnoir depuis le chevalement n'est plus praticable du fait de la végétation épaisse. Cet endroit paraît très dangereux, pour une personne qui s'y aventurerait, par sa configuration et la présence de l'orifice du puits probablement toujours ouvert. La condamnation de l'accès à cette zone est nécessaire.

Pour répondre à l'objectif de mise en sécurité minimale du site, plusieurs solutions de traitement ont été analysées tant pour les cavités que pour les puits.

Des méthodes de traitement véritablement pérennes, par remblayage des vides ou des puits et obturation des têtes de puits par serrements ou bouchons bétonnés ont été envisagées, mais ces techniques lourdes et onéreuses se révéleraient rapidement inadaptées et irréalistes sur le site de Maël-Carhaix compte tenu du volume et de la géométrie des travaux et surtout du contexte environnemental et socio-économique du site.

*Compte tenu des objectifs fixés et des aspects socio-économiques examinés, nous proposons d'adopter, pour la mise en sécurité du site, des mesures minimales qui visent à éviter la circulation de personnes et les risques de chutes dans les puits en condamnant l'usage des terrains environnants. Elles ne garantissent en revanche pas une mise en sécurité définitive et pérenne des terrains de surface et exigent donc un gel définitif de leur utilisation. Ces mesures sont les suivantes :*

- *dans les zones d'aléas moyen et fort, des mesures de prévention visant à destiner les terrains de surface, dans l'emprise des secteurs sous-minés, en zones à vocation exclusivement naturelles, sans activités agricoles, qui seront considérées comme inconstructibles (zones « R » du plan de zonage des dispositions visant la sauvegarde de la surface) ;*
- *dans les zones d'aléa moyen à faible, au vu du contexte environnemental et socio-économique du site, des mesures de prévention similaires aux précédentes visant à faire des terrains de surface des zones exclusivement naturelles, sans activités agricoles, considérées comme inconstructibles ;*
- *sur l'ensemble du périmètre d'exploitation des mesures qui répondent à l'obligation d'information du public sur l'existence d'anciennes cavités dans le tréfonds (panneaux d'affichage) assorties de dispositions d'interdiction d'accès, comme des barrières, sur les voies pénétrant le site ;*
- *pour les puits, des mesures techniques complémentaires de traitement par dalles bétonnées pour les puits encore ouverts (Puits Connan, Puits de la Prairie et éventuellement Puits d'en Haut) accompagnées de la mise en place d'une ceinture grillagée interdisant l'accès à la dalle et de panneaux d'affichage du risque. Pour le Puits du Milieu, les solutions minimales consisteraient à interdire les accès du site par une ceinture de grillage à laquelle serait associée une végétalisation dense d'arbustes épineux.*

## 10. LEXIQUE

---

Assereaux	Accidents structuraux plats formant des fentes de tension, de faible pendage (5 à 30°) et de direction indéterminée.
Bardeau	Pilier séparant deux chambres adjacentes.
Bavures	Fractures ouvertes inclinées (entre 40° et 70°), symétriques, de direction variant autour de la schistosité, assez similaires aux rembrayures.
Cosses	Terrains ardoisiers altérés proches de l'affleurement.
Chauves	Accidents mineurs au pendage subvertical dont la direction est voisine de celle de la schistosité.
Chefs	Fractures subverticales en extension, peu ou non ouvertes, à surfaces lisses et planes, de direction sensiblement perpendiculaire à la schistosité.
Délits	Ensemble des accidents, comme les failles ou les fractures diverses contemporaines ou postérieures à la formation sédimentaire ardoisière.
Epontes	Terme minier désignant le toit et le mur d'une veine.
Feuilletis	Accidents structuraux qui se caractérisent par une déviation plus ou moins brutale de la schistosité entre deux surfaces limites ou " plans de feuilletis ".
Parois	Plans subverticaux correspondant aux limites d'une chambre Les parois latérales, formées le plus souvent par les fractures naturelles de type « chefs », sont également désignées sous le terme de « chefs ».
Pladens	Désignation locale de fractures proches des « assereaux » (voir ce nom).
Rembrayures	Fractures ouvertes inclinées (entre 40° et 70°), comparables aux bavures, dont la direction varie autour de la direction de schistosité.
Sole	Partie inférieure de la chambre désignant le sol sur lequel circule le personnel.
Stot	Planche intercalaire séparant deux niveaux d'exploitation superposés.
Torsins	Délits constituant les plus gros accidents structuraux comme les failles majeures à l'échelle du bassin ardoisier.
Voûte	Partie sommitale de la chambre appelée également « plafond » ou « ciel ».

## 11. ARCHIVES ET BIBLIOGRAPHIE SPECIALISEES

---

Archives DRIRE : Plan d'exploitation de l'Ardoisière du Moulin de la Lande, échelle 1/1000<sup>ème</sup>, daté 1938.

Archives DRIRE : Plan d'exploitation des Ardoisières de Kergonan et de Moulin-Lande, échelle 1/500<sup>ème</sup>, daté 1958, mis à jour en 1964 et 1979.

Archives DRIRE : Plan topographique des Ardoisières de Moulin - Lande, échelle 1/250<sup>ème</sup>, dressé par M. Revenot, géomètre, dossier 7904/EB, daté juin 1995.

Archives DRIRE : Avis de l'ingénieur en chef des mines sur les conditions d'exploitation de l'Ardoisière du Moulin de la Lande, daté du 20 novembre 1925.

Archives DRIRE : Procès-verbal de visite du 25 mars 1943 aux Ardoisières de Moulin-Lande à Maël-Carhaix, établi par M. Broquin, ingénieur adjoint des TPE, daté du 31 mars 1943.

Archives DRIRE : Surveillance des carrières des Côtes-du-Nord, Ardoisière de Moulin-Lande. Rapport de M. Coppin, ingénieur subdivisionnaire, datée du 1er décembre 1971.

Archives DRIRE : Compte rendu sur la situation aux ardoisières de Moulin-Lande. Note de M. Coppin, ingénieur subdivisionnaire, datée du 14 juin 1972.

Archives DRIRE : Compte rendu de la réunion du 24 septembre 1972 à l'Ardoisière de Moulin-Lande, signé par l'ingénieur subdivisionnaire J-P. Dhumerelle, en date du 27 novembre 1972.

Archives DRIRE : Rapport de l'ingénieur subdivisionnaire J-P. Dhumerelle, du 12 décembre 1972.

Archives DRIRE : Note de l'Ingénieur d'exploitation des Ardoisières de Moulin-Lande relative aux travaux dans la chambre 0, daté du 13 février 1976.

Archives DRIRE : Note de l'Ingénieur d'exploitation des Ardoisières de Moulin-Lande relative aux travaux dans la chambre 0, daté du 13 avril 1976.

Archives DRIRE : Rapport de l'ingénieur subdivisionnaire J-P. Dhumerelle, A12083, du 4 juin 1976.

Archives DRIRE : Procès-verbal de visite du 7 septembre 1979 aux Ardoisières de Moulin - Lande à Maël-Carhaix n° 22 137 001, signé T. Lacapelle, Directeur Interdépartemental de l'Industrie, daté du 19 sept. 1979.

Archives DRIRE : Procès-verbal d'enquête d'accident, accident Le Gac du 2 juillet 1979. Dossier DRIRE, daté du 16 mai 1980.

Archives DRIRE : Courrier de M. André, gérant de la Société des Ardoisières de Moulin-Lande, à M. Dhumerelle, Ingénieur des Mines ; daté du 25 mars 1980.

Archives DRIRE : Procès-verbal de visite du 27 janvier 1984 aux Ardoisières de Moulin - Lande à Maël-Carhaix, signé J-P. Dhumerelle, ingénieur subdivisionnaire, daté du 29 février 1984.

Archives DRIRE : Note sur la situation des Ardoisières de Maël-Carhaix. Rapport DRIRE de Mme C. Allo daté du 18 novembre 1997, avec copie de l'Arrêté préfectoral d'autorisation du 23 mai. 1977, modifié le 23 novembre 1988.

Archives DRIRE : Relevé de conclusions faisant suite à la réunion du 12 février 1999. Rapport du 16 mars 1999, annexé au courrier CA/Abi/EI2S/99-506, signé M. Michelon, Chef Division Environnement Industriel et Sous-sol de la DRIRE-Bretagne, daté du 22 mars 1999.

Archives DRIRE : Dossier des garanties financières de la Société d'exploitation de l'Ardoisière de Maël-Carhaix, établi par B.E.T. A.R.E.A., daté mai 1999.

Archives DRIRE : Courrier demandant à l'INERIS une analyse critique du dossier des garanties financières établi par la Société d'exploitation de l'Ardoisière de Maël-Carhaix, signé M. Michelon, Chef Division Environnement Industriel et Sous-sol de la DRIRE-Bretagne, daté du 19 septembre 1999.

Archives DRIRE : Courrier adressé à la Société d'exploitation de l'Ardoisière de Maël-Carhaix, signé M. Michelon, Chef Division Environnement Industriel et Sous-sol de la DRIRE-Bretagne, daté du 31 janvier 2000.

CHANTRAINE (J), HERROUIN (Y), JAUGEY (P) et LIMASSET (J-C) : Etude géologique de l'Ardoisière de Moulin - Lande à Maël-Carhaix (22). Rapport BRGM, 14 p., 1971.

BRGM : Inventaire des cavités souterraines de Bretagne, Département des Côtes-d'Armor, Réf. 91-37, juillet 1991.

GUIDE METHODOLOGIQUE « Plans de Prévention des risques naturels (PPR) », Risques de mouvements de terrain, La Documentation Française, 1999.

FINE (J) : Ardoisières de Maël-Carhaix, Analyse de la stabilité. Rapport ENS des Mines de Paris, Réf. AMC/981, 6 p., 29 décembre 1998.

ICHON (M) : Notice sur l'exploitation souterraine des ardoisières d'Angers. Bull. SIM, p. 753-849, 1890.

ICHON (M) : Rapport de l'ingénieur des Mines sur l'éboulement de l'ardoisière de la Paperie. Archives départementales n° 15 J 206, 6 p., 15 février 1887.

DE LA GOUPILLIERE (H) : Cours d'exploitation des mines. Dunod ed., 3 tomes, 1920.

SOULEZ-LARIVIERE (F) : Les ardoisières d'Angers, 2<sup>ème</sup> édition Ménard-Garnier, 1986.

TINCELIN (E), DUCHENE (M) : Rapport de visite aux Ardoisières de Moulin - Lande à Maël-Carhaix relative à l'exploitation de la chambre n° 2, ENS Mines de Paris, 9 p., 2 mai 1984.

TINCELIN (E), DUCHENE (M) : Note aux Ardoisières de Moulin - Lande à Maël-Carhaix, ENS Mines de Paris, 2 p., 23 mars 1978.

TRITSCH (J-J), AL HEIB (M) : Analyse préliminaire pour la définition d'une étude de stabilité de l'Ardoisière souterraine de Maël-Carhaix. Rapport INERIS-SSE-98-32EZ21/RN01, 8 p., 27 nov. 1998.

TRITSCH (J-J), AL HEIB (M) : Note INERIS-DRS-99-23229/L01, faisant critique du dossier des garanties financières établi par la Société d'exploitation de l'Ardoisière de Maël-Carhaix, 2 p., 29 septembre. 1999.

## 12. LISTE DES FIGURES ET PHOTOS

Repère	Désignation	Nombre de pages
Figure 1	Plan de situation de l'ardoisière de Maël-Carhaix (Côtes d'Armor)	1 A4
Figure 2	Limites d'exploitation de l'ardoisière de Maël-Carhaix (Côtes d'Armor)	1 A4
Figure 3	Coupes verticales de la veine (d'après le rapport BRGM, 1971)	1 A4
Figure 4	Reproduction du plan des travaux de Moulin-Lande, daté 1925, montrant le secteur des vieux fonds descendants sous voûtes	1 A4
Figure 5	Reproduction du plan d'ensemble de Moulin-Lande, daté 1938	1 A4
Figure 6	Reproduction du plan d'exploitation de l'ardoisière de Maël-Carhaix (Côtes d'Armor), plan original daté 1958	1 A3
Figures 7	Reproduction du plan d'exploitation de l'ardoisière de Maël-Carhaix (d'après le rapport du BRGM de 1971)	1 A4
Figure 8	Détermination des marges de sécurité à l'aplomb des cavités, pour la cartographie du zonage des aléas	1 A4
Photo 1	Puits Connan, vue du chevalement et des bords du puits	1 A4
Photo 2	Puits Connan, vue de l'orifice et des parois du puits	
Photo 3	Puits de « la Prairie », vue du chevalement	1 A4
Photo 4	Puits de « la Prairie », vue de l'orifice	
Photo 5	Puits « du Milieu », vue des abords et du chevalement	1 A4
Photo 6	Puits « du Milieu », vue des abords au niveau du chevalement	
Photo 7	Puits « du Milieu », vue en contrebas du chevalement	1 A4
Photo 8	Puits « du Milieu », autre vue en contrebas du chevalement	

## 13. LISTE DES ANNEXES

Repère	Désignation	Nombre de pages
Annexe 1	Historique des méthodes d'exploitation dans les ardoisières des bassins d'Angers – Trélazé et Segré (Maine-et-Loire)	9 A4
Annexe 2	Mécanismes de rupture et dimensionnement des ouvrages dans les ardoisières des bassins d'Angers – Trélazé et Segré (Maine-et-Loire)	18 A4

## 14. LISTE DES PLANS

Repère	Désignation	Nature
Plan 1	Cartographie des aléas	1 plan au 1/500 <sup>ème</sup>
Plan 2	Zonage des dispositions visant la sauvegarde de la surface	1 plan au 1/500 <sup>ème</sup>

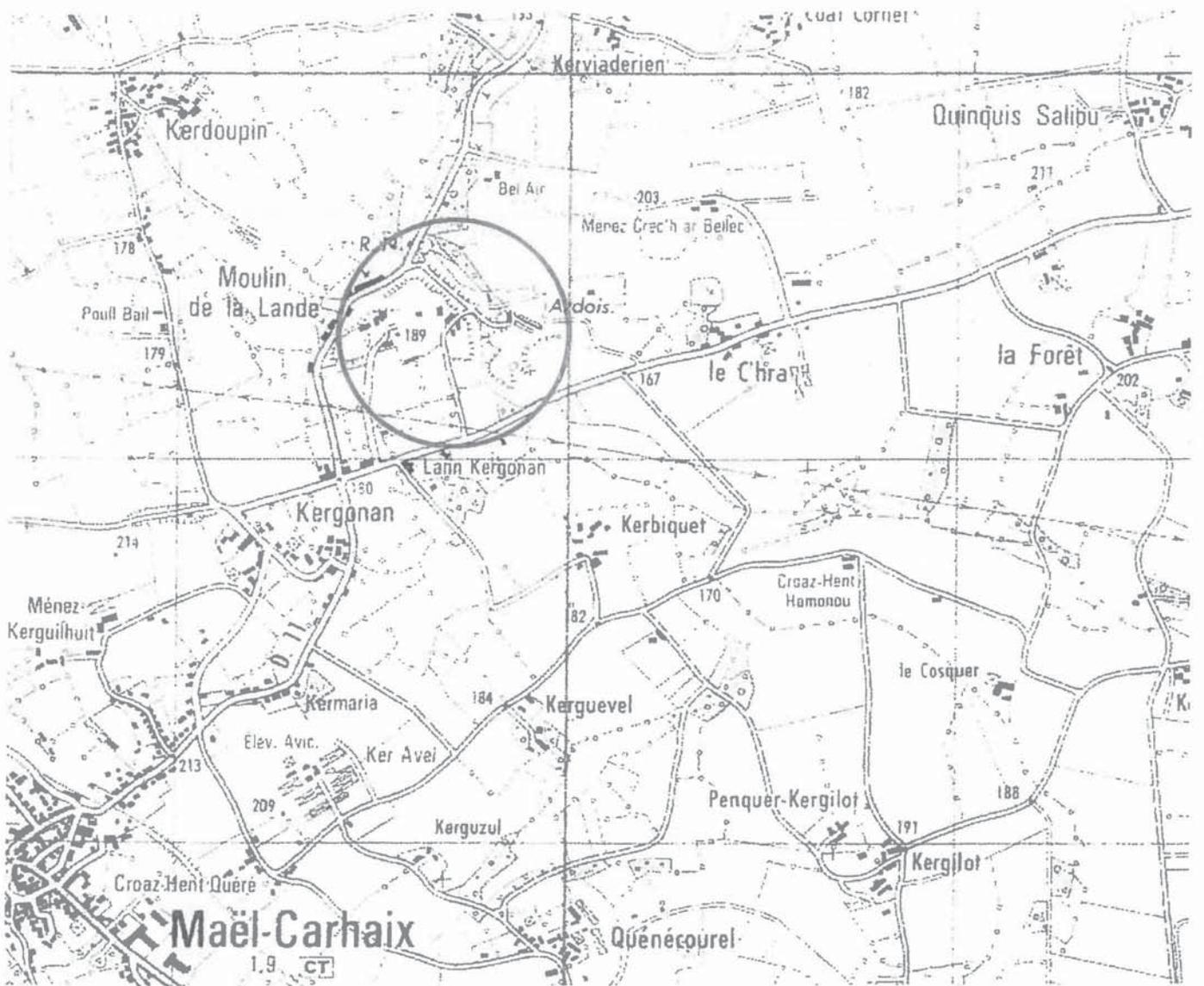


Figure 1 : Plan de situation de l'ardoisière de Maël-Carhaix (Côtes d'Armor)



Figure 2 : Limites d'exploitation de l'ardoisière de Maël-Carhaix (Côtes d'Armor)  
 (d'après un document DRIRE de Bretagne, original au 1/2000<sup>ème</sup>)



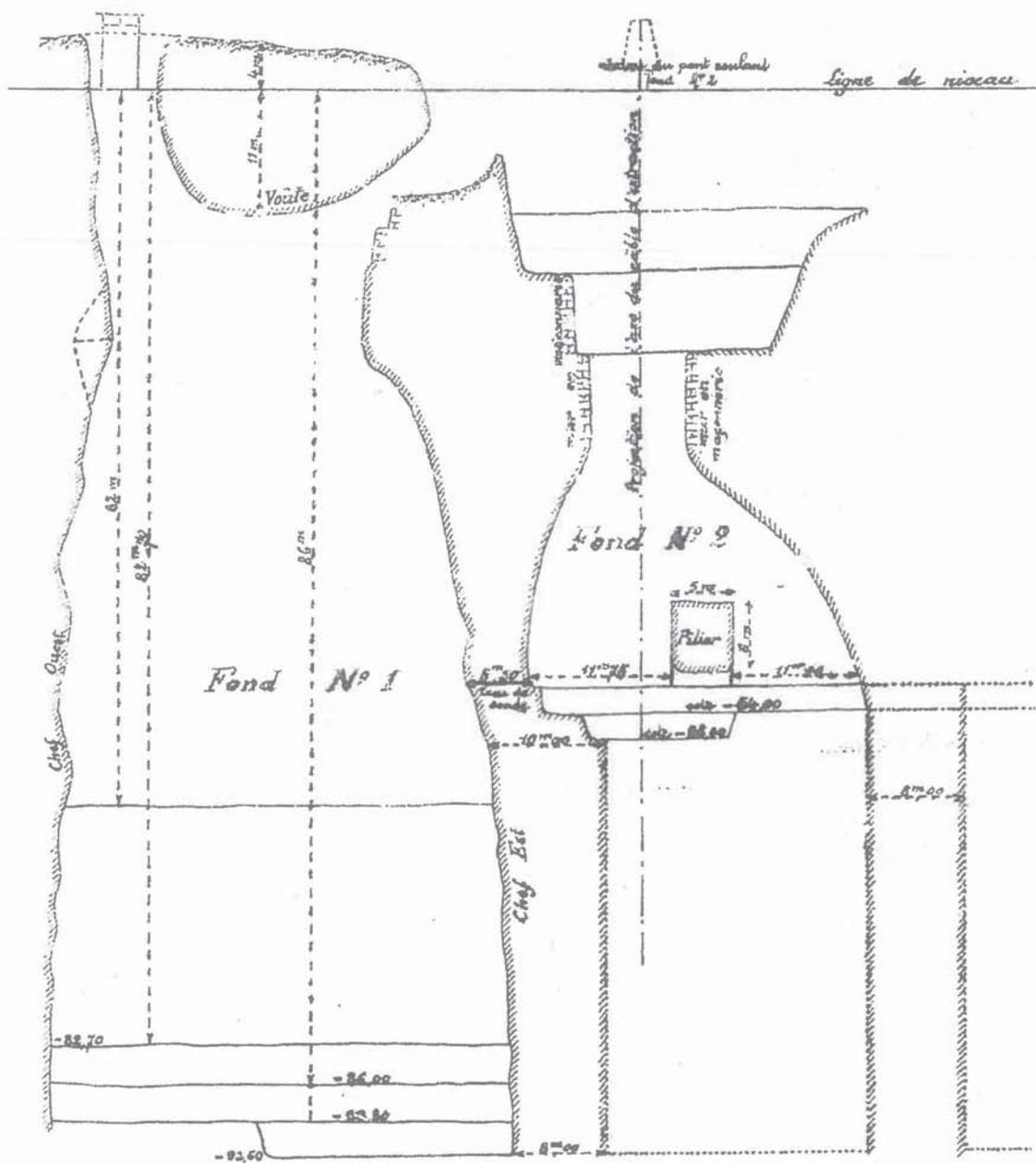


Figure 4 : Reproduction du plan des travaux de Moulin-Lande, daté 1925 montrant le secteur des vieux fonds descendants sous voûtes

