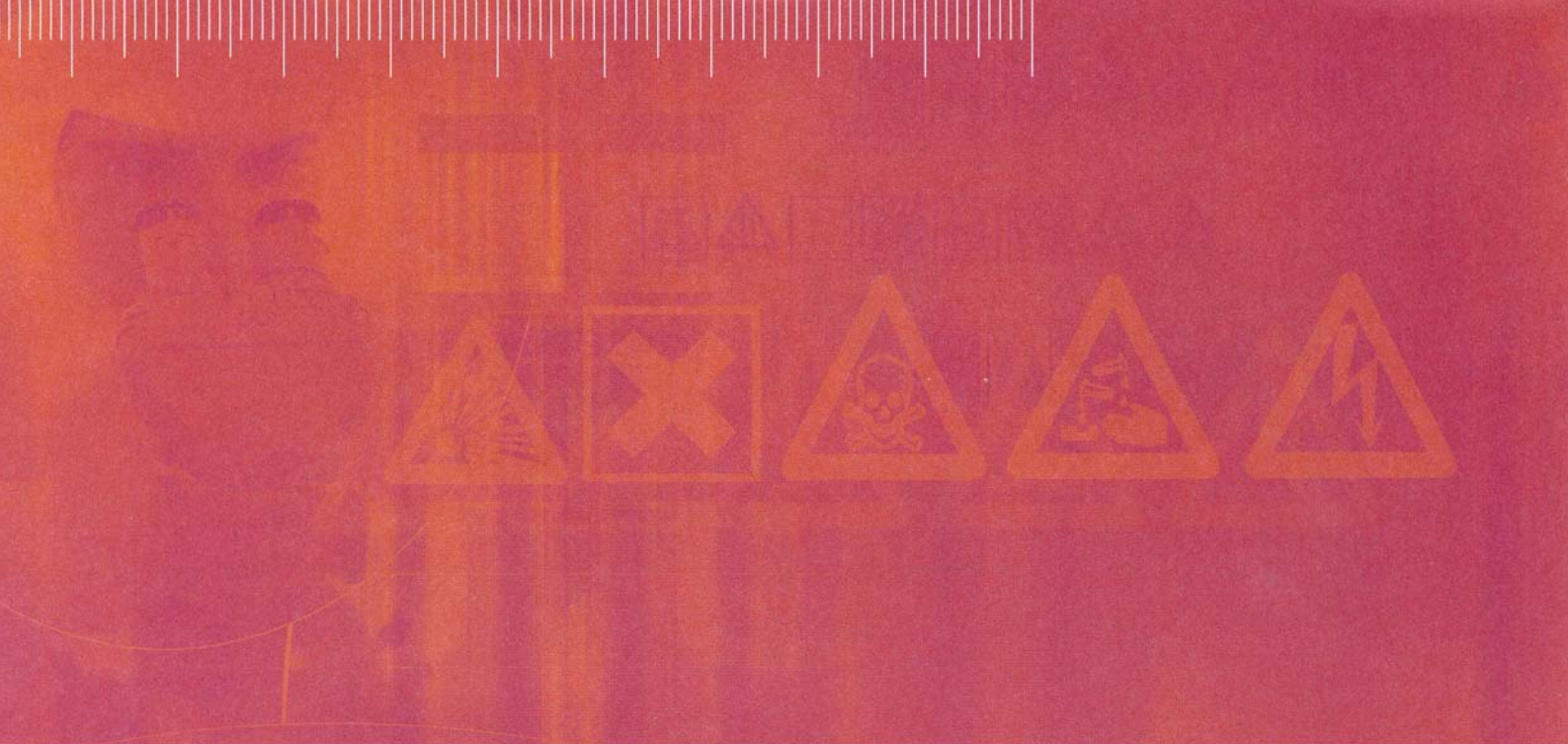




RAPPORT D'ÉTUDE
DRS-05-55102/R01

29/07/2005

**Contribution au développement d'outils d'aide à
l'évaluation des aléas dans le cadre des PPRM
Aléa « mouvements de terrain » pour les
gisements pentés et filoniens**

**Partie 1 : Inventaire et principales
caractéristiques des gisements pentés et
filoniens en France**

INERIS

maîtriser le risque |
pour un développement durable |

Contribution au développement d'outils d'aide à l'évaluation des aléas dans le cadre des PPRM Aléa « mouvements de terrain » pour les gisements pentés et filoniens

Partie 1 : Inventaire et principales caractéristiques des gisements pentés et filoniens en France

Direction des Risques du Sol et du Sous-sol

Ministère de l'Economie, des Finances et de l'Industrie

**Direction de l'Action Régionale, de la Qualité et de la Sécurité
Industrielle (DARQSI)**

Autres personnes ayant participé à l'étude :

F. POULARD, ingénieur à la Direction des Risques du Sol et du Sous-sol.

V. MARTINET, technicien supérieur à la Direction des Risques du Sol et du Sous-sol.

PREAMBULE

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

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

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

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

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

	Rédaction	Vérification	Approbation
NOM	C. LAMBERT	R. SALMON X. DAUPLEY	M. GHOREYCHI
Qualité	Ingénieur à l'Unité Risques Géotechniques liés à l'exploitation du sous-sol à la Direction des Risques du Sol et du Sous-sol	Ingénieur et responsable à l'Unité Risques Géotechniques liés à l'exploitation du sous-sol à la Direction des Risques du Sol et du Sous-sol	Directeur des Risques du Sol et du Sous-Sol
Visa			

TABLE DES MATIÈRES

SYNTHÈSE

1. PRÉSENTATION GÉNÉRALE DE L'ÉTUDE.....	11
1.1 Contexte et objectifs.....	11
1.2 Limites de l'inventaire et suites	11
1.3 Sources d'information.....	12
1.4 Mises à jour	12
2. LES INFORMATIONS CONTENUES DANS L'INVENTAIRE	13
2.1 Matériau exploité.....	13
2.2 Localisation	15
2.3 Historique du titre minier	16
2.4 Géométrie du corps minéralisé	16
2.5 Contexte géologique	17
2.6 Type de travaux	18
2.7 Retours d'expérience	18
2.8 Divers	19
3. CONTEXTE GÉOLOGIQUE ET DÉFINITIONS.....	21
3.1 Origine du gisement	21
3.2 Morphologie des corps de minerais	22
3.3 Eléments constitutifs du gisement.....	22
3.4 Caractéristiques des trois principales formes de gisement	23
3.4.1 Filons (figure 4).....	23
3.4.2 Couches (figure 7)	25
3.4.3 Amas (figure 8)	26
4. PRINCIPALES MÉTHODES D'EXPLOITATION EN GISEMENTS PENTÉS ET FILONIENS	29
4.1 Méthodes anciennes	29
4.2 Méthodes modernes.....	30
4.2.1 Méthodes par taille	30
4.2.2 Méthodes par fronts étroits	32
4.2.3 Méthodes par chambres ou tranches	33
4.2.3.1 Méthode des chambres ou tranches vides.....	34

4.2.3.2	Méthode des chambres ou tranches foudroyées.....	38
4.2.3.3	Méthode des chambres ou tranches remblayées.....	38
4.2.3.4	Méthode des chambres magasins.....	42
4.2.3.5	Variantes et adaptations de la méthode des chambres magasin	44
5.	PARTICULARITÉS DES GISEMENTS PENTÉS OU FILONIENS.....	51
5.1	Particularités géologiques	51
5.1.1	Age des terrains.....	51
5.1.2	Affleurements	51
5.1.3	Epontes et terrain encaissant	52
5.1.4	Filons	56
5.1.5	Couches sédimentaires	56
5.1.6	Amas	56
5.2	Spécifications des travaux.....	57
5.3	Types de désordre observé.....	59
5.4	Fiches « matériau ».....	60
6.	EXEMPLES DE SITES	60
7.	CONCLUSION.....	61
8.	BIBLIOGRAPHIE	63
9.	LISTE DES ANNEXES	69

SYNTHÈSE

Le travail présenté dans ce rapport est réalisé dans le cadre d'un programme, financé par le Titre V du Ministère de l'Economie, des Finances et de l'Industrie, dont l'un des thèmes est de développer un outil méthodologique d'évaluation de l'aléa « instabilité des terrains » adapté aux particularités des exploitations pentées et filoniennes pour des besoins spécifiques de l'élaboration des Plans de Prévention des Risques Miniers (besoin d'une méthodologie). Il s'agit de définir des configurations « types » d'exploitations pentées et filoniennes en vue d'analyser l'évolution à long terme de ces sites.

On désigne sous la terminologie d'exploitations pentées ou filoniennes : les exploitations en couche (dressants) à plus de 45° de pendage, les exploitations en filon (lentilles ou amas peu épais), et les exploitations en amas épais ou de forme ovoïdique.

Cette étude s'articule autour de deux volets :

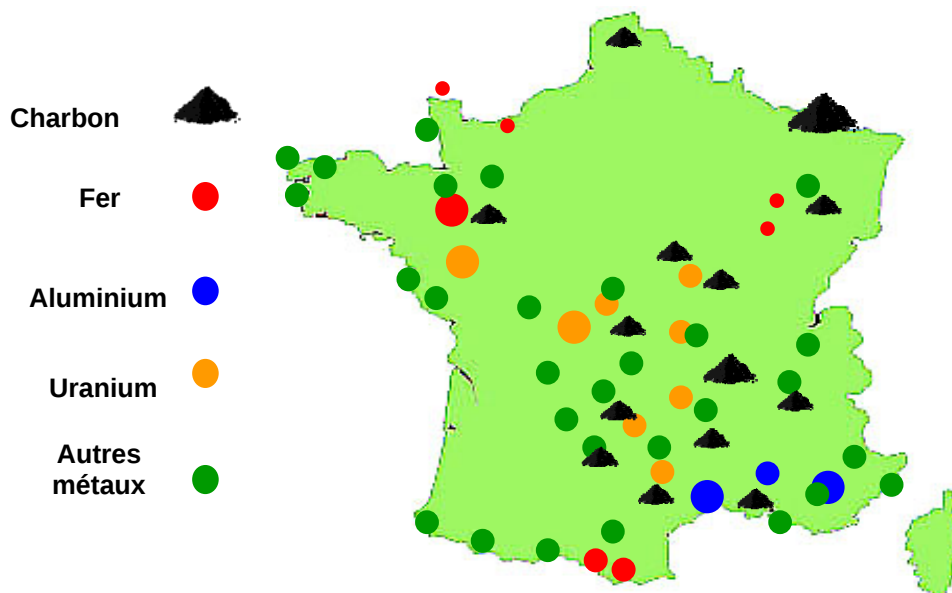
- un volet « bilan des connaissances », dont l'inventaire constitue la première phase. Il vise à rassembler les données caractéristiques principales pour chacun des sites ;
- un volet « analyse des informations » qui permettra de définir une typologie d'événements redoutés en fonction des contextes des gisements et des méthodes d'exploitation. Des paramètres discriminants par rapport aux types d'instabilité de terrain pourront être reconnus.

L'inventaire et les fiches matériau

Le premier volet, l'inventaire, objet du présent rapport, consiste en un recensement le plus exhaustif possible des principaux sites sur lesquels ont été pratiquées des extractions minières dans des gisements à fort pendage ou filonien. Il permet de synthétiser les bases de données existantes et de rassembler les données nécessaires au second volet. Les informations recueillies sont synthétisées dans un tableau de type Excel.

Le recensement révèle l'importance et la dissémination des gisements pentés ou filoniens en France. La plupart des régions françaises possèdent des mines ayant exploité, souvent avant le XX^{ème} siècle, ces types de gisements à fort pendage : fer, plomb, zinc, aluminium, uranium... Un peu plus de 1000 sites ont été recensés, à ce jour, dans la base de données que nous avons créée.

De façon à répondre à notre problématique, notre base de données trie et structure les informations recueillies dans des publications nationales et internationales sur le sujet, dans les données bibliographiques du domaine public (notamment du BRGM), dans les études INERIS, dans les bases de données de GEODERIS (Ouest et Sud), dans les archives accessibles et les retours d'expérience de mouvements de terrain liés aux cavités minières en France. Notre inventaire comprend ainsi, quand les données sont disponibles : les contextes géologique et hydrogéologique, les méthodes d'exploitation et leurs caractéristiques, les caractéristiques mécaniques des terrains, les événements liés à des instabilités de terrain.



Localisation géographique des principaux minerais, pentés ou filoniens, concessibles exploités en France métropolitaine.

Les minerais exploités, les plus usuels et les plus répandus sont présentés ci-dessous :

Eléments	Minerai associé	Sites caractéristiques
Or (Au)	Or natif ou combiné, tellure d'or	Gisement de la Montagne Noire – Salsigne (11) Gisement du Bourneix (87)
Argent (Ag)	Argyrose, argent rouge, argent bromuré ou ioduré	Gisement du Bourneix (87) Mine de l'Argentière (07)
Cuivre (Cu)	Chalcopyrite, chalcosine, cuivre panaché, cuivre gris, produits oxydés	Mine de Chessy (69)
Plomb (Pb)	Galène, cérusite	Gisements des Malines (30)
Zinc (Zn)	Blende, smithsonite, calamine	Gisements des Malines (30)
Fer (Fe)	Pyrite, magnétite, oligiste ou hématite, limonite, sidérose	Mines de May-sur-Orne (14), de Soumont (14), de la Ferrière-aux-Etangs (61)
Manganèse (Mg)	Oxydes, pyrolusite, acerdèse	Mine de Chaillac (36)
Nickel (Ni)	Sulfure et arséniure	Thio et Koné (Nouvelle Calédonie)
Cobalt (Co)	Sulfure et arséniure	Thio et Koné (Nouvelle Calédonie)
Chrome (Cr)	Fer chromé	Mine de Tiebaghi (Nouvelle Calédonie)
Tungstène (W)	Wolfram, scheelite	Mine de l'Echassières (03)
Etain (Sn)	Cassitérite, stannine	Gisement de Montebrias (23)
Antimoine (Sb)	Stibine	District de Brioude-Massiac (15)
Mercure (Hg)	Cinabre	La Chapelle-en-Juger (50)
Aluminium (Al)	Bauxite	Gisements du Var
Uranium (U)	Pechblende	Zone minière de Crouzille (87)
Molybdène (Mo)	Molybdénite, wulfénite	Mine du Thillot (88)
Bismuth (Bi)	Bismuth natif, bithmuthinite	Gisements du Finistère
Arsenic (As)	Mispickel, löllingite, réalgar	Gisements d'Auvergne à Chaudes-Aigues
Soufre (S)	Soufre natif et sulfures	Gisement près de Manosque (04)

Liste des minerais les plus usuels et les plus répandus

Le recensement présenté dans ce document est la première compilation des données sur les sites miniers pentés ou filoniens à l'échelle nationale, il est destiné à être mis à jour régulièrement.

En complément de l'inventaire des sites, des fiches synthétiques, au nombre de 27, récapitulent pour chaque matériau, les généralités, le mode de formation, la localisation, la production et l'utilisation du minerai exploité.

Géologie

La géologie revêt une importance majeure notamment dans les études de type PPRM et particulièrement pour les gisements pentés et filoniens.

Les sites miniers en gisements pentés ou filoniens sont pour la plupart d'anciennes exploitations (sauf les dressants de charbon). Les plans précis et complets des travaux sont souvent inexistantes et la géologie permet de donner des indices quant à :

- la nature et les caractéristiques mécaniques du minerai et de son encaissant ;
- la localisation des zones exploitées.

Les données géologiques sont superposées aux données d'exploitation (contours approximatifs des travaux, ouvrages débouchant en surface,...) afin de cartographier de manière plus complète l'étendue des travaux d'exploitation.

Origine et morphologie des corps de minerais

L'origine d'un grand nombre de gîtes minéraux au voisinage de la surface du sol est étroitement liée, soit à l'évolution interne d'un magma et se rattache ainsi au phénomène de volcanisme, soit à la destruction plus ou moins complète ou à l'altération des roches consolidées à la surface de la terre.

Les zones minéralisées peuvent prendre des formes très diverses suivant leur mode de formation : inclusion dans des fractures ou des failles (filons), couche sédimentaire plissée (charbon lorrain), altération de granite (amas)... La géométrie du corps minéralisé influe très nettement sur les méthodes d'exploitation du minerai.

Les travaux miniers dans des massifs anciens se sont concentrés de préférences dans les régions où sont présentes des roches cristallines. Les assises sédimentaires peu ou pas disloquées ne renferment que des dépôts sédimentaires sans intérêt pour les travaux. Par contre, les zones de contact de ces dépôts sédimentaires, particulièrement celles des calcaires et des roches plutoniennes et éruptives sont potentiellement riches de matériaux exploitables. Il en va de même pour les zones de plissements intenses.

La direction et l'âge relatif des lignes de fractures et des miroirs de faille, aux environs du gîte, permettent dans une certaine mesure de reconnaître les accidents tectoniques qui ont pu affecter la zone minéralisée et limiter les travaux.

Affleurements et pendage

La recherche des affleurements apporte souvent des renseignements très riches et importants. Elle est nécessaire pour délimiter les zones potentiellement exploitées.

Lorsqu'on est en présence d'une couche inclinée ou d'un filon exploité, il est indispensable de chercher à déterminer la direction du plongement. Le pendage influe fortement sur les méthodes d'exploitation et les désordres susceptibles de se produire en surface.

Épontes et terrains encaissants

Les gisements sédimentaires sont toujours compris entre des épontes bien nettes. Dans les gisements non sédimentaires, la minéralisation peut être irrégulière, de sorte que les limites de l'exploitation sont souvent difficiles à connaître.

Le minerai des gisements non sédimentaires est très souvent plus dur, plus résistant (résistance à la compression uniaxiale (R_c) comprise entre 100 et 150 MPa pour l'uranium, 30 et 90 MPa pour le plomb-zinc, 600 et 700 MPa pour la fluorine) et plus dense que les minerais sédimentaires tels le charbon ($R_c = 25$ MPa au plus) ou la bauxite ($R_c = 4$ à 40 MPa), ce qui a entraîné la généralisation du tir à l'explosif dans les gisements pentés ou filoniens non sédimentaires.

Les épontes sont souvent d'excellente qualité et ceci permet de prendre certaines libertés avec le soutènement et même de le supprimer parfois totalement.

Méthodes d'exploitation

A part quelques exceptions, les réserves reconnues des mines non sédimentaires, ne présentent que des tonnages faibles, ce qui explique la vie réduite de la plupart de ces mines (10 à 20 ans pour beaucoup d'entre elles).

Les travaux préparatoires des mines en gisements filoniens ou en amas présentent des particularités en terme d'ossatures des travaux. En effet, l'emploi de puits inclinés et de galeries à flanc de coteau y est plus fréquent. Les puits inclinés permettaient de suivre le gisement au mur et de réduire ainsi l'importance des travers-bancs.

Les méthodes d'exploitation mises en place varient d'un point à l'autre des exploitations afin de prendre en compte des variations géologiques locales et de maintenir la rentabilité des travaux. Parmi les très nombreux facteurs qui interviennent pour modifier les conditions de travail, signalons spécialement :

- la puissance, le pendage et l'irrégularité de la formation ;
- la dureté, les propriétés mécaniques du minerai et la nature des épontes ;
- les variations des teneurs ;
- la stabilité de la couronne¹ ;
- l'importance du gisement ;
- la lavabilité² du minerai (teneur).

¹ Stot laissé entre le toit de l'exploitation et la surface (son épaisseur est de 20 m en moyenne dans les exploitations ferrifères de l'Ouest).

² Aptitude d'un minerai au lavage, c'est-à-dire à la concentration gravimétrique (pour améliorer sa qualité).

La nature et la dimension des vides résiduels peuvent ainsi être variables dans un même gisement.

Mis à part les couches minces peu inclinées, les gîtes, en amas ou en filon, sont pris principalement par tranches successives montantes ou descendantes. La mine de La Plagne (73) et la plupart des mines d'uranium françaises se trouvent dans ce cas. Les tranches ont des épaisseurs variant de 2 à 5 m pour 10 à 150 m de large. Elles sont parfois remblayées ou parfois quelques piliers sont laissés en place pour garantir la stabilité du toit. La méthode des chambres magasins est également très souvent employée lorsque le pendage est élevé (mines de fer de l'Ouest). La hauteur de ces chambres peut varier de 10 à 70 m pour une largeur comprise entre 30 et 200 m.

Désordres

Comme les gisements en plateaux, les gisements pentés et filoniens sont soumis à des éboulements au fond susceptibles d'affecter les terrains de surface. Ainsi, dès l'arrêt des travaux mais parfois également beaucoup plus tardivement, de nombreux désordres se sont développés. Les méthodes d'exploitations et les caractéristiques géologiques et notamment le pendage ont des effets sur la géométrie et la localisation des désordres en surface. On dénombre des effondrements localisés situés le plus souvent aux affleurements. Les effondrements généralisés, quant à eux, sont inexistant dans les retours d'expérience disponibles. On dénombre également des affaissements dont l'ampleur varie selon le pendage des couches.

Le rapport suivant sera consacré à l'interprétation des retours d'expérience de désordres pour identifier les principaux mécanismes de rupture liés aux contextes miniers.

1. PRÉSENTATION GÉNÉRALE DE L'ÉTUDE

1.1 CONTEXTE ET OBJECTIFS

De très nombreuses exploitations minières souterraines en France concernent des gisements à **forte pente** ou **de type filonien**. Il s'agit par exemple de la quasi-totalité des mines d'uranium, de nombreuses exploitations hydrothermales polymétalliques ou de fer, ou encore d'une part non négligeable des exploitations de charbon (dressants). Une partie de ces travaux souterrains font aujourd'hui ou feront très prochainement l'objet d'études diverses pour la « déclaration d'arrêt de travaux » ou la mise en place de Plan de Prévention des Risques Miniers (PPRM).

Compte tenu de la spécificité de ces gisements, le Ministère de l'Economie, des Finances et de l'Industrie a demandé à l'INERIS de développer un outil méthodologique d'évaluation de l'aléa « instabilité des terrains » adapté aux particularités des exploitations pentées et filoniennes. Il a pour but de définir des configurations « types » d'exploitations pentées et filoniennes en vue d'analyser l'évolution à long terme de ces sites.

