INERIS

INSTITUT NATIONAL DE L'ENVIRONNEMENT INDUSTRIEL ET DES RISQUES

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
NOM	J.J. TRITSCH	C. DIDIER	C. TAUZIEDE
Qualité	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
Visa			

TABLE DES MATIERES

1. OBJECTIF ET CONTEXTE DE L'ETUDE 4

2. METHODE D'ETUDE 4

3. CONTEXTE ET SITUATION DE L'EXPLOITATION 5

3.1 CADRE GEOGRAPHIQUE 5
3.2 CADRE ADMINISTRATIF DE L'EXPLOITATION 6
3.3 CONTEXTE GEOLOGIQUE 6
3.4 CONTEXTE D'EXPLOITATION 7

4. METHODES D'EXPLOITATION ET MECANISMES DE RUPTURE SYMPTOMATIQUES DES ARDOISIERES 9

5. HISTORIQUE ET CONFIGURATIONS D'EXPLOITATION DE L'ARDOISIERE DE MAËL–CARHAIX 9

5.1 LA PERIODE ARCHAÏQUE DES FONDS SOUS VOUTE (1903 –1928) 10
5.2 LES CHAMBRES DESCENDANTES (1928-1952) 11
5.3 LES DERNIERES CHAMBRES DESCENDANTES (1952-2000) 12

6. SYNTHESE : EVALUATION DES ALEAS 14

6.1 PRINCIPE DE L'ANALYSE 14
6.2 IDENTIFICATION DES CONFIGURATIONS DEFAVORABLES ET DES SCENARIOS ACCIDENTELS PREVISIBLES 15
6.3 ZONAGE ET QUALIFICATION DES ALEAS 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 DEBOUCHANT AU JOUR (PUITS) 19
6.5 IMPACTS LIES A LA REMONTEE DES EAUX 20
a) Impacts quantitatifs 20
b) Impacts sur la qualité des eaux 20

7. CARTOGRAPHIE DES ALEAS 21

8. PRINCIPES DE MISE EN SECURITE DU SITE A LONG TERME 22

8.1 PRINCIPES GENERAUX DE MISE EN SECURITE 22
8.2 ANALYSE DE MESURES DE MISE EN SECURITE DE LA SURFACE 22
8.2.1 Zones d'aléas moyen et fort 22
8.2.2 Zones d'aléa faible 24
8.2.3 Information du public et interdiction d'accès 24
8.3 ANALYSE DE MESURES DE SECURITE POUR LES PUITS 24
8.3.1 Les serrements et bouchons bétonnés en colonne de puits 24
a) Serrements bétonnés ancrés 24
b) Bouchons autoportants 25
8.3.2 Dalles bétonnées 26
a) Dalles bétonnées de surface 26
b) Panneaux préfabriqués de béton 26
c) Dalles enterrées 26
8.3.3 Remblayage 27
8.3.4 Méthodes de fermeture légères 27
a) Grilles métalliques 27
b) Rails en acier 27
8.3.5 Mesures d'interdiction d'accès et d'affichage du risque 28
8.3.6 Proposition de mesures pour les puits adaptées au contexte du site 28

9. CONCLUSION 29

10. LEXIQUE 32

11. ARCHIVES ET BIBLIOGRAPHIE SPECIALISEES 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 Coät-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^2 (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).

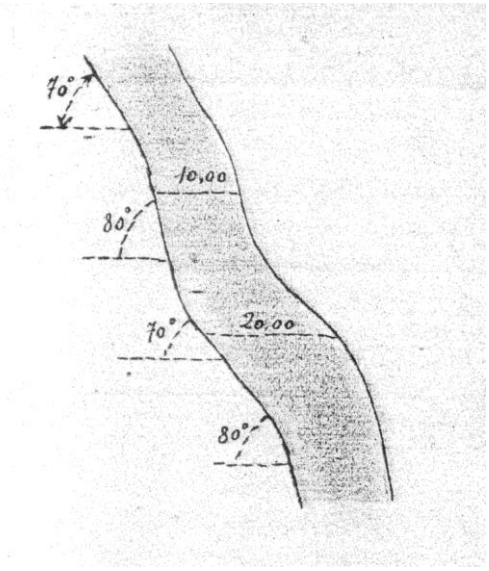


Schéma de la veine montrant les « plis en genou »
(archives DRIRE)

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 x4 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 avions 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^3 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 ARDOISIERES

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'ARDOISIERE 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.

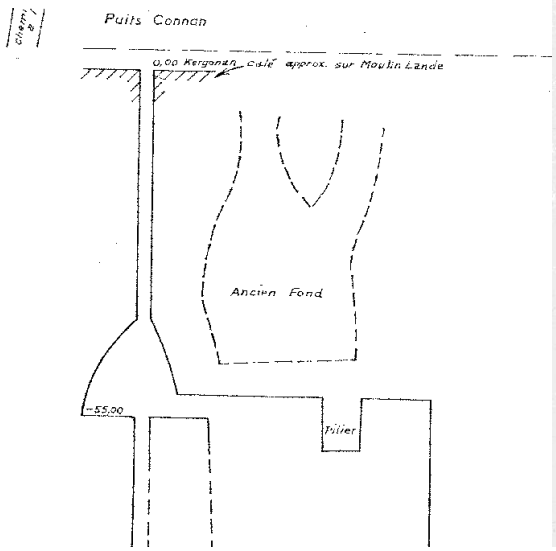
On se reportera au plan d'ensemble de l'ardoisière de 1958 (représenté sur la figure n° 6) pour mieux comprendre l'historique des travaux détaillée dans les paragraphes suivants.

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

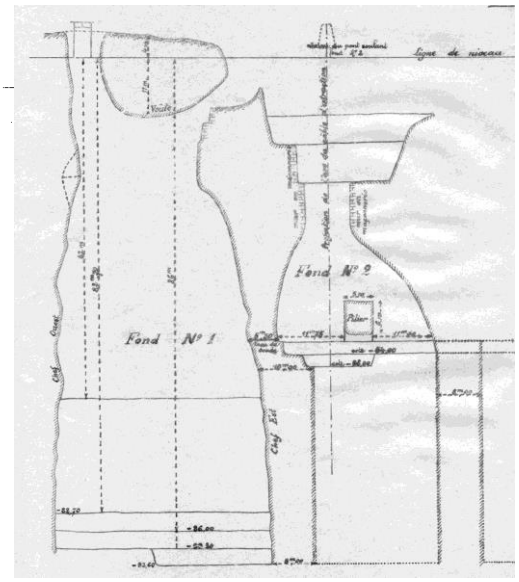
Le début des travaux sur les exploitations de Moulin-Lande et Kergonan semble remonter au début du XXème siècle. L'ardoise était extraite dans deux carrières exploitée par « fonds descendants sous voûte » (ou « puits bouteilles »), méthode archaïque utilisée au XIXème siècle et définitivement abandonnée 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* ».