# ARDOISIERE DU MOULIN DE LA LANDE

## PLAN DES TRAVAUX

ECHELLE 1/1000

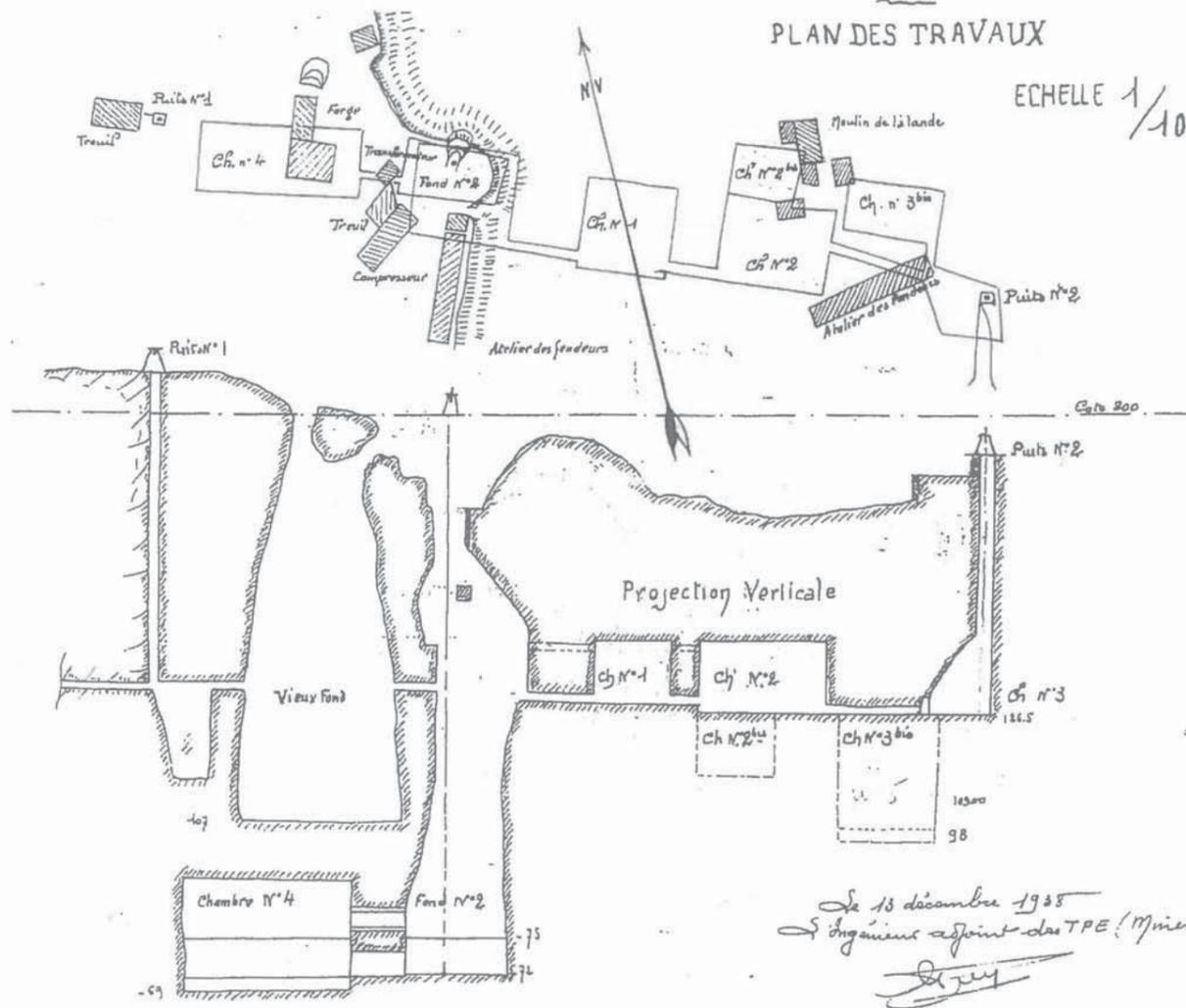
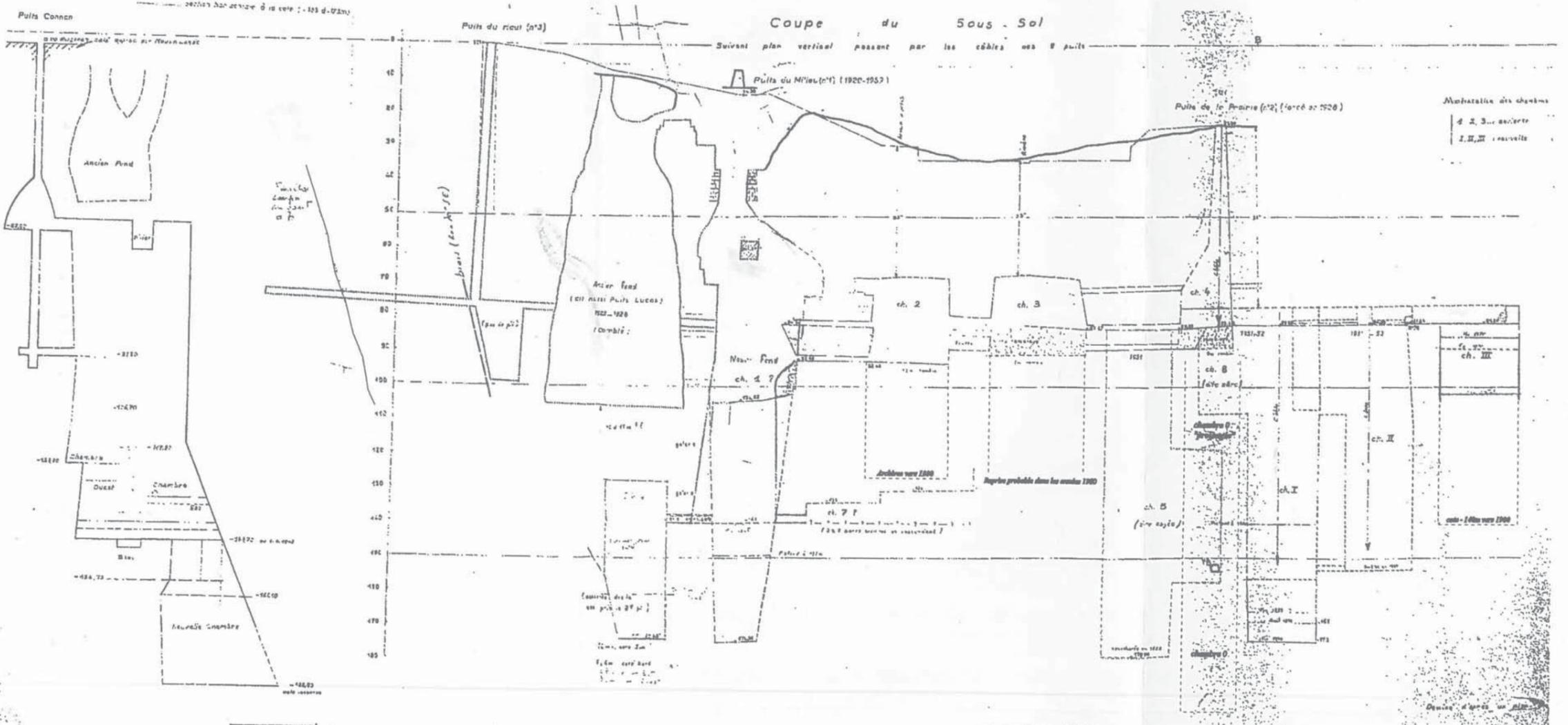
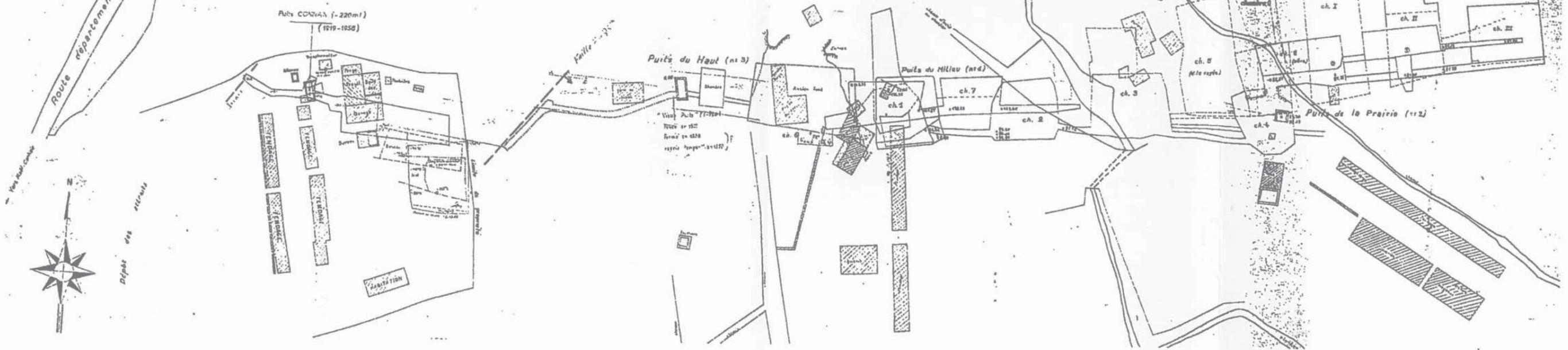


Figure 5 : Reproduction du plan d'ensemble des travaux de Moulin-Lande daté 1938

ARDOISIÈRES DE KERGONAN  
COMMUNE DE MAËL-CARHAIX

ARDOISIÈRES DE MOULIN-LANDE  
COMMUNE DE MAËL-CARHAIX

Côtes du Nord



**Figure n° 6 : Reproduction du Plan d'exploitation de l'ardoisière de Maël - Carhaix (côtes-d'Armor)**

Plan original de 1958, mis à jour en 1964 (modifié d'après les données d'archives de la DRIRE - Bretagne)

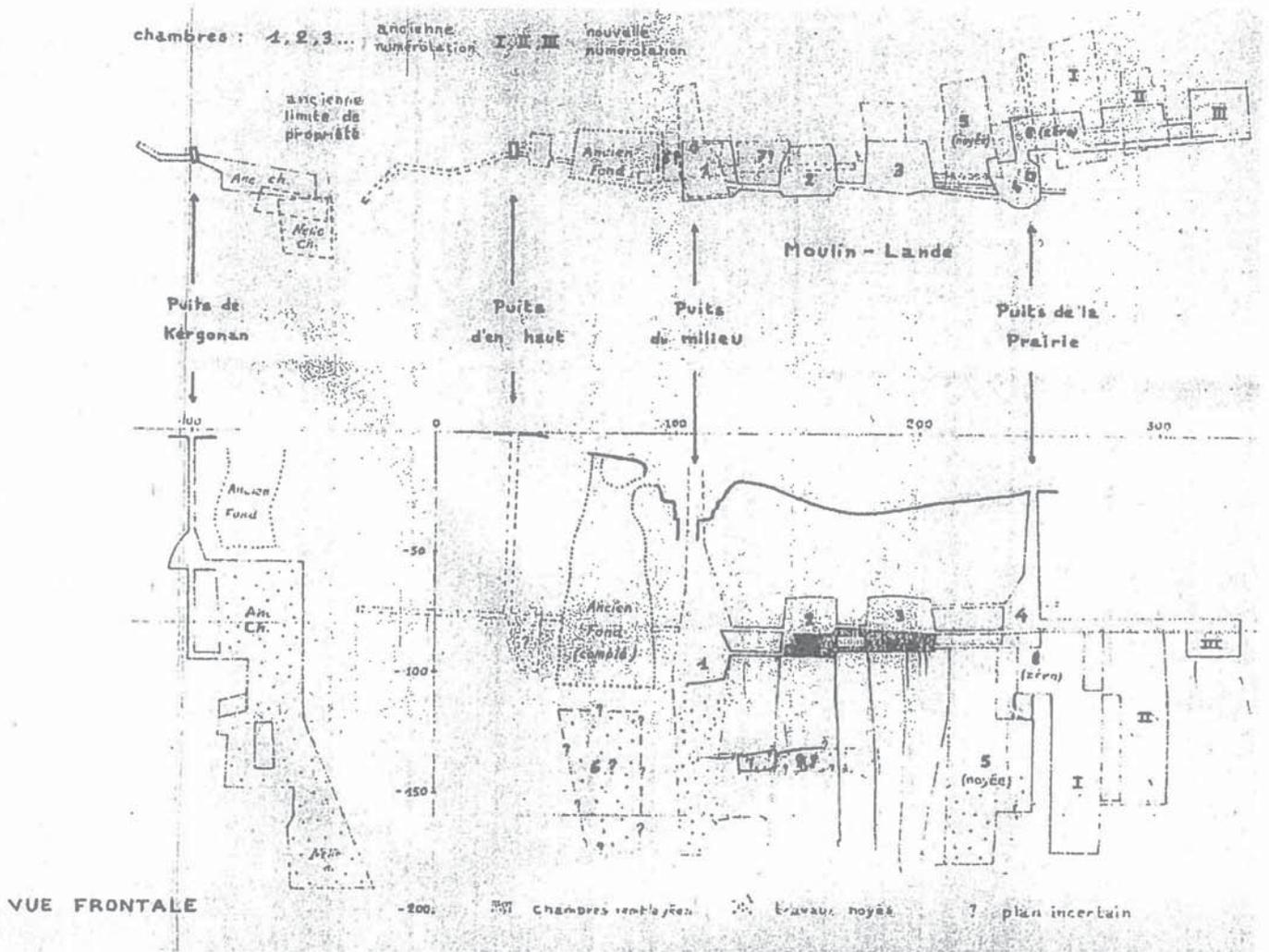


Figure 7 : Reproduction du plan d'ensemble des travaux de l'ardoisière de Maël-Carhaix (d'après le rapport du BRGM de 1971)

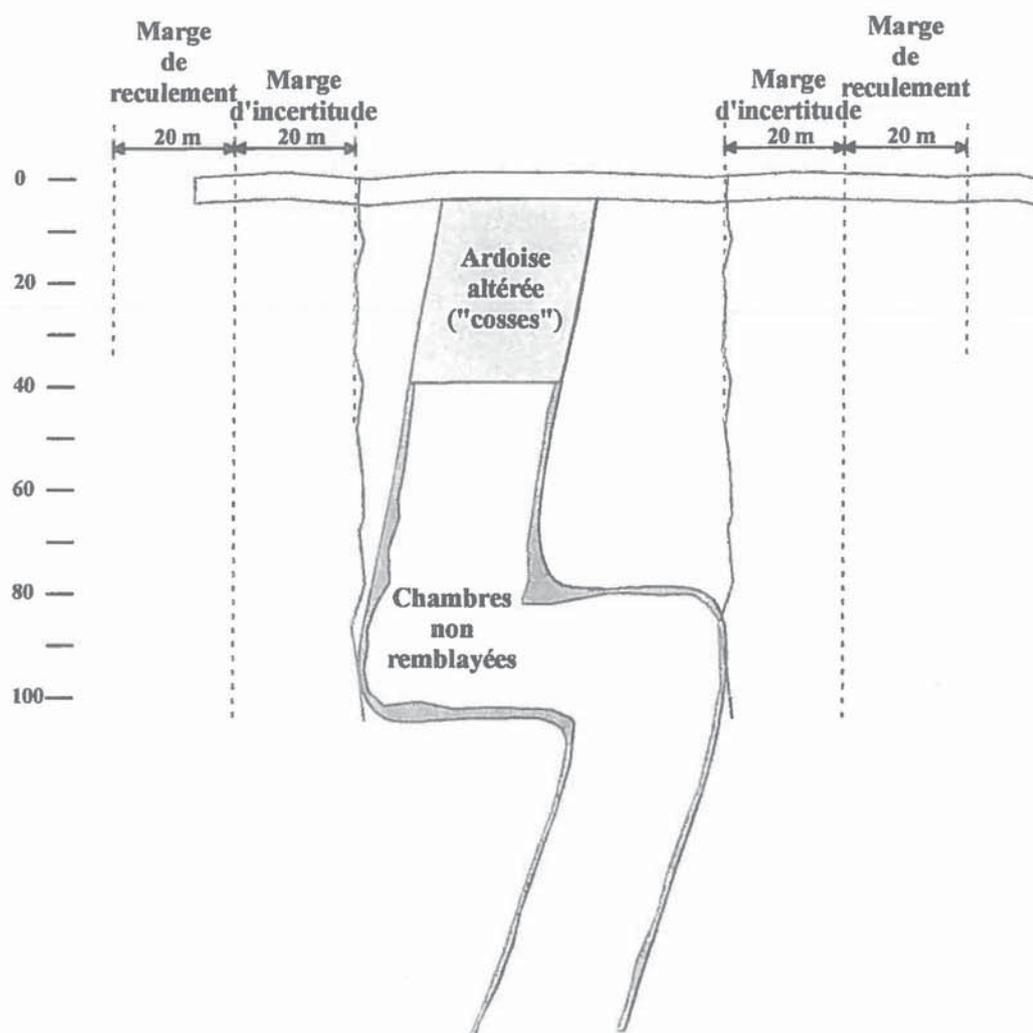


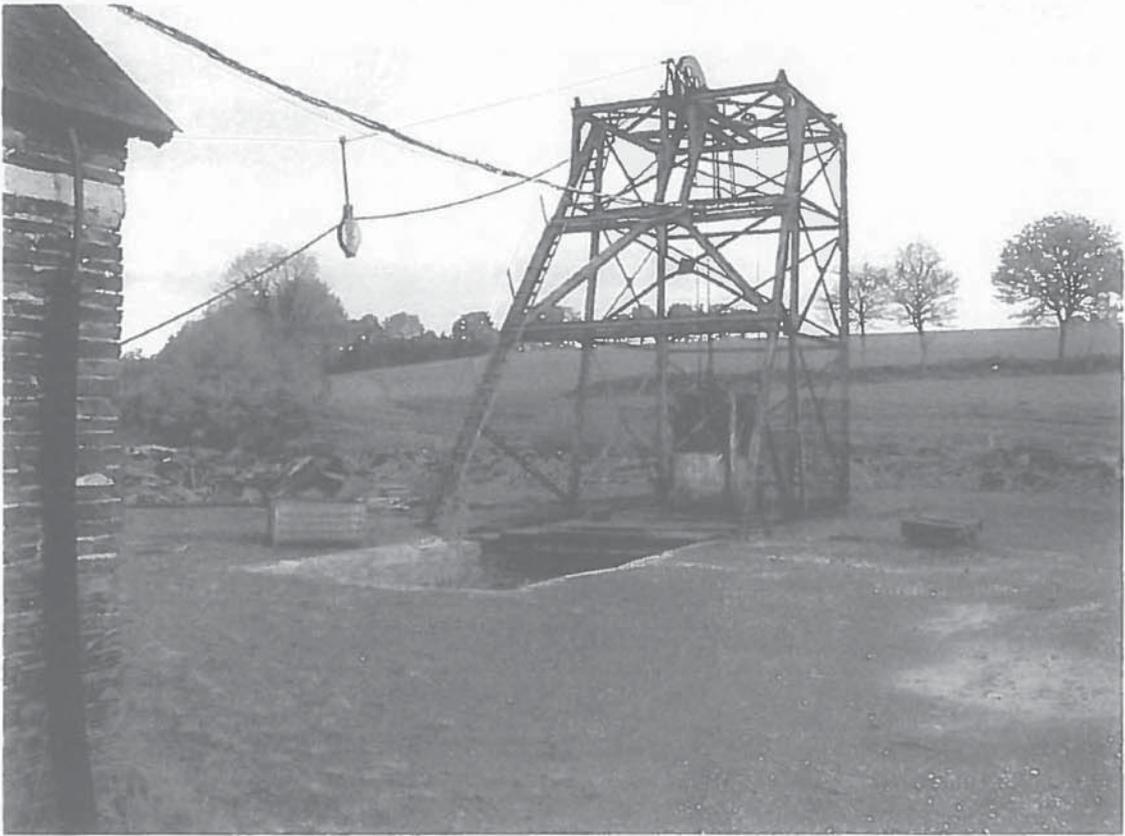
Figure 8 : Détermination des marges de sécurité à l'aplomb des cavités pour la cartographie du zonage des aléas



*Photo n° 1 : Puits Connan, vue du chevalement et des bords du puits  
(Vue prise le 25 avril 2003)*



*Photo n° 2 : Puits Connan, vue de l'orifice et des parois du puits  
(Vue prise le 25 avril 2003)*



*Photo n° 3 : Puits de « la Prairie », vue du chevalement  
et de la nacelle permettant la descente au fond  
(Vue prise le 25 avril 2003)*



*Photo n° 4 : Puits de « la Prairie », vue de l'orifice  
(Vue prise le 25 avril 2003)*



*Photo n° 5 : Puits « du Milieu », vue des abords et du chevalement  
(Vue prise le 25 avril 2003)*



*Photo n° 6 : Puits « du Milieu », vue des abords au niveau du chevalement  
(Vue prise le 25 avril 2003)*



*Photo n° 7 : Puits « du Milieu », vue en contrebas du chevalement  
(Vue prise le 25 avril 2003)*



*Photo n° 8 : Puits « du Milieu », autre vue en contrebas du chevalement  
(Vue prise le 25 avril 2003)*

# Annexe 1

## Historique des méthodes d'exploitation dans les ardoisières des bassins d'Angers – Trélazé et de Segré (Maine-et-Loire)

### TABLE DES MATIERES

1.	INTRODUCTION.....	2
2.	LES FONDS À CIEL OUVERT OU « DÉCOUVERTURES ».....	2
3.	LES PREMIERES EXPLOITATIONS SOUTERRAINNES ISOLÉES.....	3
3.1	LES EXPLOITATIONS LATÉRALES OU « SOUS-CAVAGES ».....	3
3.2	LA MÉTHODE DESCENDANTE SOUS VOÛTE OU « PUIITS BOUTEILLES ».....	3
4.	LES MÉTHODES MONTANTES AVEC REMBLAYAGE.....	5
4.1	LA MÉTHODE PAR « BANCS À MONTER » OU « MÉTHODE MIXTE ».....	5
4.2	LA MÉTHODE CLASSIQUE DITE DES « BANCS À MONTER ».....	6
5.	LES METHODES RÉCENTES.....	8
5.1	LA MÉTHODE DES « BANCS À DESCENDRE ».....	8
5.2	LA MÉTHODE MONTANTE PAR TRANCHES REMBLAYÉES.....	8
6.	BIBLIOGRAPHIE.....	9

## 1. INTRODUCTION

---

L'exploitation des ardoisières dans la région d'Angers est fort ancienne et remonte au Moyen-Age probablement vers le XII<sup>ème</sup> ou le XIII<sup>ème</sup> siècles. Elle se développe quelque peu à partir du XV<sup>ème</sup> siècle et prend un essor considérable au début du XIX<sup>ème</sup> siècle.

Pour plus de détails sur les anciennes méthodes d'exploitation, nous renvoyons le lecteur aux ouvrages spécialisés, tels que celui de M. Soulez-Larivière (1986), le rapport de M. Ichon du bulletin de la SIM (1890), le cours d'exploitation des mines de Haton de La Goupillière (1920) ou au travers des consignes relatives à l'article 137 du Règlement Général. Une description plus synthétique des méthodes classiques pratiquées sur l'ensemble des ardoisières des bassins de Segré et Angers-Trélazé est faite dans ce présent document.

L'exploitation de ces gisements a été réalisée jusqu'à présent par quatre types de méthodes :

- à ciel ouvert, sur d'immenses découvertes atteignant souvent 60 - 80 m, jusqu'à 100 m, parfois plus ;
- par le creusement de grandes chambres isolées desservies chacune par un puits particulier, foncées en descendant en gradins droits sans aucun remblai ;
- par la méthode des chambres montantes séparées par des piliers (« cloisons » ou « bardeaux »), branchées sur une même collectrice reliée à un seul puits d'extraction et foncées par gradins renversés avec remblayage systématique des tranches successives ;
- enfin, depuis les années 1970, par des méthodes plus modernes, montantes ou descendantes, permises par l'introduction de moyens d'abattage hautement mécanisé.

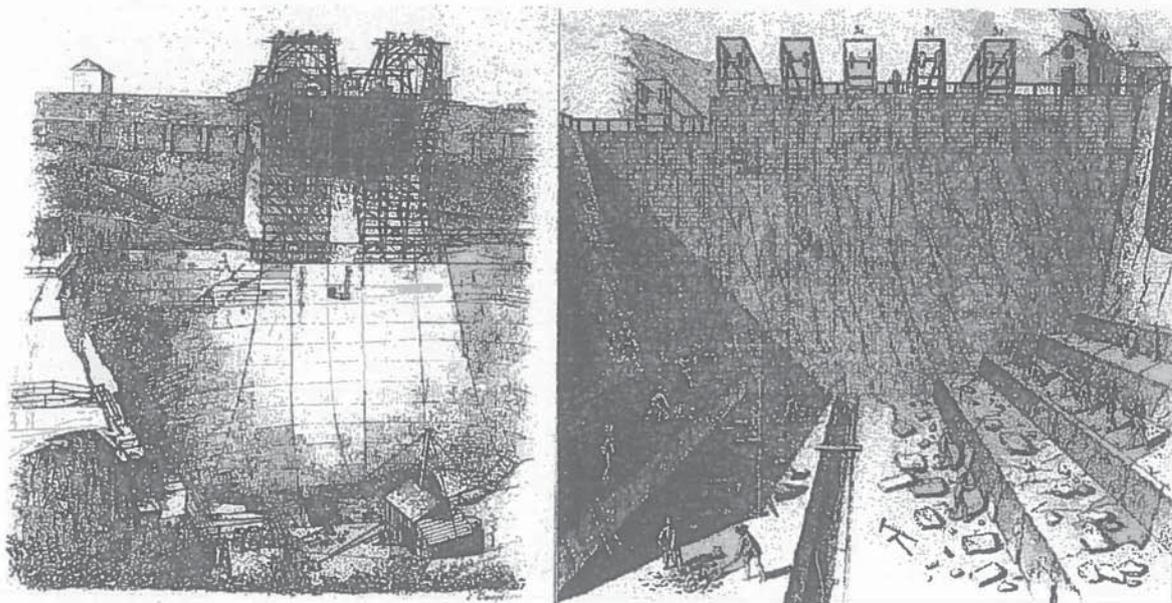
Plusieurs variantes à ces méthodes ont existé, en particulier lors de l'introduction des méthodes d'exploitation en souterrain.

## 2. LES FONDS A CIEL OUVERT OU « DECOUVERTURES »

---

La méthode d'exploitation par fonds à ciel ouvert (ou « découvertures ») est la plus ancienne et ne fut définitivement abandonnée qu'en 1899.