Cette étude s'articule autour de deux volets :

- un volet « bilan des connaissances », dont l'inventaire constitue la première phase. Il vise à rassembler les données caractéristiques principales pour chacun des sites ;
- un volet « analyse des informations » qui permettra de définir une typologie d'événements redoutés en fonction des contextes des gisements et des méthodes d'exploitation. Des paramètres discriminants par rapport aux types d'instabilité de terrain pourront être reconnus.

Le premier volet, l'inventaire, objet du présent rapport, consiste en un recensement le plus exhaustif possible des principaux sites sur lesquels ont été pratiquées des extractions minières dans des gisements à fort pendage ou filonien. Il permet de synthétiser les bases de données existantes et de rassembler les données nécessaires au second volet. Les informations recueillies sont synthétisées dans un tableau de type Excel. L'annexe 1 en donne un aperçu.

1.2 LIMITES DE L'INVENTAIRE ET SUITES

La terminologie d'exploitations pentées comprendra :

- les exploitations **en couche** (dressants) à plus de 45° de pendage ;
- les exploitations **en filon (lentilles ou amas peu épais)** ;
- les exploitations **en amas épais ou de forme ovoïdique**.

La géologie et la formation de ces différents types de gisements sont détaillées dans le paragraphe 3.

Délibérément factuelle, les données de l'inventaire retranscrivent, sans commentaire ni jugement, les informations que les rédacteurs ont pu collecter. En marge des sites répertoriés, il existe toutefois des sites ayant fait l'objet de campagnes de prospection mais sur lesquels aucun travail minier d'extraction,

même de faible ampleur (tranchées, travaux de reconnaissance par petits chantiers), n'a été réalisé.

L'information recueillie au stade de l'inventaire reste partielle et synthétique. La suite du programme permettra de rassembler des données plus détaillées sur certains sites, notamment en terme d'instabilités sur le terrain.

1.3 SOURCES D'INFORMATION

Cet inventaire a fait appel :

- à des publications nationales et internationales sur le sujet ;
- aux données bibliographiques du domaine public, notamment du BRGM ;
- aux études INERIS ;
- aux bases de données de GEODERIS (Ouest et Sud) ;
- aux archives accessibles ;
- aux retours d'expérience de mouvements de terrain liés aux cavités minières en France.

1.4 MISES À JOUR

L'inventaire présenté dans ce document représente la première tentative de compilation des données sur les sites miniers pentés ou filoniens à l'échelle nationale.

Les mises à jour prévues permettront d'actualiser, de compléter les informations et de prendre en compte les remarques, corrections, suggestions éventuelles proposés par les lecteurs.

2. LES INFORMATIONS CONTENUES DANS L'INVENTAIRE

Les principaux sites miniers du territoire français sont répertoriés et caractérisés, dans la mesure du possible, à travers les grands items qui suivent.

2.1 MATÉRIAU EXPLOITÉ

Seuls les gîtes de substances minérales ou fossiles considérées comme mines sont classés dans cette base de données.

Chaque ligne du tableau (Annexe 1) correspond à une substance exploitée. Si plusieurs substances ont été exploitées sur un même site minier, l'inventaire comportera autant de ligne que de type de matériau extrait.

Les minéralisations les plus couramment exploitées sont :

- la minéralisation en **or**. Elle se rencontre en France dans la chaîne hercynienne, comme le Limousin par exemple. L'or est très souvent présent à l'état natif, fréquemment allié à l'argent, souvent au cuivre et parfois au **bismuth**. Dans certain cas, l'or est parfois piégé dans des sulfures de **fer**, d'**arsenic**, d'**antimoine**, de **zinc** ou de **plomb** (mine du Châtelet dans le Limousin) ;
- l'association minéralogique **plomb**, **zinc** et **argent** (plusieurs exemples en France dont Largentière en Ardèche ou les Malines dans le Gard). Le **germanium** y est parfois associé, on citera l'exemple de Saint-Salvy dans le Tarn ;
- la **fluorine** comme dans l'Albigeois ;
- le **cuivre** (mines de Chessy et de Saint-Bel dans le Rhône) ;
- l'association minéralogique **bismuth**, **cobalt**, **nickel**, **argent**, **uranium**, dit aussi « à 5 éléments ». Il s'agit de concentrations filoniennes productrices d'argent mais aussi parfois d'uranium, de **radium** et de **barytine**. Les mines de Co-Ni de Nouvelle Calédonie en sont des exemples ;
- l'antimoine (mine de la Lucette dans le Pays de Loire). Les filons sont souvent situés dans des zones anticlinales fracturées ;
- les gisements associés aux listwaenites qui produisent du **cobalt**, parfois du **nickel**, de l'**or**, de l'**arsenic**, du **zinc**, du **mercure**, du **bismuth** et du **tungstène**.

Notons aussi les gîtes de :

- **houille** (bassin de Lorraine), **lignite** (bassin de Manosque), **anthracite** (gisement de La Mure) ou d'autres combustibles fossiles, bitumes, hydrocarbures liquides ou gazeux ;
- **fer**, dans les gisements de l'Ouest (Segré, Soumont, la Ferrières-aux-Etangs) ;
- **bauxite** dans le Var ;
- **niobium**, **tantale** comme dans le Finistère ;
- **molybdène**, **titane**, **zirconium** ;

- **étain et lithium** comme dans la mine de Montebbras (23) ;
- **manganèse** à Romanèche (71) ;
- **etc.**

Les minerais les plus usuels et les plus répandus sont classés dans le Tableau 1 :

Eléments	Minerai associé	Sites caractéristiques
Or (Au)	Or natif ou combiné, tellure d'or (AuTe_2)	Gisement de la Montagne Noire – Salsigne (11) Gisement du Bourneix (87)
Argent (Ag)	Argyrose (Ag_2S), argent rouge (Ag_2Hg_2), argent bromuré ou ioduré (AgI)	Gisement du Bourneix (87) Mine de l'Argentière (07)
Cuivre (Cu)	Chalcopryrite (CuFeS_2), chalcosine (Cu_2S), cuivre panaché ($\text{Cu}_6\text{Fe}_2\text{S}_6$), cuivre gris ($(\text{Ag}, \text{Fe}, \text{Zn}, \text{Cu})_8 \text{Sb}_2\text{S}_7$), produits oxydés	Mine de Chessy (69)
Plomb (Pb)	Galène (PbS), cérusite (PbCO_3)	Gisements des Malines (30)
Zinc (Zn)	Blende (ZnS), smithsonite (ZnCO_3), calamine ($\text{H}_2\text{Zn}_2\text{SiO}_5$)	Gisements des Malines (30)
Fer (Fe)	Pyrite (FeS_2), magnétite (Fe_3O_4), oligiste ou hématite (Fe_2O_3), limonite ($\text{H}_6\text{Fe}_4\text{O}_9$), sidérose (FeCO_3),	Mines de May-sur-Orne (14), de Soumont (14), de la Ferrière-aux-Etangs (61)
Manganèse (Mg)	Oxydes, pyrolusite (MnO_2), acerdèse ($\text{H}_2\text{Mn}_2\text{O}_4$)	Mine de Chaillac (36)
Nickel (Ni)	Sulfure et arséniure (nickéline : NiAs , garniérine...)	Thio et Koné (Nouvelle Calédonie)
Cobalt (Co)	Sulfure et arséniure (cobaltine : CoAsS , smaltine : $(\text{CoFe})\text{As}_2$)	Thio et Koné (Nouvelle Calédonie)
Chrome (Cr)	Fer chromé ($(\text{FeMg})(\text{CrAl})_2\text{O}_4$)	Mine de Tiebaghi (Nouvelle Calédonie)
Tungstène (W)	Wolfram ($(\text{MnFe})\text{WO}_4$), scheelite (WO_3)	Mine de l'Echassières (03)
Etain (Sn)	Cassitérite (SnO_2), stannine ($(\text{Cu}_2\text{FeZn})\text{SnS}_4$)	Gisement de Montebbras (23)
Antimoine (Sb)	Stibine (Sb_2S_3)	District de Brioude-Massiac (15)
Mercure (Hg)	Cinabre (HgS)	La Chapelle-en-Juger (50)
Aluminium (Al)	Bauxite	Gisements du Var
Uranium (U)	Pechblende	Zone minière de Crouzille (87)
Molybdène (Mo)	Molybdénite, wulfénite	Mine du Thillot (88)
Bismuth (Bi)	Bismuth natif, bithmuthinite	Gisements du Finistère
Arsenic (As)	Mispickel, löllingite, réalgar (AsS)	Gisements d'Auvergne à Chaudes-Aigues
Soufre (S)	Soufre natif et sulfures	Gisement près de Manosque (04)
Gangues	Quartz, feldspath, serpentine, carbonates de chaux, de baryte et de strontiane, sulfates analogues, apatite, fluorine...	

Tableau 1 : Liste des minerais les plus usuels et les plus répandus.

2.2 LOCALISATION

Quasiment toutes les régions de France (sauf le bassin parisien) sont concernées par la problématique des gisements pentés et filoniens.

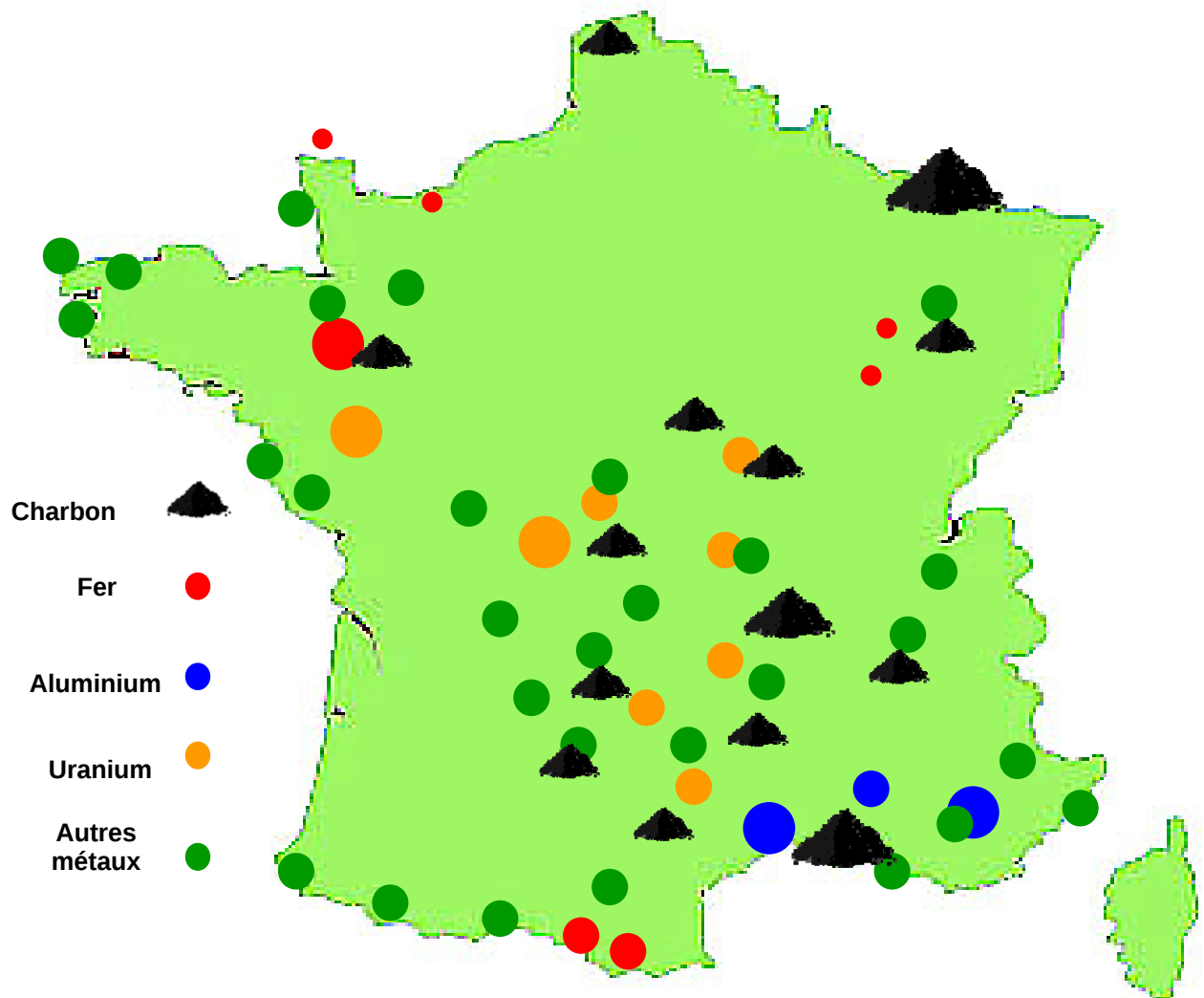


Figure 1 : Localisation géographique des principaux minerais, pentés ou filoniens, concessibles exploités en France métropolitaine.

Dans l'inventaire, la localisation du gisement est associée :

- au nom du site ;

Le nom attribué au site correspond à la dénomination retrouvée dans les documents administratifs miniers ou encore à un nom d'usage issu de la déformation (modifications orthographiques notamment) d'un nom de lieu.

Le regroupement de diverses activités extractives au sein d'un même « site », c'est-à-dire dans une même ligne du tableau, est décidé en fonction de plusieurs critères :

- proximité géographique ;
- regroupement au sein d'un même dossier pour les procédures administratives (arrêt définitif des travaux miniers notamment).

- au(x) commune(s) sur laquelle (lesquelles) se situe l'emprise du site, ainsi que les noms du département et de la région concernés.

2.3 HISTORIQUE DU TITRE MINIER

Dans ce champ sont indiquées les informations relatives :

- au début et à l'arrêt de l'exploitation minière du site ;

Sur certains sites, les dates d'institution et de renonciation de la concession sont différentes des dates de début et d'arrêt effectif des travaux miniers. Les dates effectives des travaux ont été privilégiées dans l'inventaire. Dans le cas de sites exploités sur plusieurs périodes, les deux dates indiquées correspondent respectivement au début de la première période et à la fin de la dernière.

- le nom du ou des titulaire(s) de la concession.

En l'absence d'informations disponible à la date de constitution ou de mise à jour de l'inventaire, la case reste vide.

2.4 GÉOMÉTRIE DU CORPS MINÉRALISÉ

Ce champ indique :

- le pendage du corps minéralisé ;

Le pendage d'un gisement de minerai désigne l'angle entre le plan horizontal et le plus grand plan inscriptible dans le gisement.

Le pendage d'une exploitation représentera l'angle entre le plan horizontal et le plan moyen du mur³ de l'exploitation.

Dans la plupart des cas, les exploitations souterraines étaient menées de la sole à la couronne (Figure 2) ou entre niveaux, pour des raisons de rentabilité et de sécurité ; donc dans toute zone exploitée, les valeurs de pendage de gisement et de pendage de l'exploitation se confondent.

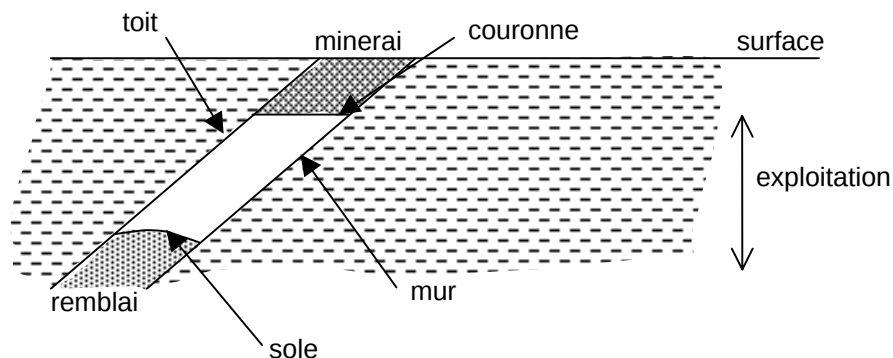


Figure 2 : Toit, mur, couronne et sole d'une exploitation pentée

³ Ce terme désigne l'ensemble des terrains situés immédiatement sous la formation minérale

- la longueur du filon ;
- la largeur du filon ;
- la puissance du gisement exploité.

Dans le cas où plusieurs couches ou filons ont été exploités, les valeurs extrêmes de la puissance sont données.

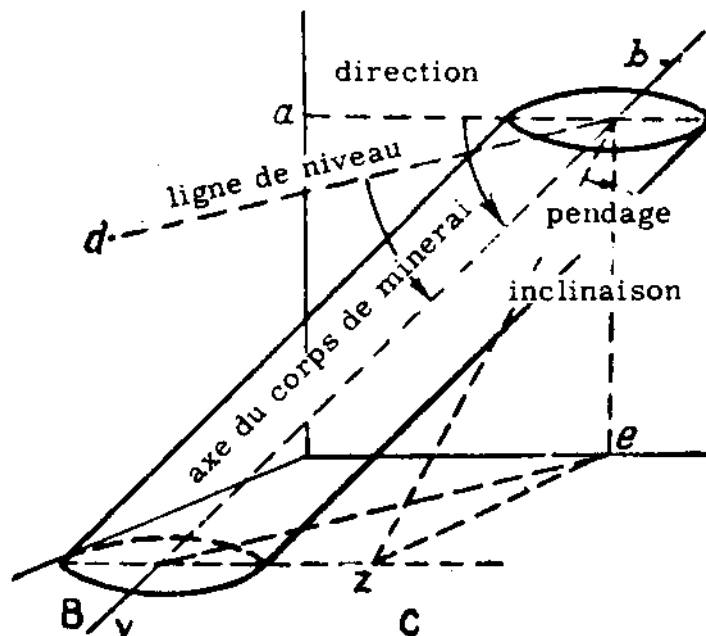


Figure 3 : Pendage, direction d'un corps de minerai [9]

Le type de gisement est également mentionné dans ce champ. Dans le cas de gisements filoniens, lorsque l'information est disponible, la forme de la minéralisation (amas, filon) et le nombre de filons exploités sont précisés. Pour les gisements d'origine sédimentaire, le terme « stratiforme » est employé.

En l'absence d'informations, les cases du tableau ne sont pas renseignées.

2.5 CONTEXTE GÉOLOGIQUE

Les contextes géologique et hydrogéologique sont importants, en particulier pour toute analyse postérieure de la stabilité des terrains de surface au-dessus des exploitations minières.

Dans la colonne « encaissant » se trouve la nature des terrains dans lesquels est située la substance extraite. Pour les gisements d'origine sédimentaire, la nature du toit et du mur est précisée lorsqu'elle est connue.

Lorsqu'ils étaient disponibles, la base de données recense les indices géologiques (affleurements, failles, nature des terrains, profondeur) ou hydrogéologiques (sources, aquifères, couches imperméables...).

La hauteur de recouvrement correspond à l'épaisseur des terrains situés à l'aplomb de l'exploitation minière. Très souvent, c'est la valeur maximale de cette épaisseur qui est indiquée dans le tableau.

Les caractéristiques mécaniques des terrains (épontes, terrains encaissants ou minéral), connues par mesures en laboratoire, figurent dans le tableau pour certains sites miniers :

- R_c : résistance à la compression uniaxiale du minéral (en MPa) ;
- $R_{c\text{toit}}$: résistance à la compression uniaxiale du toit (en MPa) ;
- $R_{c\text{mur}}$: résistance à la compression uniaxiale du mur (en MPa) ;
- d : densité du minéral (sans dimension).

En l'absence d'informations, les cases du tableau ne sont pas renseignées.

2.6 TYPE DE TRAVAUX

Dans le tableau sont indiqués les types d'exploitations minières qui ont été pratiquées sur le site au cours de son histoire.

Les méthodes désignent les procédés qui permettent d'exploiter un gisement au meilleur compte et avec la meilleure sécurité.

Une méthode bien adaptée génère au voisinage des travaux miniers de faibles concentrations de contraintes. Elle conduit à une circulation d'air optimale et elle utilise au mieux les forces naturelles, spécialement la pesanteur, tout en assurant des frais d'entretiens réduits. Elle s'attache aussi à minimiser l'impact des travaux miniers sur l'environnement de l'exploitation (mouvements de terrain, eaux d'exhaure etc.).

Les principales méthodes d'exploitations en gisements pentés ou filoniens sont détaillées au paragraphe 4.

Dans certains cas, la géométrie et la dimension des cavités sont citées. C'est le cas principalement des concessions ayant fait l'objet de dossier d'arrêt d'exploitation ou d'études de Plan de Prévention des Risques Miniers.

Lorsqu'elle est disponible, la quantité de substance extraite du site, durant toutes les périodes d'exploitation, est également indiquée. Parfois le tonnage extrait est renseigné pour une année précise ou en moyenne par année d'exploitation. Lorsque les réserves de matériau sont connues, elles figurent aussi dans ce champ.

En l'absence d'informations, les cases du tableau ne sont pas renseignées.

2.7 RETOURS D'EXPÉRIENCE

On retrouve dans cette case du tableau de l'inventaire :

- les instabilités de terrain liées à l'exploitation minière (affaissement, effondrement...) ;
- les problèmes de gaz de mine ;
- les travaux réalisés par l'exploitant ou l'administration pour mettre en sécurité le site.

2.8 DIVERS

Les informations situées dans cette case du tableau de l'inventaire :

- la division :

La notion de « division » ou de « zone minière » ou de « district » correspond à un regroupement géographique d'un ensemble de site. Dans la pratique, il s'agit principalement de sites d'uranium, mais aussi de gisement de plomb-zinc. Le nom attribué à chaque zone peut traduire soit l'appartenance à une limite administrative définie (par exemple un département ou une région) ou bien, au nom d'une ville importante ou le nom d'un titre minier ;

- la superficie du titre minier ;
- la présence de plans, cartes relatifs à l'exploitation, au contexte géologique, aux désordres en surface ;
- les références bibliographiques.

Le champ « observations » permet d'ajouter toute information supplémentaire jugée pertinente.

3. CONTEXTE GÉOLOGIQUE ET DÉFINITIONS

Rappelons qu'un gisement de minerais est une accumulation de matière minérale dans l'écorce terrestre, formée sous l'influence de divers processus géologiques, qui peut être exploitée, au point de vue quantité et qualité, dans des buts industriels [9].

Ce paragraphe rappelle les principales caractéristiques géologique, métallogénique⁴, morphologique d'un gisement, qu'il soit penté ou filonien. En effet, de son origine, et de sa forme dépendront les méthodes d'exploitation utilisées.