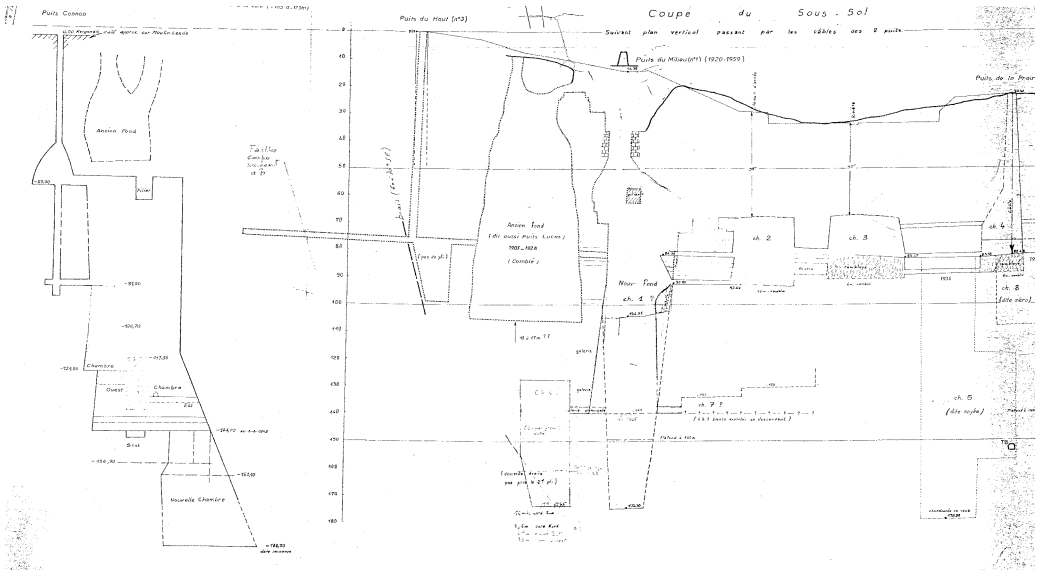
En outre, le Service des Mines jugeait indispensable « *qu'une issue de secours soit réalisée à l'extrémité du champ d'exploitation en cas d'effondrement de la chambre est actuelle* » (du fond n° 2). Le « puits de la Prairie » (puits n° 2) fut foncé dans cette optique en 1928, à 150 m de l'ancien puits.

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 au 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 abandonnés (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.

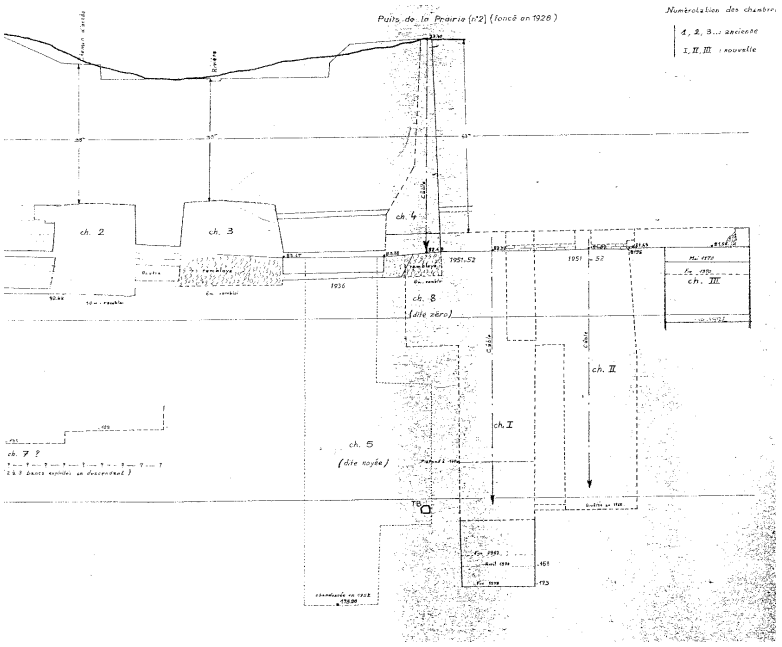
5.3 LES DERNIERES CHAMBRES DESCENDANTES (1952-2000)

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 concourir à 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 1/500ème 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. SYNTHESE : 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

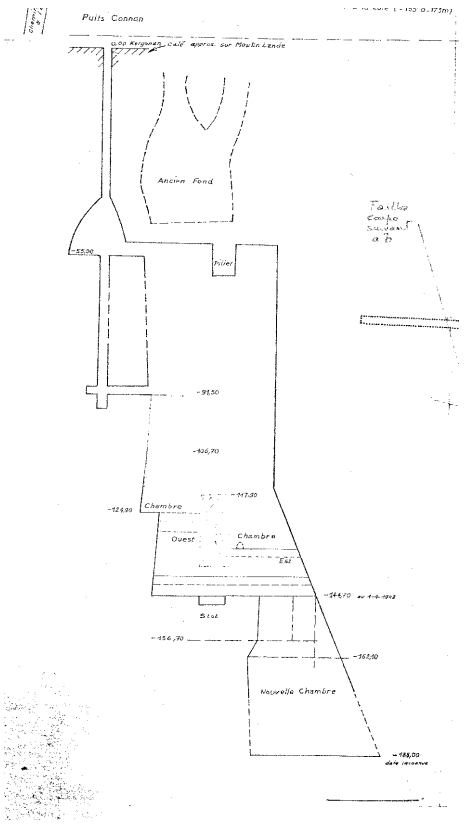
Tableau 2 : Facteurs de prédisposition déduits des dimensions des ouvrages

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).



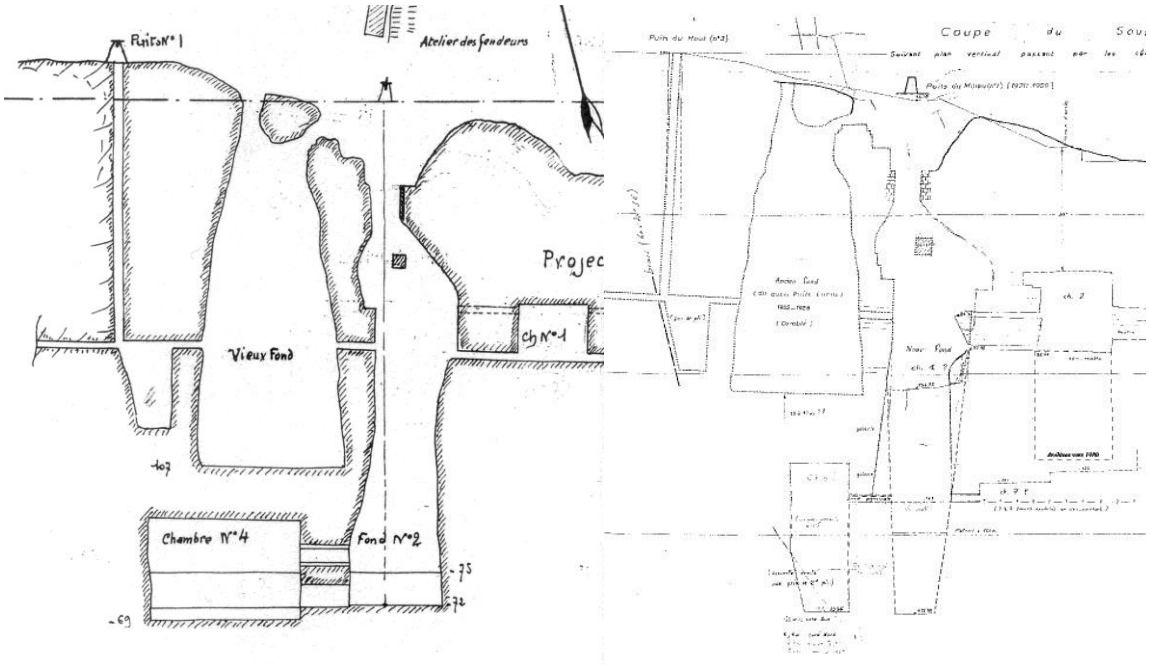
Vue d'ensemble du secteur de Kergonan
(Détail du plan établi en 1958)

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 1/2500ème 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.