En terrain plat, l'exploitation à ciel ouvert nécessitait d'abord des opérations de découverte pour le décapage des morts-terrains, terres végétales et cosses. La qualité du matériau s'améliorait progressivement avec la profondeur. L'exploitation en gradins débutait par l'ouverture d'une tranchée dans le sens de la fissilité. La hauteur des gradins subverticaux atteignait 4 mètres. L'abattage purement manuel était réalisé à la lance et à l'aide de coins de fer. L'emploi de la poudre noire et des machines d'extraction à vapeur vers la moitié du XIX<sup>ème</sup> siècle a nettement amélioré la productivité des chantiers. La profondeur des fonds dépassa souvent largement la centaine de mètres sur certains sites, jusqu'à près de 150 m dans l'ardoisière de l'Hermitage. La longueur correspondait à la puissance de la veine ardoisière (70 m), tandis que la largeur était le plus souvent maintenue autour d'une cinquantaine de mètres.



*Anciens fonds à ciel ouvert ou « découvertures » (d'après Soulez-Larivière, 1986)*

Ces exploitations étaient rendues dangereuses par les pentes très raides pratiquées afin de minimiser l'emprise en surface et les éboulements fréquents des parois qui menaient souvent à la perte du fond.

### **3. LES PREMIERES EXPLOITATIONS SOUTERRAINNES ISOLEES**

---

#### **3.1 LES EXPLOITATIONS LATERALES OU « SOUS-CAVAGES »**

Les premières méthodes d'exploitation en souterrain furent utilisées dans la région d'Angers, aux Grands-Carreux dès les années 1832-1839. Il s'agissait d'exploitations latérales par galeries ouvertes à partir d'un fond formant des sous-cavages pratiqués dans le rocher sain. L'organisation des chantiers était plutôt anarchique.

#### **3.2 LA METHODE DESCENDANTE SOUS VOUTE OU « PUIS BOUTEILLES »**

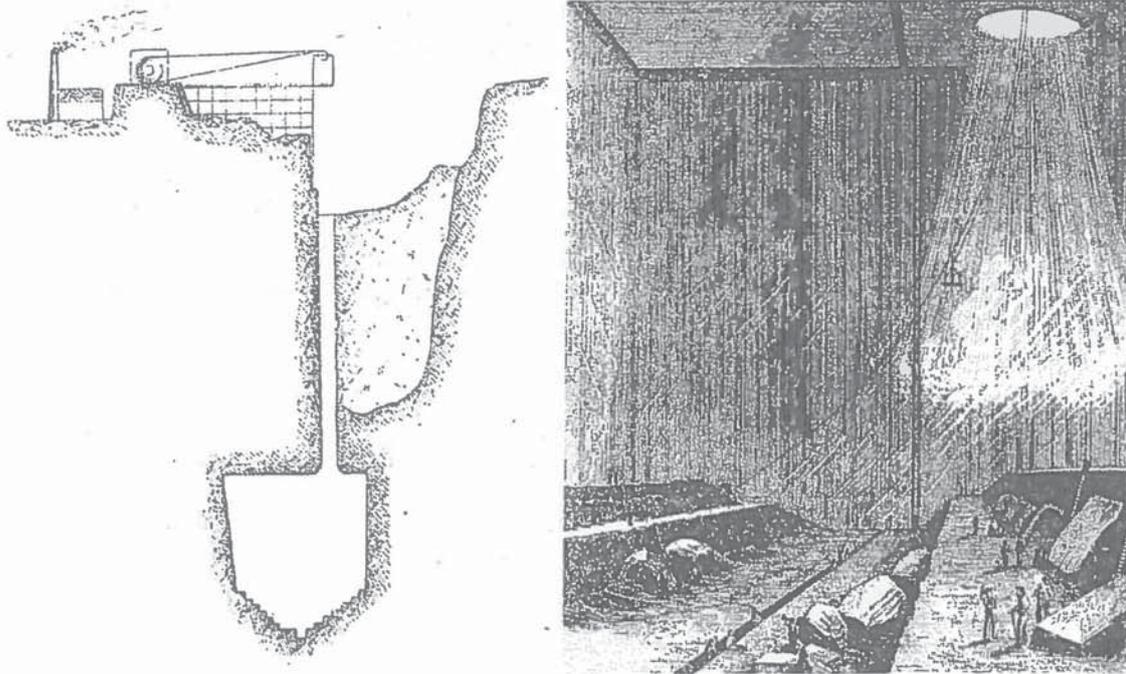
Pour des raisons purement économiques et de gain de gisement par approfondissement, la véritable première méthode d'exploitation en souterrain fut introduite vers les années 1840. Il s'agissait de la méthode descendante sous voûte qui ne cessera véritablement qu'en 1901. Elle était pratiquée à ses débuts suivant deux variantes principales :

- sous les anciens fonds à ciel ouvert, à partir de puits foncés dans les remblais, ou parfois dans le rocher proche ;
- en terrain vierge, à partir de puits descendants, au rocher.

Les travaux de fonçage s'opéraient à la poudre noire et au pic.

Dans la première variante, on laissait un « stot » (planche de protection) d'une épaisseur d'une quinzaine de mètres sous les remblais des anciens fonds. Plusieurs accidents semblent liés à ce type d'exploitation par insuffisance de l'épaisseur du stot ou ignorance de l'emplacement exact du vieux fond.

Dans la seconde variante, la méthode se rapproche des puits bouteilles : le puits, creusé en grande section (au moins 5 x 3 m), s'évasait dans sa partie inférieure jusqu'à 8 à 10 m dans les deux sens, auprès de la voûte. Les voûtes en elles-mêmes faisaient parfois 40 m de côté (30 m pour le puits n° 1 de Misengrain). L'exploitation courante était menée par foncée, première ouverture dans le banc. La hauteur sous voûte (entre semelle et voûte) pouvait dépasser 100 m sur certains sites.



*Anciens fonds sous voûtes exploités par la méthode descendante  
(d'après Haton de la Goupillière, 1920)*

Les accidents furent extrêmement fréquents dans les exploitations ardoisières descendantes et la mortalité par éboulement a atteint pendant la seule période de quinze années (1890 – 1904) le chiffre annuel moyen de 798 sur 100 000 ouvriers du fond, contre 123 pour l'ensemble des houillères de France.

Les causes de ces effondrements et éboulements résultent des quatre mécanismes suivants :

- rupture des stots entre fond et vieux fond à ciel ouvert ;
- rupture des bardeaux entre fonds ;
- rupture des voûtes ;
- éboulements de parois ou de chefs.

Par rupture des stots on peut citer chute du puits n°1 de la carrière des Fresnais, en 1854 et l'effondrement de l'ancien fond à découvert Ste-Marie à Bel-Air en 1894. L'effondrement jusqu'en surface du fond souterrain n° 2 de Grand'Maison en 1887 résulte également d'une avancée en sous-cavage sous un ancien fond en découverte sus-jacent.

La proximité des fonds sous voûte et l'insuffisance de l'épaisseur des bardeaux séparatifs furent à l'origine de plusieurs accidents par effondrement généralisé qui entraînent la ruine des installations de surface. Citons celui et du puits n° 2 des Fresnais en 1862 (pas de victimes), l'effondrement des fonds 1 et 2 des Grands-Carreux en 1868 (3 tués) ou l'effondrement jusqu'en surface du puits n° 1 de Misengrain le 14 novembre 1887 (pas de victimes).

Il semble n'y avoir eu que relativement peu d'accidents par rupture des voûtes dans ce type d'exploitation, en particulier grâce à la surveillance qui y était opérée. Le plus grave accident par éboulement de voûte mentionné est celui du puits n° 10 des Fresnais qui fit 7 tués en 1877. La catastrophe par éboulement sous faible hauteur de voûte (8 m) du puits n° 2 de Misengrain en 1888, qui fit 18 morts, est un cas de rupture de voûte considéré comme isolé et prévisible. D'après le rapport de M. Ichon (1890), elle aurait pu être évitée.

Avec l'approfondissement des travaux, ces exploitations descendantes sous voûte devinrent surtout dangereuses par le risque de rupture des parois. Les ruptures de parois des chambres et les éboulements consécutifs devinrent, en effet, d'autant plus fréquents et graves que la hauteur sous voûte augmentait (les chambres n'étaient pas remblayées). Ce mode de rupture fut à l'origine du plus grand nombre d'accidents mortels recensés, dont l'accident du fond n° 3 des Fresnais du 14 décembre 1860 (9 morts), celui du fond n°4 de La Paperie du 8 novembre 1879 (4 tués) et du 4 juin 1883 (13 morts).

#### **4. LES METHODES MONTANTES AVEC REMBLAYAGE**

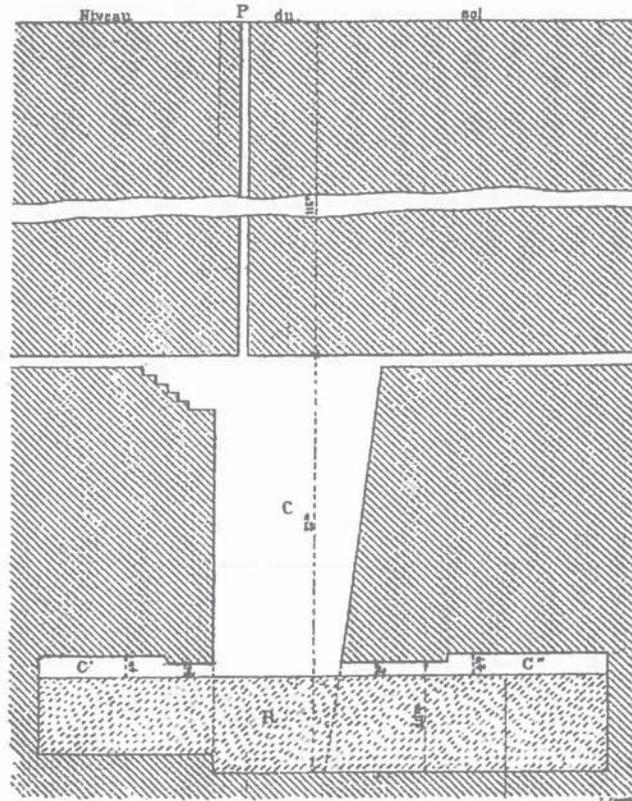
---

##### **4.1 LA METHODE PAR « BANCS A MONTER » OU « METHODE MIXTE »**

En 1878, sur avis du Conseil Général des Mines et compte tenu des dangers inhérents à ce type d'exploitation avec l'approfondissement, les exploitants qui souhaitaient poursuivre selon cette méthode durent se soumettre à un contrôle de plus en plus strict du Service des Mines. En contrepartie, un nouveau mode d'exploitation « par gradins renversés » ou « par bancs à monter » fut mis à l'étude.

Le principe consistait à atteindre tout de suite la plus grande profondeur recherchée, par fonçage d'un puits ou percement d'une galerie latérale à partir d'un vieux fond en descendant, puis à progresser vers le haut par tranches montantes en comblant les fonds par des remblais issus des stériles. De tels exemples sont présents sur le site des Fresnais dans le secteur du Grand-Noyer et Bouc-Cornu (puits 12 et 12 bis, en remontant, 18 et 18 bis, 19 et 19 bis, etc.).

Dans la même année 1878, la première exploitation en remontant débuta sur le site des Grands-Carreux par ouverture d'une avancée de 40 m de longueur « profondeur » sur 35 m de largeur (« portée ») à côté d'un vieux fond pris en descendant (méthode dite « mixte »).



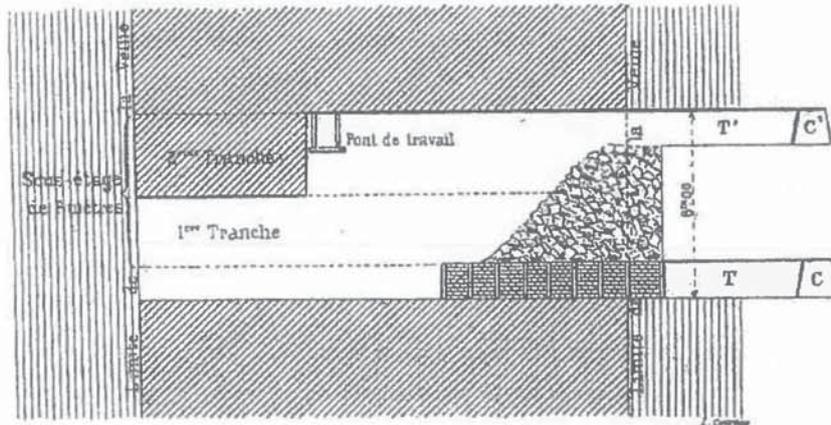
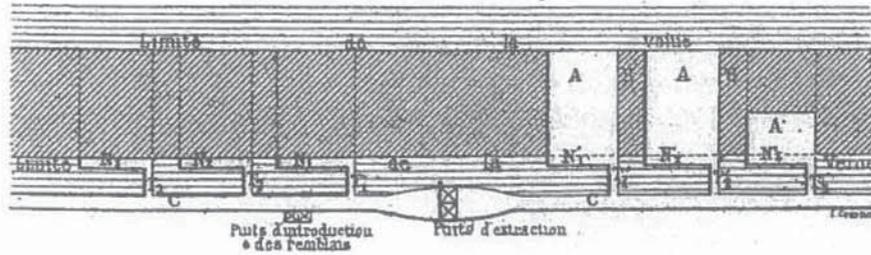
*Anciens fonds sous voûtes et avancées pour exploiter en remontant (méthode mixte)  
(d'après Haton de la Goupillière, 1920)*

D'autres variantes de la méthode par bancs à monter furent utilisées, comme celle du puits indépendant avec une ou plusieurs voûte(s) contiguë(s). Les chambres étaient implantées de façon plus ou moins anarchique et reliées au puits par des galeries non spécifiquement orientées. Cette méthode fut employée autour du puits n° 3 de Misengrain, entre 1889 et 1895.

#### 4.2 LA METHODE CLASSIQUE DITE DES « BANCS A MONTER »

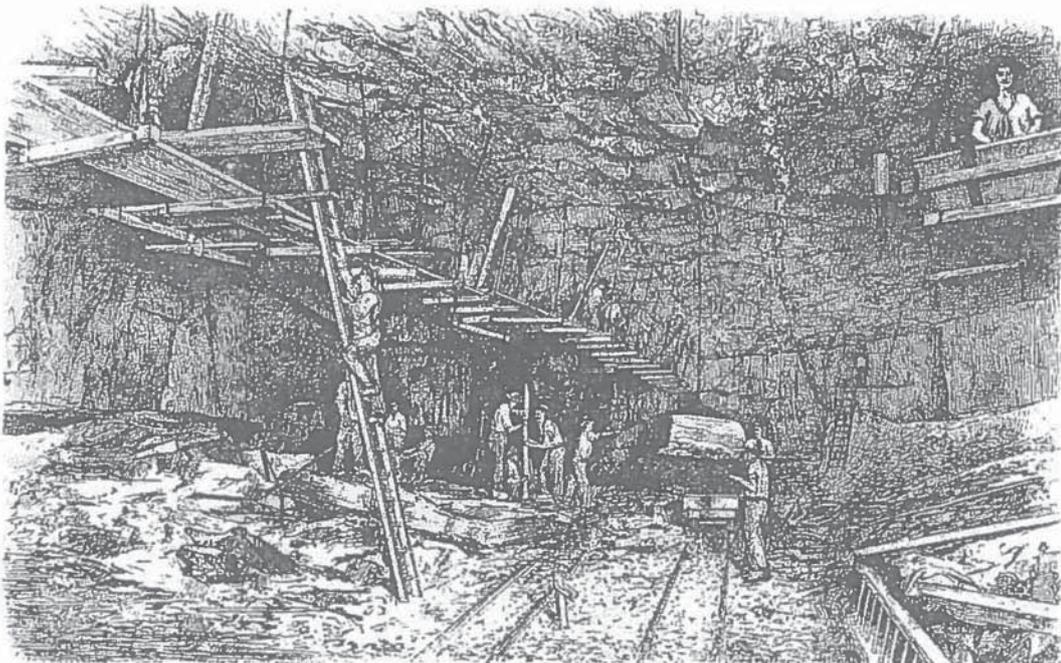
Cette méthode montante, dans des chambres remblayées jusqu'au dernier banc, est la méthode d'exploitation classiquement répandue de la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle jusqu'au dernier quart du XX<sup>ème</sup> siècle.

La méthode montante dite méthode par sous-étages montants et gradins renversés (plus connue sous le terme « bancs à monter »), couramment pratiquée depuis 1890-1895, consiste à foncer le puits d'extraction jusqu'à la profondeur correspondant au niveau de base. Ce niveau est constitué essentiellement de galeries de reconnaissance ou travers-bancs, orientées perpendiculairement au fil de pierre, et/ou de galeries dites collectrices, creusées dans la direction du fil de pierre (schistosité). Les chambres d'exploitation sont disposées de part et d'autre de la collectrice (au nord et au sud) et reliées à elle par une galerie d'accès. On creuse la collectrice au niveau sus-jacent dès que la hauteur maximale des remblais est atteinte. Chaque niveau (ou étage) est séparé du précédent d'une quinzaine de mètres et permet l'exploitation de plusieurs bancs dont la hauteur est généralement comprise entre 3 et 6 m (bancs de 6 m à Misengrain ou à la Brémândière, bancs de 3 m aux Fresnais).



*Exploitation par chambres montantes*  
(d'après Haton de la Goupillière, 1920)

Précisons qu'en fin d'exploitation de la chambre, la dernière tranche sous voûte est abandonnée sans être remblayée, ce qui laisse généralement une hauteur de vide de l'ordre de 3 à 6 m sur une certaine surface de la chambre.



*Exploitation par chambres montantes*  
(d'après Haton de la Goupillière, 1920)

Les dimensionnements des chambres dans les ardoisières bénéficient de l'expérience du passé et suivent les règles édictées dans l'arrêté préfectoral d'autorisation du 29 décembre 1978 qui abroge en particulier l'arrêté préfectoral du 28 août 1922 (propre à l'ardoisière de Misengrain. Dans le bassin de Trélazé, la portée (largeur) est limitée à 35 m, la profondeur (longueur) à 45 m. La largeur des bardeaux est fixée entre 10 et 12 m. La hauteur n'est, en principe, pas limitée si ce n'est selon les consignes réglementaires que « *par le risque de flambage des piliers situés entre les chambres et sur lesquels s'appuient les voûtes* ».

L'abattage du banc est opéré à partir d'une foncée par coups de mines ou havage. L'exploitation du banc peut également être effectuée à l'explosif ou par sciage au fil.

Cette méthode perdura aux Fresnais (veines sud et extrême-sud) jusqu'aux années 1990.

## 5. LES METHODES RECENTES

---

Ces méthodes d'exploitation ne sont ou n'ont été utilisées que dans les ardoisières encore en activité ou abandonnées depuis peu, telles celles de La Pouèze ou de Misengrain, dans le bassin de Segré, ou celles des Fresnais « veine nord » et des Petits-Carreaux, dans le bassin de Trélazé.

### 5.1 LA METHODE DES « BANCS A DESCENDRE »

A partir du milieu des années 1970, l'apparition de l'abattage mécanique, avec sciage au fil et havage, a été à l'origine du développement d'une nouvelle méthode d'exploitation, dite des « bancs à descendre ».

Cette méthode désignée de méthode par sous-étages montants et gradins droits s'opère par enlèvement de tranches successives en descendant à l'intérieur d'un sous-étage (ou « niveau ») de hauteur variable suivant les exploitations. L'exploitation est montante dans la mesure où elle s'effectue du niveau inférieur vers le niveau supérieur. Chaque niveau utilisé pour l'exploitation de bancs de 4 m, est séparé du suivant par une « solette » (ou planche intercalaire) d'une épaisseur de 7 à 15 m (en fait 8 à 10 m).

L'exploitation descendante commence donc par l'ouverture de la voûte à la partie supérieure du sous-étage le plus profond. L'abattage est réalisé mécaniquement. Le remblayage de la chambre s'effectue avant d'entamer le stot entre le niveau exploité et le niveau supérieur.

### 5.2 LA METHODE MONTANTE PAR TRANCHES REMBLAYEES

La dernière méthode pratiquée est une méthode montante par tranches remblayées avec abattage mécanisé.

## 6. BIBLIOGRAPHIE

---

Arrêté préfectoral du 29 décembre 1978 autorisant l'exploitation d'une carrière souterraine sur les communes de Noyant-la-Gravoyère et Bouille-Ménard pour les Ardoisières d'Anjou, 3 p., 29 déc. 1978.

Arrêté préfectoral du 9 janvier 1979 autorisant l'exploitation de la carrière souterraine des Fresnais sur les communes de Trélazé et Saint-Barthélemy d'Anjou pour la S.A. Ardoisières d'Angers, 3 p., 9 janvier 1979.

DE LA GOUPILLIERE (H): Cours d'exploitation des mines. Dunod ed., 3 tomes, 1920.

ICHON (M) : Notice sur l'exploitation souterraine des ardoisières d'Angers. Bull. SIM, p. 753-849, 1890.

ICHON (M) : Rapport de l'ingénieur des Mines sur l'éboulement de l'ardoisière de la Papeterie. Archives départementales n° 15 J 206, 6 p., 15 février 1887.

SOULEZ-LARIVIERE (F) : Les ardoisières d'Angers, 2<sup>ème</sup> édition Ménard-Garnier, 1986.

TRITSCH (J-J) : Assistance technique à l'élaboration d'un dossier de demande d'abandon concernant les carrières de Misengrain - Site de Noyant (49). Rapport INERIS-DRS-00-25078/R01, 97 p., 26 oct. 2000.

TRITSCH (J-J) : Assistance technique à l'élaboration d'un dossier de demande d'abandon. Périmètre des anciennes carrières des Fresnais, Veines sud et extrême-sud, carrière de Trélazé (49). Rapport INERIS-DRS-02-29081/R01, 42 p., 15 janvier 2002.



## Annexe 2

# Mécanismes de rupture et dimensionnement des ouvrages dans les ardoisières des bassins de Trélazé et Segré (Maine-et-Loire)

### TABLE DES MATIERES

<b>1. MODES DE RUPTURE SYMPTOMATIQUES DES ARDOISIÈRES .....</b>	<b>2</b>
1.1 LES ÉBOULEMENTS DANS LES VIEUX FONDS A CIEL OUVERT .....	2
1.2 LES ÉBOULEMENTS DANS LES VIEUX FONDS SOUS VOÛTES ET CHAMBRES DESCENDANTES.....	2
1.3 LES ÉFFONDREMENTS DANS LES VIEUX FONDS SOUS VOÛTES ET CHAMBRES DESCENDANTES.....	5
1.4 LES CHAMBRES MONTANTES REMBLAYÉES.....	6
<b>2. DIMENSIONNEMENT ET RÈGLES D'EXPLOITATION.....</b>	<b>8</b>
2.1 RÈGLES DE DIMENSIONNEMENT .....	8
2.2 RÉTROANALYSE DES ÉVÈNEMENTS PASSÉS .....	10
<b>3. BIBLIOGRAPHIE .....</b>	<b>11</b>

## **1. MODES DE RUPTURE SYMPTOMATIQUES DES ARDOISIÈRES**

Une analyse synthétique des documents d'archives effectuée sur les bassins ardoisiers d'Angers - Trélazé et de Segré a permis d'identifier les accidents les plus représentatifs et les mécanismes de rupture symptomatiques qui sont synthétisés dans le tableau n° 1, ci-après.

Les différents scénarios d'accidents observés dans l'histoire des ardoisières sont examinés ci-dessous en fonction des différentes méthodes d'exploitation pratiquées au cours du temps.

### **1.1 LES EBOULEMENTS DANS LES VIEUX FONDS A CIEL OUVERT**

Ces exploitations prises « en découverte » étaient rendues dangereuses par les pentes très raides pratiquées afin de minimiser l'emprise en surface et les éboulements fréquents des parois qui menaient souvent à la perte du fond. Rien que dans le secteur du bassin de Trélazé, sur l'ensemble des quatre fonds des Fresnais, trois durent être abandonnés définitivement à la suite de gros éboulements de parois : le fond n° 2 en 1829, dont l'éboulement remblaya en partie la carrière et emporta la machine d'extraction, le fond n° 3 en 1840 (sans faire de victimes), et le fond n° 1, détruit par l'effondrement du vieux fond sous voûte de 1862 (figure 1). A La Paperie, l'éboulement du fond Est, en 1836, provoqua l'écroulement de la machine d'extraction. Certains de ces fonds subsistent toujours et peuvent présenter des dangers dans leurs abords pour les personnes qui y circulent.