3.1 ORIGINE DU GISEMENT

L'origine d'un grand nombre de gîtes minéraux au voisinage de la surface du sol est étroitement liée, soit à l'évolution interne d'un magma et se rattache ainsi au phénomène de volcanisme, soit à la destruction plus ou moins complète ou à l'altération des roches consolidées à la surface de la terre [12].

On distingue ainsi principalement :

- les gisements de ségrégation ou de différenciation magmatique, profondément enfouis dans le sous-sol et résultant d'une différenciation, d'une séparation de minerais au sein d'un magma. Les gisements de chrome et de fer peuvent être de ce type ;
- les gisements de métamorphisme où il y a eu une transformation plus ou moins complète de la roche. On y trouve des minerais de fer et de cuivre par exemple ;
- les gisements hydrothermaux : les éléments minéraux se sont dissous dans des eaux très chaudes, formant des solutions hydrothermales très riches en gaz dissous sous pression. La pression a eu pour effet de les expulser vers la surface du sol par tous les vides qui s'offraient à elles (grandes cassures, zones de broyage...). En s'élevant, les solutions se sont refroidies et appauvries en gaz de sorte à déposer les éléments minéraux les moins solubles en premier et les plus solubles en dernier. L'or, le fer, le cuivre, le plomb, le zinc se trouvent en abondance dans les gisements hydrothermaux profonds. Le gisement d'argent de Sainte-Marie-aux-Mines (68) en est aussi un exemple. L'uranium se présente en France dans des formations hydrothermales sous forme de filons, de stockwerks ;
- les gisements sédimentaires : la destruction plus ou moins complète des roches de la surface de la terre sous l'effet de l'érosion, et particulièrement l'action de l'eau, a amené la dissolution de certains éléments qui, gagnant la mer, s'y sont déposés par simple évaporation ou par suite de réactions chimiques ou biologiques. Les concentrations ont pu se faire à la surface du sol, soit sur place, par dissolution et reprécipitation, soit dans les cours d'eau par un effet mécanique, tels sont les placers aurifères. Les dépôts de matières organiques et leurs fossilisations peuvent également être à l'origine de gisements sédimentaires comme les gisements de charbon ou de fer (gisements de fer oolithique de Normandie, de Bretagne ou d'Anjou) ;

⁴ La métallogénie est l'étude de la formation et de l'évolution des gisements de minerais métalliques.

- les gisements produits par altération superficielle des roches, principalement sous l'action des eaux superficielles, tels que les gisements de bauxite dans le Var et les gisements de nickel en Nouvelle Calédonie.

3.2 MORPHOLOGIE DES CORPS DE MINERAIS

La forme des gisements, leurs dimensions, dépendent fortement de leur origine. Elles influent aussi très nettement sur les méthodes d'exploitation du minerai.

Les colonnes minéralisées ont naturellement 3 dimensions dans l'espace. Suivant les rapports de ces 3 dimensions, on peut distinguer trois types de formes [9] :

- corps isométriques dont les 3 dimensions sont à peu près égales (amas et nids, poches et boules, lentilles) ;
- corps ayant la forme de colonnes, dont l'une des dimensions est beaucoup plus grande que les deux autres (longueur dépasse largeur et puissance). Ils se rencontrent assez rarement et se sont toujours formés après les roches encaissantes ;
- corps ayant la forme de dalles, dont deux dimensions sont grandes (longueur et largeur) et la troisième (puissance) est petite. Les filons, les couches et les lames en font partis.

Cette distinction et ces dénominations sont très arbitraires et ne correspondent pas toujours avec la réalité, mais elles sont pratiques. En effet, on rencontre dans la nature des formes de corps de minerais très compliquées, qui ne correspondent à aucun des trois premiers types. Parmi les nombreux corps compliqués, les plus typiques sont les « stockwerks ». Ils sont constitués par un véritable réseau entrecroisé de petits filons et filets de minerais, dont l'ensemble a une forme générale isométrique. Ils sont caractéristiques de nombreux gisements d'uranium, d'étain, d'or, de cuivre et de molybdène.

Les parois d'un gîte portent le nom d'épontes [12].

Certains minerais se présentent sous forme de corps massifs, tandis que d'autres sont disséminés. Les minerais massifs sont caractéristiques du fer, du chrome, du cuivre, du plomb, du zinc, du manganèse, du graphite et du soufre. Les minerais disséminés sont caractéristiques de l'or, de l'argent, du platine, du molybdène, du wolfram, de l'étain, du nickel, du cobalt, de l'antimoine, du mercure, du bismuth, de l'asbeste et du mica [9].

Etant donné que les gisements de minerais sont étroitement liés aux massifs rocheux, il est naturel qu'ils subissent, de même que les roches, l'influence des processus de plissement et celle des diverses irrégularités de dislocation. On rencontre donc fréquemment, dans les gisements, des discontinuités dues à des failles [9].

3.3 ELÉMENTS CONSTITUTIFS DU GISEMENT

D'après sa nature même, un gîte n'a pas de composition homogène. Les éléments constitutifs ont subi une répartition inégale due, par exemple, aux courants des circulations hydrothermales [12].

On distingue : les minéraux qui constituent le minerai (combinaisons simples ou complexes de substances utiles) et les autres minéraux qui sont sans valeur et constituent la gangue. Les gangues les plus fréquentes sont : le quartz, les carbonates, des sulfates, la fluorine, l'apatite, les silicates [10].

La définition du minerai dépend de la teneur en substance utile qu'il refferme. Pour qu'une matière minérale puisse être exploitée, il faut, entre autres conditions, qu'elle contienne une certaine teneur minimale du métal ou du composé utile extrait. En général, quand on indique la teneur du minerai, il s'agit de la teneur moyenne du minerai extrait (teneur exploitable), c'est-à-dire le rassemblement de minerai, à l'état naturel et suffisamment riche pour être extrait, au sein des autres roches. Elle est exprimée en pourcentage.

Très souvent, les espèces minérales ne se présentent pas à l'état isolé (état natif) et s'associent les unes avec les autres (paragénèse). On trouve, par exemple, fréquemment ensemble [9] :

- Au, Fe, S, As (gisements aurifères arsenicaux) ;
- Zn, Pb, Ag, quelquefois Cu, Au, Cd, In, Ge (gisements polymétalliques) ;
- Ag, Co, Ni, Bi, U quelquefois Cu, Fe, As (gisement d'uranium de la formation à cinq éléments) ;
- Au, Ag, Te, Se (gisements des tellures d'or et d'argent) ;
- Hg, Sb, S, F, quelquefois As (gisements d'antimoine et de mercure, avec du spath fluor).

3.4 CARACTÉRISTIQUES DES TROIS PRINCIPALES FORMES DE GISEMENT

Dans la nature, les minerais se rencontrent, quelle que soit leur origine, principalement sous trois formes (cf. paragraphe 3.2). Elles sont décrites ci-dessous.

3.4.1 FILONS (FIGURE 4)

On parle de filon [9], lorsque la masse minérale remplit une fente de roche. Il est encaissé dans des roches formées antérieurement au phénomène de remplissage de la fente par la matière minéralisée. Par exemple, les filons hydrothermaux résultent du remplissage de fissures ou de cavités par une précipitation de substances amenées par une circulation d'eaux thermales [10]. Le gisement de La Bellière (49) est un gisement aurifère d'origine hydrothermale : une gangue de quartz entoure des pyrites plus ou moins aurifères dans des schistes métamorphiques.

Par extension, les gisements à allure filonienne comprennent [12] :

- les filons proprement dits,
- les zones de broyage qui en ont l'allure,
- diverses cassures plus ou moins minéralisées,
- des couches redressées.

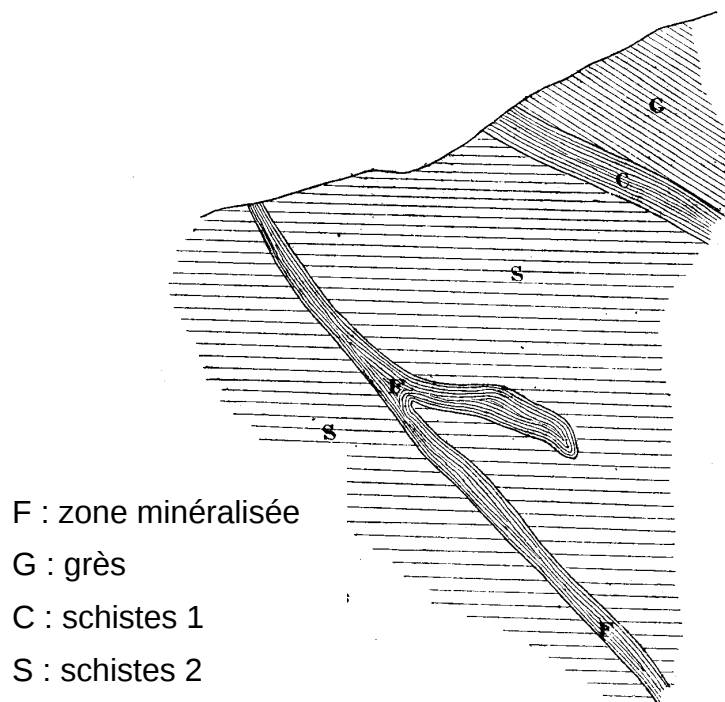


Figure 4: Coupe d'un filon de cuivre en Allemagne [13]

Les dimensions des filons sont très variées. Dans la majeure partie des cas, leur longueur se mesure par des dizaines ou des centaines de mètres, et leur puissance par quelques mètres ou quelques décimètres. Dans le sens du pendage, les filons forment assez rapidement des rétrécissements, mais ils peuvent s'étendre à des profondeurs considérables qui dépassent le kilomètre. La puissance des filons reste rarement constante. Généralement, elle se modifie suivant la direction, en se réduisant pour former des étranglements ou en s'élargissant pour former des renflements.

Le plus souvent, les affleurements d'un filon, presque entièrement masqués, ne sont visibles qu'en de rares points, généralement dans les ravins ou sur les versants abrupts des montagnes. Plus leur gangue est riche en quartz, plus la roche est friable, plus leurs affleurements apparaissent nettement et sur de grandes longueurs.

Modes de répartition du minerai dans les gisements filoniens :

Le remplissage des filons s'est opéré souvent par des phases successives, généralement à température décroissante.

Le minerai dans un filon forme généralement une ou plusieurs lentilles allongées, grains, lamelles, rognons ou masses englobés dans le gîte et appelés colonnes minéralisées [10]. Au cours de l'étude d'un gisement en vue de son exploitation, il est indispensable d'identifier les colonnes minéralisées.

Habituellement dans un corps de minerai, on rencontre plusieurs colonnes minéralisées qui ont des formes, des dimensions et des volumes plus ou moins égaux, et qui sont séparées par des intervalles à peu près réguliers. Il existe des séries de filons parallèles (figure 6) tel est le gisement de plomb de Vialas (48), les champs de filons réticulés (figure 5, les filons se recoupent suivant toutes les directions possibles), les filons rayonnants (les éléments convergent vers un même point).

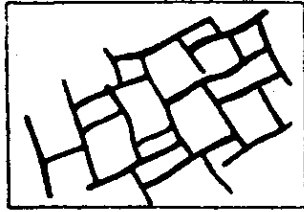


Figure 5 : Filons réticulés [9]

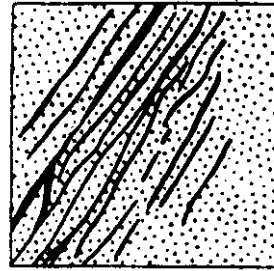


Figure 6: Filons parallèles [9]

Plusieurs raisons, d'ordre géologique ou liées à la nature de la roche encaissante, peuvent provoquer l'apparition de ces colonnes métallifères. On peut citer par exemple, l'influence des roches en « éponge » qui catalysent la solution métallifère, les facteurs structuraux (changement de direction et de pendage des fentes) qui sont plus favorables au dépôt de la matière minérale, un changement brutal de température et de pression des solutions métallifères... [9].

Dès qu'un gisement d'allure filonienne est découvert, les travaux de recherche débutent par des tranchées ouvertes normalement aux affleurements et entament le toit et le mur du filon. Puis les travaux souterrains continuent en ouvrant des puits et des galeries étagées réunies par des descenderies.

Exemples de site :

- les filons hydrothermaux d'argent de Pontpéant (50) ;
- les filons de fluorine du Var (83) ;
- le grand filon de fer oxydé hydraté dans les calcaires de la montagne de Rancié (09) ;
- les filons de plomb-zinc des Bormettes (83) ;
- le champ filonien aurifère de la Lucette (53).

3.4.2 COUCHES (FIGURE 7)

Une couche [9], est un corps minéralisé en forme de dalle, d'origine sédimentaire, qui est séparé des autres roches par les surfaces planes de stratification, les épontes. Les couches sont des formations qui se sont constituées en même temps que les roches qui les contiennent, ce qui les différencie des filons. Elles peuvent avoir subi des plissements lors de leur histoire.

Outre les couches sédimentaires, les couches de minerai comprennent par extension :

- les zones d'imprégnation de roches métamorphiques ;
- des couches imprégnées de minerais par des solutions hydrothermales ;
- des amas de substitution allongés renfermant des minerais de manganèse, ou de fer, de plomb et de zinc.

Les couches peuvent avoir une longueur qui se mesure par kilomètres et par dizaines de kilomètres et une largeur également grande. La puissance est extrêmement variable (quelques mètres à quelques dizaines de mètres).

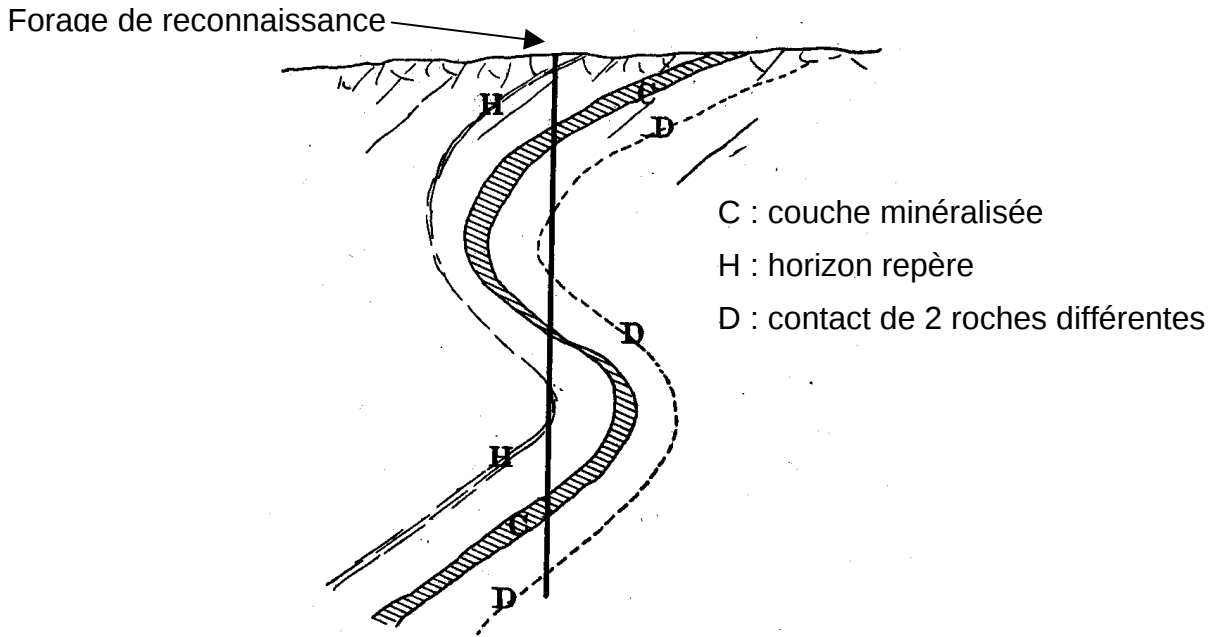


Figure 7 : Couche plissée [12]

Pour préciser l'allure, la puissance, la teneur en minerai, des travaux de recherche sont entrepris par tranchées ouvertes entre les affleurements. Pour reconnaître la couche en profondeur, des petits puits, des sondages ou des galeries sont nécessaires.

Exemples de site :

- les gisements de bauxite en couches irrégulières dans le Var ;
- les veines de charbon en dressants et semi-dressants en Lorraine ;
- les gisements oolithiques de fer en Normandie.

3.4.3 AMAS (FIGURE 8)

Les amas comprennent [12] :

- les masses de minerai différenciées au sein d'un magma ou au contact de celui-ci. L'amas de chrome exploité dans la mine de Tiebagui en Nouvelle Calédonie est de ce genre ;
- des zones d'imprégnation dans un magma, ayant la même origine et la même allure, et situées parfois à la périphérie d'un massif (stockwerks) ;
- des masses grossièrement interstratifiées dans des roches métamorphiques ;
- des zones d'imprégnation dans une roche métamorphique, ayant la même origine et la même allure ;
- des amas de substitution dans les roches calcaires, le plus souvent au contact ou au voisinage immédiat du contact de deux roches de perméabilité différentes. Le gisement plombo-zincifère des Malines (30) dans le calcaire jurassique en est un exemple.

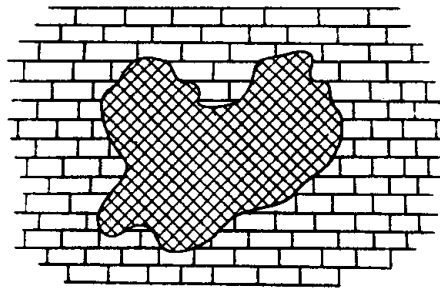


Figure 8 : Vue en plan d'un amas [9]

Un amas se révèle en surface, soit par les affleurements de sa masse principale, soit par ceux de masses minérales moins importantes avec lesquelles il est plus ou moins en relation.

Un amas existe rarement seul, il est presque toujours accompagné d'autres masses plus ou moins exploitables.

Les premiers travaux de recherche se font par petits puits au niveau de l'affleurement de l'amas ou encore par une galerie au point le plus bas de l'affleurement (si l'amas affleure à flanc de coteau).

Exemples de site :

- les gisements de cobalt en inclusions dans la serpentine en Nouvelle Calédonie ;
- amas sulfuré massif de cuivre de Chessy (69).

4. PRINCIPALES MÉTHODES D'EXPLOITATION EN GISEMENTS PENTÉS ET FILONIENS

Les experts ont souvent tenté de mettre en évidence des relations entre la méthode d'exploitation et les caractéristiques du gisement. Ainsi, les gisements à forte pente (pendage > 45 °) étaient principalement exploités par les différentes méthodes décrites ci-après.

Toutes ces méthodes permettent de suivre les irrégularités des formations minérales filoniennes, d'amas ou de couches épaisses.

Contrairement aux exploitations en gisements sédimentaires (en couche), où le remblayage était préféré aux méthodes d'abandon de vides et de foudroyage, la dureté des épontes des gisements filoniens ont orienté les choix vers les méthodes d'abandon de vide ou de foudroyage.

4.1 MÉTHODES ANCIENNES

Elles concernent les périodes de l'antiquité à la fin du XIX^{ème} siècle en passant par le Moyen Age.

Le principe de ces méthodes était simple. Il s'agissait, dans un premier temps, de repérer l'affleurement du minerai convoité à la surface. Ensuite, des premiers travaux de grattage et de fouille à ciel ouvert étaient réalisés afin de récupérer le minerai facilement accessible. Ces exploitations étaient parfois désignées par le terme de « minières » (Figure 9).

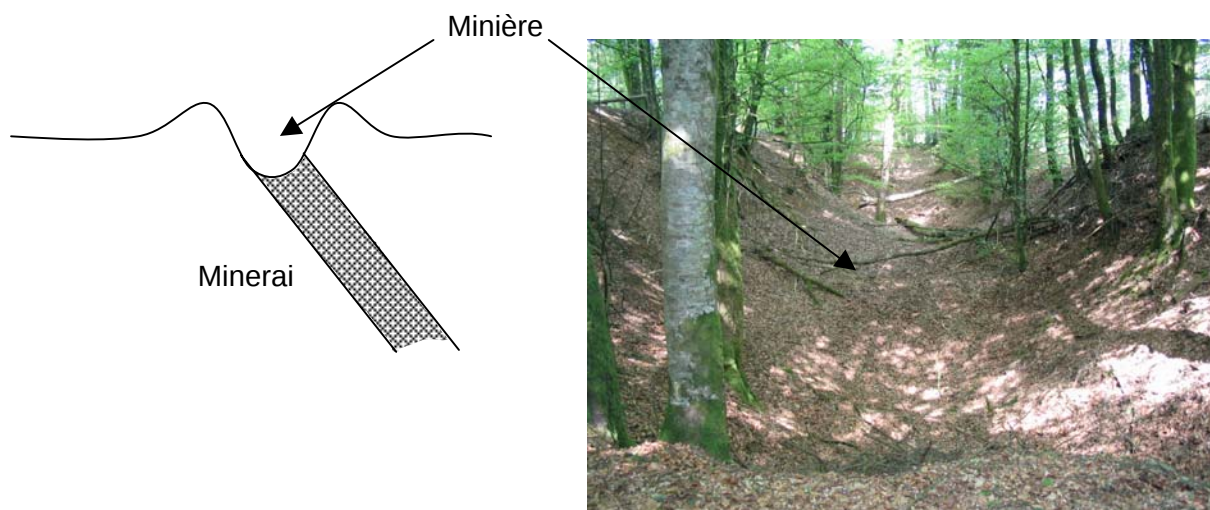


Figure 9 : Une minière (exemple de l'exploitation de fer de la Ferrière-aux-Etangs)

Puis, si les conditions techniques et financières le permettaient, des galeries étaient creusées « dans la couche » ou « en suivant le filon ». Le tracé de ces ouvrages, essentiellement guidé par la qualité du minerai, pouvait donc être relativement anarchique. Les dimensions de ces galeries étaient généralement faibles (1,5 à 2 m de large) permettant le travail d'un ou deux hommes. Les volumes extraits correspondaient exactement aux volumes de vides créés par le creusement de la galerie, réalisé de façon artisanale et avec des outils bien souvent rudimentaires (maillets, pioches et pics ...).