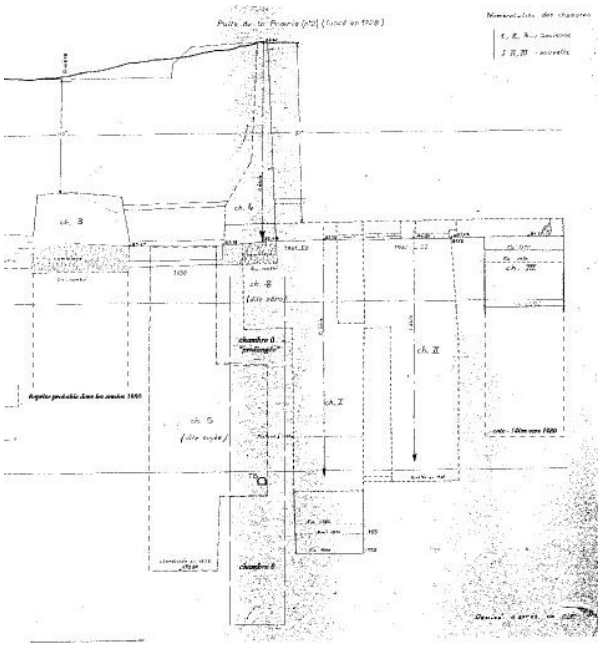
Cas de chambres n° 2 et 3

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 atteigne 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 chambres 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 1/500ème 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 un 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 ALEAS

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 inexploitables (« 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^3 ;
- 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^3) : 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 PUITS

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 boulant 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 débourrage 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^3 (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. Prévues 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 débourrage 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 débourrage 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 débourrage mais elles impliquent des travaux très lourds aux niveau 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^3 environ) à 10 euros le m^3 : 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 du risque ;*
- *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^{ème} 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^{ème} 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 1/1000ème, daté 1938.

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

Archives DRIRE : Plan topographique des Ardoisières de Moulin - Lande, échelle 1/250ème, 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, 2ème 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 1/500ème
Plan 2	Zonage des dispositions visant la sauvegarde de la surface	1 plan au 1/500ème

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 A CIEL OUVERT OU « DECOUVERTURES » 2

3. LES PREMIERES EXPLOITATIONS SOUTERRAINNES ISOLEES 3

3.1 LES EXPLOITATIONS LATERALES OU « SOUS-CAVAGES » 3
3.2 LA METHODE DESCENDANTE SOUS VOUTE OU « PUITS BOUTEILLES » 4

4. LES METHODES MONTANTES AVEC REMBLAYAGE 5

4.1 LA METHODE PAR « BANCS A MONTER » OU « METHODE MIXTE » 5
4.2 LA METHODE CLASSIQUE DITE DES « BANCS A MONTER » 6

5. LES METHODES RECENTES 8

5.1 LA METHODE DES « BANCS A DESCENDRE » 8
5.2 LA METHODE MONTANTE PAR TRANCHES REMBLAYEES 9

6. BIBLIOGRAPHIE 10

15. INTRODUCTION

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

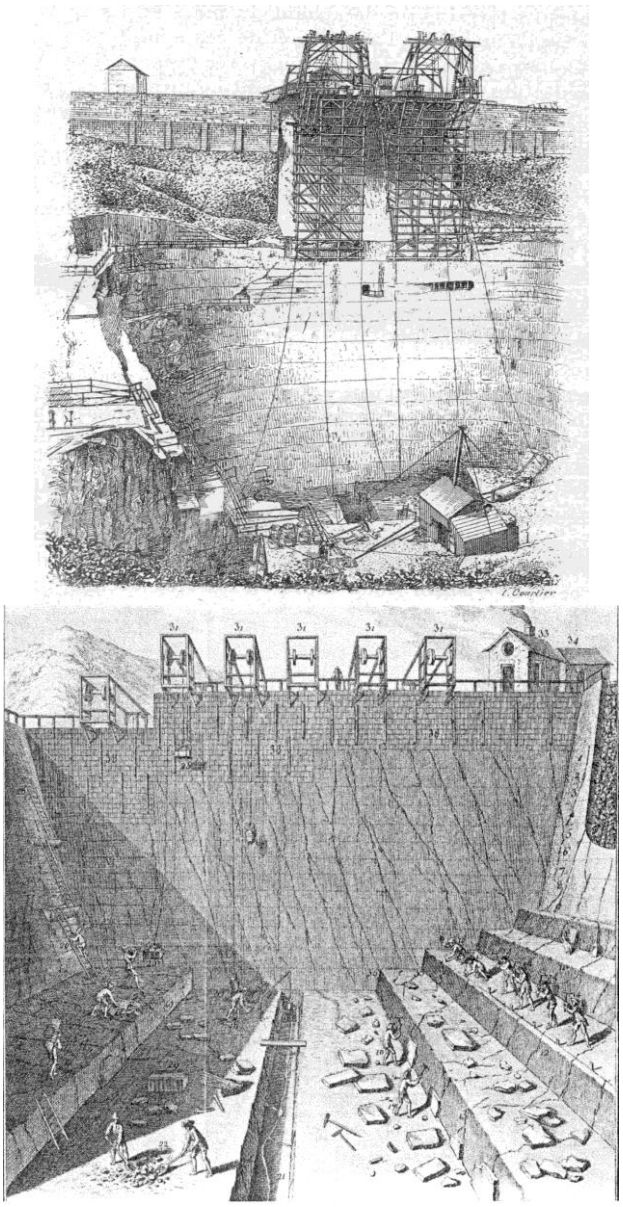
Plusieurs variantes à ces méthodes ont existé, en particulier lors de l'introduction des méthodes d'exploitation en souterrain.

16. 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 découverture 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^{ème} 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.

17. LES PREMIERES EXPLOITATIONS SOUTERRAINNES ISOLEES

17.1 LES EXPLOITATIONS LATERALES OU « SOUS-CAVAGES »

Les premières méthodes d'exploitation en souterrain furent utilisées dans la région

d'Angers, aux Grands-Carreaux 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.

17.2 LA METHODE DESCENDANTE SOUS VOUTE OU « PUITS BOUTEILLES »

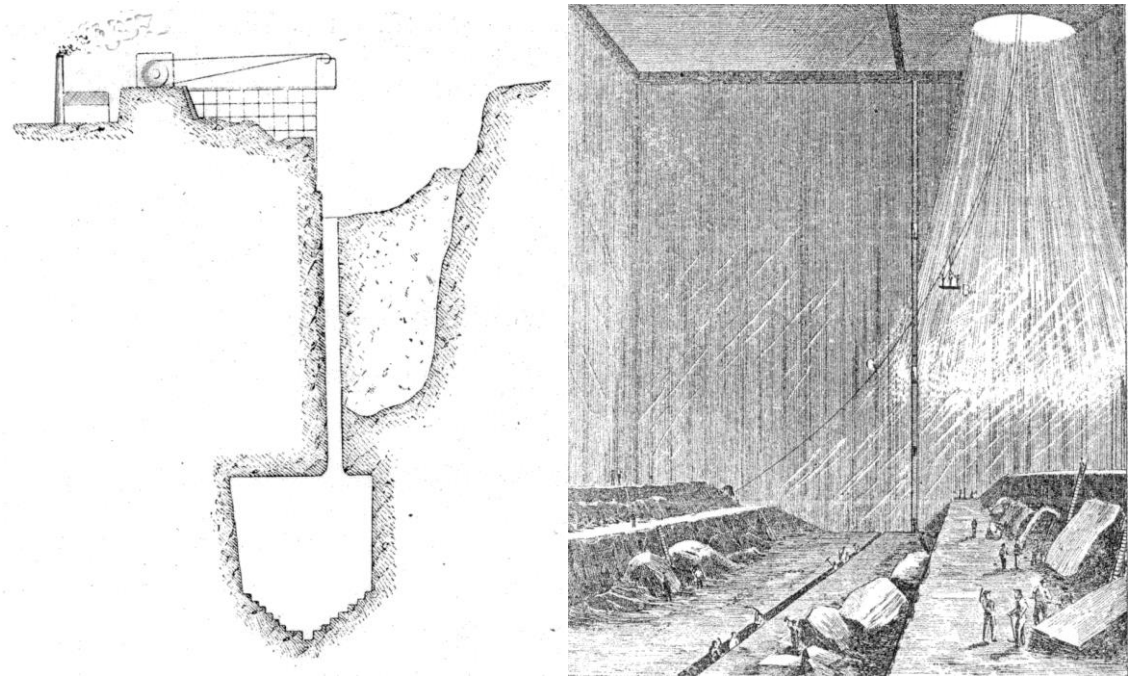
Pour des raisons purement économiques et de gain de gisement par approfondissement, la véritable première méthode d'exploitation en souterrain fut introduite vers les années 1840. Il s'agissait de la méthode descendante sous voûte qui ne cessera véritablement qu'en 1901. Elle était pratiquée à ses débuts 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 des 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'insuffisante de l'épaisseur des bardeaux séparatifs furent à l'origine de plusieurs accidents par effondrement généralisé qui entraînèrent 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-Carreaux 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).