### **1.2 LES EBOULEMENTS DANS LES VIEUX FONDS SOUS VOUTES ET CHAMBRES DESCENDANTES**

Les accidents les plus nombreux et les plus meurtriers sont imputables aux anciennes exploitations souterraines qui débutèrent dans la région d'Angers, dès 1832, pour pallier l'arrêt des découvertes devenues trop profondes.

Les méthodes d'exploitations du XIX<sup>ème</sup> siècle furent opérées par chambres descendantes, qu'il s'agisse de la méthode la plus ancienne des fonds sous voûtes, de celle des avancées ou de la méthode mixte descendante et remontante latéralement. Les cavités demeuraient généralement vides après exploitation. Très peu d'entre elles furent remblayées. Les instabilités de ces chantiers donnent lieu à des éboulements (de parois ou de voûtes) le plus souvent limités au volume de la chambre, mais aussi à des effondrements parfois importants en surface.

Les éboulements au fond, particulièrement meurtriers, sont sans incidence sur la surface dès lors que leur évolution atteint un nouvel état d'équilibre, sans affecter les structures les séparant des travaux sus-jacents ou adjacents (stots ou bardeaux). Ils constituent toutefois, par vieillissement des ouvrages, une menace à long terme sur les cavités proches.

Les mécanismes de rupture caractéristiques sont les suivants :

- éboulement par rupture de voûte ;
- éboulement par rupture de paroi.

Mécanismes	Exemples types	Méthode d'exploitation	Profondeur	Schéma dimensionnement	Facteurs aggravants	Typologie accident	Conséquences	Dégâts en surface	Victimes
Rupture de voûte dans une chambre	Les Grands Carreaux (22/11/1851)	descendante sous voûte (puits bouteille)	voûte à -45m	40x40m, environ	intersection du chef par un assereau	éboulement (3 000m <sup>3</sup> )	chute formant un cœur de 4m	non	non
	La Forêt (6/08/1888)	ancien fond n°1 descendant, repris en montant	voûte à -6m	40x40m, environ	intersection d'une chauve et d'une rembrayure inclinée	éboulement (5 000m <sup>3</sup> )	hauteur du cœur : 20m	non	non
	Misengrain, puits n°2, (15/11/1888)	ancien fond n°2 descendant	voûte à -106 m	40x30	intersection d'une chauve et d'une rembrayure	éboulement en voûte (750m <sup>3</sup> )	hauteur du cœur : 7m	non	18 morts
Rupture de paroi dans une chambre	Les Fresnais (14/12/1860)	ancien fond descendant sous voûte	voûte à -40m	40x40m, environ	présence d'une chauve	éboulement de paroi (600m <sup>3</sup> )	Chute du parement sur une hauteur de 30 m	non	11 morts
	Les Grands Carreaux (2/10/1864)	fonds descendant sous voûte	voûte à -115m	40x40m, environ		éboulement de paroi (8000m <sup>3</sup> )	pas de détails	pas de détails	pas de détails
	Les Fresnais (13/07/1877)	avancée à partir d'une chambre descendante	voûte à -50m		tête de l'avancée du chef ouest	éboulement de la tête		non	6 morts
	La Papeterie, fond n°4 (4/06/1883)	fond descendant sous voûte	voûte à -59m		nombreux délits	éboulement (15 000m <sup>3</sup> )	effondrement du puits implanté dans les remblais	immense cratère en surface par défournement des remblais	13 morts
Rupture de bardeaux (pilier) entre chambres ou fonds sous voûtes	Les Fresnais, fonds n°1, 2 et 3 (18/05/1862)	fonds descendants séparés par des bardeaux de largeur insuffisante	inconnu	grandes chambres formant une surface sous-cavée très importante	voisinage de découvertures	effondrement généralisé après éboulement des bardeaux (500 000m <sup>3</sup> )	pas de détails	pas de détails	non
	Les grands Carreaux (5/01/1868)	fonds descendants séparés par des bardeaux de largeur insuffisante (10m)	fond à -115m	grandes chambres formant une surface sous-cavée très importante (7 000m <sup>2</sup> )	voisinage de découvertures	effondrement généralisé après éboulement des bardeaux (450 000m <sup>3</sup> )	effondrement en surface sur 9000m <sup>2</sup>	engloutissement des machines, chaudières, destruction des puits 1 et 2 et de l'usine à gaz	3 morts au jour
	Misengrain, puits n°3, (12 avril 1894)	ancienne méthode montante à coté d'anciennes chambres descendantes sous voûte	semelle à -88m, voûte à -52m	petites chambres 15x25m, bardeaux de moins de 10m	proximité immédiate du puits n°1 effondré (moins de 10 m)	éboulement du puits n°3 et de la chambre 21	perte du puits	pas de détails	non

Tableau 1 : Typologie des principaux scénarios accidentels dans les ardoisières

## Annexe 2 : Mécanismes de rupture symptomatiques des ardoisières

Rupture de stots entre avancées ou chambres et vieux fonds remblayés	Les Fresnais, fonds n°1 et 2 (1/09/1854)	fonds descendants sous voûte	inconnue	inconnu, mais probablement schéma type de ce mode d'exploitation (stot de 15m)	vieux fond à ciel ouvert sus-jacent	éboulement suivi d'un effondrement par défournement des remblais du vieux fond	arrêt de l'exploitation des deux fonds	pas de détails	pas de détails
	Grand'Maison, fond n°2 (1887)	fond montant pris à coté d'un fond descendant sous voûte formant avancée	inconnue	inconnu, mais probablement schéma type de ce mode d'exploitation (stot de 15m)	vieux fond à ciel ouvert sus-jacent	effondrement jusqu'à la surface après éboulement du fond n°2 et défournement des remblais	chute du puits n°2 et arrêt du puits n°3 situé non loin	machines et chaudières situées en surface entraînées dans l'effondrement	pas de détails
	Bel-Air La forêt, puits n°1 et 2, ancien fond Sainte Marie (22 juin 1894)	fond montant pris à coté d'un fond descendant sous voûte formant avancée d'une découverte sus-jacente	voûte à 110m	épaisseur du stot sous la découverte: 18m	éboulements successifs depuis 1888 à l'aplomb d'un vieux fond en découverte (Sainte Marie)	éboulement d'une chambre insuffisamment remblayée, avec irruption des eaux accumulées dans la découverte	effondrement total jusqu'à la surface (3 500m <sup>2</sup> )	pas de détails	pas de détails
Rupture des bardeaux entre chambres contiguës	Misengrain, puits n°4 (novembre 1908)	ancienne méthode montante	semelle à 163m, voûte à 110m	chambres contiguës (20x50m) séparées par des bardeaux de moins de 10m (7 à 8m)	présence d'accidents structuraux parallèles aux bardeaux des chambres	effondrement généralisé après rupture des piliers séparatifs (bardeaux)	affaissement en surface (35cm) avec crevasses, abandon du puits	bâtiments ruinés en surface (forge, atelier du groupe électrique, cheminée de chaufferie)	non
	Misengrain, puits n°5 (26 mars 1922)	ancienne méthode montante	semelle à -160m, voûte à -104m	chambres contiguës (20x50m) séparées par des bardeaux de moins de 10m (7 à 8m)	présence d'accidents structuraux parallèles aux bardeaux des chambres	effondrement généralisé après rupture des piliers séparatifs (bardeaux)	affaissement très important en surface (3,50 à 4,00m) sur une surface de plus de 8000m <sup>2</sup> , avec apparition de larges crevasses	puits et machine d'extraction descendus verticalement, scierie disloquée, tous les bâtiments en périphérie totalement ruinés	non
Rupture de stot sous d'anciennes exploitations montantes remblayées	Grand-Maison (1928 et 1942)	vieux travaux exploités en montant séparés par un stot de 24 m de vieux fonds descendants	voûtes à -216m	séparation des travaux par un stot de 24m d'épaisseur	vieux travaux sus-jacents descendants vides et vieux fonds à ciel ouvert.	rupture du stot entraînant la rupture des vieux travaux sus-jacents	effondrement généralisé jusqu'en surface (7 ha) après vidange des vieux fonds remblayés	affaissement maximal de 1m en surface. Dégâts aux installations de surface et sur plusieurs maisons	non
	La Pouèze (octobre 1990)	chantiers récents descendants mécanisés sous vieux travaux exploités en montant	voûtes à -375m	séparation des travaux par une solette (ou stot) de 15m d'épaisseur	vieux travaux sus-jacents montants remblayés (bardeaux de 20m) avec vides	rupture de la solette entraînant la rupture des bardeaux des vieux travaux sus-jacents	effondrement généralisé jusqu'en surface (3 ha) après vidange des anciennes chambres remblayées	affaissement maximal de 3m en surface. Dégâts aux installations de surface et sur plusieurs pavillons	non

Tableau 1 (suite) : Typologie des principaux scénarios accidentels dans les ardoisières

Ces instabilités se traduisent le plus souvent par des phénomènes de chutes de blocs (issues des parements ou de la voûte), chutes de voûte (« cœur ») ou d'éboulements dont les conséquences sont parfois dramatiques. Le rapport de M. Ichon (1890) dénombre sur une quarantaine d'années (1850-1889), rien que dans la région d'Angers, près de 134 victimes (dont 65 tués) dans les chambres descendantes. Sur une période équivalente, la méthode montante réduira très sensiblement ce chiffre à près de 47 victimes (dont 29 tués).

Les rapports d'accidents, montrent que ces instabilités sont essentiellement liées :

- à un dimensionnement trop important des chambres (surtout dans le sens de la profondeur) ;
- à la présence de fractures formant un dièdre en voûte (intersection d'une bavure et d'une rembrayure). Les ruptures localisées de paroi sont essentiellement dues à la présence de fractures plutôt qu'au flambage du pilier.

Notons que la hauteur des cloches d'éboulements en voûte (« cœur ») peut atteindre très souvent 6 à 7 m (accident du puits n° 2 de Misengrain en 1888, qui fit 18 tués), jusqu'à 20 m (accident de l'exploitation de La Forêt en 1888, pas de victimes). Ce mécanisme peut alors être la cause d'un effondrement généralisé si le stot séparant des travaux superposés vient à lâcher.

### 1.3 LES EFFONDEMENTS DANS LES VIEUX FONDS SOUS VOUTES ET CHAMBRES DESCENDANTES

Les données historiques recensent un certain nombre d'effondrements accompagnés de dégâts de surface plus ou moins importants au voisinage du puits. Ces phénomènes se manifestent par la rupture de structures portantes des ouvrages souterrains qui peuvent se traduire par des éboulements affectant un volume important de l'exploitation et susceptibles d'évoluer en surface sous forme d'effondrements ou d'affaissements. Le puits d'extraction est souvent entraîné dans le mouvement d'effondrement (« chute du puits »).

L'analyse des causes des accidents, accompagnés de phénomènes d'effondrement en surface, fait apparaître les mécanismes de rupture suivants :

- rupture de bardeaux (piliers) entre fonds sous voûtes (anciennes exploitations du XIX<sup>ème</sup> siècle) ;
- rupture de paroi entraînant la rupture de la voûte jusqu'en surface ;
- rupture de stots entre avancées et vieux fonds remblayés.

L'accident le plus fréquent est l'effondrement d'anciens fonds sous voûtes (ou « puits bouteilles »), soit par rupture des bardeaux (piliers), soit par rupture des voûtes. Dans le premier cas, la raison de la rupture est due à une insuffisance de la largeur des bardeaux (généralement inférieure à 7 m). Dans le second cas, la rupture de la voûte est essentiellement liée aux dimensions excessives de la chambre (profondeur ou portée). Bien évidemment, les discontinuités du massif rocheux ainsi que le découpage souvent anarchique des chambres ont un rôle fortement aggravant, voire déclenchant dans le processus de rupture.

Les très nombreux cas d'effondrements de vieux fonds sous voûtes, au cours du XIX<sup>ème</sup> siècle (rapport M. Ichon ; 1890), sont illustrés par les quelques exemples donnés ci-dessous :

- effondrement des fonds n° 1 et n° 2 des Fresnais du 1<sup>er</sup> septembre 1854 (1 tué) ;
- nouvel effondrement du fond n° 1 des Fresnais, le 18 mai 1862 (figure 1). La rupture des bardeaux séparant les fonds n° 1 et n° 3 provoqua l'effondrement complet des trois fonds et la chute du puits n° 2, entraînant au fond les installations de surface. Cet accident spectaculaire ne fit pas de victimes ;
- effondrement des fonds n° 1 et n° 2 des Grands Carreaux en 1868 (figure 2) qui fit 3 tués. Les chaudières, machines et charpentes des deux puits, ainsi que l'usine à gaz furent englouties ;
- chute du fond n° 4 de La Paperie qui fit 13 morts en 1883. La partie supérieure du puits s'est complètement effondrée en laissant un immense entonnoir à la surface ;
- chute du puits n° 1 de Misengrain en 1887 qui entraîna en surface la machine d'extraction et le bâtiment des machines ;
- nouvel effondrement du fond n° 4 de La Paperie en 1887 (figure 3). La rupture de la voûte de ce fond, abandonné depuis plusieurs années, provoqua une vidange des remblais du vieux fond sus-jacent et l'apparition d'une cuvette d'effondrement en surface marquée d'importantes crevasses dans un rayon de 40 à 50 m autour du puits (Archives DRIRE, 1887) ;
- effondrement du fond n° 2 de Grand'Maison, en 1887, par rupture de la voûte de l'avancée n° 2 (figure n° 4). Le débouillage des remblais entraîna la chute et la perte du puits, la chute des installations du jour, machines et chaudières, et des dégâts de surface importants ;
- effondrement de l'ancien fond Sainte-Marie de Bel-Air-La-Forêt de 1894 par rupture d'un stot dont l'épaisseur était de 18 m (figure 5). L'épaisseur minimale de 15 m du stot séparatif sous les remblais des anciennes découvertes préconisée par le Service des Mines au milieu du XIX<sup>ème</sup> se révéla insuffisante.

#### 1.4 LES CHAMBRES MONTANTES REMBLAYEES

La méthode des chambres montantes remblayées fut introduite à la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle. Conçue par M. Blavier, Ingénieur des Mines à Angers, dès 1863, elle fut préconisée par avis du Conseil Général des Mines, et débuta en 1878 dans l'ardoisière des Grands-Carreaux (basin de Trélazé). Elle visait à améliorer le découpage des exploitations et surtout diminuer le nombre des victimes particulièrement élevé dans les chantiers menés par la méthode des chambres descendantes. Elle devint la méthode classique d'exploitation des ardoisières et ne fut progressivement remplacée qu'à partir des années 1970 par des méthodes mécanisées plus modernes tout en perdurant, comme aux Fresnais, jusqu'en 1990.

Cette méthode permit effectivement de diminuer considérablement le nombre des accidents, mais l'augmentation de la dimension latérale des champs d'exploitation et de la profondeur provoqua quelques rares cas d'effondrement souvent spectaculaires par leur étendue dont mécanismes de rupture sont les suivants :

- rupture des bardeaux entre chambres montantes contiguës ;
- rupture de la planche (stot) sous les anciens travaux descendants ou les anciens fonds remblayés ;
- rupture de la planche (stot ou solette) entre exploitations ou niveaux superposés.

Ces ruptures situées à assez grande profondeur (100 à 400m) présentèrent des signes prémonitoires d'instabilité avant l'accident qui permirent probablement d'éviter de nombreuses victimes.

Chacun de ces processus est illustré par les exemples suivants :

- effondrements de 1908 et 1922 des puits n° 4 et 5 de l'exploitation de Misengrain (bassin de Segré) par rupture en chaîne des piliers séparant les chambres (figure 6) ;
- effondrement du champ d'exploitation du puits n° 6 de Grand-Maison (bassin de Trélazé), en 1928 et 1942 ; et du fond n° 5 de La Paperie, le 22 juin 1941 (également à Trélazé), par rupture de stot ;
- effondrement de La Pouèze (bassin de Segré) en 1990 par rupture de la planche séparative (solette) entre des niveaux d'exploitation superposés (figure 7).

L'effondrement généralisé, par rupture des bardeaux, de l'exploitation de Misengrain résulte de la profondeur des chantiers (comprise entre 100 à 250 m) et de la largeur insuffisante des piliers (inférieure à 10 m).

L'effondrement des travaux du puits n° 4 (1908) fut à l'origine de dégâts très importants sur les bâtiments de surface et de son abandon au début de l'année 1909. L'ensemble complet du terrain s'affaissa en donnant lieu à un effondrement au jour qui fit apparaître des lézardes un peu partout dans les bâtiments de surface. Un affaissement de 35 cm fut constaté dans le bâtiment du groupe électrique. L'atelier des forges fut ruiné et la cheminée de la chaufferie s'inclina de façon inquiétante au point qu'il fallut la raccourcir. Les quatre chambres à l'ouest du puits furent abandonnées.

L'effondrement des travaux du puits n° 5 (figure 6) se manifesta par des mouvements inquiétants observés au fond le 20 mars 1922. En surface, d'autres mouvements semblaient indiquer un rejeu des terrains affaissés du puits n° 4, au niveau de la forge, des ateliers de mécanique et de sciage. L'effondrement généralisé se produisit brusquement dans la nuit du 26 mars en formant de grandes cassures. Une grande cuvette se forma en surface sur près de 8 000 m<sup>2</sup>, donnant un affaissement maximal de 3,50 à 4,00 m. Des dégâts considérables furent constatés sur tous les bâtiments situés en périphérie. Le puits et la machine d'extraction furent détruits ainsi que la scierie.

Un cas typique de rupture de planche intercalaire (ou stot) est représenté par l'accident du champ d'exploitation du puits n° 6 de Grand-Maison en 1928 et 1942. Le phénomène démarra par un éboulement des terrains entre les chantiers par chambres montantes et les anciens fonds descendants laissés vides, surmontés eux-mêmes d'anciennes découvertures. L'épaisseur du stot séparatif était de l'ordre de 24 m. Le processus évolua progressivement jusqu'à l'effondrement des terrains de surface qui se produisit en 1942. Le rapport du Service des Mines signale un affaissement généralisé de la surface qui s'est produit sur toute l'étendue des travaux de cette exploitation. On constata la présence d'une cuvette d'affaissement d'environ 150 m de rayon dont le centre accuse une dénivellation de plus de 1 mètre. De nombreuses crevasses larges jusqu'à 30 cm sont apparues en périphérie de la zone. Les dégâts furent importants tant sur les bâtiments de l'exploitation que sur quelques demeures privées voisines (Archives DRIRE, 1928 et 1942).

Un autre exemple est fourni par l'effondrement du fond n° 5 de La Paperie, le 22 juin 1941. Ce vieux fond, abandonné en 1891, s'est effondré par rupture du stot en voûte, entraînant un déséquilibre du bardeau séparant le fond n° 5 du fond n° 4. Un entonnoir assez considérable s'est formé en surface, menaçant les constructions les plus proches du petit village des « Glairies ». L'effondrement provoqua une inondation en renvoyant l'eau qui remonta par le puits n° 3 de « La Cadette » en passant par dessus la route au Sud de ce puits (archives DRIRE, 1953). On notera qu'il aura fallu attendre une cinquantaine d'années pour que la rupture se produise.

Le processus de rupture de la planche séparative (solette) entre exploitations superposées est illustré par l'effondrement de La Pouèze en 1990 (figure 7). La rupture du stot (épais de 16 m) entre les étages - 375 m et - 356 m dans trois chambres vides, entre les travaux récents (1989) et les anciens travaux remblayés (1945 à 1973), est suivie d'un débouillage des remblais et de la rupture des bardeaux entre les anciennes chambres montantes remblayées. Le mouvement affecte un ancien vide de 3 m, d'extension inconnue, puis finalement provoque l'effondrement des anciens fonds remblayés sus-jacents. Au vu des plans d'exploitation, le stot séparatif de 30 à 35 m d'épaisseur, séparant la voûte des chambres montantes et cet ancien vide, n'aurait pas suffi à bloquer l'évolution du processus de rupture. Les conséquences ont été graves vis-à-vis des bâtiments situés en surface avec la formation d'une vaste cuvette d'affaissement (3 ha) atteignant près de 3,5 m d'amplitude (Schwartzmann, 1991).

### *Remarque*

Dans ces trois exemples d'accidents, on a pu constater que les mouvements ne s'étaient pas produits de façon instantanée ou spontanée, mais en plusieurs jours (voire plusieurs mois ou plusieurs années), avec des épisodes dynamiques importants. La profondeur explique en grande partie ce phénomène. Pour des travaux à faible profondeur (moins de 150 m) on aurait probablement eu une évolution plus dynamique de l'effondrement.

## **2. DIMENSIONNEMENT ET REGLES D'EXPLOITATION**

---

### **2.1 REGLES DE DIMENSIONNEMENT**

Les règles de dimensionnement dans les ardoisières bénéficient de l'expérience du passé. Elles sont concrétisées par les prescriptions édictées dans le décret du 27 janvier 1896 réglementant l'exploitation des carrières du département du Maine-et-Loire (abrogé par l'article 27 du décret du 4 juillet 1972) ou celles émanant d'arrêtés d'application spécifiques (comme celui du 28 août 1922 pour l'ardoisière de Misengrain abrogé par l'arrêté préfectoral d'autorisation du 29 décembre 1978).

un classement synthétique de l'évolution des dimensionnements apparaît dans le tableau comparatif suivant (tableau 2) :

Méthodes	Montante	Descendante	Montante	Descendante	Montante	Montante	Montante
Ardoisière	Misengrain (-74m -130m)	Misengrain (-194m -231m)	Bel-Air	La Pouèze	Trélazé	Grands-Carreux	Grand'Maison
Portée (largeur)	20 à 22m	20m	16 à 17m	25 à 30m	40 à 50m limitée à 35m	40 à 50m	25 à 30m
Profondeur (longueur)	60m	60m	Illimitée (sauf ch. 5, limitée à 90m)	35m	40 à 50m limitée à 45m	40 à 45m	35 à 40m
Hauteur maximale des chambres	illimitée	30m	Illimitée	Illimitée (praticqué : 40 à 50m)	Illimitée avec remblais (praticqué : 135m)	Illimitée (praticqué : 140m)	100m
Largeur du bardeau entre chambres (pilier)	15m	15m	12m (2/3 de la portée)	12m au minimum	10m (praticqué : 12m)	10m (praticqué : 12m)	1/3 de la portée
Épaisseur des bancs	6m	1.80m	3m	1.80m	3m	3m	6m
Hauteur des niveaux	12m	37m	21m	40m	21m	21m	18m
Épaisseur de la solette entre niveaux		7 à 15m					
Remblayage	immédiat	A la fin	immédiat		immédiat	immédiat	immédiat
Épaisseur du stot séparatif avec les vieux travaux	>20m	>20m			>15m		

Tableau n°2 : Dimensionnement des ouvrages souterrains dans les exploitations des ardoisières des bassins de Trélazé et de Segré (documents DRIRE)

Ce tableau fait référence aux méthodes récentes pratiquées dans les différentes ardoisières des bassins de Trélazé et de Segré.

On constate globalement sur ce tableau que, hormis la longueur de la chambre (profondeur) qui varie plutôt en fonction de la puissance de la veine, pour des considérations géotechniques, les dimensions fondamentales des ouvrages souterrains sont relativement comparables entre elles, toutes exploitations confondues.

On notera ainsi la constance de la largeur du pilier (bardeau), 12 à 15 m, de l'épaisseur des stots séparatifs, 15 à 20 m, et des solettes entre niveaux, de 7 à 15 m. La hauteur des chambres, en principe « illimitée » (en dehors de Misengrain suite à l'accident de 1922), est en fait limitée par l'exploitant, en particulier pour l'application de la méthode descendante la plus récente.