*Photographie 2 : Mines d'arsenic
(Allemagne)*



*Photographie 1 : Mines de
cuivre (Site de Pioch-Farus
en Languedoc)*

Généralement peu étendus en superficie, ces ouvrages peuvent se retrouver aléatoirement au niveau des zones d'affleurements de différents minerais. A titre d'exemple, d'après le Service Régional de l'Archéologie de la DRAC Alsace et de sa cellule « carte archéologique », sur l'ensemble des gisements du massif vosgien quelques 2900 orifices de ce type ont été recensés. Il s'agit, pour la plupart, de gisements hydrothermaux, polymétalliques ou de fer. La majeure partie de ces travaux sont anciens et datent du Moyen Age au début 1900 ; il s'agit généralement de traçage de galeries dans le filon depuis l'affleurement. Dans cet ensemble, plus de 95 % des gisements ont des pendages supérieurs à 75°, voire 80°.

4.2 MÉTHODES MODERNES

Les méthodes suivantes ont été appliquées du début du XX^{ème} siècle à nos jours.

4.2.1 MÉTHODES PAR TAILLE⁵

Elles sont le plus souvent spécifiques à l'exploitation des gisements en couches minces, d'au plus 3 m d'ouverture, pris en une seule fois et peuvent être appliquées à de fort pendage. Les dimensions des tailles exploitées sont souvent

⁵ Panneau où l'on extrait, où l'on « taille », un minerai.

importantes : de l'ordre d'une centaine de mètres pour la largeur du front de taille sur parfois plusieurs centaines de mètres de longueur.

- longues tailles en direction : taille droite au pendage, taille à gradins renversés ou taille oblique. Elles consistent à prendre le minerai en avançant dans la couche perpendiculairement au pendage (Figure 10). Ces méthodes sont conduites avec foudroyage ou remblayage des vides après exploitation. La méthode par gradins renversés est souvent utilisée en filon mince penté. La surface du minerai en place forme des gradins renversés. Des planchers posés sur des buttes coincés entre toit et mur (ou quelque fois suspendus aux gradins supérieurs par des boulons d'ancrage) permettent le travail des abatteurs. Elles ont été utilisées en France dans le bassin houiller du Briançonnais (05), mais aussi pour exploiter le gisement de plomb-zinc de Trémuson (22) ;

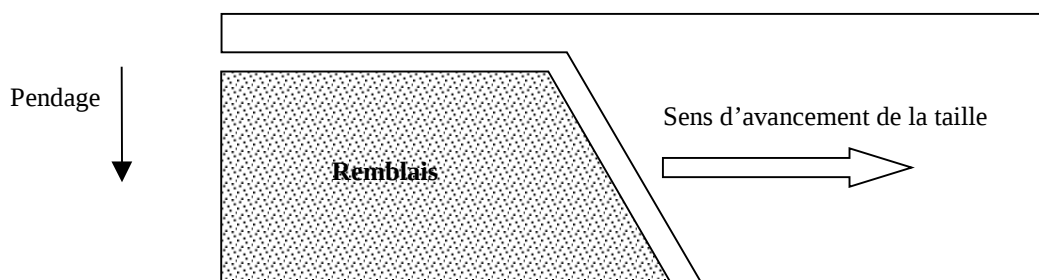


Figure 10 : Principe des tailles en direction (taille oblique)

- longues tailles montantes : taille en dents de scie, taille à attaque unique, taille à attaques multiples. Elles consistent à prendre le minerai en remontant le pendage de la couche (le long de la ligne de plus grande pente, Figure 11). Les chantiers, une fois terminés, reliaient une voie de base (d'où le chantier était parti) à une voie de tête où il arrivait. Ces méthodes s'accompagnaient aussi de remblayage des vides. Elles ont été par exemple mises en place dans les mines de charbon des dressants de Petite-Rosselle et de Merlebach en Lorraine ;

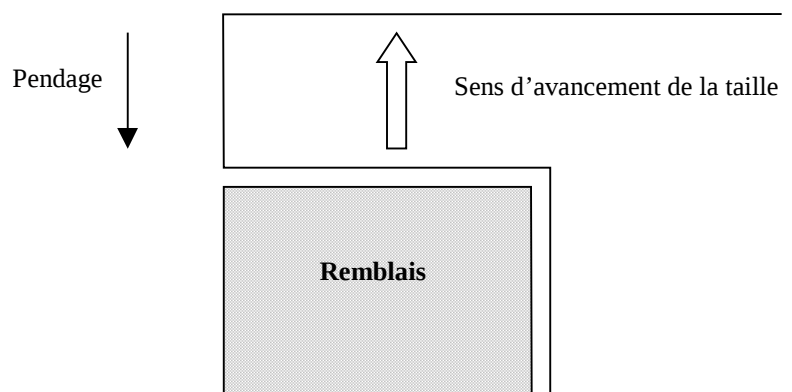


Figure 11 : Principe des tailles montantes

4.2.2 MÉTHODES PAR FRONTS ÉTROITS

Elles sont dérivées des méthodes d'exploitations par chambres⁶ et piliers classiques et utilisées dans les gisements présentant des pendages de 25° à 40°. Les piliers sont souvent alignés suivant le pendage.

Ainsi, des particularités ont été retrouvées : la « slant méthode » et la méthode des tranches prisonnières.

- La « slant méthode », d'origine canadienne, s'applique aux couches minces avec des pentes de 42° au minimum. Elle consiste à découper le panneau en blocs carrés par un double réseau de galeries diagonales (Figure 12). Une variante de cette méthode existe : elle consiste à tracer des blocs rectangulaires.

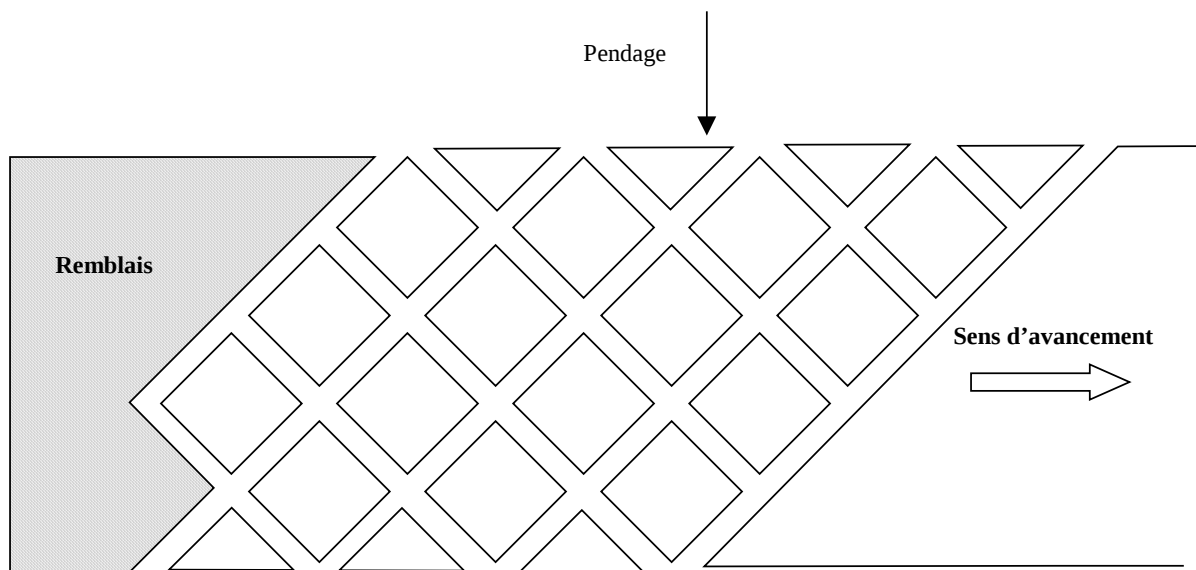


Figure 12 : Principe des fronts étroits (slant method) [24]

- Les tranches prisonnières consistent à tracer des chambres distantes de 10 à 20 m et délimitée par des piliers d'une dizaine de mètre. Puis le toit des chambres est miné sur toute l'épaisseur de la tranche en utilisant des retards successifs. Le pilier est donc entièrement abattu par des tirs forcés à partir de parois de galeries ou de cheminées. Cette méthode a été utilisée dans les dressants de Douai (59).

⁶ Dans l'expression chambres et piliers, on appelle chambres, les galeries tracées qui séparent les piliers. Dans l'expression exploitation par chambres, rencontrée généralement pour les gisements intrusifs, le terme de chambre désigne une excavation souterraine dont les parois délimitent le volume occupé par le minerai enlevé.

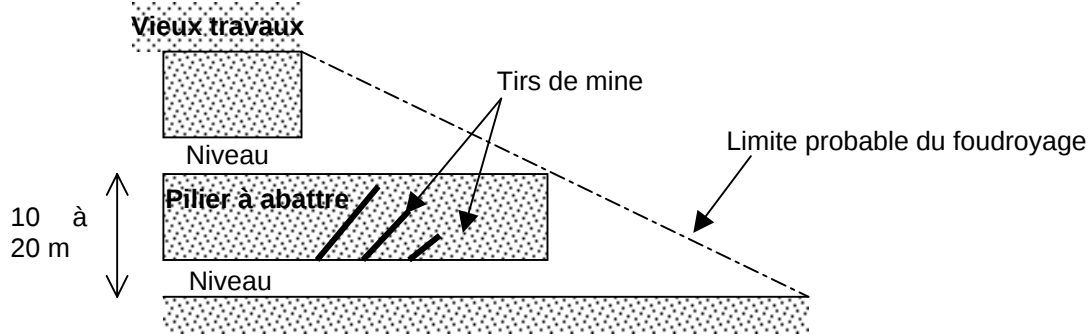


Figure 13 : Principe de la méthode des tranches prisonnières [24]

Pour des pendages élevés, les méthodes de tailles en direction étaient généralement peu utilisées, sauf peut être la taille à gradins renversés. En effet, le fort pendage des chantiers génère un risque important pour le personnel travaillant à l'abattage du minerai. Les méthodes de tailles montantes leur ont souvent été préférées. Elles génèrent moins de risques et, compte tenu de la pente de l'exploitation, elles permettent un remblayage⁷ efficace et facile. A ce propos, dans les méthodes par longues tailles, le foudroyage⁸ de l'arrière-taille⁹ a été longtemps exceptionnel pour des pendages supérieurs à 30°. Le remblayage, facilité par la pente de l'exploitation, était préféré car il prévenait bien mieux les glissements possibles du toit.

Les méthodes par tailles et fronts étroits s'appliquent principalement aux gisements sédimentaires minces. Ces gisements minces représentent, en outre, une faible part des exploitations à fort pendage. Par exemple, en 1981 moins de 1 % du charbon français produit par des exploitations à fort pendage provenait de couches minces (0,6 m à 3m).

4.2.3 MÉTHODES PAR CHAMBRES OU TRANCHES

Elles se rencontrent dans les gisements comportant des couches épaisses (4 à 20 m d'ouverture), prises en plusieurs fois, quelque soit leur pendage, où la dénomination de tranches est préférée. Mais elles s'appliquent aussi et surtout aux gisements filoniens ou en amas subverticaux où la dénomination de chambres est plus souvent utilisée. Contrairement aux méthodes par taille, les dimensions des chantiers (ou étage exploités simultanément) des exploitations menées par chambres ou tranches sont plus restreintes. L'ordre de grandeur est décimétrique pour les longueur et largeur ou hauteur de relevé¹⁰.

⁷ Action de remplir tout ou une partie du vide résultant de l'enlèvement du minerai.

⁸ Action de laisser ébouler ou tomber volontairement le toit de l'exploitation, en supprimant le soutènement par exemple.

⁹ Partie de l'exploitation souterraine située juste en arrière de la dernière ligne de soutènement en place par rapport à l'avancée des travaux.

¹⁰ Hauteur verticale entre les voies de base et de tête

Notons que l'exploitation par tranches descendantes n'est possible que si les épontes sont solides. En fait, il s'agit d'une méthode par tranches horizontales, par gradins.

L'exploitation par tranches montantes ou gradins montants peut être utilisée dans les gisements à épontes ébouleuses si les tranches exploitées sont remblayées. Dans le cas de la méthode des chambres magasin, le minerai sert lui-même de plancher de travail.

En outre compte tenu de la spécificité des gisements filoniens ou en amas (pente, puissance, irrégularité ...) il existe pratiquement autant de variantes de ces méthodes que de sites miniers exploités (combinaisons ou simples modifications des méthodes déjà mises en place ailleurs). Il arrive que dans un même gisement, plusieurs méthodes d'exploitation différentes aient été employées selon l'époque ou en fonction du pendage.

4.2.3.1 MÉTHODE DES CHAMBRES OU TRANCHES VIDES

Il s'agit des méthodes d'exploitation en chambres et piliers, chambres vides charpentées ou square set, gradins droits vides, gradins renversés vides, sous-niveaux abattus sous dalle. Les figures 14, 15 et 16 montrent des exemples de chambres vides. Elles consistent à laisser systématiquement les vides créés par l'exploitation sans remblayage ni foudroyage. Ces méthodes sont fréquentes en filons subverticaux, à profondeur faible ou moyenne. En effet, dans de nombreux cas d'exploitations filoniennes, la résistance des épontes par rapport à la poussée des terrains est telle qu'il est possible d'abandonner des vides parfois étendus. Ces méthodes sont caractérisées par l'enlèvement du minerai au fur et à mesure de son abattage. La méthode par gradins renversés vide (Figure 17) a été utilisée dans la mine de plomb-zinc des Malines (30) et pour certaines mines de fer de l'Ouest (la Ferrières-aux-Etangs, 61). Il est souvent difficile de différencier précisément les méthodes d'exploitation dont les schémas présentent souvent des similitudes et des variantes locales.

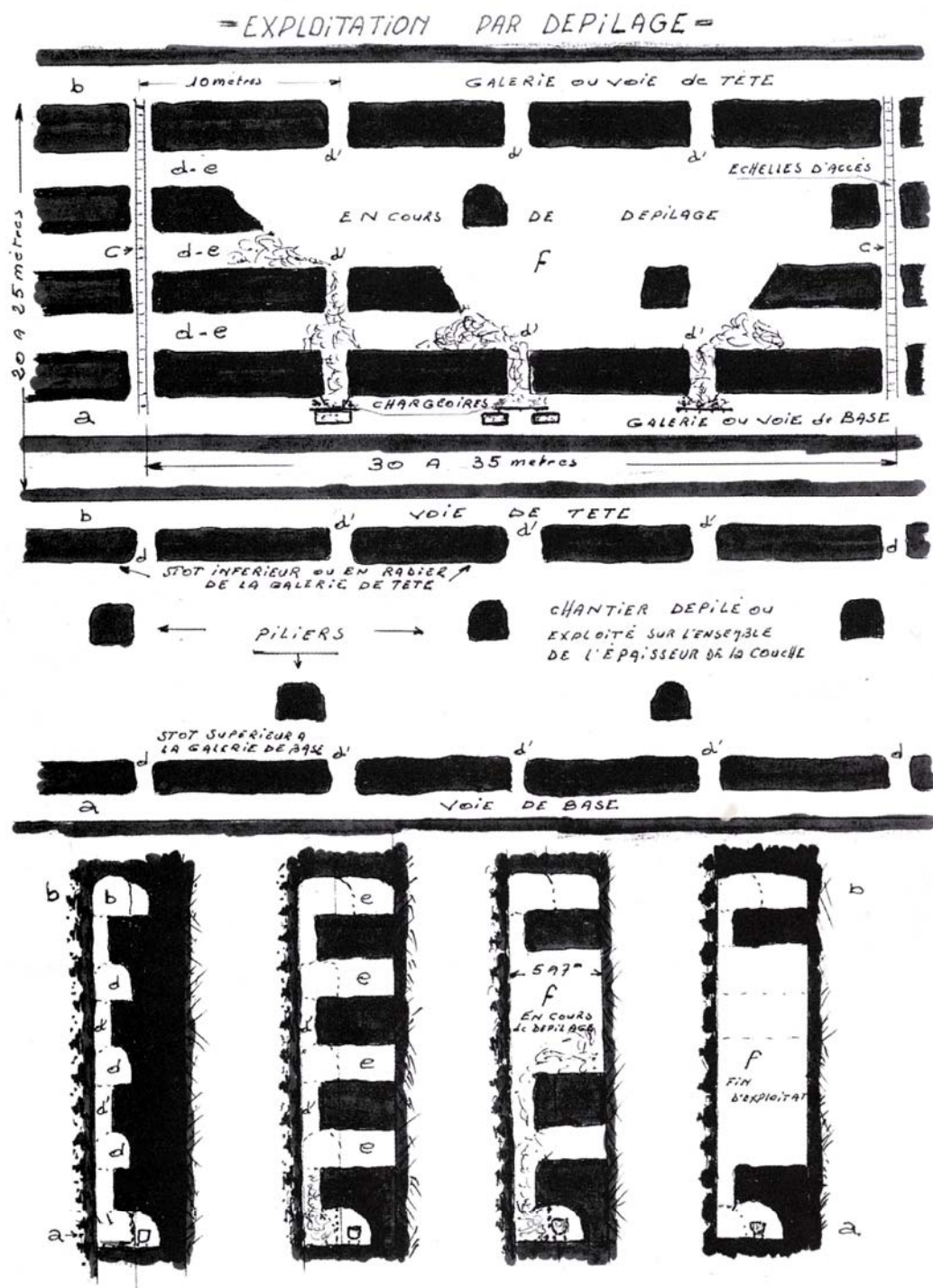


Figure 14 : Exemple 1 d'exploitations par chambres vides [35]

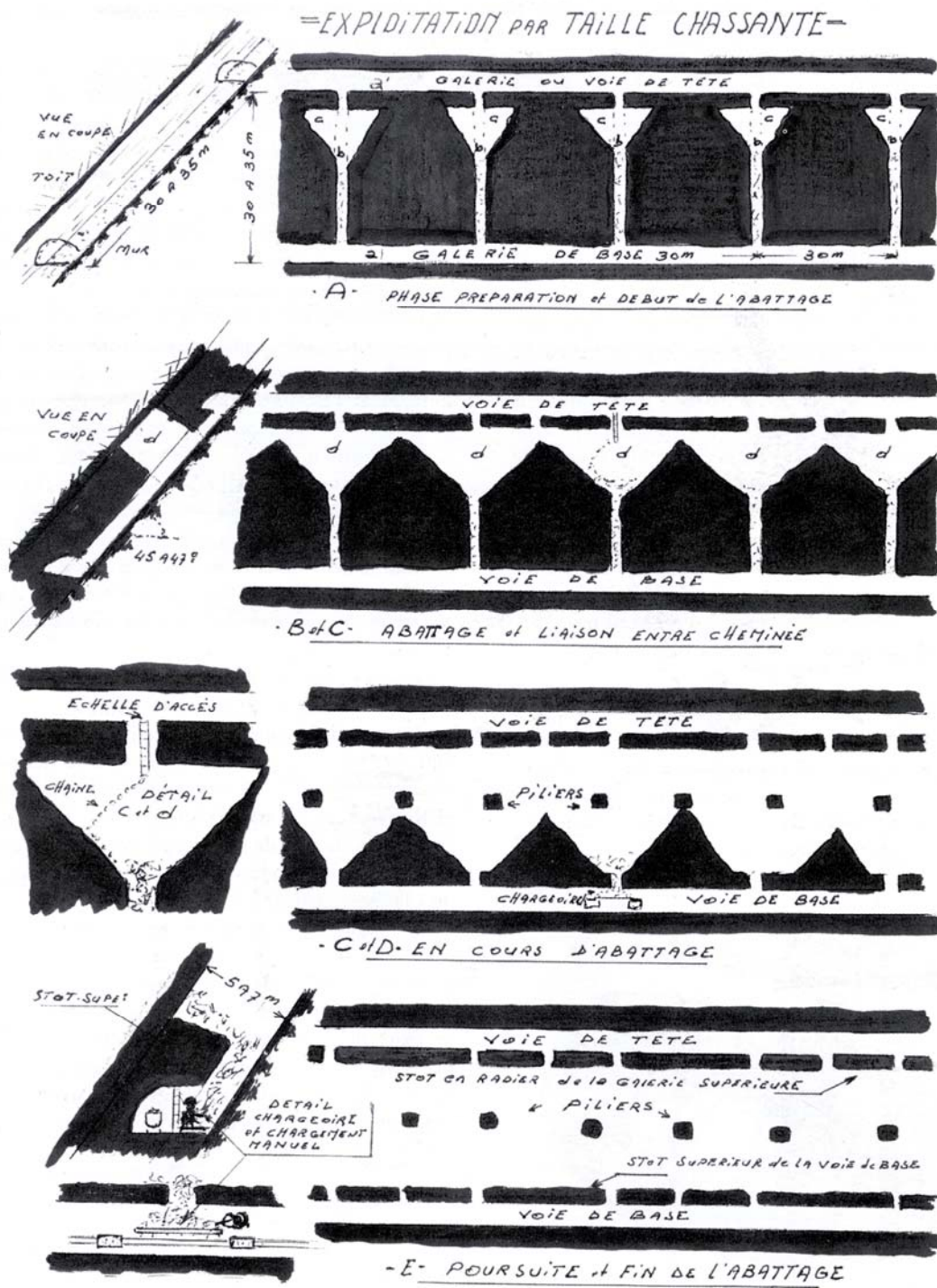


Figure 15 : Exemple 2 d'exploitation par chambres vide [35]