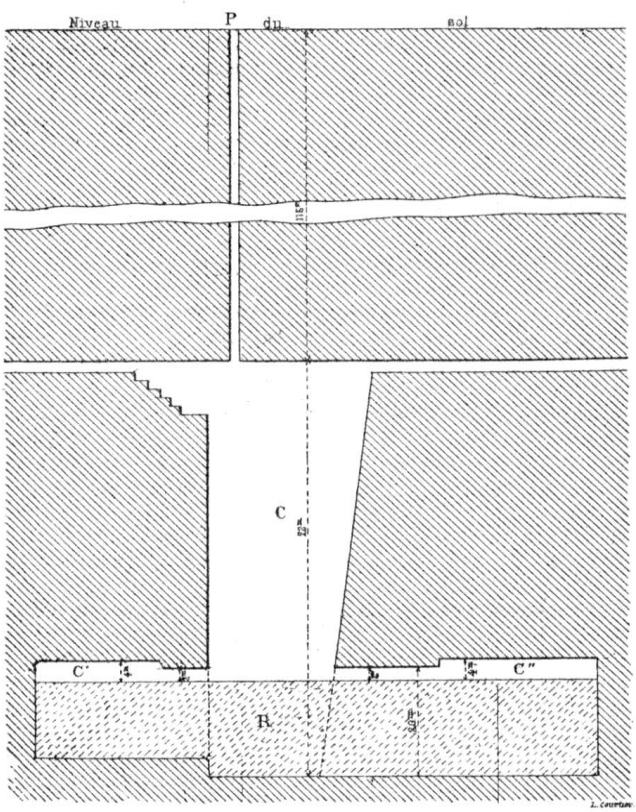
18. LES METHODES MONTANTES AVEC REMBLAYAGE

18.1 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-Carreaux 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 »).



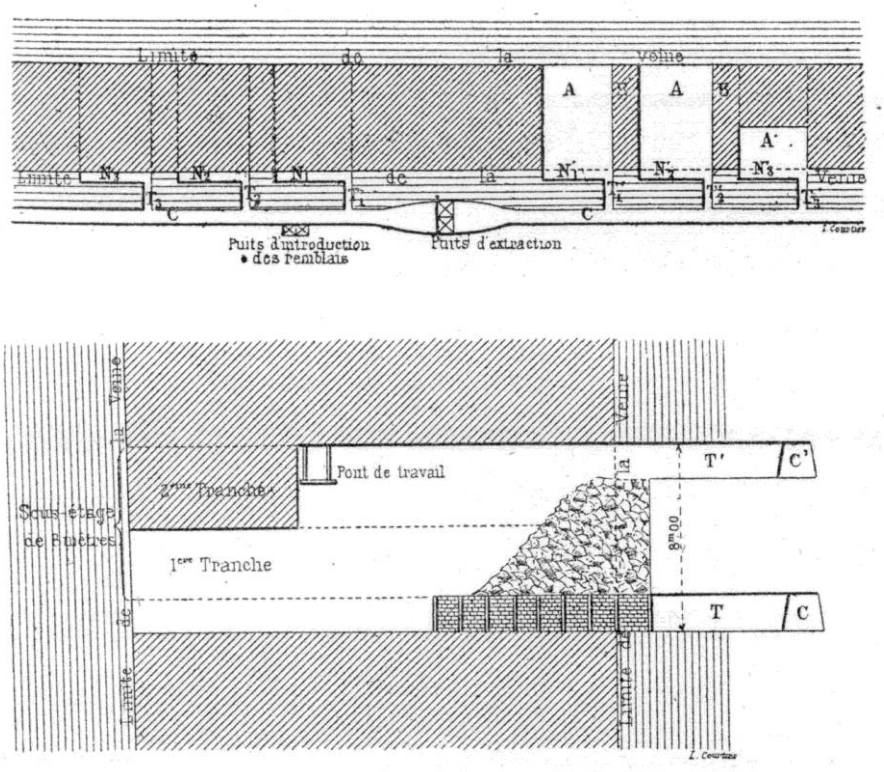
Anciens fonds sous voûtes et avancées pour exploiter en remontant (méthode mixte)
(d'après Haton de la Goupillière, 1920)

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.

18.2 LA METHODE CLASSIQUE DITE DES « BANCS A MONTER »

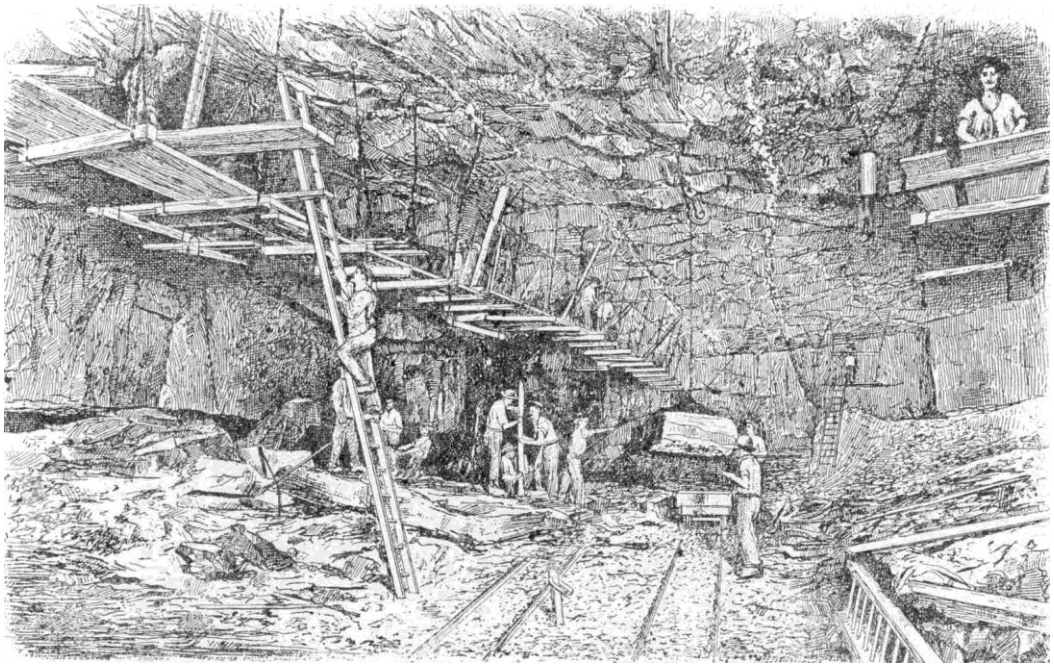
Cette méthode montante, dans des chambres remblayées jusqu'au dernier banc, est la méthode d'exploitation classiquement répandue de la fin du XIX^{ème} siècle jusqu'au dernier quart du XX^{ème} siècle.

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 Brémandière, 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.

19. 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.

19.1 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.

19.2 LA METHODE MONTANTE PAR TRANCHES REMBLAYEES

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

20. 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 Paperie. Archives départementales n° 15 J 206, 6 p., 15 février 1887.