Pour des raisons de tenue des voûtes, des différences sensibles sont observées pour la largeur (portée) des chambres, comprise entre 20 et 40 m. Les exploitations les plus récentes évoluent vers des largeurs plus faibles, de l'ordre de 20 m, la profondeur des travaux augmentant.

Dans la méthode montante, la géométrie des piliers n'est pas rigoureuse, ce qui est, en principe, compensé par le remblayage immédiat. Dans la méthode descendante, les piliers ont une épaisseur croissante et leur géométrie est rigoureuse.

Il n'existe pas d'étude spécifique concernant l'épaisseur des stots.

En ce qui concerne l'épaisseur des solettes entre niveaux, la pratique veut qu'une solette de 7 à 15 m (en fait plutôt 7 à 10 m) soit laissée entre les différents niveaux tant en méthode montante mécanisée qu'en méthode descendante avec havage.

## 2.2 RETROANALYSE DES EVENEMENTS PASSES

Cette démarche, représentée de façon synthétique dans le tableau n°3, ci-après, résume les données informatives acquises sur les bassins ardoisiers d'Angers – Trélazé et de Segré (Tritsch, 2000-2002). Elle intègre directement ou indirectement les limites dimensionnelles observées, les mécanismes de rupture qui s'y rattachent et donne un indice de probabilité – délai correspondant à la prévision de rupture, pouvant affecter la surface, déduite de l'analyse historique.

Elle vise à évaluer la probabilité de retour d'événements accidentels passés, à condition d'intégrer parallèlement le contexte d'exploitation à partir des critères suivants :

- configurations particulières d'exploitation (méthode d'exploitation et conditions de site) ;
- configurations locales spécifiques (structure du gisement, épaisseur des morts-terrains, présence de vieux fonds, etc.) ;
- caractéristiques géométriques des ouvrages souterrains spécifiques à un mode d'exploitation particulier (régularité du découpage, imbrication des ouvrages, etc.) ;
- dégradation des ouvrages souterrains (vieillesse, effet de la remontée des eaux, etc.).

Paramètres de dimensionnement (rétro-analyse historique)	Dimensionnement et probabilité de rupture			
	Court terme (exploitation)	Moyen terme (valeurs basses)	Moyen terme (valeurs hautes)	Long terme (centennal)
Largeur des piliers (m)	< 7	7 - 10	10 - 15	> 15
Épaisseur des stots entre exploitations superposées (m)	< 15	15 - 20	>20	>> 20
Épaisseur des solettes entre niveaux (m)	< 6	6 - 8	8 - 20	> 20

*Tableau n°3 : Probabilités de rupture des structures souterraines en fonction du temps*

Le court terme correspond à la phase d'exploitation ou à une durée limitée après l'abandon des travaux, c'est-à-dire à une échelle décennale ou un peu plus, le moyen terme à une échelle du demi-siècle et le long terme à l'échelle de temps de référence de l'aléa, c'est-à-dire centennale ou plus.

L'analyse des valeurs dimensionnelles proposées apporte, par ses indications quantitatives, un complément de jugement indispensable à la simple analyse des spécificités des configurations et modes d'exploitation. La confrontation de ces deux critères permet de juger la pertinence de l'évaluation de l'aléa lorsque les données reposent essentiellement sur l'examen de plans d'exploitation et de rares données d'archives.

### 3. BIBLIOGRAPHIE

---

- Archives DRIRE : La Paperie. Note sur les principaux accidents, 8 p., non datée.
- Archives DRIRE : Note sur l'éboulement de La Paperie du 8 février 1887, 3 p. et Procès-verbal au sujet de l'accident, 2 p avec plan, 1887.
- Archives DRIRE : Rapport de l'ingénieur TPE sur l'accident de Grand-Maison du 15 septembre 1928, 5 p., 18 sept.1928.
- Archives DRIRE : Rapport du Subdivisionnaire sur l'accident de Grand-Maison du 15 septembre 1928, 7 p., 28 février 1929.
- Archives DRIRE : Rapport de l'ingénieur TPE sur l'accident de Grand-Maison du 23 janvier 1942, 4 p., 23 janvier 1942.
- Archives DRIRE : Note sur l'éboulement survenu à la Paperie en 1941, 1 p., 11 août 1953.
- Arrêté préfectoral du 29 décembre 1978 autorisant l'exploitation d'une carrière souterraine sur les communes de Noyant-la-Gravoyère et Bouille-Ménard pour les Ardoisières d'Anjou, 3 p., 29 déc. 1978.
- Arrêté préfectoral du 9 janvier 1979 autorisant l'exploitation de la carrière souterraine des Fresnais sur les communes de Trélazé et Saint-Barthélemy d'Anjou pour la S.A. Ardoisières d'Angers, 3 p., 9 janvier 1979.
- DE LA GOUPILLIERE (H) : Cours d'exploitation des mines. Dunod éd., 3 tomes, 1920.
- ICHON (M) : Notice sur l'exploitation souterraine des ardoisières d'Angers. Bull. SIM, p. 753-849, 1890.
- ICHON (M) : Rapport de l'ingénieur des Mines sur l'éboulement de l'ardoisière de la Paperie. Archives départementales n° 15 J 206, 6 p., 15 février 1887.
- SCHWARTZMANN (R) : Rapport d'étude sur l'effondrement de la Pouèze. Ardoisières d'Angers, 9 p., déc. 1991.
- SOULEZ-LARIVIERE (F) : Les ardoisières d'Angers, 2<sup>ème</sup> édition Ménard-Garnier, 1986.
- TRITSCH (J-J) : Assistance technique à l'élaboration d'un dossier de demande d'abandon concernant les carrières de Misengrain - Site de Noyant (49). Rapport INERIS-DRS-00-25078/R01, 97 p., 26 oct. 2000.
- TRITSCH (J-J) : Dossier technique de demande d'abandon concernant les carrières de Misengrain - Site de Noyant (49). Document de synthèse des études géotechniques et hydrogéologiques. Rapport INERIS-DRS-01-26991/R01, 40 p., 12 avril 2001.
- TRITSCH (J-J) : Assistance technique pour l'élaboration d'un dossier de demande d'abandon Périmètre des anciennes carrières des Fresnais, veines sud et extrême-sud, carrière de Trélazé (49). Rapport INERIS-DRS-02-29081/R01, 42 p., 15 janvier 2002.

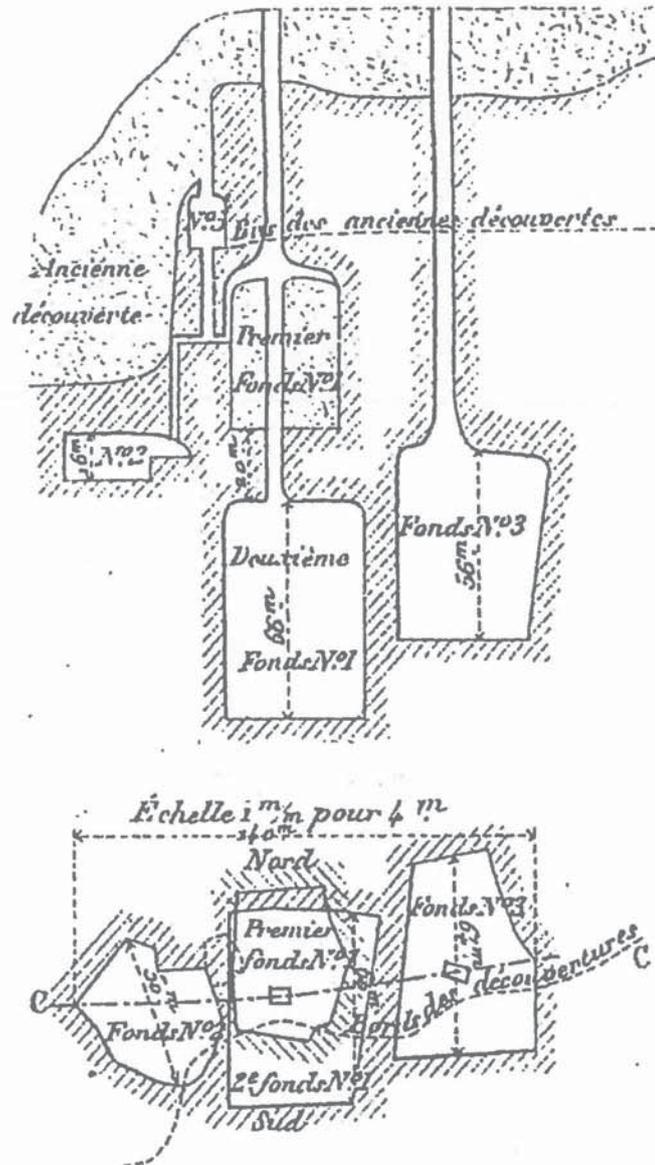
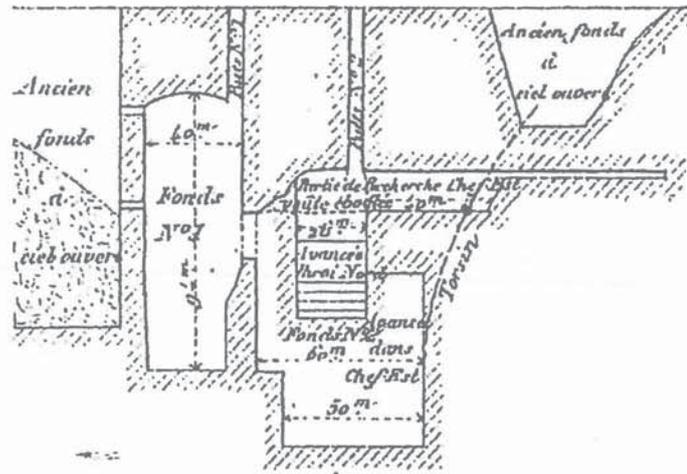


Figure 1 : Effondrement des fonds n° 1, 2 et 3 des Fresnais en 1862 (d'après M. Ichon, 1890)

Fonds N<sup>os</sup> 1 et 2 des Grands Carreaux effondrés en 1868



Plan

Echelle 1<sup>m</sup>/m pour 4<sup>m</sup>.

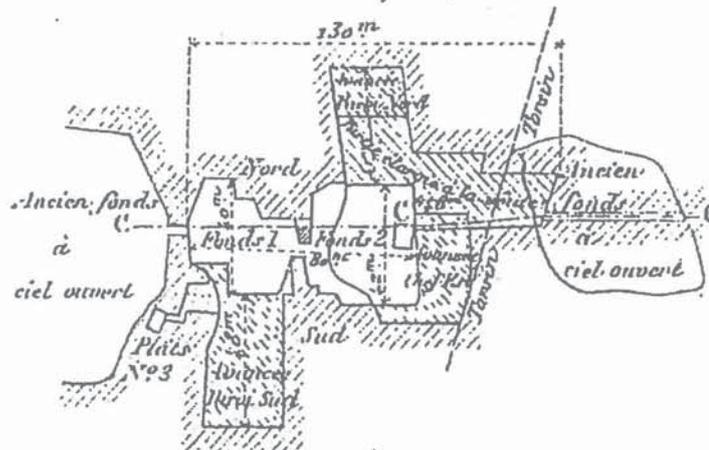


Figure 2 : Effondrement des fonds n° 1 et 2 des Grands-Carreaux en 1868 (d'après M. Ichon, 1890)

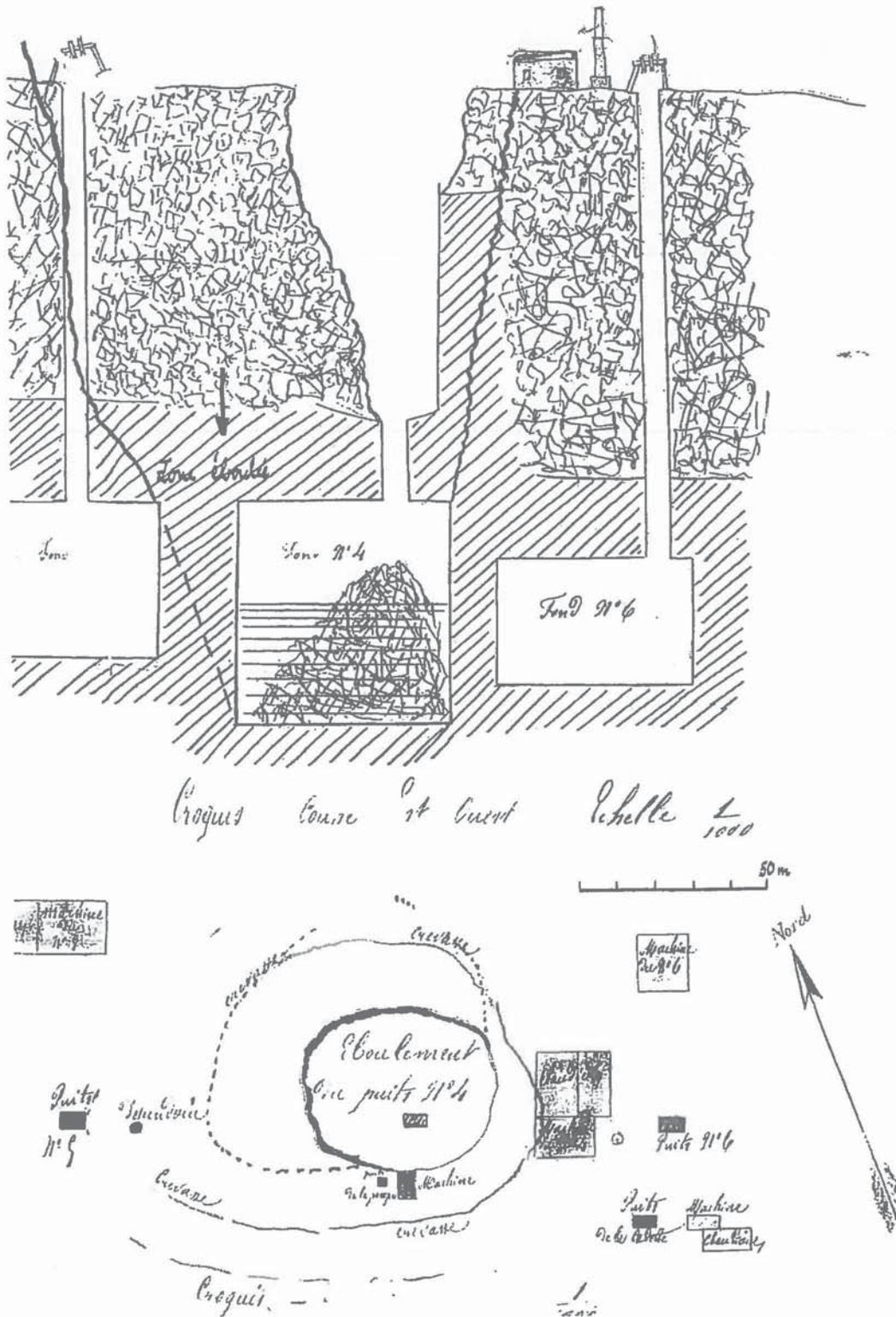


Figure 3 : Effondrement du fond n° 4 de La Papeterie en 1887  
(Plan d'archives DRIRE, 1887)

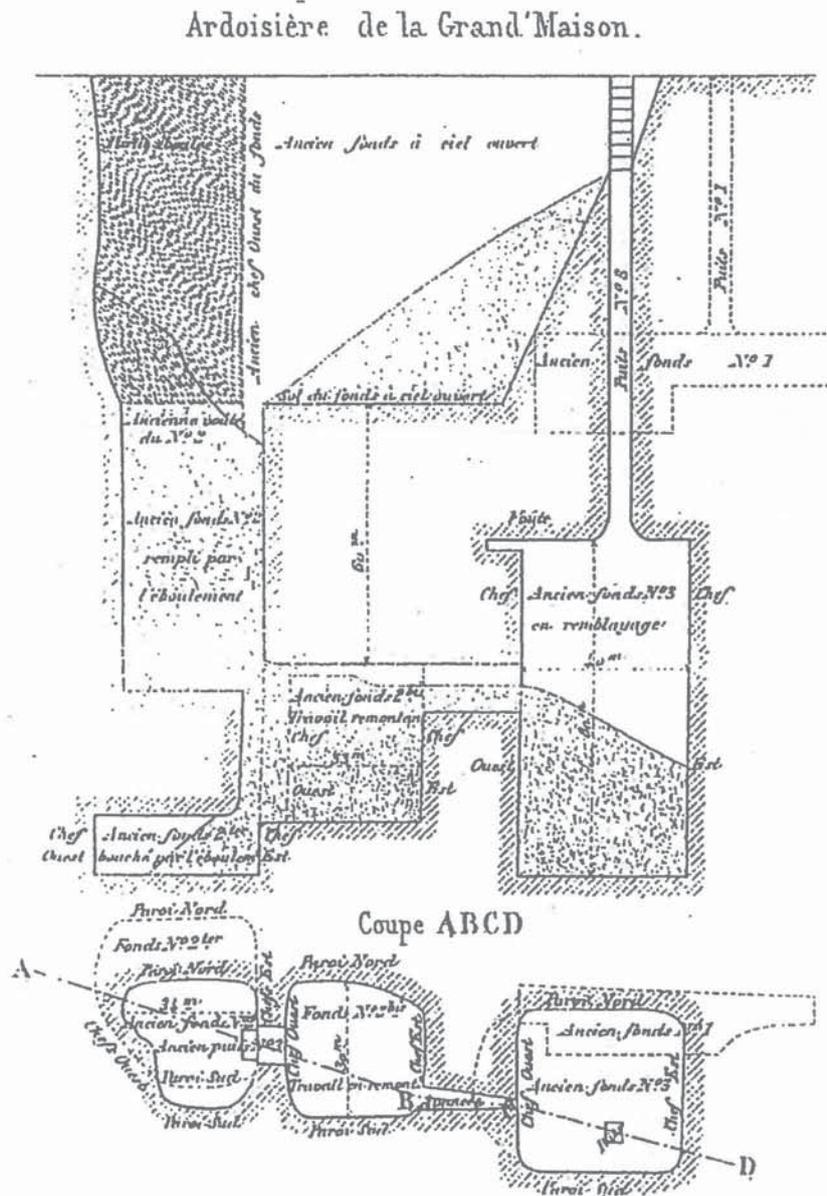


Figure 4 : Effondrement du fond n° 2 de Grand'Maison, en 1887  
 par rupture de la voûte de l'avancée n° 2  
 (d'après M. Ichon, 1890)

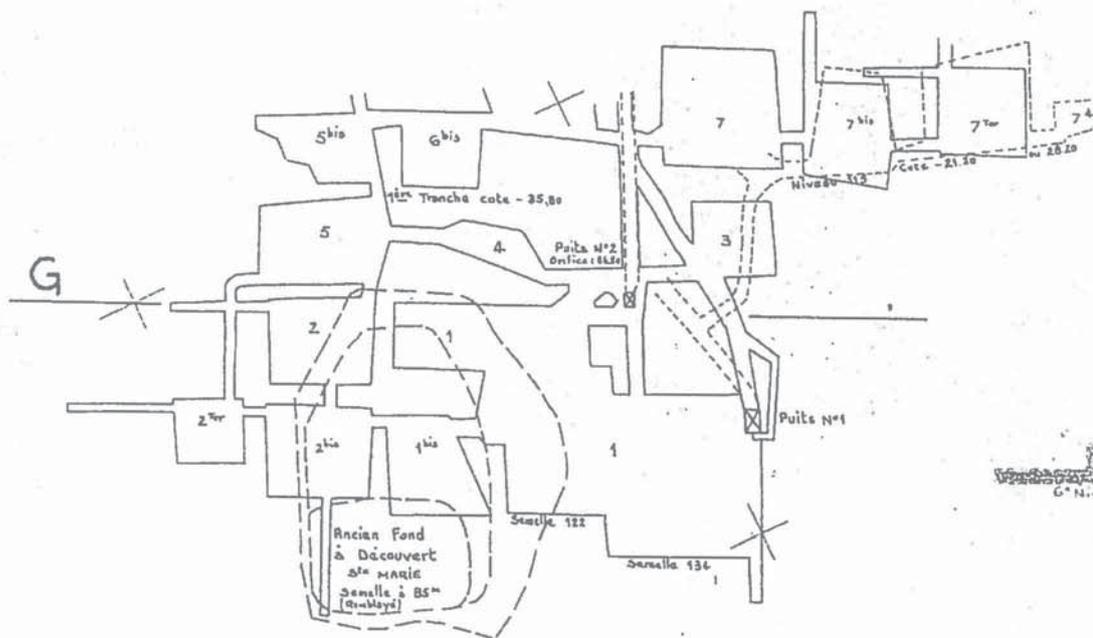
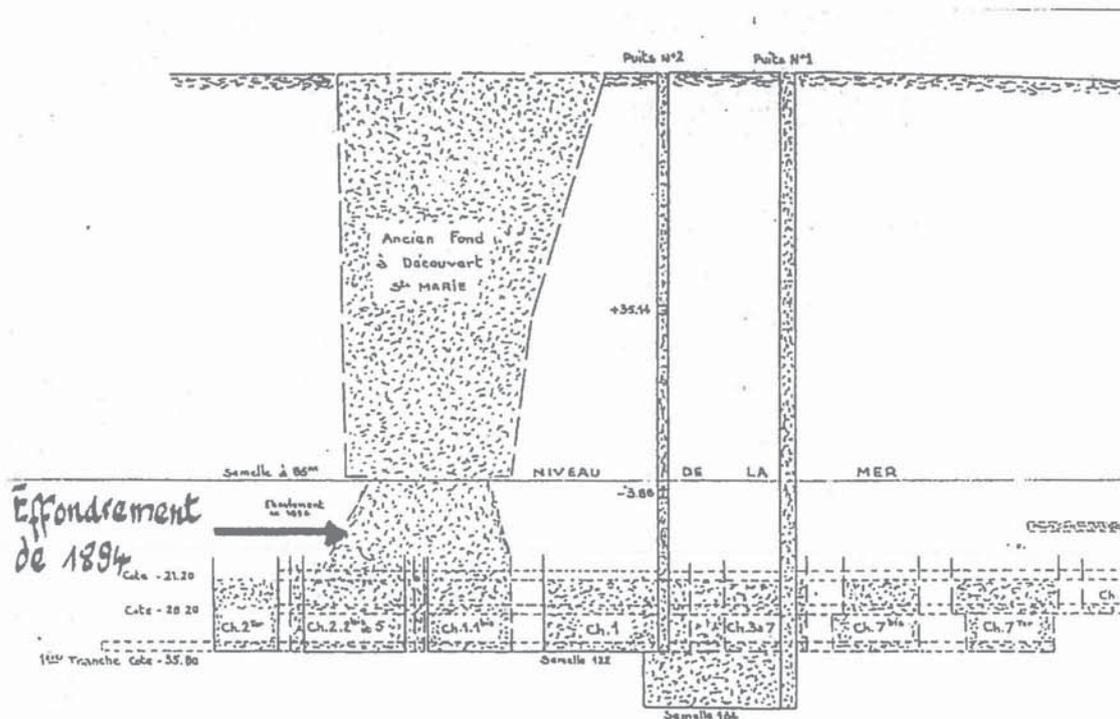


Figure 5 : Effondrement de l'ancien fond Sainte-Marie de Bel-Air-La-Forêt en 1894 par rupture du stot (épais de 18 m) le séparant des chambres montantes remblayées (Plan d'archives DRIRE, 1887)