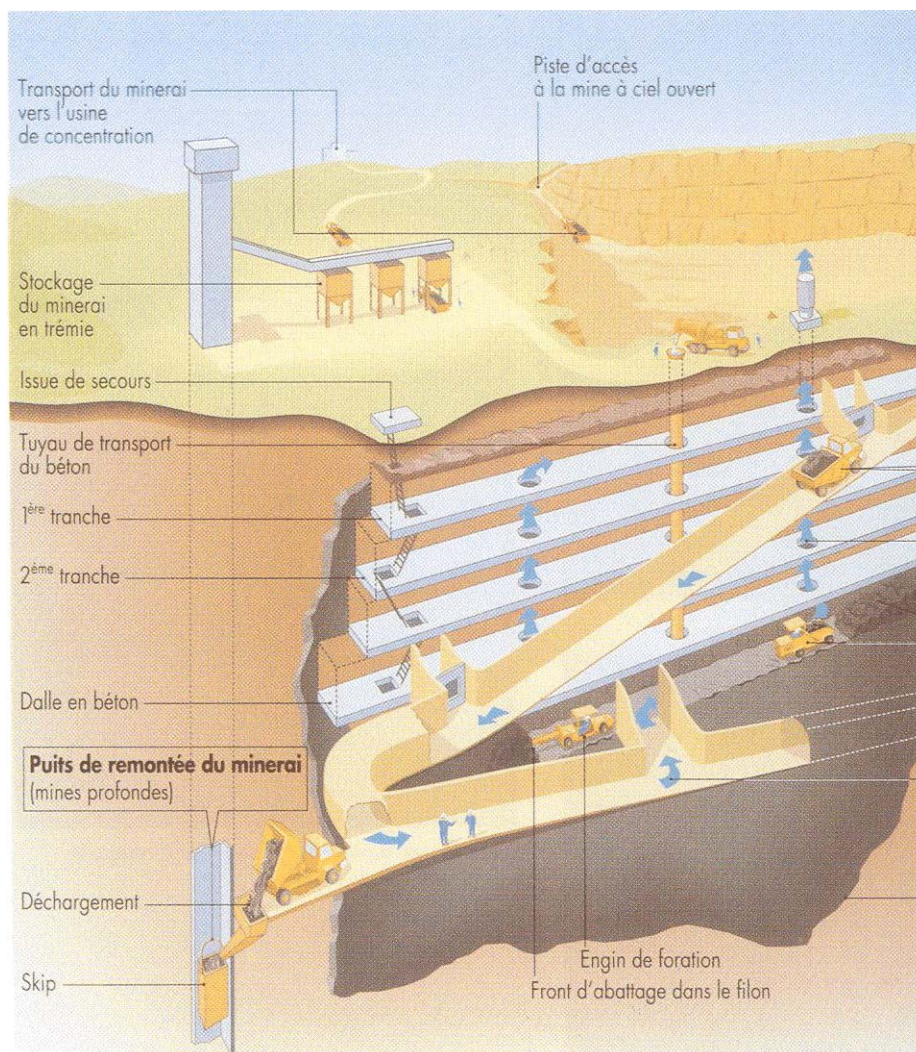


Figure 16 : Exemple 3 d'exploitation par chambres vides, Mine d'uranium de la Crouzille (méthode descendante par sous-niveaux dallés)

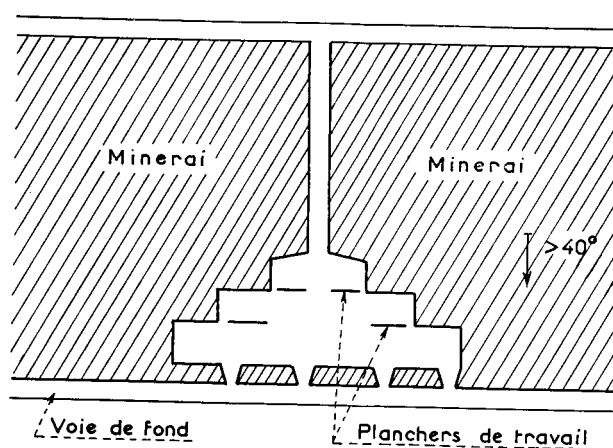


Figure 17 : Méthode des gradins renversés avec travail sur plancher [24]

4.2.3.2 MÉTHODE DES CHAMBRES OU TRANCHES FOUDROYÉES

Il s'agit des exploitations par chambres et piliers, tranches horizontales montantes foudroyées, tranches horizontales descendantes foudroyées ou tranches unidescendantes foudroyées, sous-niveaux foudroyés. Ces méthodes sont similaires aux précédentes, si ce n'est qu'une fois le minerai enlevé, les vides sont systématiquement foudroyés : l'abattage du minerai entraîne l'éboulement du toit. Certains semi-dressants de Freyming-Merlebach (57) ont été exploités par ces méthodes.

4.2.3.3 MÉTHODE DES CHAMBRES OU TRANCHES REMBLAYÉES

Il s'agit des exploitations par tranches horizontales montantes remblayées (TMR), tranches horizontales descendantes remblayées ou tranches unidescendantes remblayées, chambres charpentées remblayées ou « square set » (Figure 18). Ces méthodes sont similaires aux précédentes mais les vides sont systématiquement remblayés après l'abattage du minerai. Le remblayage peut être mis en place manuellement ou mécaniquement. Toutefois, il est fréquent que la dernière tranche exploitée ne soit pas remblayée pour des raisons pratiques. Dans le cas de la mine des Malines (30), il reste ainsi un vide de 3 m environ en tête des exploitations.

Les dimensions des vides sont variables. Quelques exemples sont donnés dans le tableau suivant.

Minerai	Concession	Puissance de la couche	Pendage	Ouverture des travaux	Epaisseur du stot de protection du niveau de base	Epaisseur du stot de protection du niveau de supérieur	Epaisseur des tranches	Relevé	Largeur des panneaux	Hauteur du vide résiduel
charbon	Mines de Lorraine	1 à 15 m	50 à 90°	jusqu'à 7 m	?	?	4 à 5 m	?	250 à 300 m	1,5 à 2 m au toit
uranium	Chardon	3 à 15 m	70°	3 m	4 m	2 m	3 à 3,5 m	40 à 50 m	?	?
uranium	Ecarpière	0,10 à 15 m	60 à 90°	2,5 à 3 m	4 m	2 m	3 à 3,5 m	40 à 50 m	?	?
uranium	Commanderie	0,2 m	70°	3 m	4 m	2 m	3 m	40 m	12 m	?
plomb zinc argent	Largentière	0,3 à 1 m	0 à 90°	3 m	?	?	2 m	50 m	300 m	?
fluorine	Mine de Burc	0 à 10 m	57 à 63°	2,2 à 4,5 m	?	?	?	70 m	150 m	?
uranium	Penarran	3 m	50 à 90°	3 m	?	?	4 m	?	?	?
charbon	Mines du NPDC	0,5 à 1,5 m	40 à 45°	?	?	?	?	?	150 m	?
charbon	Mine de Messeix	1 à 3 m	?	2 m	?	?	?	15 m	12 m	?
zinc	Mine des Malines	10 à 30 m	?	?	?	?	2,5 à 3 m	15 à 20 m	8 à 9 m	3 m au toit
zinc	Mine des Malines	70 m	70°	?	?	?	2,5 m	50 m	7 m	3 m au toit

Tableau 2 : Caractéristiques de quelques exploitations par tranches montantes remblayées

L'exploitation avec remblai est très répandue dans les mines à gisements en gros amas. Quelques exemples de ces méthodes sont donnés sur les Figure 20 (mine de Crouzille, 87) et Figure 21 (mine des Malines, 30).

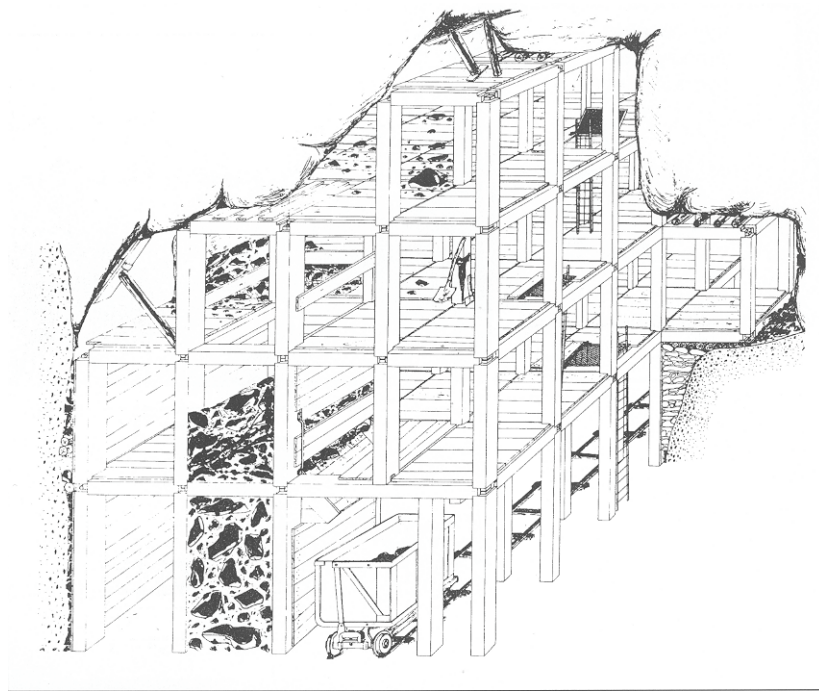


Figure 18 : Méthode par chambre vide charpentée (détails des charpentes en cours de remblayage) [24]

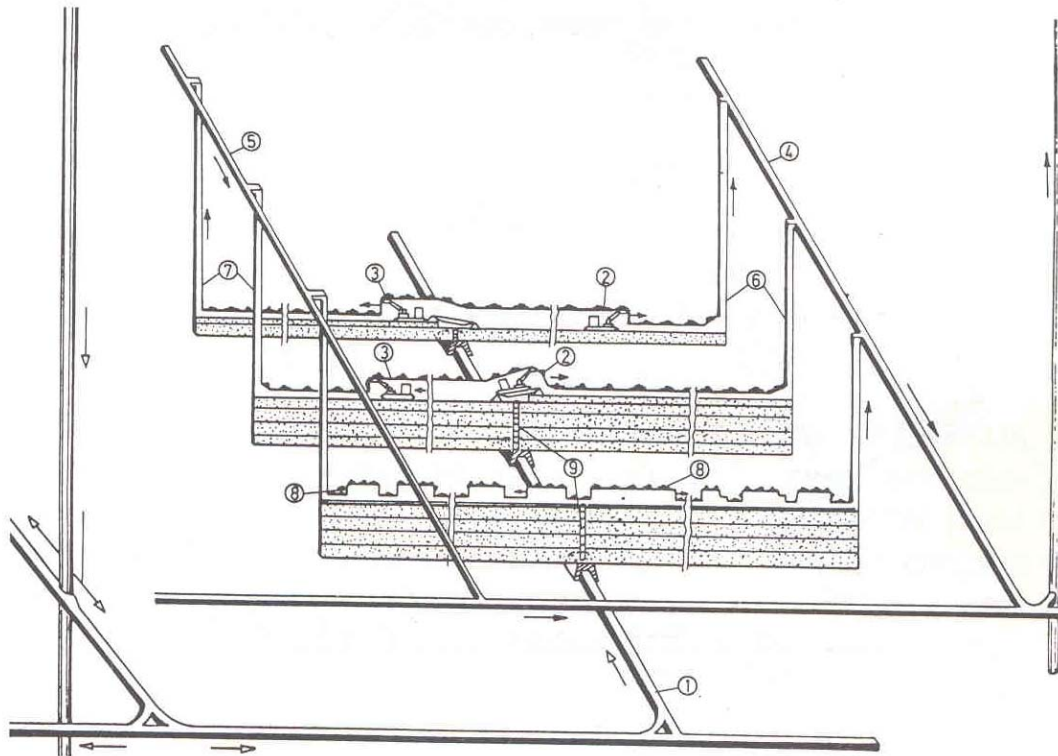


Figure 19 : Tranches montantes remblayées dans un gisement vertical en couche épaisse des mines de charbon des dressants des Houillères de Lorraine [7]

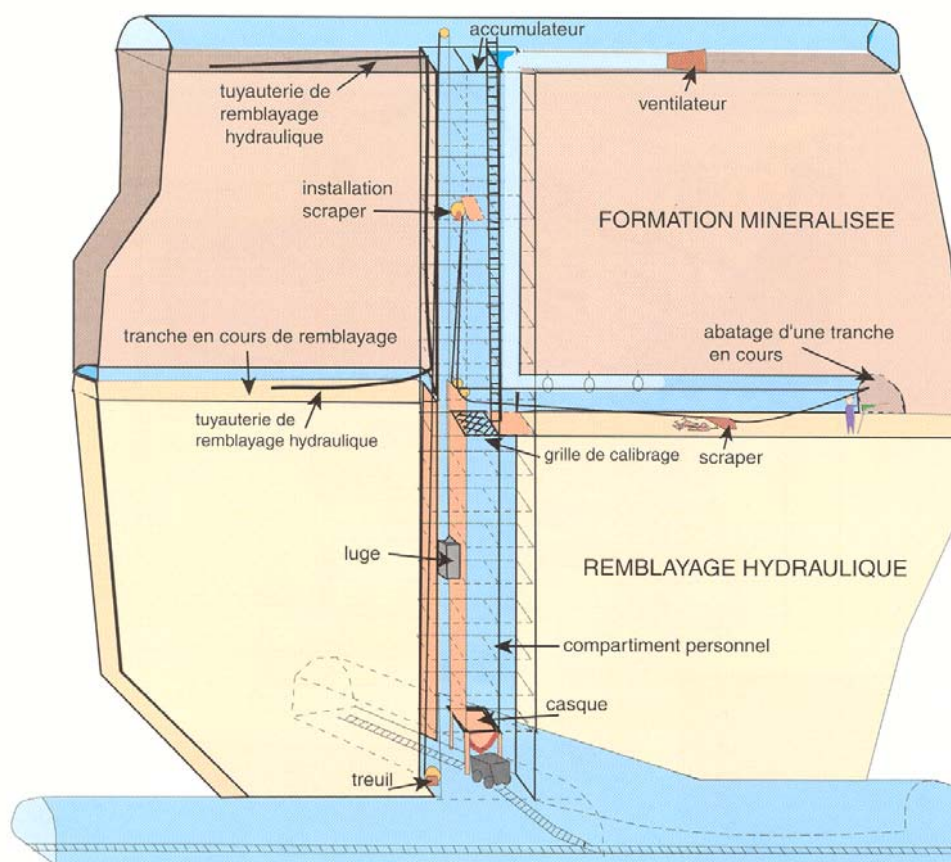
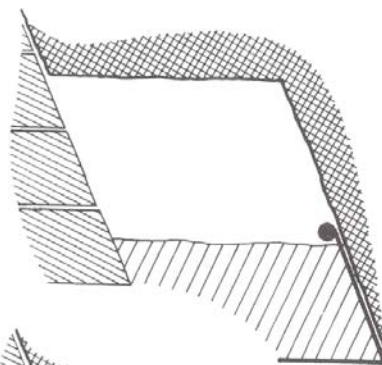
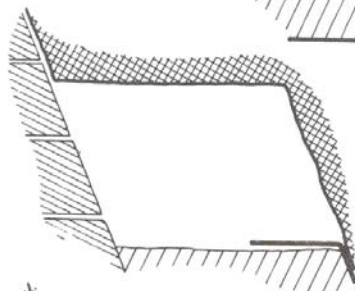


Figure 20 : Autre exemple des tranches montantes remblayées à la mine d'uranium de la Crouzille [52]

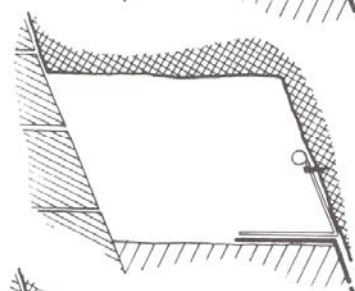
1. Etat du front après déblayage.



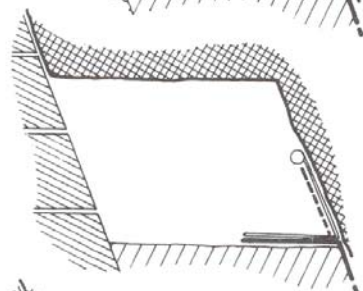
2. On rabat la partie du grillage de la tranche précédente restant au parement.



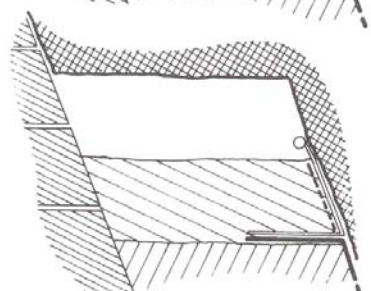
3. On installe la bande de grillage en la fixant au parement par des broches en bois.



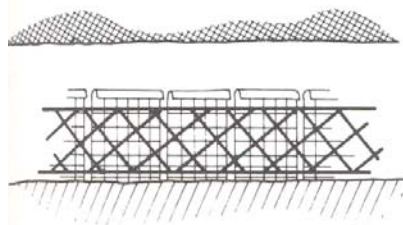
4. On déroule la bande longitudinale.



5. Remblayage.



N.B.: vue longitudinale en phase 4.



-  minerais
-  remblai taille n-1
-  remblai taille n

Figure 21 : Pose du remblai dans la méthode des tranches montantes remblayées, mine de plomb - zinc des Malines [7]

4.2.3.4 MÉTHODE DES CHAMBRES MAGASINS

Il s'agit d'une méthode d'exploitation spécifique aux exploitations pentées et filoniennes. Elle a été employée, par exemple, dans les mines de fer de l'Ouest (La Ferrière-aux-Etangs, Soumont, Chazé-Henry), dans la mine de fluorine de Fonsante (83), dans des mines d'uranium du district de Vendée.

Le principe général de cette méthode d'exploitation est l'abattage du minerai de bas en haut, en remontant le pendage de la couche ou du filon ; les blocs de minerai « s'écoulant » par gravité au sein de la chambre. Durant l'abattage, les blocs sont retenus puis soutirés dans les berlines en galerie de base par un système de trémies¹¹ une fois la chambre complètement exploitée. C'est la différence essentielle avec les méthodes par tranches classiques : pendant le creusement de la chambre le minerai abattu est emmagasiné, d'où le nom de la méthode. Au cours de ces opérations d'abattage, seul le volume foisonné est évacué, de façon à maintenir toujours un vide suffisant entre le minerai en place et la sole. Le minerai stocké sert de plancher de travail et contribue au support des épontes. Les mineurs accèdent au front de taille soit par la galerie de base soit par des cheminées dites « Alimak » percées depuis la galerie de tête.

La méthode des chambres magasins possède un schéma d'évacuation du minerai bien particulier (Figure 22 et Figure 23). Il comprend :

- 1) des trémies (T), parfois surmontées de cheminées. Elles sont placées sous les chambres en exploitation et elles présentent des pentes suffisantes pour la descente du minerai par gravité. Ces cheminées s'évasent généralement à leur tête sous la forme d'entonnoirs. Au mur de la couche, elles forment des cercles (Figure 29) ;
- 2) des voies de roulage (V), où les berlines circulent, passant sous les trémies ;
- 3) dans les couches ou les filons épais, les voies de roulage ne se trouvaient pas forcément sous les chambres exploitées. Le minerai abattu devait donc être raclé, dans des voies de raclage (R) depuis son point d'écoulement vers les voies de roulage. Ces voies de raclage ne se retrouvent pas sur toutes les exploitations par chambres magasins.

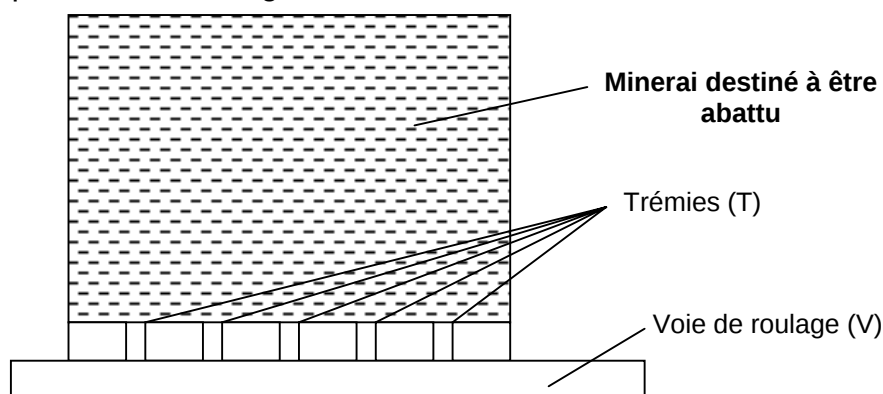


Figure 22 : Représentation simplifiée du schéma d'évacuation du minerai dans la méthode des chambres magasins (sans voie de raclage)

¹¹ Réservoir en forme de pyramide, de cylindre ou de cône renversé, dans lequel sont stockées des substances ou des matériaux qui sont déchargés par une ouverture située à la base de ce réservoir.

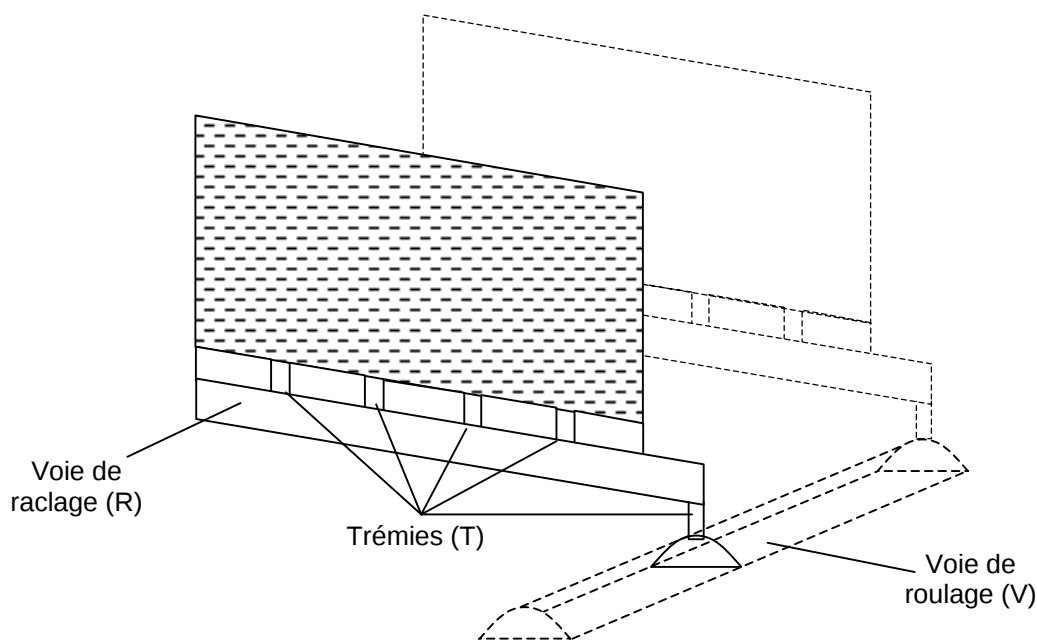


Figure 23 : Représentation simplifiée du schéma d'évacuation du minerai dans la méthode des chambres magasins (avec voie de raclage)

Cette méthode est fondée sur un écoulement par gravité du minerai, cette condition nécessite :

- un pendage suffisant afin de permettre un soutirage aisé, généralement au minimum de 40°. Certaines exploitations ont été mises en place avec 35° de pente ;
- une granulométrie du minerai abattu adaptée.