SOULEZ-LARIVIERE (F) : Les ardoisières d'Angers, 2ème 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

1. MODES DE RUPTURE SYMPTOMATIQUES DES ARDOISIERES 2

1.1 LES EBOULEMENTS DANS LES VIEUX FONDS A CIEL OUVERT 2
1.2 LES EBOULEMENTS DANS LES VIEUX FONDS SOUS VOUTES ET CHAMBRES DESCENDANTES 2
1.3 LES EFFONDREMENTS DANS LES VIEUX FONDS SOUS VOUTES ET CHAMBRES DESCENDANTES 5
1.4 LES CHAMBRES MONTANTES REMBLAYEES 6

2. DIMENSIONNEMENT ET REGLES D'EXPLOITATION 8

2.1 REGLES DE DIMENSIONNEMENT 8
2.2 RETROANALYSE DES EVENEMENTS PASSES 10

3. BIBLIOGRAPHIE 11

21. MODES DE RUPTURE SYMPTOMATIQUES DES ARDOISIERES

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.

21.1 LES EBOULEMENTS DANS LES VIEUX FONDS A CIEL OUVERT

Ces exploitations prises « en découverture » 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.

21.2 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^{ème} 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 000m3)	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 000m3)	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 (750m3)	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 (600m3)	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 (8000m3)	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 Paperie, fond n°4 (4/06/1883)	fond descendant sous voûte	voûte à -59m		nombreux délits	éboulement (15 000m3)	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 000m3)	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 000m2)	voisinage de découvertures	effondrement généralisé après éboulement des bardeaux (450 000m3)	effondrement en surface sur 9000m2	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

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 découverture sus-jacente	voûte à 110m	épaisseur du stot sous la découverture: 18m	éboulements successifs depuis 1888 à l'aplomb d'un vieux fond en découverture (Sainte Marie)	éboulement d'une chambre insuffisamment remblayée, avec irruption des eaux accumulées dans la découverture	effondrement total jusqu'à la surface (3 500m^2)	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^2, 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.

21.3 LES EFFONDREMENTS 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^{ème} 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^{ème} 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 1er 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 débourrage 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 découvertures préconisée par le Service des Mines au milieu du XIX^{ème} se révéla insuffisante.

21.4 LES CHAMBRES MONTANTES REMBLAYEES

La méthode des chambres montantes remblayées fut introduite à la fin du XIXème 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 superposées.

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^2, 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 débourrage 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 suffit 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.

22. DIMENSIONNEMENT ET REGLES D'EXPLOITATION

22.1 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-Carreaux	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 (pratiqué : 40 à 50m)	Illimitée avec remblais (pratiqué : 135m)	Illimitée (pratiqué : 140m)	100m
Largeur du bardeau entre chambres (pilier)	15m	15m	12m (2/3 de la portée)	12m au minimum	10m (pratiqué : 12m)	10m (pratiqué : 12m)	1/3 de la portée
Epaisseur des bancs	6m	1.80m	3m	1.80m	3m	3m	6m
Hauteur des niveaux	12m	37m	21m	40m	21m	21m	18m
Epaisseur de la solette entre niveaux		7 à 15m					
Remblayage	immédiat	A la fin	immédiat		immédiat	immédiat	immédiat
Epaisseur 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.

22.2 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 (vieillissement, 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
Epaisseur des stots entre exploitations superposées (m)	< 15	15 - 20	>20	>> 20
Epaisseur 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.

23. 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, 2ème 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.

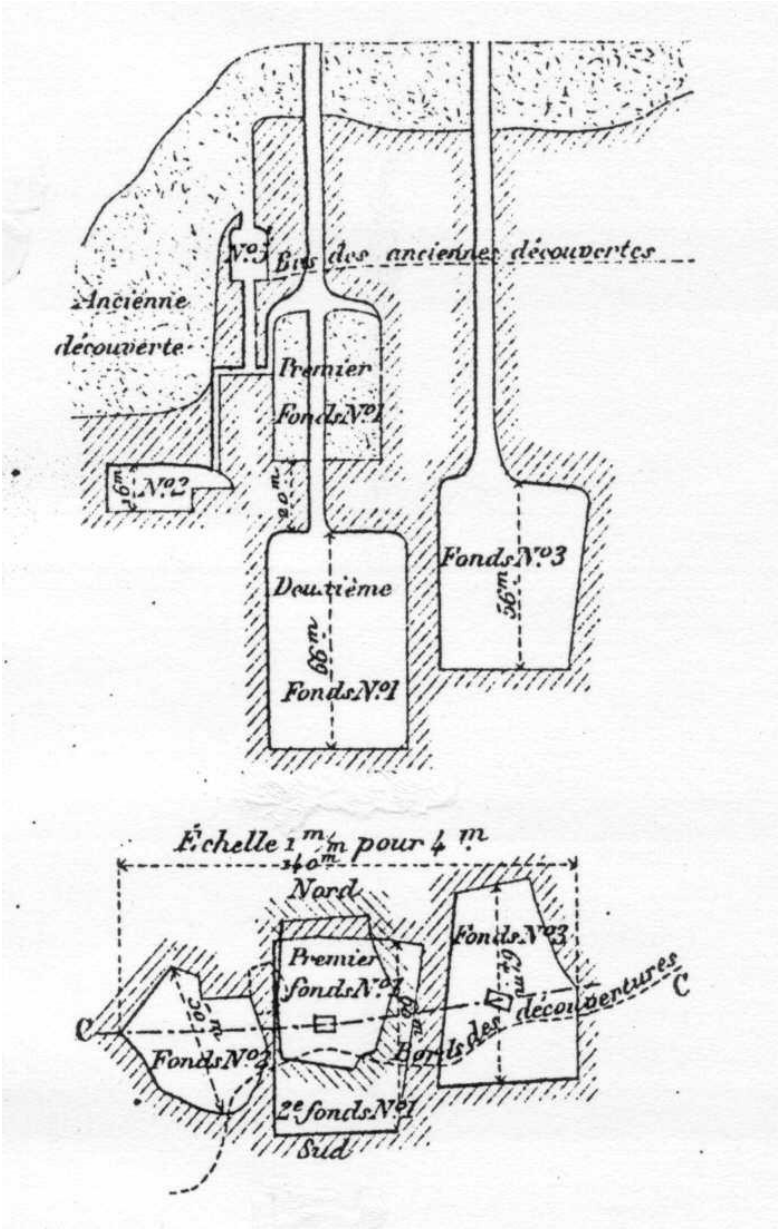


Figure 1 : Effondrement des fonds n° 1, 2 et 3 des Fresnais en 1862 (d'après M. Ichon, 1890)