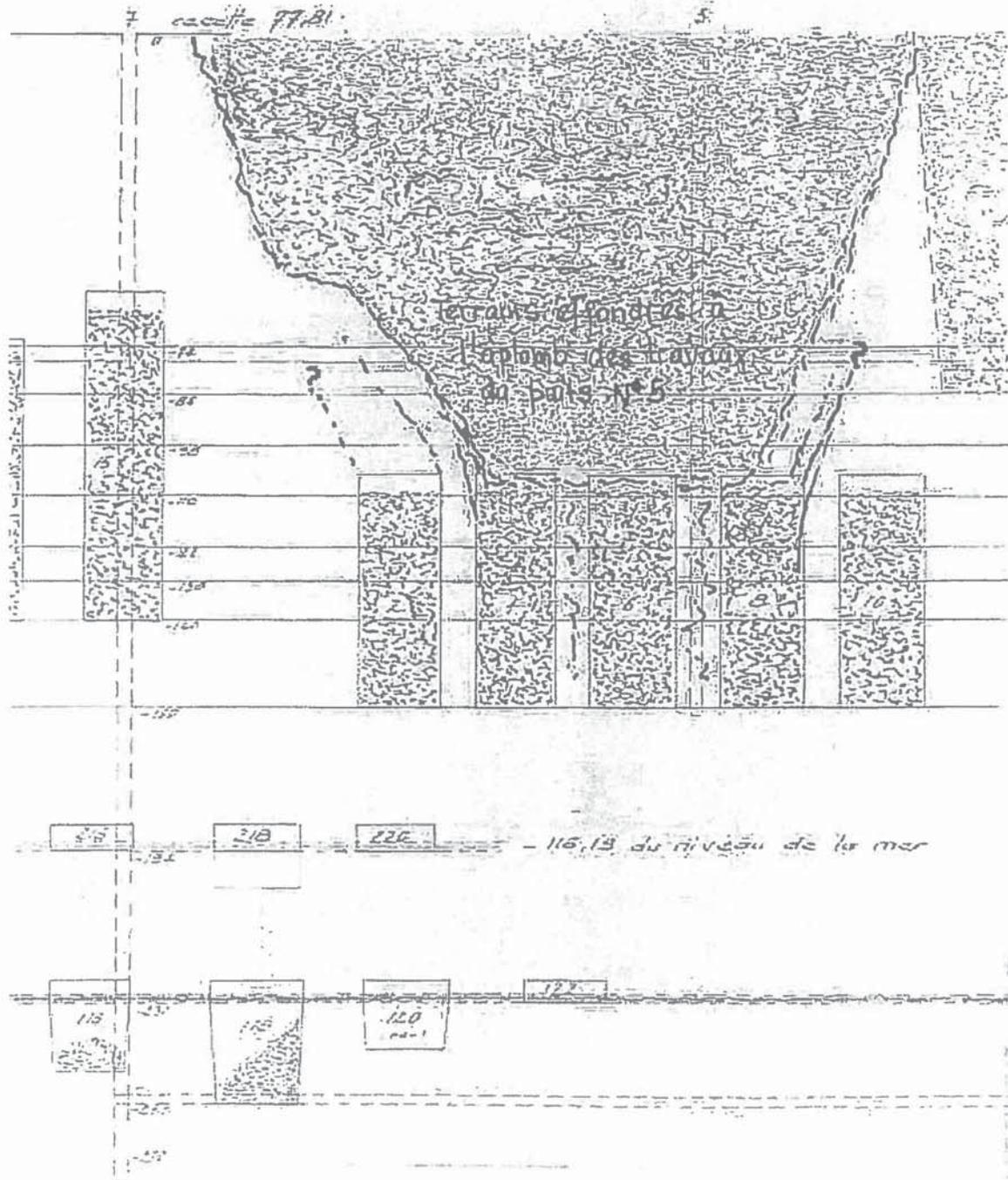


Figure 6 : Effondrement des travaux du puits n° 5 de Misengrain en 1922  
(d'après plan des Ardoisières d'Angers daté 1991)

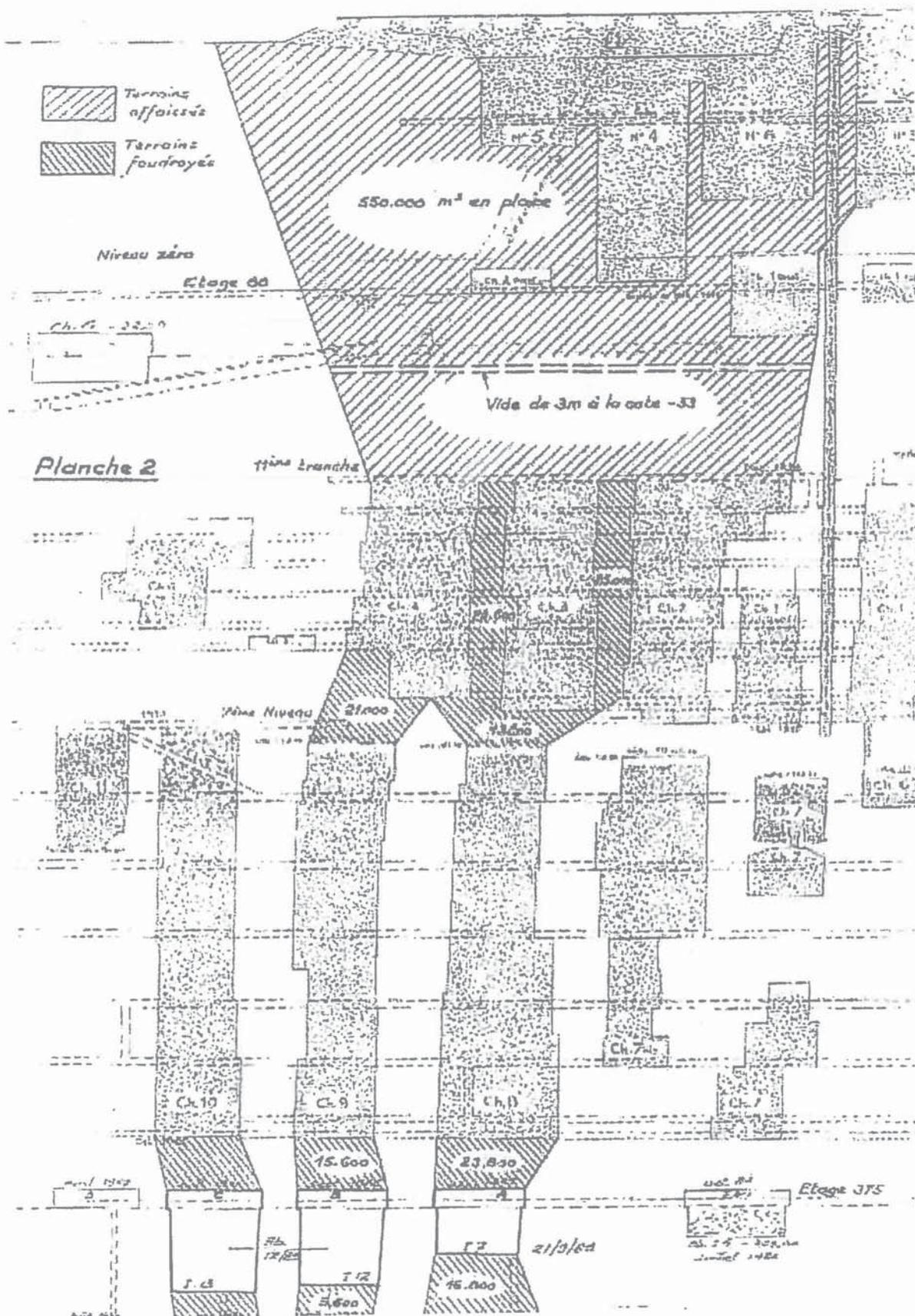
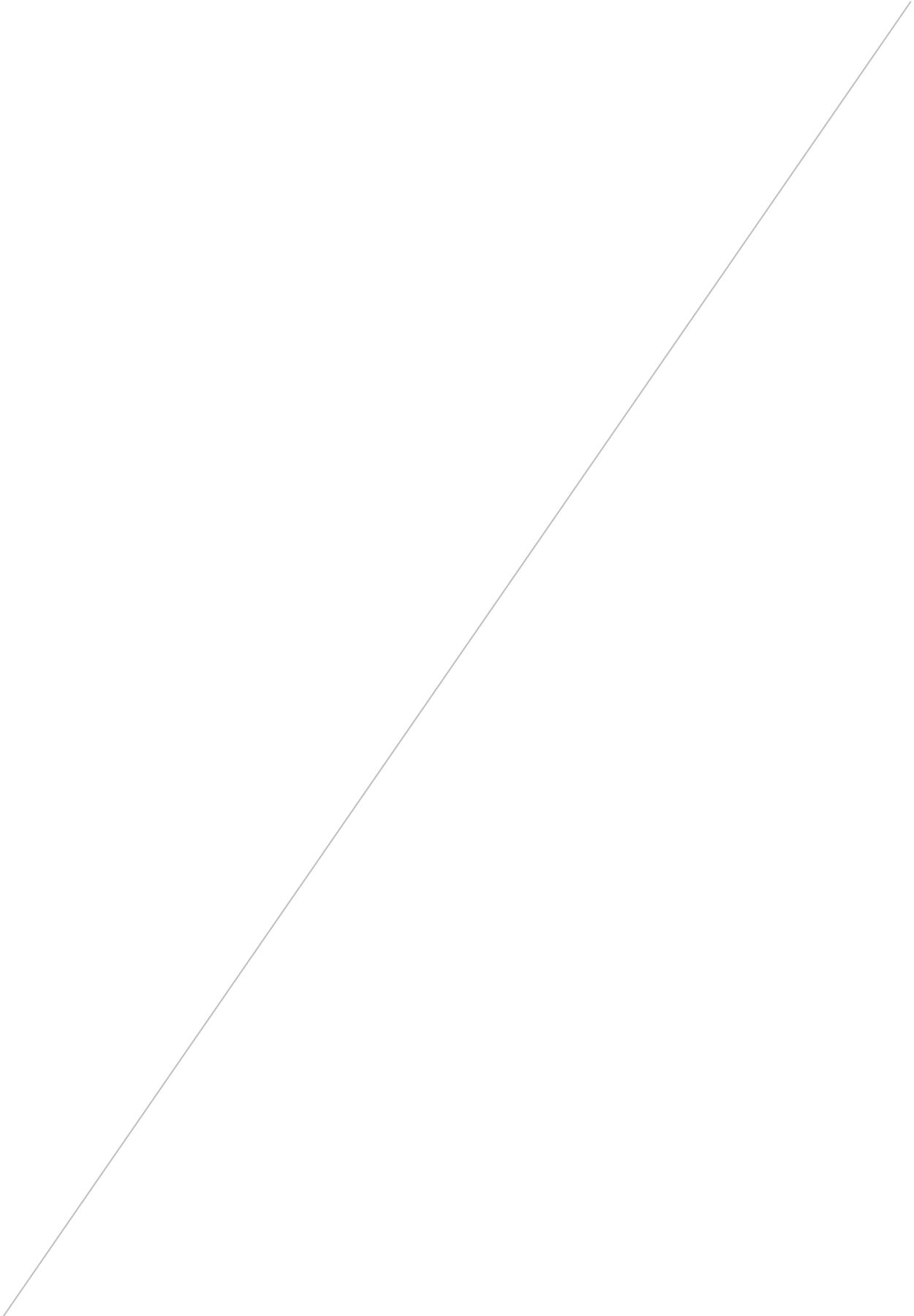


Figure 7 : Effondrement de La Pouèze en 1990 par rupture du stot à l'étage -375 m (d'après R. Schwartzmann, 1991)

**Annexe 2 : Etude de l'école nationale supérieure des mines de Paris – 2001 –  
Ardoisières de Maël-Carhaix – Conséquences de l'arrêt de l'exploitation sur le plan  
hydrogéologique et géotechnique**



Jacques FINE

CONSEILLER EN GEOTECHNIQUE  
ET EXPLOITATION DU SOUS SOL

Réf. AMC/013  
2 mai 2001

35 Rue Saint-Honoré  
77305 FONTAINEBLEAU Cedex

Téléphone 01.64.69.48.21  
Télécopie 01.64.22.63.78

## ARDOISIÈRES DE MAËL-CARHAIX

### CONSEQUENCES DE L'ARRÊT DE L'EXPLOITATION SUR LE PLAN HYDROGÉOLOGIQUE ET GEOTECHNIQUE

Ce document a pour but de prévoir les conséquences sur le plan hydrogéologique et géotechnique de l'arrêt de l'exploitation des Ardoisières de Moulin-Lande.

#### 1. LES DONNEES.

##### 1.1. Données géologiques

Les Ardoisières de Maël-Carhaix ont exploité un filon de schistes ardoisiers de l'époque carbonifère, situé dans la formation des schistes de Chateaulin (série  $h_{2b-c} S^{1-2}$ ). Dans cette série, les schistes alternent avec des grès du type grauwacke.

Le filon exploité (ancienne exploitation de Kergonan et exploitation de Moulin-Lande) se situe dans une structure fortement plissée. Un croquis de cette structure se trouve sur la figure 1 ci-après. L'axe des plis est sensiblement Est-Ouest. La puissance du filon ardoisier est de l'ordre de 10 à 20 m. La fissilité a un pendage de l'ordre de 63 à 65 degré vers le Sud.

##### 1.2. Données sur la technique d'exploitation.

L'exploitation a concerné les deux premiers plis, c'est à dire:

- les deux premières parties sub-verticales
- les deux zones sub-horizontales

L'exploitation a commencé en 1890 et s'est arrêté en 2000.

La méthode d'exploitation était celle de grandes chambres vides descendantes. Les dimensions de ces chambres étaient:

- largeur de 10 à 25 m (selon l'axe du pli Est-Ouest)
- longueur de 20 à 60 m (direction Nord-Sud)
- hauteur pouvant atteindre 80 m

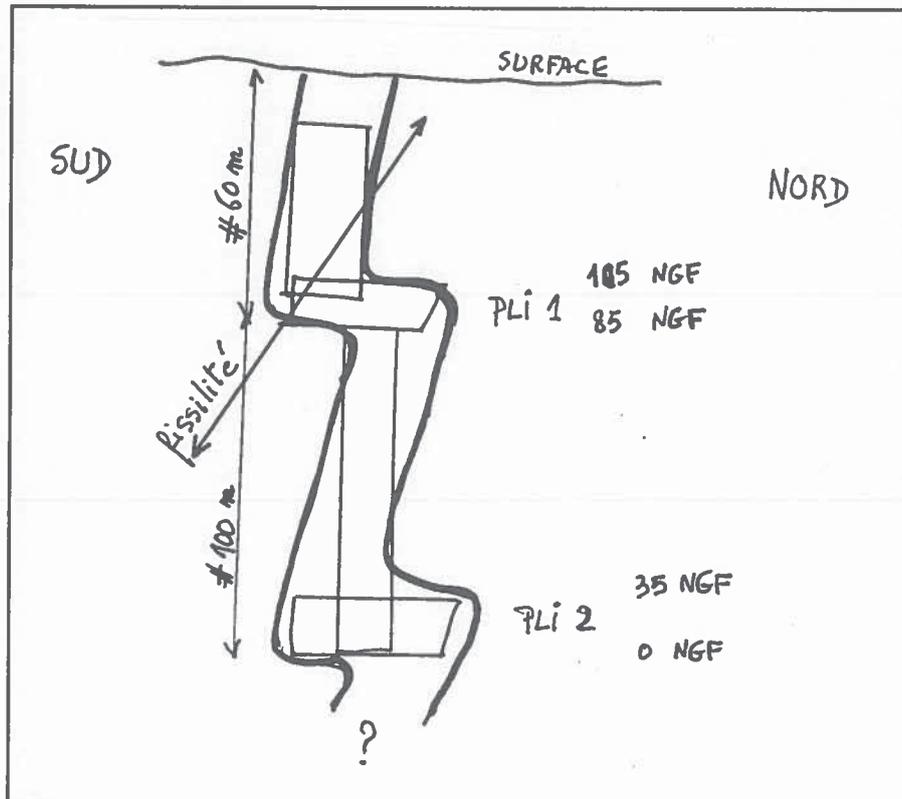


Fig.1. Structure géologique schématisée du filon ardoisier

Les chambres étaient séparées par des piliers. La disposition des chambres et des piliers n'est pas régulière comme dans une exploitation classique par chambres et piliers si bien que la géométrie de l'ensemble des vides aboutit à une structure assez complexe. Cette structure peut être considérée comme une imbrication des types de chambres définis ci-après:

- un ensemble de chambres comprise entre la surface et la cote NGF 85 environ. La plus grande dimension de ces chambres est la dimension verticale
- des chambres situées entre les cotes NGF 105 et 85, exploitant la partie subhorizontale du premier pli. La plus grande dimension de ces chambres est la dimension horizontale Nord-Sud.
- des chambres situées entre les cotes NGF 85 et 0 exploitant la seconde partie subverticale du filon ardoisier. Ces chambres ont une grande dimension verticale.
- des chambres situées entre les cotes NGF 35 et 0 exploitant la seconde partie subhorizontale du filon.

Quatre puits ont été creusés: Kergonan, puits du Haut, puits du Milieu et puits de la Prairie. Certaines chambres ont été partiellement remblayées ou sont ennoyées.

On trouvera ci-joint:

- un plan au 1/2000 donnant la position des chambres (planche 1)
- une coupe verticale au 1/2000 suivant la droite allant du puits Kergonan au puits de la Prairie (planche 2).

### 1.3. Données géotechniques

- résistance des terrains: l'ardoise est une roche à comportement élastique-fragile caractérisée par une forte anisotropie. Sa résistance à la compression simple est élevée dans le plan d'anisotropie ou dans la direction perpendiculaire, de l'ordre de 70 à 100 MPa, mais elle plus faible lorsque les plans de fissilité sont soumis à un effort de cisaillement. La cohésion de ces plans, telle que nous avons pu la mesurer sur des ardoises du même type est de l'ordre de 10 à 20 MPa.
- fracturation des terrains: comme toute formation de schistes ardoisiers, il existe des fractures naturelles dans le filon exploité. Les observations que plusieurs organismes ont pu faire (Herrouin/BRGM 1972 - Tincelin/EMP 1984 - Fine/EMP 2000) conduisent toutes à estimer que, globalement, la veine est assez peu fracturée. Les principales fractures sont:
  - les "chauves" dont l'azimut est voisin de la direction Nord-Sud et le pendage sub-vertical. Ces fractures, du type diaclases, sont de faible extension et ne contiennent pas de matériau de remplissage.
  - les failles qui sont de plus grande extension et contiennent un remplissage d'argiles. Elles sont liées aux plis. Leur pendage peut être très variable.

Il existe quelques fractures secondaires dont la caractéristique est de présenter une extension limitée et ne porte pas à conséquences sur le plan stabilité car on peut remarquer que les parois des excavations ne présentent pas de hors-profils.

- les contraintes naturelles initiales: les contraintes naturelles existant avant l'exploitation n'ont pas été mesurées car cette mesure est très difficile et les techniques utilisées conduisent en général à des résultats très disparates mais on peut penser que le régime des contraintes initiales est caractérisé par une valeur de contraintes horizontales assez élevée, le rapport contrainte horizontale/contrainte verticale dépassant probablement 1, comme cela s'observe assez fréquemment dans les massifs d'âge primaire. A 180 m de profondeur, la contrainte verticale est estimée à 5 MPa et les contraintes horizontales doivent être probablement supérieures à cette valeur.

### 1.4. Données hydrogéologiques

La principale caractéristique hydrogéologique des terrains du Massif Armoricaïn est de présenter une faible porosité et une faible perméabilité. La perméabilité est essentiellement une perméabilité de fracture.

Sur le site de Moulin-Lande, l'eau qui parvient aux vides souterrains correspond essentiellement à une fraction de l'eau pluviale tombant sur les terrains de surface avoisinant l'exploitation. Cette eau s'infiltré au travers de fissures. Elle n'est pas en liaison avec un réservoir aquifère important.

Le débit d'exhaure de l'exploitation souterraine était de l'ordre de 7 à 10 m<sup>3</sup>/h. A partir de ce débit, on peut essayer de calculer la superficie des terrains de surface drainés par les vides souterrains. La pluviométrie de la région est estimée, à partir des statistiques annuelles, à une

moyenne de l'ordre de 1200 mm d'eau par an, ce qui représente une alimentation moyenne de l'ordre de 137 m<sup>3</sup>/h pour une surface de 1 km<sup>2</sup>. Sachant que le taux d'infiltration de l'eau pluviale est de l'ordre de 10%, une surface de 1 km<sup>2</sup> permet donc l'infiltration d'un volume d'eau de 13.7 m<sup>3</sup>/h. Le débit d'exhaure étant compris entre 7 et 10 m<sup>3</sup>/h, on en déduit que la superficie des terrains à l'origine de ce débit est compris entre 0.5 et 0.7 km<sup>2</sup>.

Cette superficie est tout à fait compatible avec l'emprise des vides souterrains (environ 450 m suivant la direction Est-Ouest et 80 m suivant la direction Nord-Sud).

## **2. CONSEQUENCE DE L'ARRET DE L'EXPLOITATION SUR L'HYDROGEOLOGIE**

L'arrêt de l'exploitation, donc l'arrêt de l'exhaure, provoquera l'envoyage des vides souterrains.

Il est difficile d'estimer avec précision la durée de remplissage car d'une part le volume des vides est assez mal connu et d'autre part le débit de l'eau de remplissage diminuera au fur et à mesure de la montée du niveau.

Néanmoins, en se basant sur un volume approximatif de 500000 m<sup>3</sup> et sans tenir compte de la diminution progressive du débit, la durée d'envoyage se situerait entre 6 et 8 ans.

Quant au niveau final de l'eau, on peut imaginer:

- soit un remplissage jusqu'à la surface et donc un exutoire par le puits situé à la cote la plus basse, c'est à dire le puits de la Prairie à la cote 165 NGF.
- soit une stabilisation à une cote inférieure, une circulation d'eau depuis les vides vers le ruisseau, à la cote 155 NGF environ, s'établissant alors au travers des terrains superficiels. C'est cette dernière hypothèse qui nous paraît la plus vraisemblable.

Des analyses d'eau ont été effectuées en avril 2001 sur des prélèvements effectués aux 3 puits: Kergonan, puits du Milieu et puits de La Prairie.

Ces analyses, dont la copie est jointe en annexe, concluent à de l'eau potable.

Aucune pollution n'est donc à craindre pour le ruisseau et la rivière de Kersault. Il faudra veiller néanmoins de ne pas laisser au fond des résidus d'huiles ou d'hydrocarbures.

## **3. CONSEQUENCES DE L'ARRET DE L'EXPLOITATION SUR LA STABILITE DES TERRAINS**

Dans le cadre de l'abandon d'une exploitation souterraine, un examen géotechnique a pour objectif d'analyser les risques d'instabilités à court et à long terme des terrains de surface.

Pour qu'il y ait effondrement en surface, il faut:

- qu'il se produise un effondrement au fond
- que cet effondrement puisse se propager vers le haut.

### **Origine éventuelle d'effondrement en souterrain.**

Comme il a été signalé précédemment, la structure des vides est assez complexe. Cependant, nous retiendrons les structures élémentaires suivantes qui, à priori, seraient susceptibles d'engendrer des instabilités:

- le toit des chambres, c'est à dire des surfaces horizontales de grande dimension, 25 x 60 m par exemple.
- les piliers "classiques" séparant des chambres et soumis à des contraintes verticales.
- les piliers "étais" soumis à une contrainte horizontale et non pas à une contrainte

verticale car ils sont sous-cavés.

La planche 3, donnant une vue tridimensionnelle schématique de la zone d'exploitation du puits de La Prairie située entre les cotes NGF 100 et 0 (second pli), illustre ces différentes zones éventuellement sensibles. Sur cette planche, on a représenté les chambres 0, 2 et 5. D'ores et déjà, on peut remarquer que la géométrie des vides ne conduit pas à l'existence de "solettes" (terminologie des Ardoisières d'Angers). Les solettes sont des stots laissés en place entre deux chambres et constituant une dalle relativement peu épaisse par rapport à ses dimensions horizontales, par exemple épaisseur de 6 à 10 m pour une section horizontale 20 x 20 m. L'expérience a montré que ces solettes sont des structures fragiles car elles sont très sensibles à la présence de fractures naturelles. Plusieurs effondrements recensés dans les Ardoisières d'Angers ont eu pour origine une rupture de la solette. On peut rattacher à ce type d'instabilité l'accident qui s'est produit en 1979 à Mael-Carhaix dans une configuration très particulière: l'exploitation en descendant d'une chambre se situait au dessus d'une ancienne chambre; progressivement l'épaisseur d'ardoise a diminué formant une dalle de plus en plus mince. L'existence d'une fracture naturelle a provoqué une rupture. Une telle configuration n'existe plus à Moulin-Lande.