Diverses exploitations ont pu rencontrer des difficultés de soutirage. Ce dernier peut alors être aidé mécaniquement (par des racleurs par exemple).

Bien souvent, des piliers résiduels, sont laissés dans le but de garantir la stabilité des épontes. Ils sont souvent de forme triangulaire ou bien rectangulaire et alignés suivant la pente afin de faciliter la descente du minerai lors du soutirage.

Autour des chantiers, des stots de protection étaient laissés :

- au-dessus des galeries de base où les trémies étaient percées pour le soutirage du minerai ;
- en tête de chantier, au-dessous du niveau supérieur ;
- entre deux chambres contiguës ;
- vers la surface, entre la couronne (toit du chantier) et le jour, un stot, appelé « pilier couronne », devait être laissé .

Le tableau suivant donne quelques exemples de dimension des chantiers.

Minerai	fer	fluorine	charbon - anthracite
Concession	Mine de Segré	Mine de Fonsante	Mine de la Mure
Puissance de la couche	1,5 à 6 m	1,2 à 3 m	6 à 10 m
Pendage	70°	subvertical	50° à 80°
Epaisseur du stot de protection du niveau de base	3,5 m	4 m	non
Epaisseur du stot de protection du niveau de supérieur	5 m	3 à 4 m	non
Dimension des piliers en milieu de taille hauteur (h) longueur (L)	Triangulaire h = 4 m L = 6 m	non	non
Section des galeries de tête et de base	3,5 m x 2,8 m	6 m ²	?
Hauteur de la chambre	65 à 75 m	50 à 60 m	14 à 70 m
Largeur de la chambre	30 à 50 m	120 m max	200 m
Espacement des trémies	10 m	2 m	6 à 10 m
Epaisseur de la couronne	20 m	?	?

Tableau 3 : Caractéristiques de quelques exploitations par chambre-magasin

4.2.3.5 VARIANTES ET ADAPTATIONS DE LA MÉTHODE DES CHAMBRES MAGASIN

Tous les sites miniers étant différents les uns des autres, des variantes basées sur le principe de l'exploitation par chambre magasin permettent de s'adapter aux petites particularités des sites. Les figures ci-dessous présentent quelques-unes de ces adaptations ainsi que des détails sur les points particuliers de cette méthode comme le chargement grâce aux trémies (Figure 27 et Figure 29).

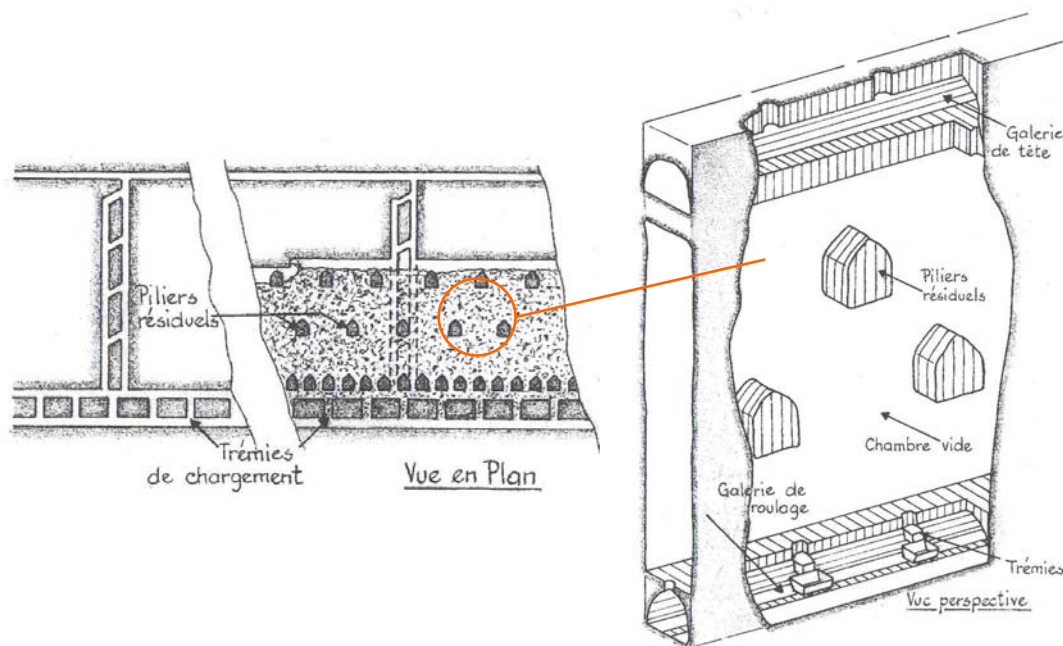


Figure 24 : Principes des chambres magasins avec piliers résiduels à la mine de fer de Segré

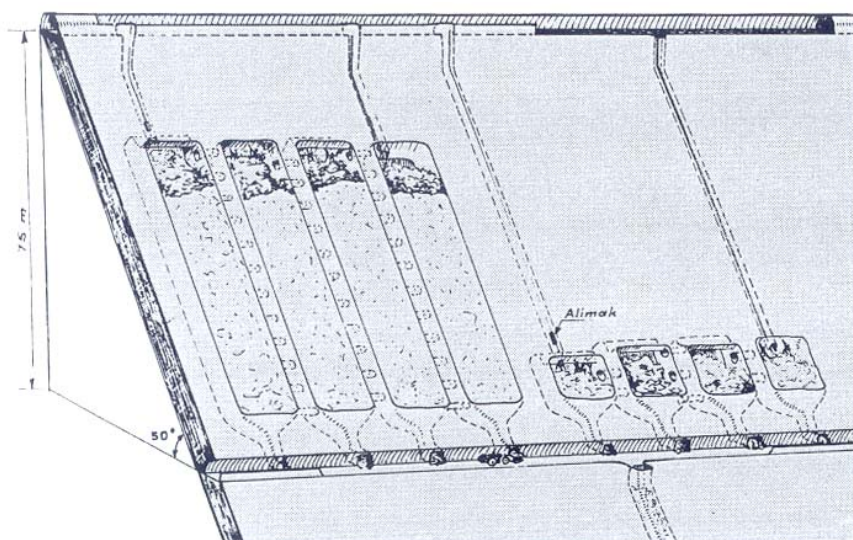


Figure 25 : Méthode d'exploitation par chambres magasins ;
vue en bloc diagramme (d'après Perrotte et Lidou, [7])

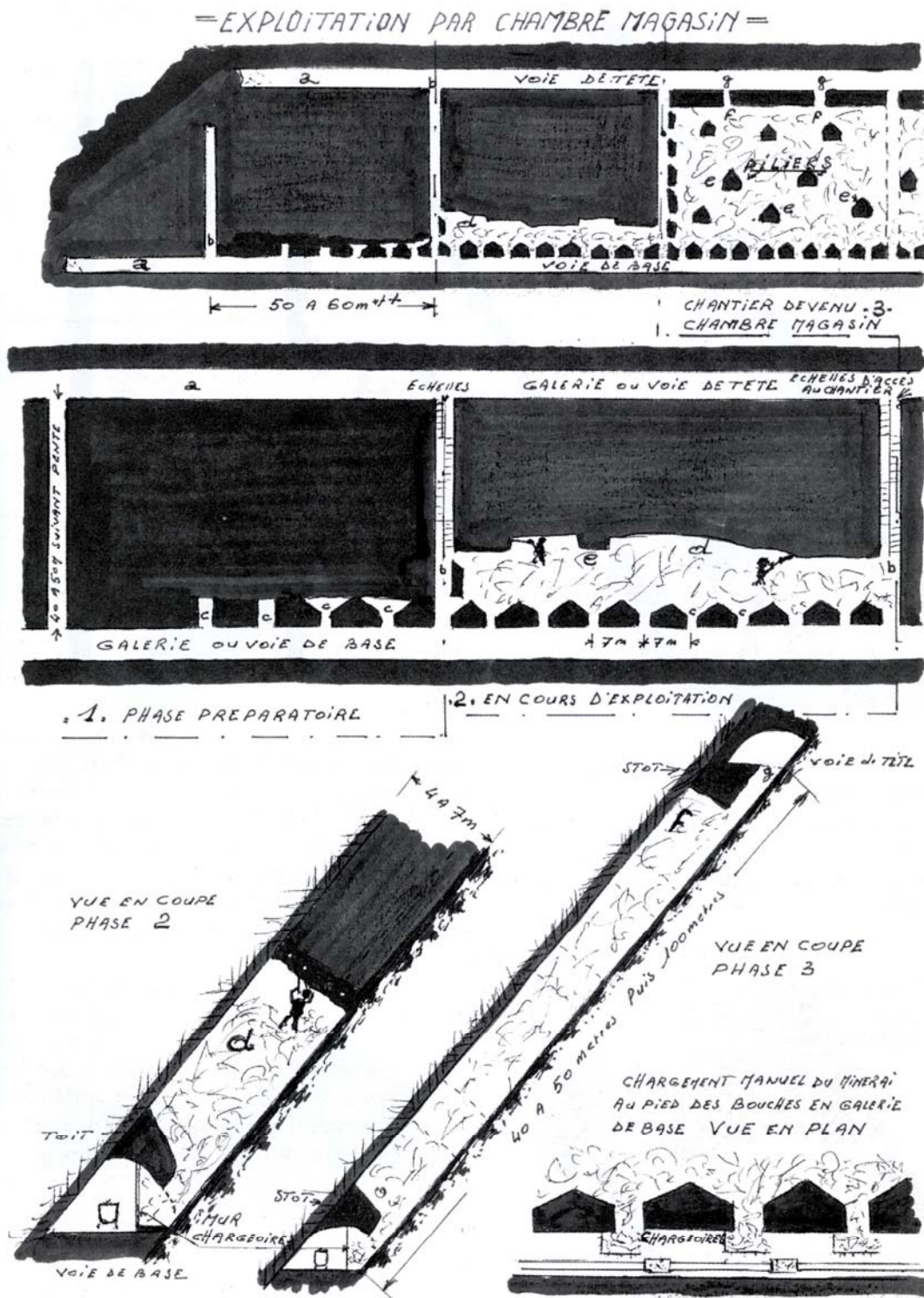
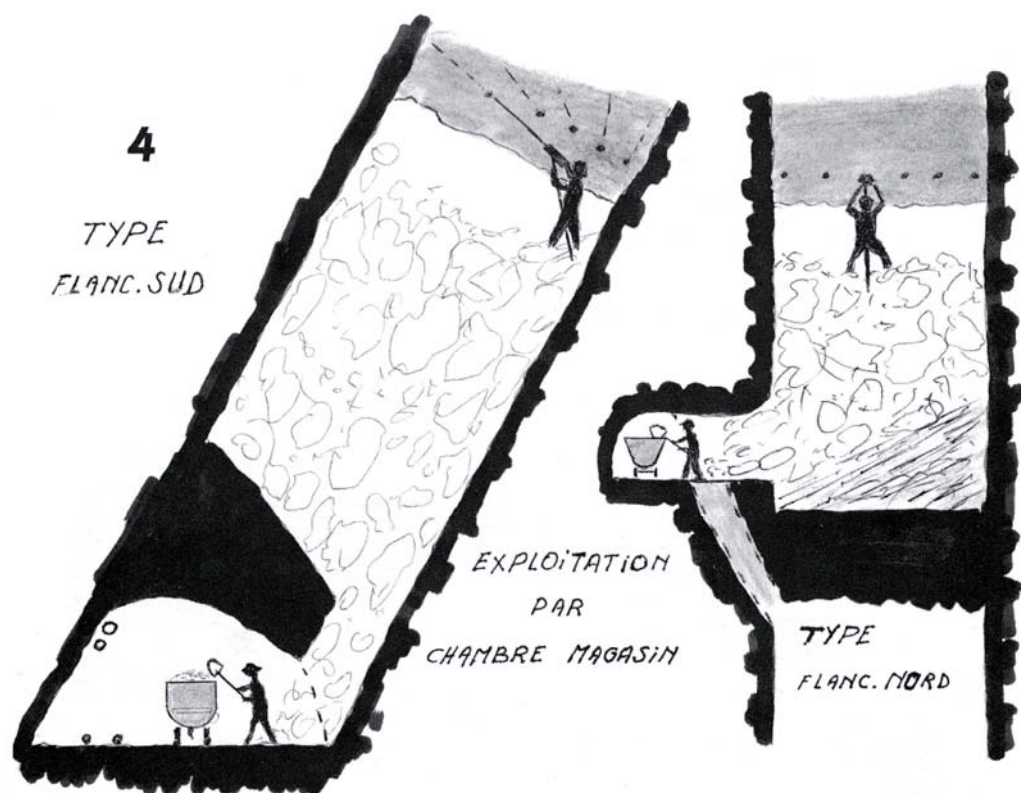


Figure 26 : Méthode d'exploitation par chambres magasins [35]



CHARGEMENT DES MINERAIS A LA BASE DES CHAMBRES MAGASIN
PAR LA METHODE GOULOTTES A DOIGTS

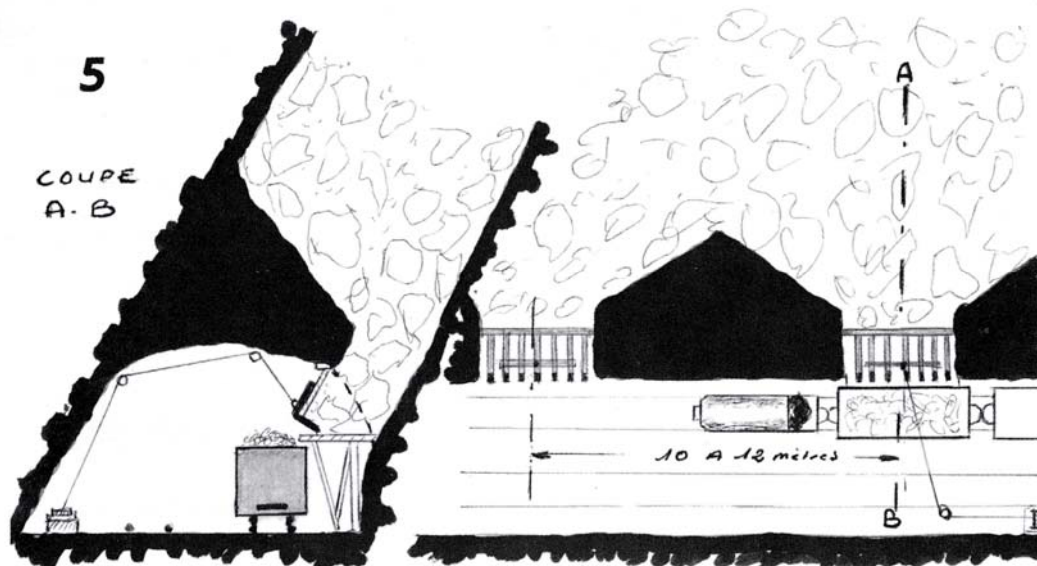


Figure 27 : Coupes synthétisant l'abattage et de chargement du minerai dans une chambre magasin [35]

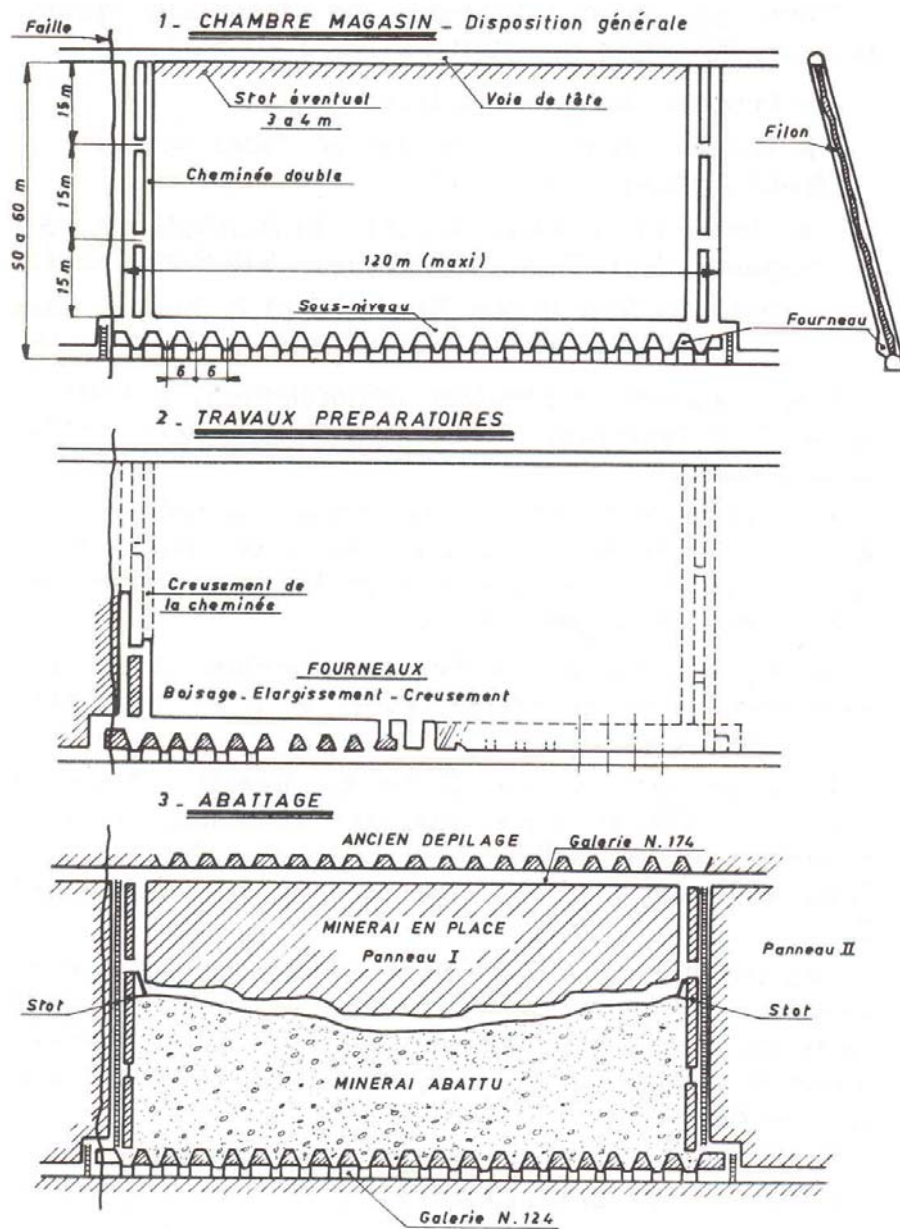


Figure 28 : Chambres magasins sans piliers résiduels à la mine de fluorine de Fontsaute [7]

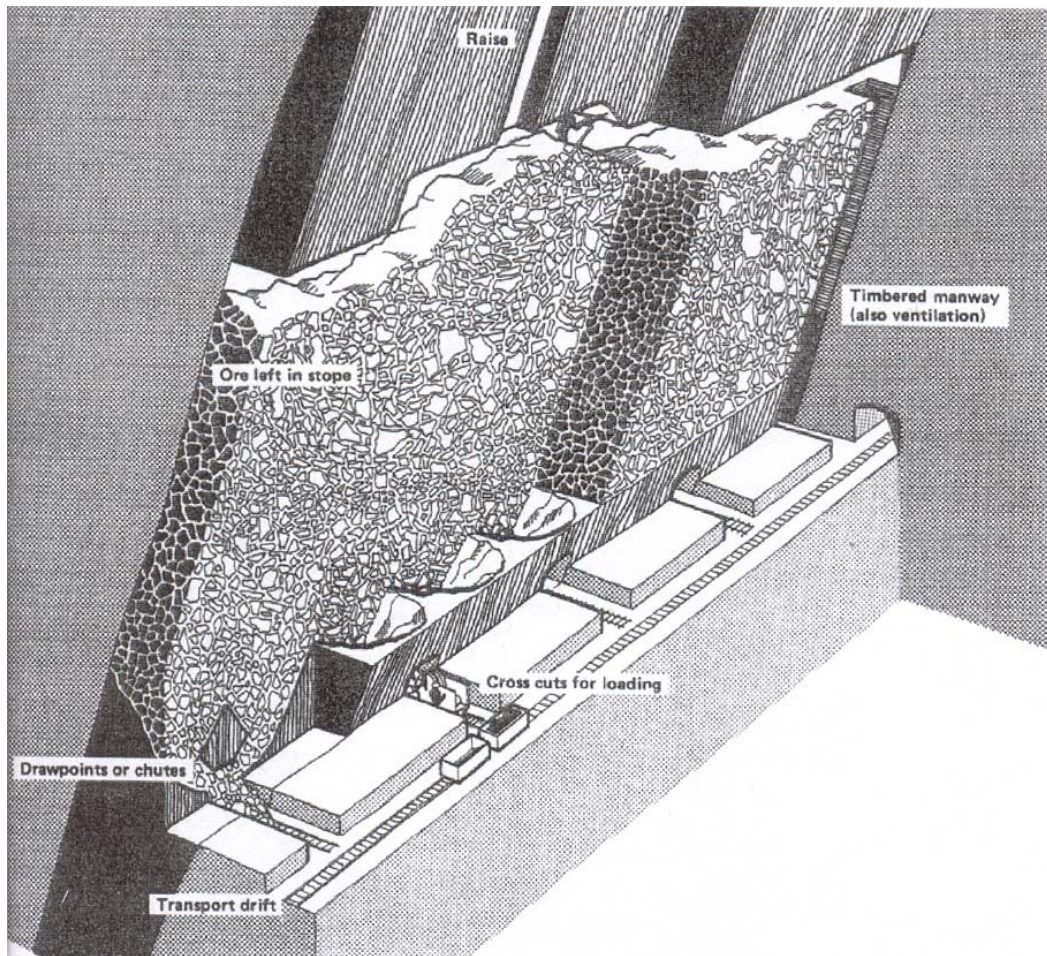


Figure 29 : Formes d'entonnoirs au-dessus des trémies
(principe des chambres magasins Atlas Copco)

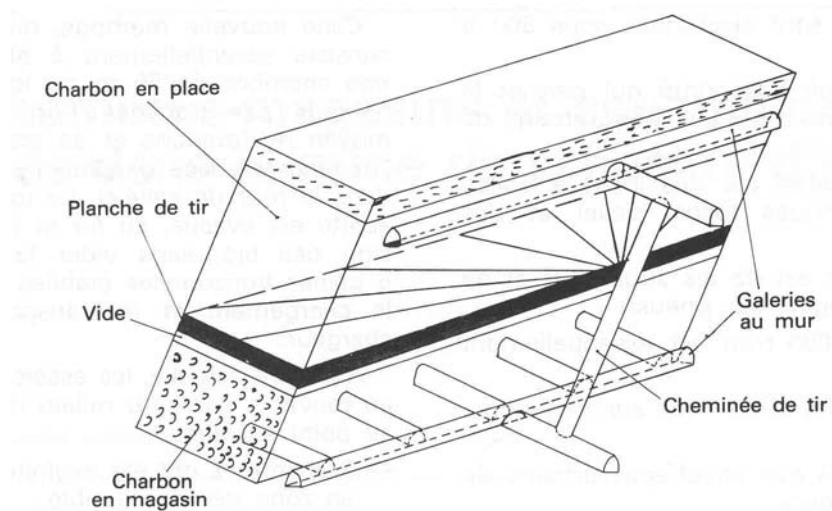


Figure 30 : Adaptation du principe des chambres magasins à une couche épaisse,
mine de charbon du Dauphiné [7]

5. PARTICULARITÉS DES GISEMENTS PENTÉS OU FILONIENS

5.1 PARTICULARITÉS GÉOLOGIQUES

La géologie revêt une importance majeure dans les études de type PPRM et particulièrement pour les gisements pentés et filoniens.