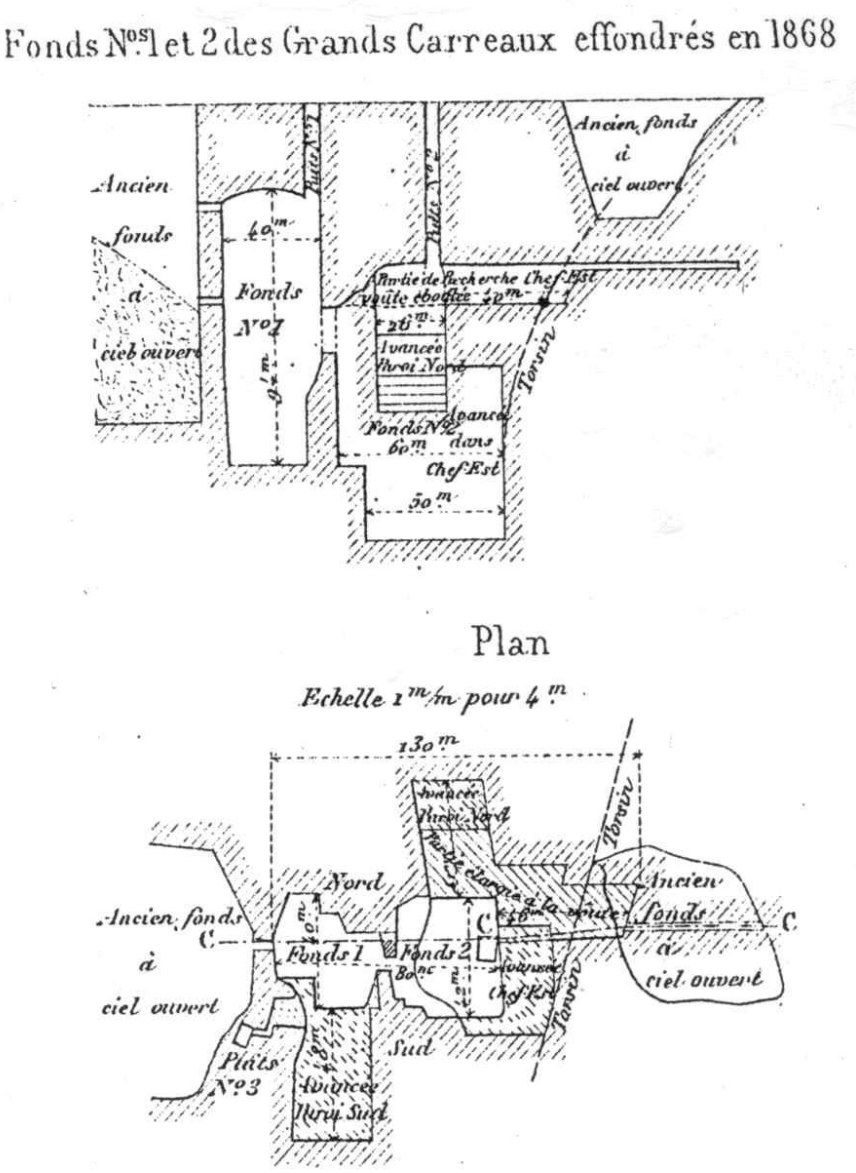


Figure 2 : Effondrement des fonds n° 1 et 2 des Grands-Carreaux en 1868 (d'après M. Ichon, 1890)

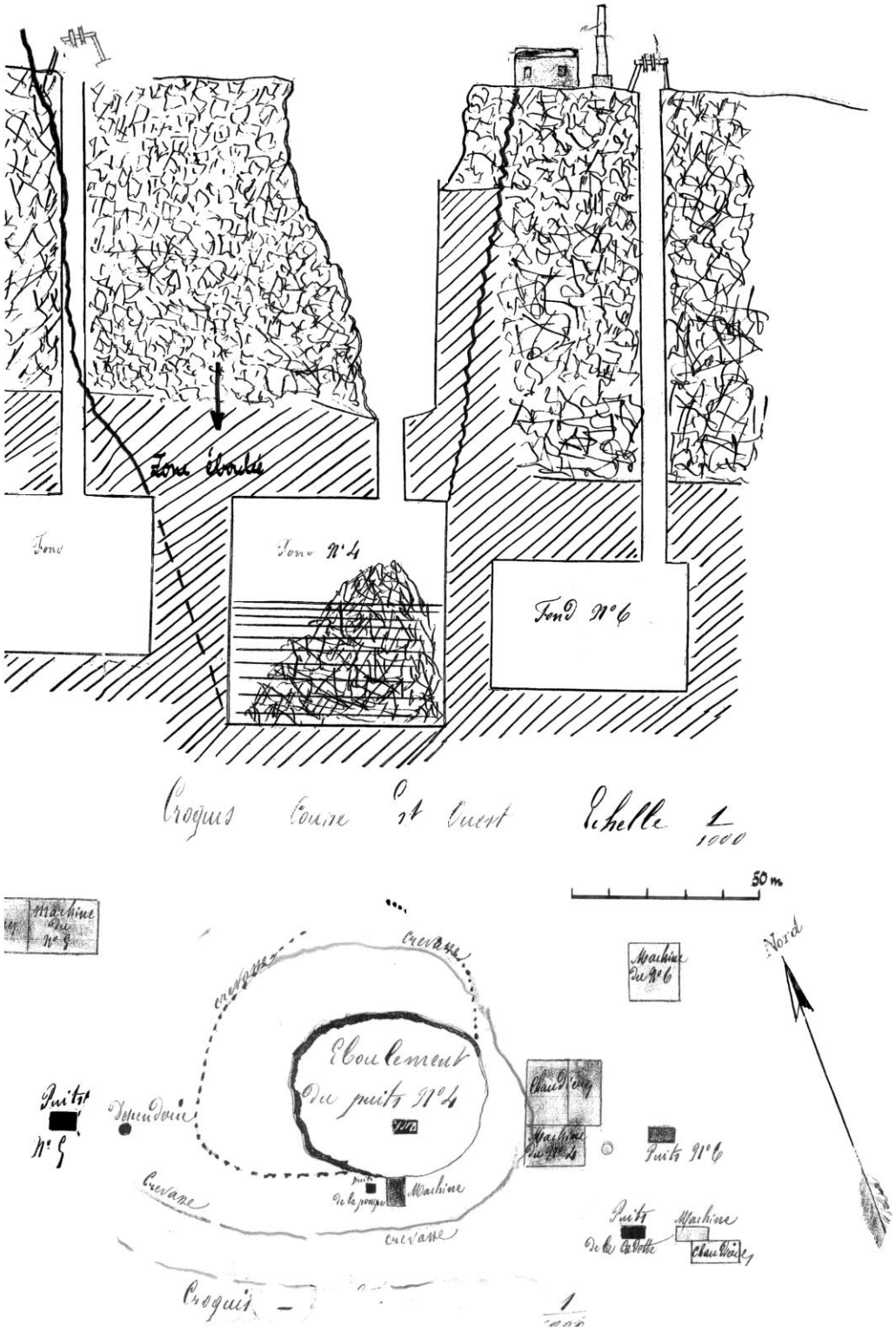


Figure 3 : Effondrement du fond n° 4 de La Paperie en 1887
(Plan d'archives DRIRE, 1887)