Nous allons examiner les risques de rupture des trois structures élémentaires précédemment définies.

#### Rupture du toit des chambres.

Une telle rupture pourrait être due à priori:

- à des contraintes excessives, en compression ou en traction. Compte tenu de la résistance de l'ardoise, de l'orientation sub-verticale de la fissilité et de la faible profondeur des travaux, cette hypothèse est à écarter. Néanmoins, pour avoir un ordre de grandeur de l'intensité des contraintes, nous avons mis en oeuvre un modèle de calcul tridimensionnel. Ce modèle, simplifié par rapport à la structure réelle des vides, représente deux chambres de longueur Nord-Sud 60 m, de largeur 20 m et de hauteur 60 m et dont la base est située à 180 m de profondeur. Ces deux chambres sont séparées par un pilier de 10 m de largeur. On trouvera en annexe les conditions et les résultats de ce calcul.

Moyennant l'hypothèse admise sur la valeur des contraintes initiales naturelles s'exerçant avant l'ouverture des travaux ( $k_0=1$ ), on trouve que les contraintes horizontales sont comprises entre 4 et 6 MPa. Ces valeurs sont évidemment très faibles par rapport à la résistance du schiste ardoisier (minimum de l'ordre de 50 MPa)

En outre, il n'existe pas de traction dont l'influence pourrait conduire à une ouverture de fissures naturelles.

- à l'existence de fractures naturelles. Il est certain que de telles fractures peuvent exister. Pour qu'il y ait effondrement, il faut une combinaison de plusieurs fractures entre elles pour donner naissance à des blocs du type tétraèdre ou prisme. Le pendage de ces fractures doit être faible. L'observation du site ainsi que l'expérience de l'exploitation a montré:
  - qu'il n'existe qu'une seule famille de fissures à faible pendage, la plupart des fractures étant subverticales.

- que la chute de gros blocs n'a jamais été constatée

En outre, si des chutes de blocs se produisaient, nous estimons que l'on n'observerait pas une propagation de ces chutes vers le haut: on obtiendrait progressivement une forme en ogive.

#### Rupture de piliers entre chambres

Là encore, l'origine de rupture de piliers pourrait être:

- des contraintes excessives. Le modèle de calcul en 3 dimensions dont il a été fait mention ci-dessus montre que la contrainte verticale sur un pilier de 10 m séparant deux chambres est de l'ordre de 6 à 7 MPa. C'est une valeur trop faible pour conduire à une rupture par compression verticale. Une rupture par flambage est également à écarter car la fissilité n'est pas parallèle aux parements des piliers.
- des fractures naturelles mal orientées. Les observations faites par plusieurs intervenants ont permis de constater que les parements des piliers sont assez réguliers et qu'il n'existe pas de hors profils notables. Cela veut dire qu'il n'y a pas eu formation de blocs par combinaison de fractures.

#### Rupture de piliers "étais".

Les origines de rupture de ces piliers un peu particuliers seraient encore un excès de contrainte ou une fissuration défavorable.

- excès de contraintes. Ces piliers sont mis en compression par la contrainte horizontale s'exerçant dans la direction Nord-Sud. Cette contrainte agit perpendiculairement à la fissilité. On ignore la valeur exacte de cette contrainte mais on peut penser qu'elle est au moins égale et probablement supérieure à la contrainte verticale due au poids des terrains, ce qui reste bénéfique pour la stabilité de ces piliers "étais". On peut aussi penser que la contrainte horizontale est insuffisante pour faire périr ces piliers par excès de compression
- fissuration défavorable. Là encore, il ne semble pas que des problèmes se soient posés lors de la réalisation des piliers, notamment lors de leur sous-cavage.

#### Propagation vers la surface d'un éventuel effondrement.

Même si la probabilité d'un effondrement en souterrain est jugée très faible, on peut examiner les conséquences d'un scénario "catastrophe" où des effondrements se produiraient au fond. Si un tel effondrement se produisait, il faut encore qu'il se propage en surface pour induire un risque.

Une stabilisation d'un effondrement, stoppant sa propagation vers le haut, peut se produire pour les deux raisons essentielles suivantes:

- formation d'une voûte stable au dessus des terrains effondrés. c'est ce qui se passe dans tout massif rocheux dont la résistance de la matrice rocheuse est importante mais qui est affecté par des fractures naturelles. Dans ce type de massif dont fait partie le site de Moulin-Lande, en cas d'effondrement par exemple d'une galerie, il est très rare de voir un éboulement se propager à une hauteur supérieure à la largeur de la galerie. C'est pourquoi, nous pensons que si le toit d'une chambre venait à céder par suite d'une combinaison de fractures naturelles défavorable et non décelée à ce jour, il se produirait une cloche d'effondrement qui ne pourrait monter au delà de 20 m, cela évidemment à la condition que les terrains situés au dessus du toit soit des terrains vierges.
- blocage par foisonnement. Lors d'un effondrement les terrains foisonnent et les éboulis peuvent finir par remplir totalement les vides. Le calcul suivant peut être fait pour une chambre isolée, avec les données suivantes (voir figure 2).
  - chambre de section horizontale carrée de coté a et dont la hauteur est h
  - effondrement du toit défini par le cercle de rayon r inscrit dans la chambre
  - zone d'éboulement en surface définie par un angle d'influence de  $\alpha$  degré: c'est donc un cercle de rayon R tel que  $R = r + H \operatorname{tg} \alpha$ , H étant la hauteur de recouvrement au dessus du toit de la chambre.

Le volume  $V_e$  du cône d'éboulis est égal à:

$$V_e = 0.33 \pi H (R^2 + r^2 + Rr)$$

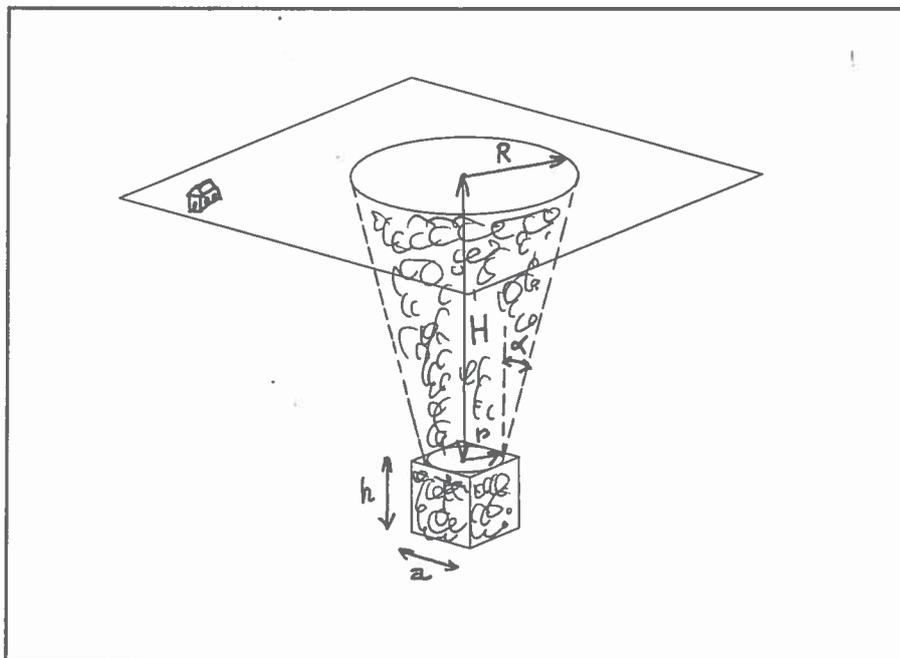


Fig.2. Volume affecté par l'effondrement d'une chambre

Après foisonnement, ce volume initial occupera un volume égal à  $C_f V_e$ ,  $C_f$  étant le coefficient de foisonnement.

Il y aura peu de phénomènes visibles en surface si les éboulis remplissent totalement les vides, ce qui se traduit par la relation:

$$C_f V_e > V_e + ha^2$$

Application. Dans les tableaux ci-dessous, nous avons calculé l'excès d'éboulis ou le déficit d'éboulis  $E = C_f V_e - ha^2$  en adoptant les données suivantes:

coefficient de foisonnement 1.6

angle d'influence 10 degré

En cas de déficit d'éboulis, il se produira un affaissement de surface. On a estimé la valeur de l'affaissement maximum comme suit:

l'affaissement moyen  $A_{moy}$  est tel que  $\pi R^2 A_{moy} = E$

l'affaissement maximum  $A_{max}$  a été estimé à 3 fois l'affaissement moyen

**Tableau 1.** Auto-remplissage d'une chambre par les éboulis  
en fonction de la section horizontale des chambres et de la hauteur de recouvrement  
 $C_f = 1.6$   $\alpha = 10$  degré Hauteur de la chambre 30 m

La première valeur correspond au déficit (signe -) ou à l'excédent d'éboulis exprimé en millier de m<sup>3</sup>. La seconde valeur correspond à l'affaissement maximal exprimé en cm

Hauteur de recouvrement en m	Chambre de 30 m de hauteur: coté d'une chambre en m				
	20	25	30	35	40
50	-2/504	-4/899	-7/1247	-11/1553	-16/1822
75	6/0	6/0	6/0	5/0	5/0
100	15/0	18/0	22/0	25/0	28/0
125	26/0	32/0	39/0	47/0	55/0
150	38/0	49/0	60/0	72/0	85/0

**Tableau 2.** Auto-remplissage d'une chambre par les éboulis  
en fonction de la section horizontale des chambres et de la hauteur de recouvrement  
 $C_f = 1.6$   $\alpha = 10$  degré Hauteur de la chambre 60 m

La première valeur correspond au déficit (signe -) ou à l'excédent d'éboulis exprimé en millier de m<sup>3</sup>. La seconde valeur correspond à l'affaissement maximal exprimé en cm

Hauteur de recouvrement en m	Chambre de 60 m de hauteur: coté d'une chambre en m				
	20	25	30	35	40
50	-14/3740	-23/4339	-34/5793	-48/6621	-64/7342
75	-6/1121	-13/1848	6/0	-31/3162	-43/3740
100	3/0	-1/63	22/0	12/-916	-20/1323
125	14/0	14/0	39/0	10/0	7/0
150	26/0	30/0	60/0	35/0	37/0

Avec les valeurs adoptées pour l'angle d'influence et le coefficient de foisonnement, on voit donc que l'effondrement de chambres situées à des profondeurs supérieures à 100 m ne donneraient que peu de manifestations en surface tandis que l'effondrement de chambres plus proches de la surface conduirait à des cratères profonds.

### Zone d'influence

Les calculs précédents n'ont pas la prétention de simuler de façon précise les conséquences d'effondrements de chambre sur le site de Moulin-Lande car la géométrie des chambres exploitées ne correspond pas à une géométrie de chambres isolées. Ces calculs permettent seulement de mieux mettre en évidence l'allure des phénomènes d'affaissement.

En revanche, toujours avec l'hypothèse de l'effondrement des chambres, on peut essayer de préciser la zone de surface qui serait affectée.

Pour cela, il faut estimer l'angle d'influence d'un éboulement. Etant donné la structure géologique du site, on peut penser:

- que l'angle d'influence Nord pourrait correspondre au pendage de la fissilité car on peut concevoir que l'éboulement se propagerait par cisaillement le long de ces plans. En conséquence, la zone d'influence Nord peut être définie par un angle d'influence de 25 degré par rapport à la verticale compté à partir du niveau d'exploitation le plus bas (cote 0 NGF). Pour une hauteur de recouvrement maximale de 170 m, la limite Nord de la zone d'influence se situerait donc à 80 m au delà de l'emprise des chambres.
- que l'angle d'influence Sud pourrait être très faible car l'éboulement se propagerait plutôt par basculement des bancs. Nous estimerons cet angle à 10 degré. En conséquence, pour un recouvrement de 100 m, la limite Sud de la zone d'influence pourrait être définie par une distance de 18 m comptée à partir de la limite Sud de l'exploitation des chambres des niveaux supérieurs (cote 100 NGF environ).

A partir de ces éléments, on pourrait donc définir une zone d'influence dans le cas où les chambres s'effondreraient. Cette zone d'influence a été tracée en pointillé sur le plan de la planche 4 où l'on a situé l'emprise des chambres sur la topographie du site.

### Influence de l'ennoyage.

Sur le plan géotechnique, l'ennoyage peut avoir deux effets:

- un effet bénéfique certain: celui dit du "soulèvement hydrostatique". cet effet est dû à la poussée d'Archimède à laquelle seront soumis les terrains. Le poids volumique étant de 27 kN/m<sup>3</sup>, après ennoyage leur poids apparent sera le poids "déjaugé" soit 17 kN/m<sup>3</sup>. En conséquence, les contraintes verticales diminueront.
- un effet non bénéfique: celui de la modification des propriétés mécaniques des terrains sensibles à l'eau. Dans le cas de Moulin-Lande, le schiste ardoisier n'est pas sensible à l'eau. En revanche, le comportement des failles renfermant un remplissage d'argile peut être affecté: le coefficient de frottement sera abaissé. On pourrait donc craindre la chute de quelques blocs s'il existe des blocs délimités par de telles failles.

En conclusion, nous estimons que l'ennoyage ne mettra pas en péril la stabilité de l'ensemble des structures souterraines.

#### 4. CONCLUSIONS

Les conséquences de l'arrêt de l'exploitation des Ardoisières de Mael-Carhaix sur le plan hydrogéologique et géotechnique seront à notre avis les suivantes:

- sur le plan hydrogéologique, les vides seront ennoyés et il se produira un exutoire vers le ruisseau s'écoulant dans la rivière de Kersault. Cet exutoire se fera probablement au travers des terrains superficiels. Aucune pollution n'est à craindre à la condition de ne pas laisser au fond des résidus d'hydrocarbures ou d'huiles. Les vides souterrains pourraient constituer un réservoir d'eau potable.
- sur le plan géotechnique, la probabilité d'effondrement des vides conduisant à un affaissements de surface est jugée extrêmement faible, à court terme comme à long terme. Néanmoins, si l'on ne voulait pas tenir compte de ce diagnostic, on peut définir une zone d'influence au delà de laquelle aucun risque ne serait encourru si les chambres souterraines s'effondraient.

# PLANCHE 1

Vue en plan

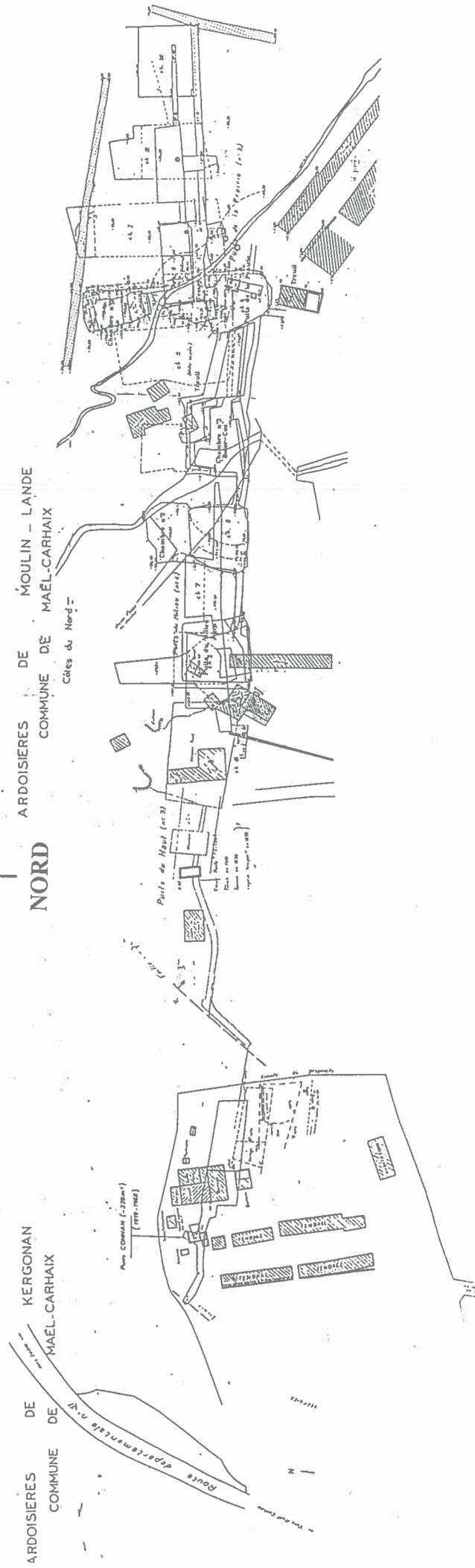
Echelle 1/2000



ARDOISIÈRES DE MOULIN - LANDE  
COMMUNE DE MAEL-CARHAIX  
Côtés du Nord

NORD

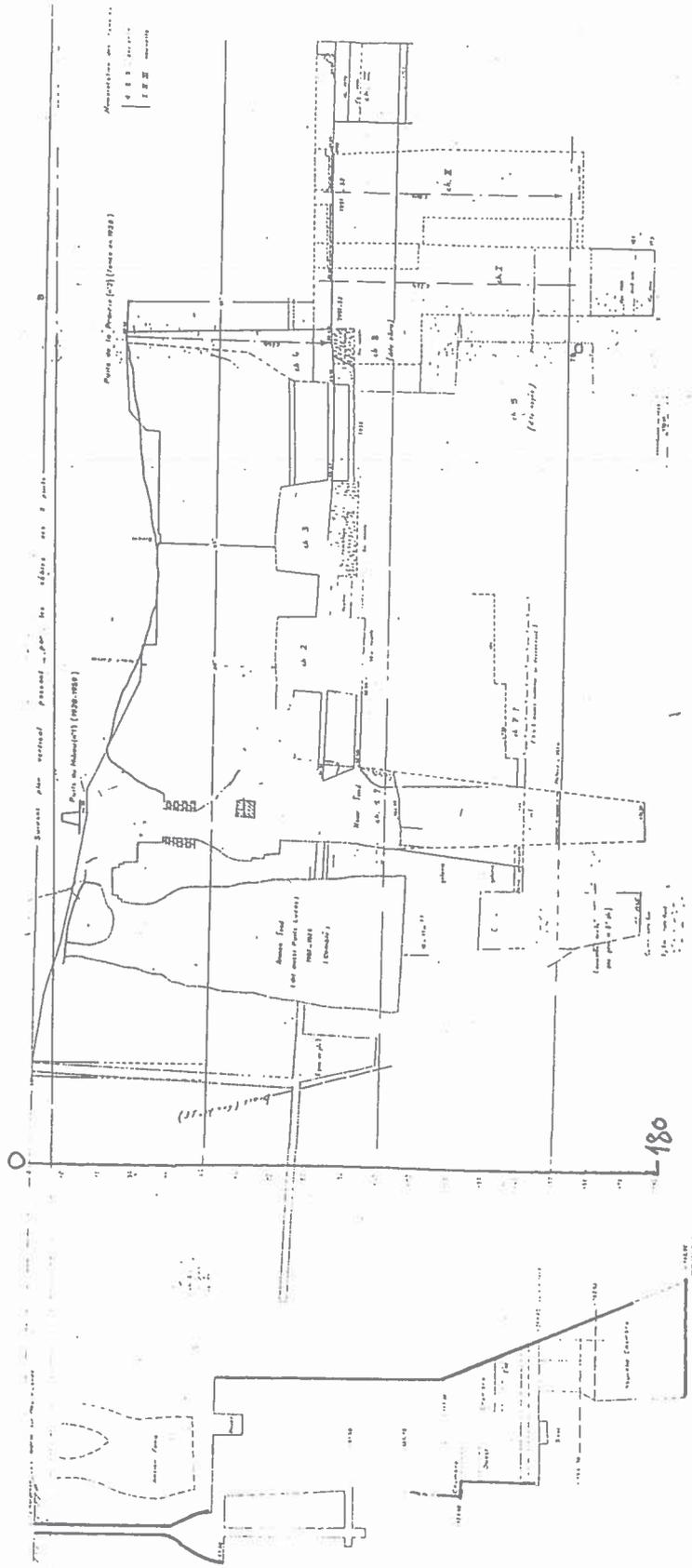
ARDOISIÈRES DE KERGONAN  
COMMUNE DE MAEL-CARHAIX



OUEST

EST

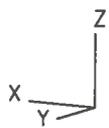
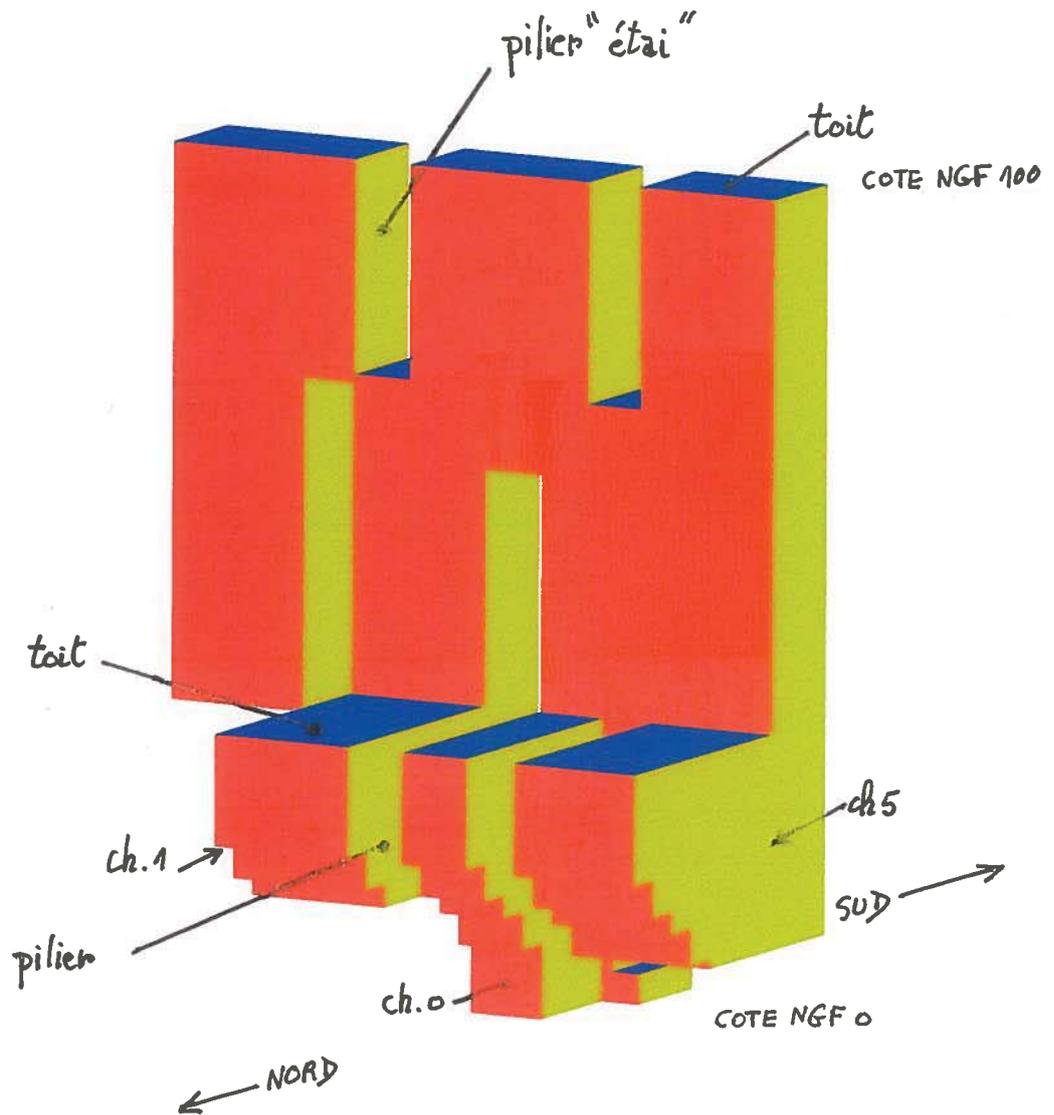
PLANCHE 2  
Coupe Est-Ouest  
Echelle 1/2000