Les sites miniers en gisements pentés ou filoniens sont aussi, pour la plupart, d'anciennes exploitations (sauf les dressants de charbon). Les plans précis et complets des travaux sont souvent inexistantes et la géologie permet de donner des indices quant à :

- la nature et les caractéristiques mécaniques du minerai et de son encaissant ;
- la localisation des zones exploitées.

Les données géologiques sont superposées aux données d'exploitation (contours approximatifs des travaux, ouvrages débouchant en surface,...) afin de cartographier de manière plus complète l'étendue des travaux d'exploitation.

5.1.1 AGE DES TERRAINS

Les régions de massifs anciens tels que le Massif Central, les Vosges, le massif armoricain sont caractérisées par la présence de gisements de ségrégation, d'amas dans des roches métamorphiques, de zones d'imprégnations diffuses, de veines quartzieuses plus ou moins aurifères, mais aussi de nombreux filons.

Les plissements alpins ou pyrénéens ont été suivis de la formation de très nombreux filons où les gangues spathiques et barytiques prédominent, où les amas de substitution dans les calcaires sont fréquents.

Les travaux miniers dans ces massifs anciens se sont concentrés de préférences dans les régions de roches cristallines. Les assises sédimentaires peu ou pas disloquées ne renferment que des dépôts sédimentaires sans intérêt pour les travaux. Par contre, les zones de contact de ces dépôts sédimentaires, particulièrement celles des calcaires et des roches plutoniques et éruptives sont potentiellement riches de matériaux exploitables. Il en va de même pour les zones de plissements intenses.

La connaissance de ces premiers éléments permet de limiter les zones qui ont pu être exploitées.

5.1.2 AFFLEUREMENTS

L'étude des affleurements est primordiale. La recherche des affleurements est souvent très enrichissante et nécessaire pour délimiter les zones potentiellement exploitées. Pour certains minerais, la couleur caractéristique de leur affleurement permet de les repérer plus facilement : le cuivre, plus rarement le cobalt et le nickel sont reconnaissables par leur gangue teintée.

Lorsqu'on est en présence d'une couche inclinée ou d'un filon exploité, il est indispensable de chercher à déterminer la direction du plongement. C'est d'ailleurs le premier point qu'a déterminé le prospecteur. Cette reconnaissance

doit être complétée par la recherche, aux environs du gîte, des lignes de fractures et des miroirs de faille. Leur direction et leur âge relatif permettent dans une certaine mesure de reconnaître les accidents tectoniques qui ont pu affecter la zone minéralisée et limiter les travaux.

5.1.3 ÉPONTES ET TERRAIN ENCAISSANT

Les gisements sédimentaires sont toujours compris entre des épontes bien nettes. Dans les gisements non sédimentaires, la minéralisation peut être irrégulière, de sorte que les limites de l'exploitation sont souvent difficiles à connaître.

Le minerai des gisements non sédimentaires est très souvent plus dur et plus dense que ne l'est le minerai issu de gisement sédimentaire tel le charbon (Tableau 4 et Tableau 5), ce qui a entraîné la généralisation du tir à l'explosif dans les gisements pentés ou filoniens non sédimentaires.

Espèce minérale	Formule chimique	Minerai contenu	Densité ¹²	Dureté ¹³
bauxite	hydrate ferrique d'alumine	aluminium	2,6 à 3	2 à 3
stibine	Sb ₂ S ₃	antimoine	4,6 à 4,7	2
argent natif	Ag	argent	10,6	2,5
argent ioduré	AgI	argent	5,7	1 à 1,5
amalgame (argent rouge)	Ag ₂ Hg ₂	argent	13,7 à 14	3 à 3,5
argyrose	Ag ₂ S	argent	7 à 7,4	2 à 2,5
réalgar	As ₂ S ₂	arsenic	3,4 à 3,6*	1,5 à 2
barytine	SO ₄ Ba	baryum	4,5	3
withérite	CO ₃ Ba	baryum	4,3	3
bismuthine	BiS ₃	bismuth	6,5	2
bismuth natif	Bi	bismuth	9,8	2
greenockite	CdS	cadmium	4,9	3
fer chromé	(FeMg)(CrAl) ₂ O ₄	chrome	4,4 à 4,6	5,5
cobaltine (arsénio-sulfure)	CoAsS	cobalt	6 à 6,3	5,5 à 6,3
smaltine (arséniure)	(CoFe)As ₂	cobalt	6,2 à 7	5,5 à 6
chalcopryrite	CuFeS ₂	cuivre	4,1 à 4,3	3,5 à 4
cuivre gris	(Ag,Fe,Zn,Cu) ₈ Sb ₂ S ₇	cuivre	4,4 à 5,4	3 à 4
cuivre panaché	Cu ₆ Fe ₂ S ₆	cuivre	5	3
chalcosine	Cu ₂ S	cuivre	5,7	2,5 à 3
malachite (carbonates)	H ₂ Cu ₂ CO ₅	cuivre	3,8 à 4,1	3,5 à 4
cassitérite	SnO ₂	étain	7	6 à 7
stannine	(Cu ₂ FeZn)SnS ₄	étain	4,3 à 4,5	4
limonite	H ₆ Fe ₄ O ₉	fer	3,6 à 4	5 à 5,5

¹² La densité est le rapport de la masse d'un certain volume d'un corps à celle du même volume d'eau (ou d'air pour les gaz).

¹³ La dureté est la résistance opposée par un corps à l'action d'un autre corps glissant à sa surface et pressé contre celle-ci. Un corps rayé par un autre est le moins dur des deux : échelle de Mohs de 1 (moins dur) à 10 (très dur).

Espèce minérale	Formule chimique	Minerai contenu	Densité	Dureté
magnétite	Fe_3O_4	fer	4,9 à 5,2	5,5 à 6,5
oligiste ou hématite rouge	Fe_2O_3	fer	4,9 à 5,3	5,5 à 6,5
pyrite	FeS_2	fer	4,9 à 5,2	6 à 6,5
sidérose	FeCO_3	fer	3,85	3,5 à 4,5
fluorine	CaF_2	fluor	3,18	4
	MgF_2	fluor	2,8	
pyrolusite	MnO_2	manganèse	4,5 à 4,8	2,5
wad	oxydes hydratés de manganèse	manganèse	3 à 4,2	0,5 à 3
cinabre	HgS	mercure	8	2,5
molybdénite	MoS_2	molybdène	4,7	
garniérite	silicate d'alumine	nickel	2,2	2
kupfernickel ou nickéline	NiAs	nickel	7,5	5 à 5,5
millérite (sulfure)	NiS	nickel	5,2 à 5,6	3 à 3,5
columbite	$(\text{NbO}_4)_2(\text{Fe}, \text{Mn})_3$	niobium	5,7	6
or	Au	or	15 à 19	2,5 à 3
sylvanite (tellure d'or)	AuTe_2	or	8 à 8,35	1,5 à 2
cérusite	PbCO_3	plomb	6,5	3,5
galène	PbS	plomb	7,5	2,5
strontianite	CO_3Sr	strontium	3,7	3,5
tantalite	$(\text{TaO}_4)_2\text{Fe}_3$	tantale	7,1	6
rutile	TiO_2	titane	4,2 à 5,2	6
wolfram	$(\text{MnFe})\text{WO}_4$	tungstène	7,1 à 7,5	5 à 5,5
schéelite	WO_3	tungstène	6	4,5
pechblende	U_3O_4	uranium	7 à 9*	5 à 6
blende	ZnS	zinc	4	3,5 à 4
calamine	$\text{H}_2\text{Zn}_2\text{SiO}_5$	zinc	3,5	5
smithsonite	ZnCO_3	zinc	4,4	5
zircom	SiO_2ZrO_2	zirconium	4,7	7,5
quartz	SiO_2	gangue	2,25 à 2,5	7
feldspath (orthose)	$\text{K}_2\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{16}$	gangue	2,5 à 2,75	6
serpentine	$\text{H}_4\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_9$	gangue	2,5 à 2,7	3
apatite	$(\text{PO}_4)_3\text{Ca}_4(\text{Ca}(\text{F}, \text{Cl}))$	gangue	3,2	5
fluorine	CaF_2	gangue	3,18	4
		houille	1,2 à 1,5	
		anthracite	1,7	
		lignite	1 à 1,2	

* poids spécifique (rapport entre le poids de l'unité de volume de la substance et le même volume d'eau).

Tableau 4 : Ordre de grandeur de dureté et de densité de certaines espèces minérales [13]

espèce minérale	mineral contenu	Rc mineral	densité	mur	Rc mur	toit	Rc toit	concession
Bauxite	Aluminium	4 à 40 MPa	2,6 à 3	calcaire	20 à 50 MPa	grès, marnes et dolomies ou calcaire	20 à 60 MPa	Peygros, Le Recoux (83)
	Argent	60 à 90 MPa	2,64	conglomérats arkosique et par des arkoses , grossières à fines, à ciment siliceux		alternance de grès et de marnes avec un horizon dolomitique		Mine de Largentière (07)
Houille	Charbon	5 à 20 MPa	1,2 à 1,5	schistes + grès		schistes + grès		Bassin houiller de Lorraine (57)
Lignite	Charbon	25 MPa	1 à 1,2	calcaire	80 à 140 MPa	calcaire	80 à 140 MPa	Bassin houiller de Provence (13)
Magnétite	Fer	80 à 200 MPa	3,4 à 4	grès + schistes	40 à 182 MPa	schistes recouvrement jurassique discordant de calcaire de 0 à 60 m	20 à 150 MPa	Mines de fer de l'Ouest (14, 50)
CaF2	Fluor	600/700MPa	2,8 à 3,15	schistes avec niveaux gréseux et volcanique	40 à 65 MPa	schistes avec niveaux gréseux et volcanique	40 à 65 MPa	Mine du Burc (81)
CaF2 et MgF2				gneiss, micaschiste		gneiss		Fontsante (83)
Galène	Plomb	30 à 90 MPa	2,6 à 2,9	dolomie et marnes triasiques		dolomie et marnes triasiques		Les Malines (30)
				conglomérats arkosique et par des arkoses , grossières à fines, à ciment siliceux		alternance de grès et de marnes avec un horizon dolomitique		Mine de Largentière (07)
Scheelite	Tungstène		3 à 3,3	massif granodioritique et calcaire		massif granodioritique et calcaire		Mine d'Anglade, mine de Salau (09)
Pech-blende	Uranium	100 à 150 MPa	2,6		50 à 200MPa		50 à 200MPa	Zone minière de Lodève (34)
			2,3 à 2,5	granite sain et stérile	200 MPa	granite altéré	200 MPa	Zone minière de la Crouzille (87)
			2,6	microgranite	200 MPa	microgranite	200 MPa	Zone minière de Vendée (49)
Blende	Zinc	30 à 90 MPa	2,6 à 2,9	dolomie et dans marnes triasiques		dolomie et dans marnes triasiques		Les Malines (30)
				granite et série schisto-gréseuse		granite et série schisto-gréseuse		Saint-Salvy (81)
				conglomérats arkosique et par des arkoses , grossières à fines, à ciment siliceux		alternance de grès et de marnes avec un horizon dolomitique		Mine de Largentière (07)

Tableau 5 : Ordre de grandeur de caractéristiques de mineral et d'épontes (Rc = résistance à la compression uniaxiale) [7]

Les épontes sont souvent d'excellente qualité et ceci permet de prendre certaines libertés avec le soutènement et même de le supprimer parfois totalement.

On note d'une manière générale (la majorité des exploitations à fort pendage, quelle que soit la nature du minerai exploité) que les terrains encaissants et notamment ceux du toit ou du recouvrement sont souvent faillés. Ceci est le résultat des déformations et des pressions importantes générées dans ces terrains, conséquence par exemple de :

- l'injection de roches (minéralisation), au sein de formations existantes ;
- la mise en pente de dépôts sédimentaires suite à des mouvements tectoniques.

5.1.4 FILONS

Suite à la reconnaissance des affleurements, il est essentiel de savoir la nature et le mode de formation du gisement car c'est sur ces données que s'est basée l'orientation des travaux. Plus particulièrement, s'il est avéré que le minerai est de type filonien et issu d'une minéralisation de fracture, la recherche des failles et fractures autour des ouvrages ou indices repérés en surface sera d'une grande aide pour localiser les travaux non reportés sur les cartes.

Pour les filons, la minéralisation est aussi variable que possible. Ils n'apparaissent qu'assez exceptionnellement sur une longueur appréciable. Il est important de connaître la nature de la roche encaissante, son mode d'altération et la nature du remplissage.

Très souvent un filon n'existe pas seul ; il est accompagné d'autres filons ayant la même direction ou des directions différentes. Les gisements filoniens apparaissant généralement dans une région donnée, de préférence dans certaines roches, c'est donc dans ces endroits que des travaux souterrains de recherche ont pu être menés. L'uranium, par exemple, se trouve principalement dans le massif hercynien et en relation avec le granite.

5.1.5 COUCHES SÉDIMENTAIRES

Quelle que soit la nature du gîte, il convient d'étudier la tectonique de la région et de repérer un ou plusieurs niveaux stratigraphiques, constants et nets, encadrant la couche de minerai. Cette première analyse se poursuit par la recherche de ces horizons partout où ils peuvent apparaître. Ce travail est complété par la recherche et l'étude des failles et des accidents pouvant affecter le gisement. Les conditions d'exploitations ont été influencées par la puissance et la teneur du minerai.

5.1.6 AMAS

Un amas existe rarement seul, il est presque toujours associé à d'autres masses plus ou moins exploitables.

Si le minerai est plus dur et moins attaquable par l'eau chargée d'acide carbonique que la roche encaissante, il fait sailli et apparaît nettement, sauf s'il est masqué par l'humus. C'est surtout vers les contacts de roches différentes que peuvent être dirigés les travaux.

Un amas, de part sa forme anarchique, est très difficile à délimiter. Les travaux d'exploitation le seront donc d'autant plus.

5.2 SPÉCIFICATIONS DES TRAVAUX

A part quelques exceptions, les réserves reconnues des mines non sédimentaires, ne présentent que des tonnages faibles, ce qui explique la vie réduite de la plupart de ces mines (10 à 20 ans pour beaucoup d'entre elles).

De plus, les cours de minerais subissaient des hausses et des baisses alternatives, dont l'amplitude était parfois considérable. Les périodes de crise, lorsqu'elles n'entraînaient pas la fermeture de la mine, conduisaient à n'exploiter que les meilleures parties du gisement et à arrêter les travaux de reconnaissance et les travaux préparatoires.

Les travaux préparatoires des mines en gisements filoniens ou en amas présentent des particularités en terme d'ossatures des travaux. En effet, l'emploi de puits inclinés et de galeries à flanc de coteau y est plus fréquent. Les puits inclinés permettaient de suivre le gisement au mur et de réduire ainsi l'importance des travers-bancs.

Les méthodes utilisées par les mines en gisements pentés et filoniens sont variées et spécifiques. Le paragraphe 4 ne présente que certaines techniques d'exploitation et est loin de citer la totalité des méthodes et de leur variante. La méthode d'exploitation choisie est commandée par la nature du gisement et par des considérations techniques (prix de revient, taux de récupération du minerai, sécurité).

Le tableau indicatif suivant permet de faire correspondre certaines méthodes d'exploitation avec des conditions géologiques.

Type de gisement	Pendage	Résistance du minéral	Résistance des éponges	Méthodes applicables
Couche ou filon très mince (moins de 1 m)	fort	bonne ou mauvaise	bonne ou mauvaise	Tranche montante avec coupage d'éponges. Sous-niveaux abattus. Gradins droits.
Couche ou filon mince (de 1 à 4 m environ)	faible	bonne	bonne	Chambres et piliers. Taille remblayée.
		bonne ou mauvaise	mauvaise	Traçage et défilage. Longue taille foudroyée. Longue taille remblayée.
	fort	bonne	bonne	Gradins droits ou renversés. Chambres magasins. Sous-niveaux abattus. Sous-niveaux foudroyés. Chambre montante remblayée.
		bonne	mauvaise	Chambre montante remblayée. Chambre charpentée.
		mauvaise	bonne	Gradins droits. Sous-niveaux foudroyés. Chambre montante remblayée. Tranche unidescendante foudroyée. Chambre charpentée.
		mauvaise	mauvaise	Chambre charpentée. Chambre montante remblayée. Tranche montante avec remblai complet. Tranche unidescendante foudroyée.
	faible	bonne	bonne	Chambres et piliers.
		bonne ou mauvaise	mauvaise	Tranche unidescendante foudroyée. Sous-niveaux foudroyés.
		bonne ou mauvaise	bonne	Gradins droits. Chambre charpentée.
Couche ou filon puissant (> 4 m)	fort	bonne	bonne	Gradins droits. Chambres magasins. Sous-niveaux abattus. Chambre montante remblayée. Tranche montante à remblai complet. Chambre charpentée.
		bonne	mauvaise	Chambre montante remblayée. Chambre charpentée. Tranche montante à remblai complet. Tranche unidescendante foudroyée. Sous-niveaux foudroyés.
		mauvaise	bonne	Gradins droits. Chambre charpentée. Sous-niveaux foudroyés. Tranche unidescendante foudroyée. Bloc foudroyé.
		mauvaise	mauvaise	Chambre charpentée. Tranche unidescendante foudroyée. Tranche montante à remblai complet. Sous-niveaux foudroyés.
		bonne ou mauvaise	bonne	Gradins droits. Chambres magasins. Sous-niveaux abattus. Tranche montante à remblai complet. Tranche montante remblayée.
		mauvaise	bonne ou mauvaise	Chambre charpentée. Tranche montante à remblai complet. Tranche unidescendante foudroyée. Sous-niveaux foudroyés. Bloc foudroyé.
Amas				

Tableau 6 : Correspondance entre méthode d'exploitation et conditions géologiques (informations indicatives) [24]

Mis à part les couches minces peu inclinées, les gîtes, en amas ou en filon, sont pris principalement par tranches successives montantes ou descendantes. La mine de La Plagne (73) et la plupart des mines d'uranium françaises sont dans ce cas.

Les méthodes d'exploitation (cf. paragraphe 4) mises en place varient d'un point à l'autre des exploitations afin de prendre en compte des variations géologiques locales et de maintenir la rentabilité des travaux. Parmi les très nombreux facteurs qui interviennent pour modifier les conditions de travail, signalons spécialement :

- la puissance, le pendage et l'irrégularité de la formation ;
- la dureté, les propriétés mécaniques du minerai et la nature des épontes ;
- les variations des teneurs ;
- la stabilité de la couronne¹⁴ ;
- l'importance du gisement ;
- la lavabilité¹⁵ du minerai (teneur).

La nature et la dimension des vides résiduels peuvent ainsi être variables dans un même gisement.

5.3 TYPES DE DÉSORDRE OBSERVÉ

Les gisements pentés et filoniens, comme les gisements en plateures, sont soumis à des éboulements au fond susceptibles d'affecter les terrains de surface. Ainsi, durant la période qui suit l'exploitation, traditionnellement appelée « après-mine », de nombreux désordres se sont développés, parfois dès l'arrêt des travaux mais parfois également beaucoup plus tardivement.

Toutefois, des différences subsistent : l'extension des zones d'instabilités potentielles dépend notamment de la configuration du gisement. Ainsi, les exploitations filoniennes fortement pentées sont moins susceptibles de produire des désordres s'étendant sur de grandes superficies que les exploitations en plateures, développées au sein de vastes bassins sédimentaires, à faible ou moyenne profondeur.

La description précise et illustrée des phénomènes et mécanismes fera l'objet du rendu de la seconde phase de cette étude.

Les désordres observés ou mentionnés dans les gisements pentés se présentent en surface principalement sous la forme d'**effondrements localisés** de grandes dimensions (en forme de « gouttière », dans la direction de la couche) ou d'effondrements de forme circulaire et de taille le plus souvent limitée (fontis), lorsque l'instabilité est localisée de façon plus ponctuelle.

Les modes de rupture relèvent essentiellement des mécanismes suivants :

¹⁴ Stot laissé entre le toit de l'exploitation et la surface (son épaisseur est de 20 m en moyenne dans les exploitations ferrifères de l'Ouest).