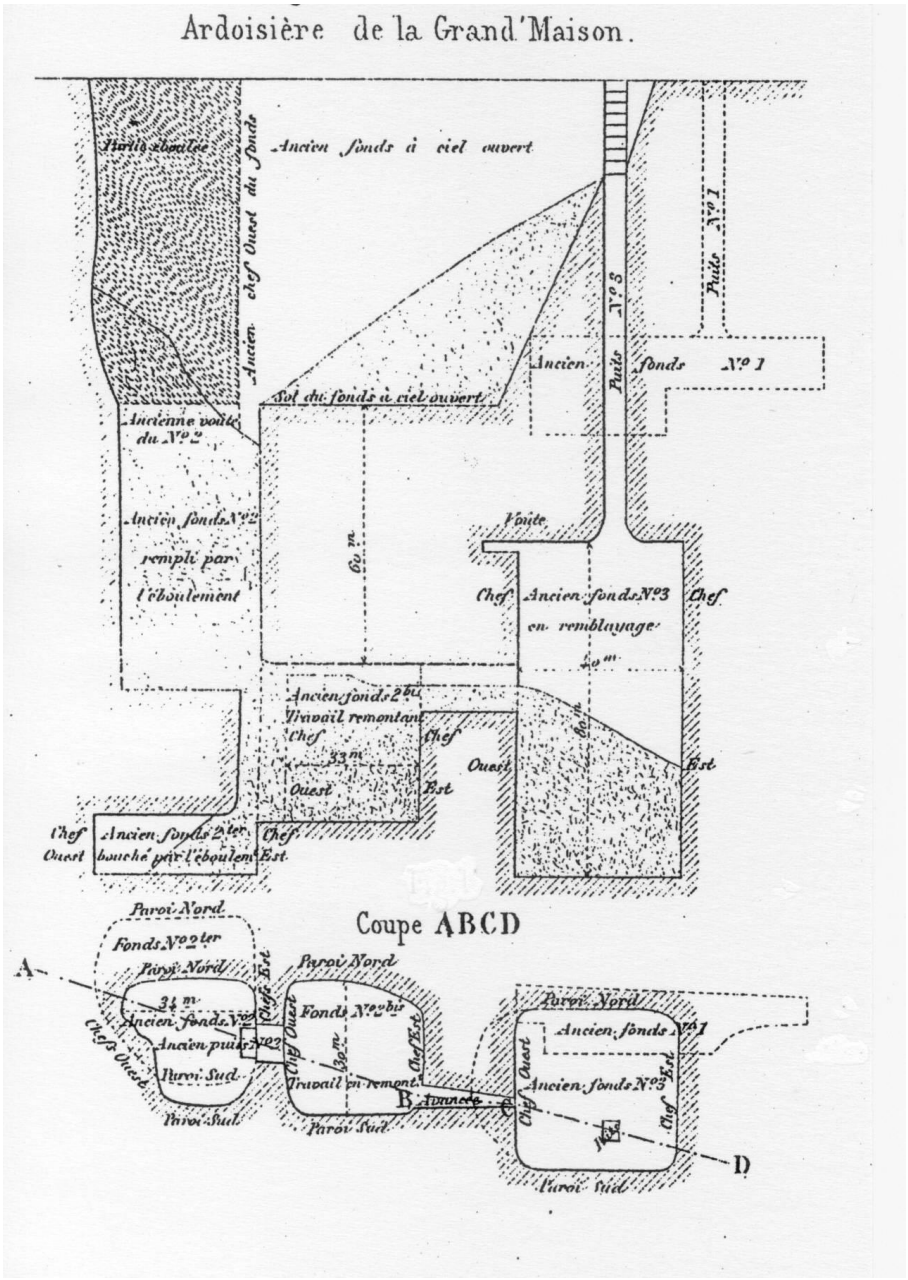


Figure 4 : Effondrement du fond n° 2 de Grand'Maison, en 1887 par rupture de la voûte de l'avancée n° 2 (d'après M. Ichon, 1890)

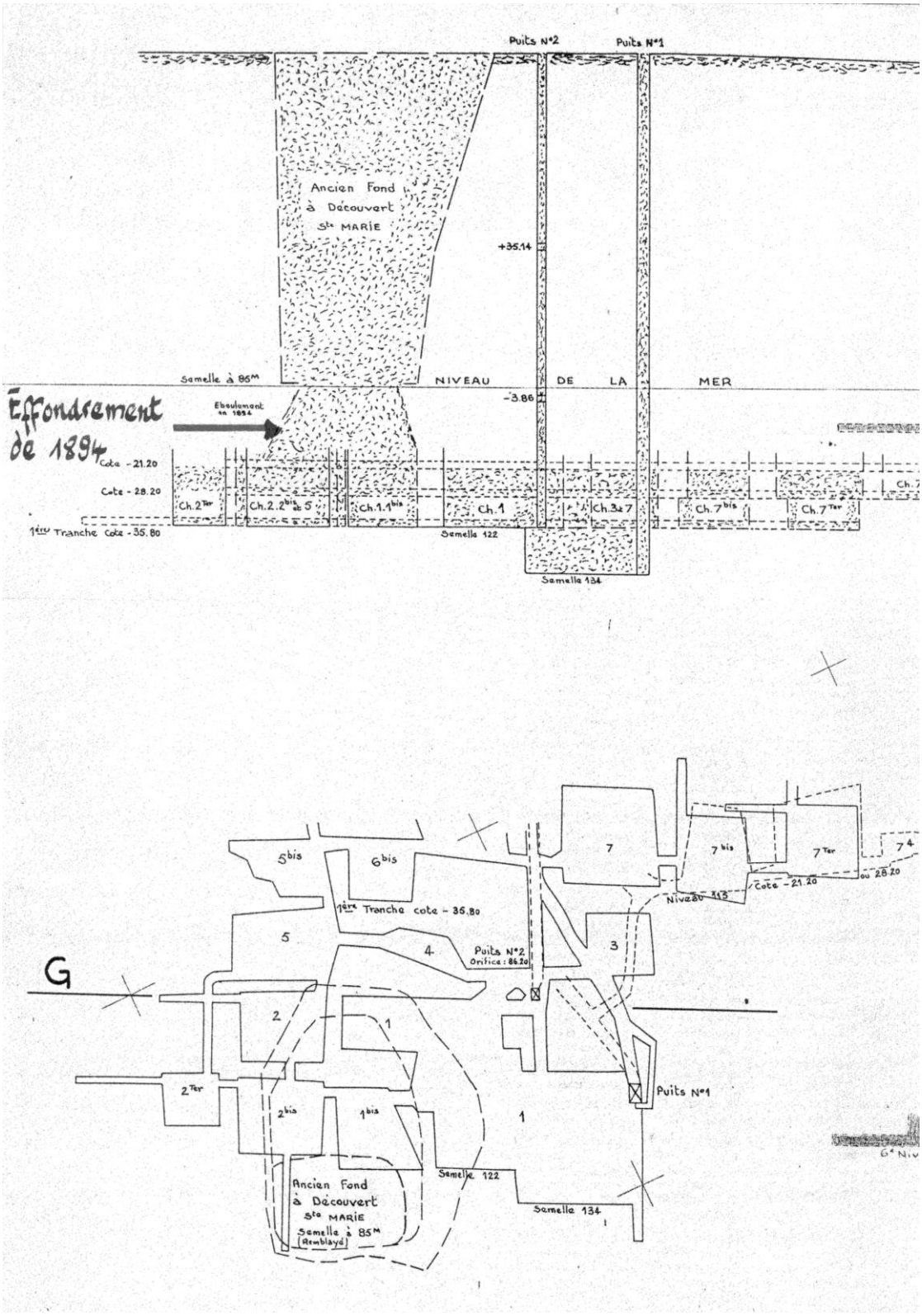


Figure 5 : Effondrement de l'ancien fond Sainte-Marie de Bel-Air-La-Forêt en 1894 par rupture du stot (épais de 18 m) le séparant des chambres montantes remblayées (Plan d'archives DRIRE, 1887)