# PLANCHE 3

ECOLE DES MINES DE PARIS - C.G.E.S - CACHE

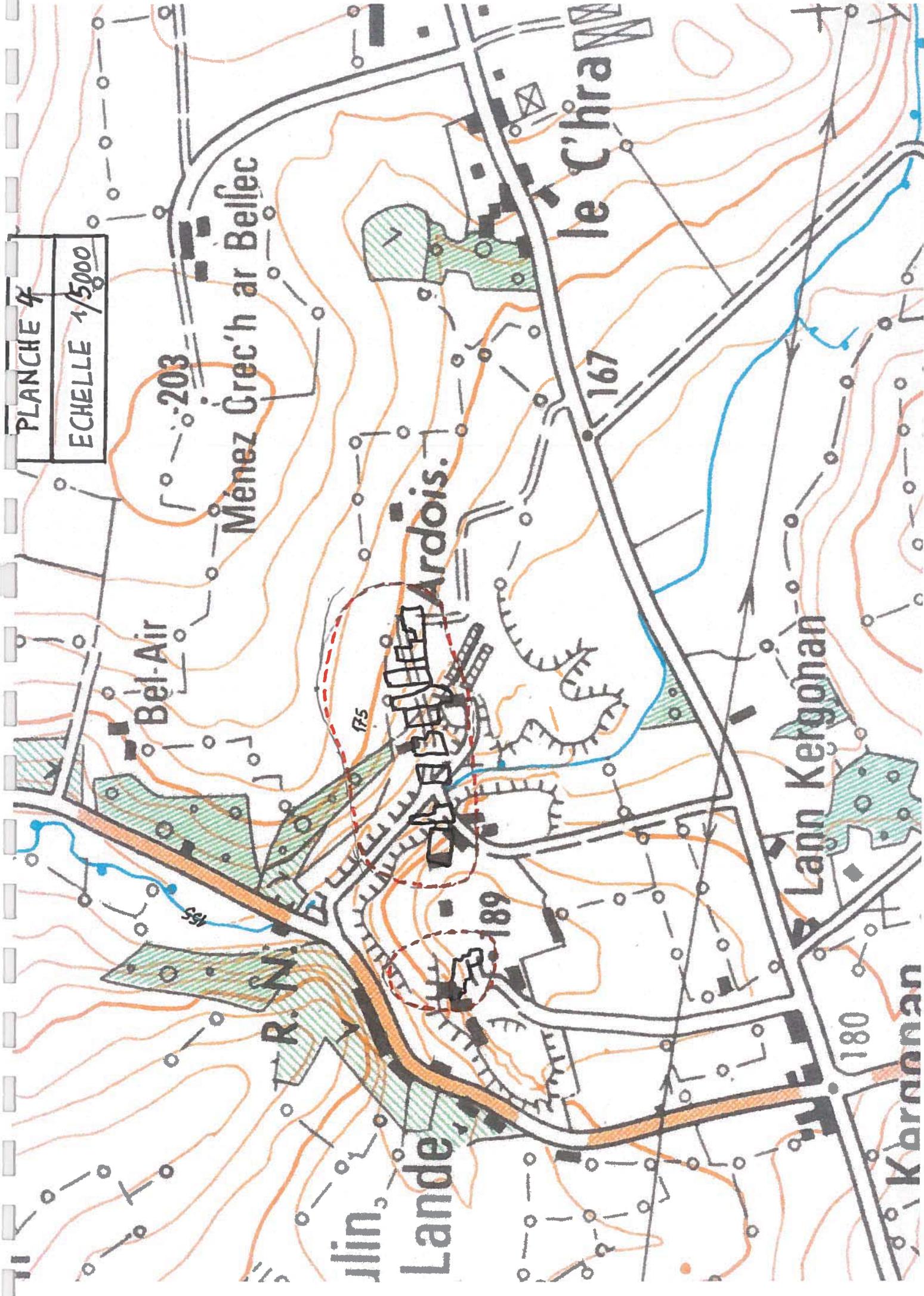
MAEL-CARHAIX Vue tridimensionnelle schematique des chambres 0 1 2 et 5



Angles de prise de vue : 120.0 10.0  
Echelle : 1/ 10.00000

PLANCHE 4

ECHELLE 1/5000

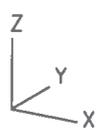
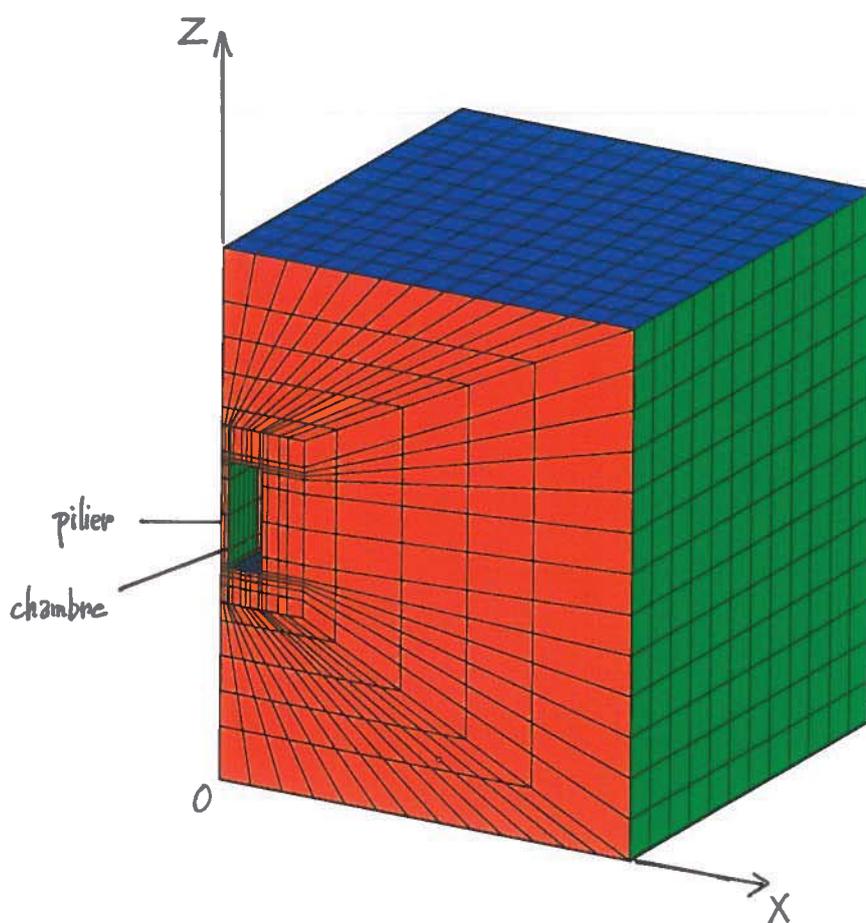


**DOCUMENTS ANNEXES**

**CALCULS TRIDIMENSIONNELS DES CONTRAINTES  
PAR LA METHODE DES ELEMENTS FINIS**

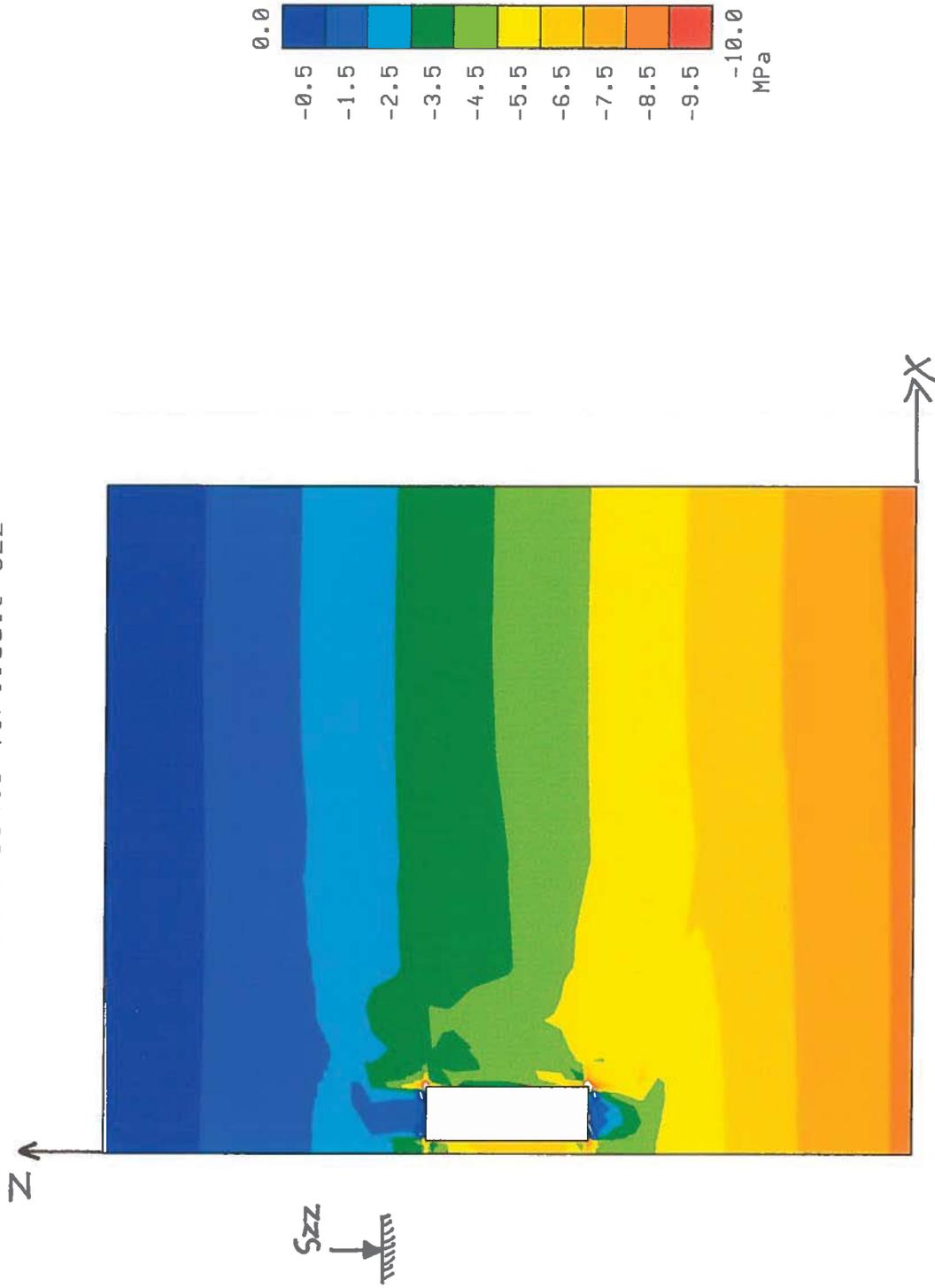
<b>MODELE NUMERIQUE PAR ELEMENTS FINIS</b>  <b>MAEL CARHAIX</b>	Référence du calcul: C1
<u>But du calcul:</u>  Calcul tridimensionnel pour examiner la distribution des contraintes au voisinage de 2 chambres	
<u>Caractéristiques géométriques du modèle:</u>  Par raison de symétrie, le modèle représente le quart de la structure: 2 chambres de dimensions : largeur 20 m, longueur 60 m, hauteur 60 m Ces 2 chambres sont séparées par un pilier de largeur 10 m Le toit des chambres se trouve à la profondeur de 120 m Dimensions totales du modèle en X Y et Z: 500 x 500 x 500 m	
<u>Caractéristiques mécaniques des terrains</u>  Le modèle comprend un seul terrain: le schiste ardoisier considéré comme anisotrope. Le plan d'anisotropie est le plan XOZ Les caractéristiques prises en compte sont: $E1 = 20000 \text{ MPa}$ $\nu = 0.20$ $E2 = 10000 \text{ MPa}$ $\nu = 0.4$ $\gamma = 27 \text{ kN/m}^3$	
<u>Conditions aux limites et conditions de chargement</u>  Contraintes initiales $\sigma_v = \gamma H$ $k = \sigma_h / \sigma_v = 1$ Déplacements horizontaux nuls sur les bords verticaux Déplacement vertical nul sur le bord inférieur horizontal	
<u>Graphiques de résultats</u>  <ul style="list-style-type: none"> <li>* vue tridimensionnelle du modèle</li> <li>* contrainte verticale SZ dans le plan vertical XOZ</li> <li>* contrainte horizontale SX dans le plan vertical XOZ</li> <li>* contrainte horizontale SY dans le plan vertical XOZ</li> </ul>	

MAEL-CARHAIX Modele C1 2 chambres 20 x 60 x 60 Pilier de 10 m H=180m



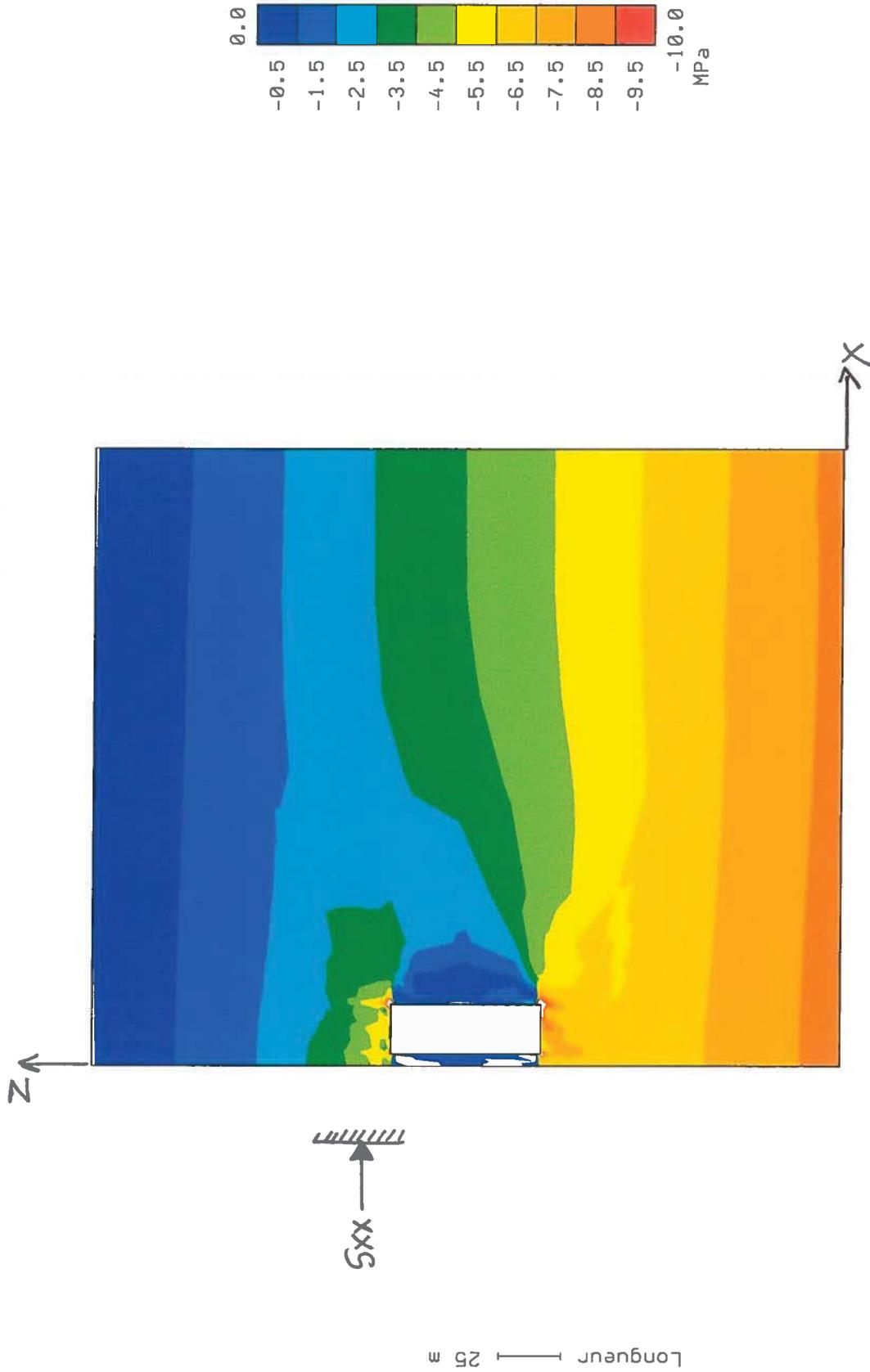
Angles de prise de vue : -60.0 20.0  
Echelle : 1/ 40.00000

MAEL CARHAIX modele C1 2 ch 20 x 60 x 60 H=180 m Pilier 10 m  
Contrainte verticale SZZ

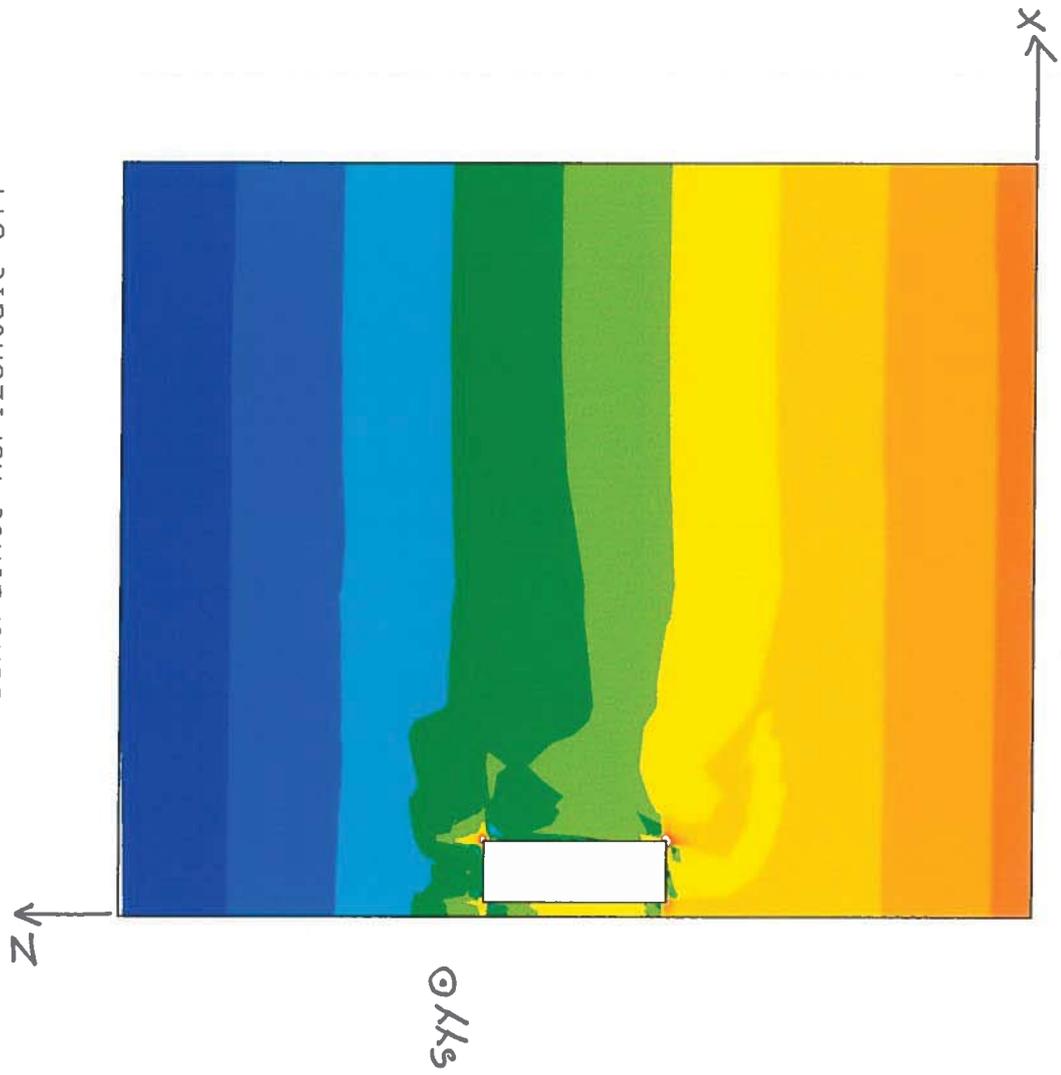


Longueur 1 25 m

MAEL CARHAIX modele C1 2 ch 20 x 60 H=180 m Pilier 10 m  
Contrainte horizontale SXX



MAEL CARHAIX modele C1 2 ch 20 x 60 x 60 H=180 m Pilier 10 m  
Contrainte horizontale SY



SY

Longueur | 25 m

**DOCUMENTS ANNEXES**

**ANALYSE DES EAUX**

**Jean-Marc GAUDRON**BIOLOGISTE  
ANCIEN INTERNE DES HÔPITAUX DE LA RÉGION DE PARIS28, place du Champ de Foire  
B.P. 242 - 29834 CARHAIX Cedex  
Téléphone 02 98 93 00 96  
Télécopie 02 98 93 39 23**Franck LELU**BIOLOGISTE  
ANCIEN INTERNE DES HÔPITAUX DE PARIS

Carhaix le 30/04/01

Page: 1

Examens du 24/04/01  
Réf: 0104240164...C.c.F..

ARDOISIÈRES

22340 MAEL-CARHAIX

## ANALYSE D'EAU

Origine..... Eau de puits (prairie)  
Aspect..... Limpide**Chimie :**

pH.....	7.50
Nitrites.....	Absence
Nitrates.....	7 mg/l (N : < 50)
Ammoniaque.....	Absence
Chlorures (en NaCl).....	29 mg/l
Phosphates.....	Absence

**Matières organiques :**

en milieu acide.....	<5.0	(N : < 5.0)
en milieu alcalin.....	<2.0	(N : < 2.0).

**Bacteriologie :**

Germes totaux.....	400
Coliformes.....	0
Streptocoques fécaux.....	0

**Conclusion :** Eau potable.

Le Biologiste

**Jean-Marc GAUDRON**

BIOLOGISTE

ANCIEN INTERNE DES HÔPITAUX DE LA RÉGION DE PARIS

28, place du Champ de Foire  
B.P. 242 - 29834 CARHAIX Cedex  
Téléphone 02 98 93 00 96  
Télécopie 02 98 93 39 23**Franck LELU**

BIOLOGISTE

ANCIEN INTERNE DES HÔPITAUX DE PARIS

Carhaix le 30/04/01

Page: 1

Examens du 24/04/01

Réf:0104240166...C.c.F..

ARDOISIÈRES

22340 MAEL-CARHAIX

## ANALYSE D'EAU

Origine..... Eau de puits (milieu)

Aspect..... Limpide

**Chimie :**

pH.....	7.50
Nitrites.....	Absence
Nitrates.....	37 mg/l (N : < 50)
Ammoniaque.....	Absence
Chlorures (en NaCl).....	15 mg/l
Phosphates.....	Absence

**Matières organiques :**

en milieu acide.....	<5.0	(N : < 5.0)
en milieu alcalin.....	<2.0	(N : < 2.0)..

**Bacteriologie :**

Germes totaux.....	400
Coliformes.....	0
Streptocoques fécaux.....	0

**Conclusion :** Eau potable.

Le Biologiste

**Jean-Marc GAUDRON**

BIOLOGISTE

ANCIEN INTERNE DES HÔPITAUX DE LA RÉGION DE PARIS

28, place du Champ de Foire  
B.P. 242 - 29834 CARHAIX Cedex  
Téléphone 02 98 93 00 96  
Télécopie 02 98 93 39 23**Franck LELU**

BIOLOGISTE

ANCIEN INTERNE DES HÔPITAUX DE PARIS

Carhaix le 30/04/01

Page: 1

Examens du 24/04/01

Réf:0104240165...C.c.F..

ARDOISIÈRES

22340 MAEL-CARHAIX

## ANALYSE D'EAU

Origine..... Eau de puits (Kergonan)  
Aspect..... Limpide

**Chimie :**

pH..... 7.50  
Nitrites..... Absence  
Nitrates..... 10 mg/l (N : < 50)  
Ammoniaque..... Absence  
Chlorures (en NaCl)..... 23 mg/l  
Phosphates..... Absence

**Matières organiques :**

en milieu acide..... <5.0 (N : < 5.0)  
en milieu alcalin..... <2.0 (N : < 2.0)..

**Bacteriologie :**

Germes totaux..... 400  
Coliformes..... 0  
Streptocoques fécaux..... 0

**Conclusion :** Eau potable.

Le Biologiste