¹⁵ Aptitude d'un minerai au lavage, c'est-à-dire à la concentration gravimétrique (pour améliorer sa qualité).

- rupture du stot de protection de la surface, après éboulement de la couronne ;
- rupture du toit au droit de la chambre, suivie d'une remontée de la cloche d'éboulement jusqu'à la surface, du type fontis.

Le premier mode de rupture est spécifique à un pendage élevé des couches.

La plupart des désordres de type effondrement localisés se produisent après que l'exploitation des chantiers a été achevée.

Ces événements se répartissent, sur les différents sites, de façon presque proportionnelle à l'étendue des travaux miniers (exemple des mines de Fer de Normandie).

Les **affaissements** de la surface, consécutifs à des éboulements du fond, sont également possible dans le cas des chantiers pentés (exemples des mines de fer de l'Ouest). Dans le cas des exploitations pentées, la cuvette d'affaissement est dissymétrique (l'angle amont est plus petit que l'angle aval).

Les gisements pentés et filoniens sont également soumis, tout comme les gisements en plateure, aux aléas mouvements de terrain de type : effondrement de tête de puits, fontis au droit d'une galerie proche de la surface, tassements.

Les résultats des recherches documentaires, des observations sur site et les témoignages sont explicites : on ne recense en France aucun événement de type effondrement généralisé en gisement pentés ou filoniens.

5.4 FICHES « MATÉRIAU »

Par type de matériau exploité, on peut se rapporter aux 27 fiches en annexe qui définissent :

- les généralités sur le matériau et les minerais ;
- le mode de formation ;
- la production en France ;
- la localisation géographique ;
- l'utilisation ;
- l'ossature des travaux, quant elle est spécifique.

6. EXEMPLES DE SITES

L'annexe 2 rassemble les descriptions de 5 sites miniers filoniens ou pentés. Extraits d'études préalables aux Plans de Prévention des Risques Miniers, ces informations permettent de mieux connaître ces sites qui ont engendré des mouvements de terrain.

7. CONCLUSION

On désigne sous la terminologie d'exploitations pentées ou filoniennes : les exploitations en couche (dressants) à plus de 45° de pendage, les exploitations en filon (lentilles ou amas peu épais), et les exploitations en amas épais ou de forme ovoïdique.

Le recensement, en cours d'évolution, révèle l'importance et la dissémination de ces gisements pentés ou filoniens en France. La plupart des régions françaises possèdent des mines ayant exploité, souvent avant le XX^{ème} siècle, dans ces types de gisements à fort pendage : fer, plomb, zinc, aluminium, uranium... Un peu plus de 1000 sites ont été recensés, à ce jour, dans la base de données que nous avons créée.

De façon à répondre à notre problématique, notre base de données trie et structure les informations recueillies dans des publications nationales et internationales sur le sujet, dans les données bibliographiques du domaine public (notamment du BRGM), dans les études INERIS, dans les bases de données de GEODERIS (Ouest et Sud), dans les archives accessibles et les retours d'expérience de mouvements de terrain liés aux cavités minières en France. Notre inventaire comprend ainsi, quand les données sont disponibles : les contextes géologique et hydrogéologique, les méthodes d'exploitation et leurs caractéristiques, les caractéristiques mécaniques des terrains, les événements liés à des instabilités de terrain.

En complément de l'inventaire des sites, des fiches synthétiques, au nombre de 27, récapitulent pour chaque matériau, les généralités, le mode de formation, la localisation, la production et l'utilisation du minerai exploité.

La géologie revêt une grande importance pour l'étude de ces types de gisement. La concentration de certains minéraux relève de facteurs géologiques : âge de la formation, tectonique... Les zones minéralisées peuvent prendre des formes très diverses suivant leur mode de formation : inclusion dans des fractures ou des failles (filons), couche sédimentaire plissée (charbon lorrain), altération de granite... Certains paramètres géologiques, comme le pendage ou les secteurs d'affleurement, sont de ce fait à analyser avec une attention particulière lors des études PPRM.

La géologie renseigne, entre autre, sur la répartition et la géométrie des travaux miniers. Les méthodes d'exploitation s'adaptent aux formes, aux variations des zones minéralisées, mais aussi aux caractéristiques mécaniques des éponges et du minerai. Les principales méthodes d'exploitation sont les chambres-magasins et les tailles montantes.

Enfin, comme les gisements en plateaux, les gisements pentés et filoniens sont soumis à des éboulements au fond susceptibles d'affecter les terrains de surface. Ainsi, dès l'arrêt des travaux mais parfois également beaucoup plus tardivement, de nombreux désordres se sont développés. Les méthodes d'exploitations et les caractéristiques géologiques et notamment le pendage ont des effets sur la géométrie et la localisation des désordres en surface. On dénombre des effondrements localisés (Figure 31) situés le plus souvent aux affleurements. Les effondrements généralisés, quant à eux, sont inexistantes dans les retours

d'expérience disponibles. On dénombre également des affaissements dont l'ampleur varie selon le pendage des couches.

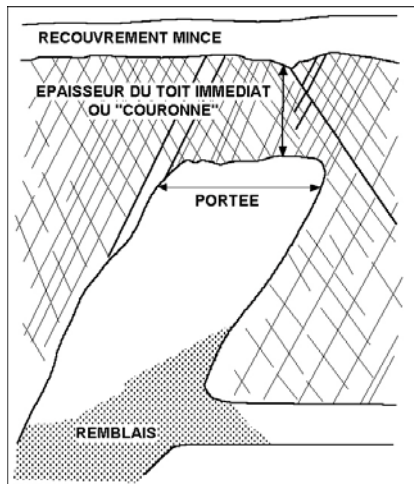


Figure 31 : Effondrement d'une « couronne » d'une exploitation par chambres-magasins (exemple des Aulnais au droit de la mine de Segré, 49)

L'étape suivante de cette étude en cours consistera à interpréter ces retours d'expérience de désordres pour identifier les principaux mécanismes de rupture liés aux contextes miniers.

8. BIBLIOGRAPHIE

- [1] INERIS, BRGM, GEODERIS, ENSMP, IRSN, CSTB, *L'élaboration des Plans de Prévention des Risques Miniers - Guide méthodologique - Volet technique relatif à l'évaluation de l'aléa*, INERIS DRS-04-51198/R01 PROJET n° 2, en cours de réalisation à la date de rédaction du présent rapport ;
- [2] F. BARTHELEMY, A. COUMOUL, C. HEINRY, *Panorama des activités minières en France en 2000*, BRGM, pp 1-36 ;
- [3] R. MOURON, J.-C. MICHEL, R. VASQUEZ-LOPEZ, *Panorama des activités minières en France en 1999*, BRGM, pp 1-19 ;
- [4] (16/22 Octobre de 1998), VIII Congreso Internacional de Minería y Metalurgia (Area II. Minería del carbon). OVIEDO ;
- [5] (février 1996) A la redécouverte des mines du passé, Le dossier de *Géochronique n°57*, pp 14-27 ;
- [6] M. FINKEL, M. OLSSON, H. MAIRENA, H. THORSHAG (mars 1994), Nouvelles techniques minières pour l'exploitation de gisements à veines étroites en pente raide, *Mines et Carrières - Les Techniques I-II/94*, supplément au volume 76, pp 21-24 ;
- [7] (février 1983), Les méthodes d'exploitation des mines souterraines, *Industrie Minérale*, supplément à la revue de février 1983 ;
- [8] E. DUMAS (1877), *Statistique géologique, minéralogique et paléontologique du département du Gard*, Troisième partie Exploitations ;
- [9] P. M. TATARINOV (1955), *Conditions de formation des gisements de minerais (métallique et non métalliques)*, Annales du service d'information géologique du BRGM, numéro 36 de janvier 1959, 215 p ;
- [10] B. SCHWARTZ (novembre 1954), Méthodes d'exploitation des gisements métalliques pauvres mais puissants, pentés et à épontes solides, *Revue de l'Industrie Minérale*, pp 1135-1148 ;
- [11] E. RAGUIN (1949), *Géologie des gîtes minéraux*, Edition MASSON et Cie, 633 p ;
- [12] L. THIEBAUT (1934), *Recherche et étude économique des gîtes métallifères*, Librairie Polytechnique Ch. BERANGER, 617 p ;
- [13] G. MOREAU (1925), *Etude industrielle des gîtes métallifères 2^{ème} édition*, Librairie Polytechnique Ch. BERANGER, 562 p ;
- [14] E. FUCHS et L. DE LAUNAY (1893), *Traité des gîtes minéraux et métallifères, tome second*, Librairie Polytechnique BAUDRY et CIE Editeurs, 1015 p ;

Argent :

- [15] Argent en France, *Minéraux et Fossiles* n° 291 ;
- [16] R. BODU (juillet 1999) Quand les rois francs étaient mineurs d'argent, *Mines et Carrières*, pp 41-41 ;

Charbon :

- [17] M. DEGAS (7 juillet 2003) *Bassin houiller de Lorraine, analyse des effets en surface des travaux miniers souterrains dans la concession De Wendel, secteur de Forbach (Moselle)*, INERIS-DRS-03-39146/R01 ;
- [18] X. DAUPLEY, T. CANTE (15 juillet 1999) *Bassin houiller du Dauphiné, analyse des effets en surface des travaux miniers souterrains dans les concessions de la Motte d'Aveillans, du Majeuil et des Boines*, INERIS-DRS-99-21670/R01 ;
- [19] S. KOUNIALI (21 décembre 1998) *Les effets de surface des exploitations souterraines de charbon*, INERIS-SSE-98-25EP06/R01 ;
- [20] G. SENFAUTE, M. BENNANI (4 novembre 1997) *Bassin Houiller du Dauphiné, Site de La Mure, Analyse des effets en surface des travaux miniers souterrains*, INERIS SSE-GSe-MBe/DMi/BS-97-26EE94/RN01ter ;
- [21] HBL, Charbonnage de France (juin 1994) *Du charbon et des hommes, Histoire des Houillères du Bassin de Lorraine de 1946 à 1992*, Edition Pierron - Serpenoise ;
- [22] F. POYOL (1983) *Soutirage en veine très pentée, Publication interbassins de Merlebach du 25-28 mai 1982*, pp 153-166 ;
- [23] R. SCHWEITZER (6-8 octobre 1976) *Méthodes d'exploitation des veines épaisses dans les Houillères françaises*, 3^{ème} conférence internationale sur la recherche charbonnière, Sydney, 13 p ;
- [24] V. VIDAL (1962) *Exploitations des Mines. Tome III – Méthodes, énergies, services du jour*, DUNOD ;

Cuivre :

- [25] D. BARDIN (1971) Les amas pyriteux de Sain-Bel (Rhône) liés au groupe spilites-kératophyre de la Brevenne, *Bulletin du BRGM* (deuxième série) Section II n°6, pp 17-41 ;

Fer :

- [26] M.C. LEFEVRE, *Le fer et La Ferrière-aux-Etangs*, Edition les Cahiers du Temps ;
- [27] L. CAUVIN (17 février 2005) *Evaluation et cartographie des aléas mouvements de terrain dans l'emprise des concessions d'Estrées-la-Campagne, Cinglais, Urville et Gouvix – Bassin ferrifère de Normandie (Calvados)*, INERIS-DRS-05-55973/R01 ;
- [28] J.J. TRITSCH (7 janvier 2005) *Etude préliminaire à la réalisation d'un plan de prévention des risques miniers sur le territoire des communes de La-Chapelle-sur-Oudon, Saint-Gemmes-d'Andigné, Segré, Chazé-Henry et Pouancé (49) – Bassin ferrifère de d'Anjou - Bretagne*, INERIS-DRS-05-55971/R01 ;
- [29] X. DAUPLEY, C. LOISEAU (7 janvier 2005) *Bassin ferrifère de La Ferrière-aux-Etangs – Etude préliminaire à la réalisation d'un plan de prévention des risques Miniers sur le territoire des concessions de La Ferrière-aux-Etangs et de Mont-en-Gérôme*, INERIS-DRS-05-56323/R01 ;

- [30] L. CAUVIN (8 décembre 2004) *Evaluation et cartographie des aléas mouvements de terrain dans l'emprise des concessions de Cinglais, Barbery, Soumont et Perrières – Bassin ferrifère de Normandie (Calvados)*, INERIS-DRS-04-44270/R02bis ;
- [31] J.J. TRITSCH, T. DELAUNAY (25 juin 2004) *Evaluation et cartographie des aléas mouvements de terrain sur le bassin minier de May/Orne – Bassin ferrifère de Normandie (Calvados)*, INERIS-DRS-04-48514/R02bis ;
- [32] V. RENAUD (7 juin 2004) *Contribution à l'analyse des conditions d'effondrement des gisements pentés des bassins ferrifères de Soumont, May/Orne et Segré (Calvados, Maine-et-Loire)*, INERIS-DRS-04-50864/RN01 ;
- [33] J.-J. TRITSCH, T. DELAUNAY (25 mars 2004) *Étude préliminaire à la réalisation d'un Plan de Prévention des Risques Miniers sur les Communes de Nyoiseau, Combrée, Noyant-la-Gravoyère et Bouillé-Ménard (Maine-et-Loire) - Bassin ferrifère d'Anjou – Bretagne, Secteur dénommé Segré zone 1. Phase informative et évaluation des aléas mouvements de terrain*, INERIS-DRS-04-42376/R03 ;
- [34] T DELAUNAY (27 juin 2003) *Participation à l'élaboration de la phase informative du PPRM sur l'emprise des concessions de Cinglais, Barbery, Soumont et Perrières - Bassin ferrifère de Normandie (Calvados)*, référencé INERIS-DRS-03-44270/R01 ;
- [35] Collège Paul Verlaine Evrecy et Amicale des anciens mineurs (avril 2002), *Histoire d'un pays minier - Autour de May-sur-Orne*, 2^e édition, Editeur local, 175 p ;
- [36] Université Inter-âges de Basse-Normandie – Antenne de Caen (mai 2000) *Les mines de fer normandes*, Edition les Cahiers du Temps ;
- [37] G. LANGLOIS (1992) L'exploitation du fer à Villerouge et Palairac (Aude, XVIII^{ème} – milieu XIX^{ème} siècles), une absence de technique ?, *Les techniques minières de l'Antiquité au XVII^e siècle*, Edition C.T.H.S, pp 205-214 ;
- [38] E. TINCELIN et G. VOUILLE (1991) *Mine de Soumont – Définition des zones à risques et de la nature des risques*, Rapport de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris – Centre de géotechnique et d'exploitation du sous-sol ;
- [39] E. TINCELIN et G. VOUILLE (1989), *Société des mines de Soumont - Stabilité à terme des zones exploitées à la mine de Soumont – flanc sud*, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris – Centre de géotechnique et d'exploitation du sous-sol ;
- [40] M. MUSSY (1868), *Description de la constitution géologique et des ressources minérales du canton de Vicdessos et spécialement de la mine de Rancé*, Annales des Mines, 6^{ème} série, Mémoire Tome XIV ;

Or :

- [41] Spécial Or, *Minéraux et Fossiles* n° 280 ;
- [42] L'or en Armorique, *Minéraux et Fossiles* n° 304 ;

- [43] (septembre 2002) L'Or, *Géochronique* n° 83 – BRGM - SGF, 52 p ;
- [44] M. FINKEL, M. OLSSON, H. MAIRENA, H. THORSHAG (mai 1995) Traitement des minerais aurifères à la société des Mines du Bourneix, *Mines et Carrières – Les Techniques I-II/95*, supplément au volume 77, 38 p ;
- [45] M. MEIA (octobre 1991) La Société des Mines du Bourneix (SMB), volume 73 de *Mines et Carrières*, pp 42-44 ;
- [46] J. J. BACHE (1982), *Les gisements d'or dans le monde – essai de typologie quantitative*, Mémoire du BRGM n°118, Edition du BRGM, 102 p ;

Plomb - Zinc :

- [47] J. MACE, Le filon de plomb argentifère des Bormettes dans le quartzite et les phyllades de la Londe-les-Maures (Var), *Minéraux et Fossiles* n°300 ;
- [48] B. BARRIERE (juillet-août 2002) La mine de plomb des Farges, près d'Ussel (Corrèze), *Minéraux et Fossiles* n°308 ;
- [49] M. LE GUEN (1989), *Les minéralisations Pb-Zn du bathonien dans la région des Malines (Gard) : cadre géodynamique, caractérisation isotopique et implications génétiques*, Thèse, Université des Sciences et Techniques du Languedoc ;
- [50] F. FOGLIERINI, A. BERNARD et G. VERRAES (1980), *Le gisement des Malines (Gard) Zn, Pb*, Gisement Français Fascicule E5 26^e CGI, Délégation générale à la recherche scientifique et technique ;

Uranium :

- [51] (avril 2004), *Inventaire national des sites miniers d'uranium – Version 1 réalisé dans le cadre du programme MIMAUSA (Mémoire et Impact des Mines d'urAniUm)*, IRSN à la demande du MEDD/DPPR avec la collaboration de la COGEMA, du MINEFI/DARPMI, la DRIRE Auvergne et Limousin et le BRGM ;
- [52] B. BAVOUX et P.C. GUIOLLARD (mars 1998), *Mines de La Crouzille (Haute Vienne)*, Pierre-Christian GUIOLLARD Auteur-Editeur ;
- [53] G. LAURET, P. BRASSE (janvier 1999) Exploitation sélective des amas uranifères : évolution de la méthode d'exploitation, *Mines et Carrières*, pp 41-44 ;
- [54] J. FINE, A. LESAVRE, A. MITTLER, D. VENTURA (février 1995) Evolution des méthodes d'exploitation à la mine du Bernardan, volume 77 de *Mines et Carrières*, pp 50-58 ;
- [55] J.L. POLGAIRE (octobre 1991) Le traitement des minerais d'uranium de la division Nord Massif Central de TCMF à Jouac, volume 73 de *Mines et Carrières*, pp 39-41 ;
- [56] J. SIROT, C. GIRARD, P. CLAYESEM (octobre 1991) La division minière de la Crouzille de Cogema, volume 73 de *Mines et Carrières*, pp 36-38 ;
- [57] J. CARALP, P. MAGET et P. SUGIER (mai 1972) L'exploitation des mines françaises d'Uranium , n°5 de *l'Industrie Minérale* ;

- [58] M. ROUBAULT (1958), *Géologie de l'Uranium*, MASSON et Cie Editeurs, 462 p ;

Autres substances :

- [59] J. FERAUD, M. MILLET, D. RAYMOND, P. SOLETY, (2005) Le Mercure – Partie 1 : métal, mine et utilisations (extraits du dossier « le mercure » de la revue « GEOCHRONIQUE » n°93 de mars 2005), *ECOMINE, Revue d'actualité des minéraux et des métaux*, Avril 2005, pp 43-49 ;
- [60] *ECOMINE*, Fermeture de la dernière mine d'or française (extraits de la revue « GEOCHRONIQUE » n°83 de 2002), *Revue d'actualité des minéraux et des métaux*, mai 2004, pp 14-15 ;
- [61] M. GHOREYCHI, X. DAUPLEY, C. CLEMENT (8 et 9 octobre 2002) *Incidences du comportement mécanique et des processus de transport sur l'évolution à long terme des sites d'exploitation de sel*, JNGG 2002, Nancy ;
- [62] FLUORINE et autres halogénures, *Minéraux et Fossiles Hors série N°13*, Septembre 2001 ;
- [63] J. FERAUD (novembre 2000), *La fluorine ou spathfluor*, Mémentos du Ministère de l'Industrie, Rapport BRGM n° R40825, 102 p.
- [64] F. PINIER, M.X. LEVEQUE (octobre 1991) Barytine de Chaillac dans l'Indre, l'un des plus grands gisements barytiques européens, volume 73 de *Mines et Carrières*, pp 45-47 ;
- [65] J. GOOSSENS (octobre 1991) La mine de fluorine du Rossignol à Chaillac (Indre), volume 73 de *Mines et Carrières*, pp 48-49 ;
- [66] F. HERMANN (1950), *Les richesses minérales du monde*, PAYOT Paris, 247p ;

Sites internet :

www.geopolis-fr.com

<http://pujol.chez.tiscali.fr/histoire/20.html>

<http://www.mineralinfo.org/index.htm>

www.lmcp.jussieu.fr

<http://jprolley.chez.tiscali.fr>

<http://jprolley.chez.tiscali.fr>

<http://paratge.chez.tiscali.fr/mines/mines1.html>

<http://sentierdufer.free.fr/PresentationF.html>

http://euromin.w3sites.net/Nouveau_site/gisements/StMarie/GISMARf.htm

www.unites.uqam.ca

www.gl.nhbnc.ac.uk

<http://perso.wanadoo.fr/mine-or-salsigne/salsigne.html>

www.minerauxetfossiles.com

www.spathfluor.com

www.sfc.fr/Donnees/metaux

http://www.cogema.fr/servlet/ContentServer?pagename=cogema_fr%2FPage%2Fpage_activite_full_template&c=Page&cid=1030635766978

<http://www.sfen.org/fr/intro/cycle.htm>

<http://www.stebarbe.com/industriecharbon.htm>

<http://www.aia.aluminium.qc.ca/>

<http://www.intexalu.com/aluminium/alu.htm>

<http://www.aluminium-info.com/fr/index2.html>

<http://www.brousse-en-folie.com/broussefolie/nc/mines.php>

http://www.industrie.gouv.fr/energie/matieres/textes/se_nvcal.htm

http://www.eramet.fr/fr/nickel/hp_nickel.php

<http://www.isee.nc/pe/bilan2003.pdf/mines%20metal.pdf>

http://www.gsr.com/PDFs/GRSA_AR_2002F.pdf

<http://dspt.club.fr/tungstene.htm>

http://mines.acp.int/html/GY_gisements_fr.html

<http://www.charbonnagesdefrance.fr>

http://www.up.univ-mrs.fr/mines/Geographie/geo_france/geo_france.htm

<http://moulinafer.free.fr/Sommaire.htm>

9. LISTE DES ANNEXES

Repère	Désignation	Nombre de pages
Annexe 1	Extrait de l'inventaire des gisements pentés ou filoniens en France	1 A4 + 1A1 (hors texte)
Annexe 2	Exemples de site minier penté ou filonien en France	26 A4
Annexe 3	27 Fiches « matériau »	36 A4