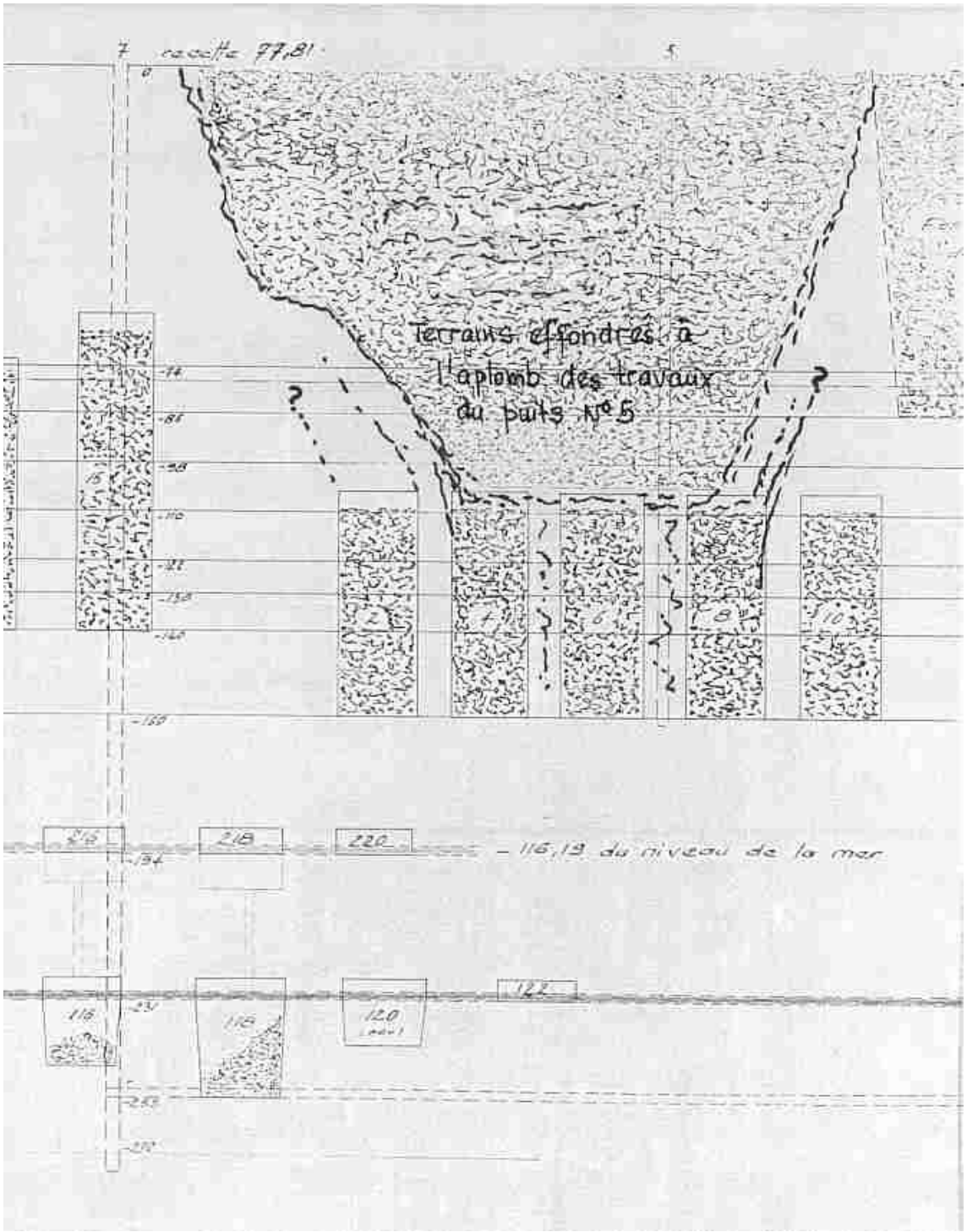


Figure 6 : Effondrement des travaux du puits n° 5 de Misengrain en 1922 (d'après plan des Ardoisières d'Angers daté 1991)

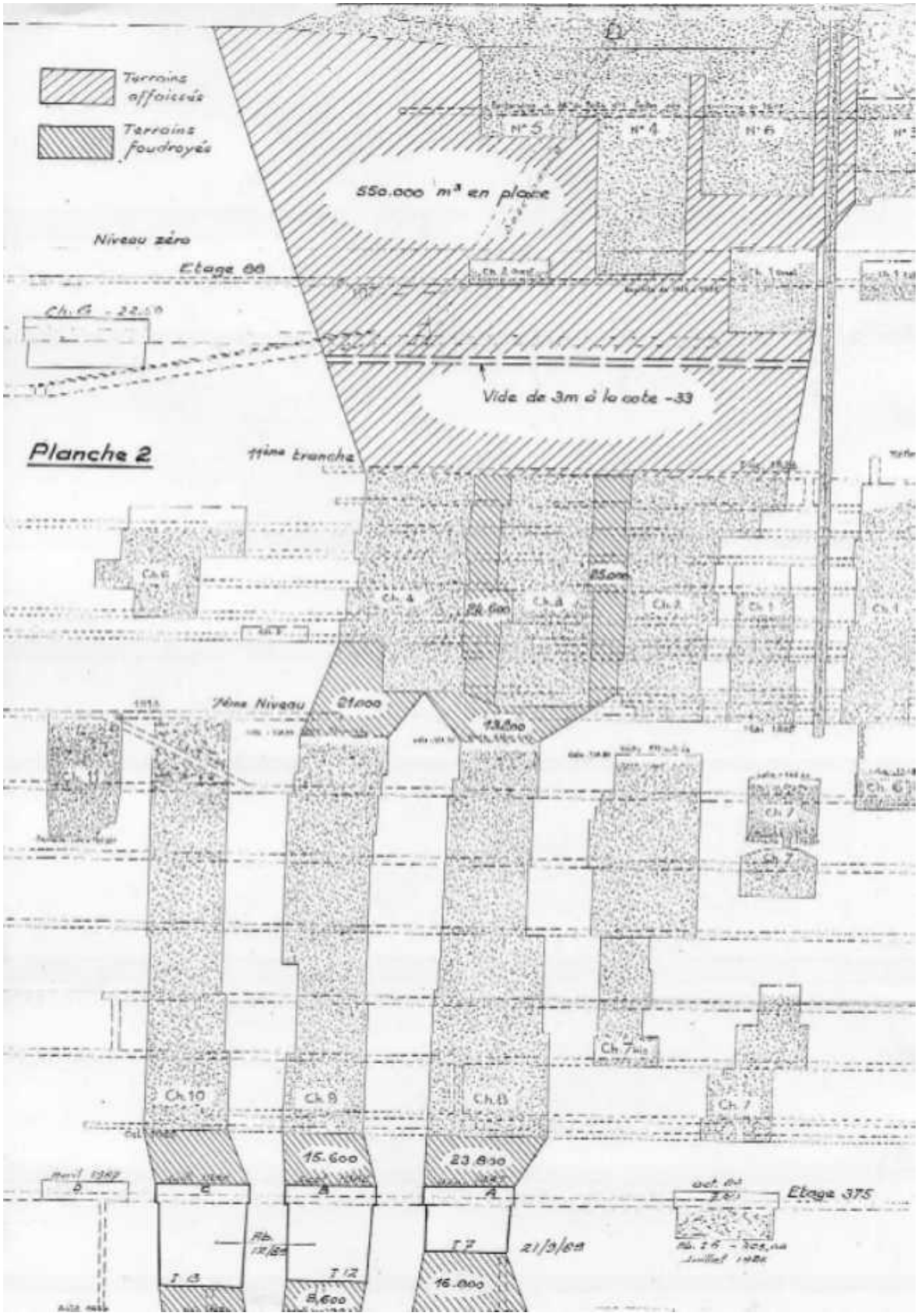


Figure 7 : Effondrement de La Pouèze en 1990 par rupture du stot à l'étage –375 m (d'après R. Schwartzmann, 1991)

24. 43500 – MISE EN SECURITE DE L'ARDOISIERE DE MAËL-CARHAIX (COTES D'ARMOR)

Client	Région	Thème	Responsable d'affaire	Engagement (euros)
DRIRE	Bretagne	Sol et Sous Sol	TRITSCH	13 500

La société « Ardoisières de Maël-Carhaix » a exploité jusqu'en 2000 une carrière souterraine de schistes ardoisiers, ouverte au début du XX^{ème} siècle, sur le site de Moulin-Lande proche 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 XIXème siècle. 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* ».

L'analyse menée par l'INERIS a permis d'identifier différentes configurations d'exploitation défavorables à la stabilité et susceptibles de provoquer des désordres, voire des effondrements en surface. Ces configurations correspondent à la présence d'anciens fonds sous-minés par de grandes chambres descendantes laissées vides et à des chambres descendantes non remblayées, contiguës et fortement imbriquées. La qualification des aléas et sa représentation sous forme d'un zonage hiérarchisé fait apparaître trois secteurs identifiés comme des secteurs à risque d'effondrement potentiel à long terme (aléas fort et moyen).

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 dont deux facilement accessibles et ouverts. Les deux autres puits sont rendus inaccessibles par une végétation dense d'épineux.

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. Les méthodes de traitement véritablement pérennes, par remblayage des vides ou des puits et obturation des têtes de puits par serrement ou bouchons bétonnés ont été écartées compte tenu de la complexité des travaux et surtout du contexte environnemental et socio-économique du site.

En considérant ces aspects et les objectifs fixés, nous avons proposé d'adopter, pour la mise en sécurité du site, des mesures de prévention visant à destiner les terrains de surface, dans l'emprise des secteurs sous-minés, en zones à vocation exclusivement naturelles considérées comme inconstructibles, assorties de dispositions d'interdiction d'accès et pour les puits, des mesures de protection par dalles bétonnées accompagnées de la mise en place d'une ceinture grillagée interdisant l'accès et des panneaux d'affichage du risque. Elles ne garantissent en revanche pas une mise en sécurité définitive et pérenne de la surface et exige donc un gel définitif de son utilisation.