SOGEREM

Mine souterraine du Burc – Paulinet (81)
Evaluation géotechnique des aléas d'effondrement en surface suite à l'arrêt de l'exploitation

Février 2006
A 39809 /B

SOGEREM
81120 MONTROC

Mine souterraine du Burc – Paulinet (81)
Evaluation géotechnique des aléas d'effondrement en surface suite à l'arrêt de l'exploitation

---

Février 2006
A 39809 /B

ANTEA
AQUITAINE – CHARENTES – MIDI-PYRENEES

Technoparc 5 – rue Jean Bart
B.P. 543 – 31674 LABEGE Cedex
Tél. : 05 61 00 70 40 – Fax : 05 61 00 70 41

Sommaire

Pages

1. OBJET 3

2. MOYENS MIS EN ŒUVRE 3

3. CARACTÉRISTIQUES GÉNÉRALES DU SITE, DU MASSIF ET DE L'EXPLOITATION MINIÈRE 6

3.1. LOCALISATION 6
3.2. LE BÂTI ET LES INFRASTRUCTURES EXISTANTES 6
3.3. CARACTÉRISTIQUES GÉOLOGIQUES GÉNÉRALES 7
3.4. CARACTÉRISTIQUES DE L'EXPLOITATION 7
3.5. CARACTÉRISTIQUES HYDROGÉOLOGIQUES DE LA MINE 11

4. ANALYSE GÉOTECHNIQUE DES DONNÉES 13

4.1. DOCUMENTS EXAMINÉS 13
4.2. SYNTHÈSE DE LA VISITE ET DES INFORMATIONS RECUEILLIES 13

5. SYNTHÈSE ET ÉVALUATION DE L'ALÉA « INSTABILITÉ » 17

5.1. STABILITÉ GLOBALE DE LA MINE 17
5.2. STABILITÉ LOCALE 17

6. EVALUATION DES ALÉAS EN SURFACE 22

6.1. GALERIES HORS FILON 22
6.2. VOIES DANS LE FILON 22

Liste des annexes

Annexe A — Plan de situation générale du site (extrait agrandi au 1/5 000 de la carte IGN)
Annexe B — Dossier photographique
Annexe C — Carte de l'exploitation (1/2 000) et localisation des profils transversaux Nord-Sud - (documents SOGEREM)
Annexe D — Vue frontale synthétique Est-Ouest de l'exploitation minière avec position des profils transversaux Nord - Sud
Annexe E — Cahier des profils transversaux Nord - Sud
Annexe F — Localisation sur plan des zones d'aléa moyen à fort d'effondrement en surface

1. Objet

La SOGEREM envisage l'arrêt de l'exploitation de la mine souterraine du BURC (plan de situation générale en annexe A) dans le courant du 1er semestre 2006 (vraisemblablement fin avril 2006) et prévoit, par conséquent, de déposer le dossier de déclaration d'arrêt des travaux miniers avant fin décembre 2005.

Dans le cadre de l'arrêt de ces travaux souterrains, SOGEREM souhaite limiter, dans la mesure du possible, les risques d'affaissements miniers ou de création de fontis en surface ; néanmoins, un risque résiduel subsistera, qu'il conviendra de délimiter afin d'y prévoir les mesures techniques appropriées et la surveillance adéquate.

Afin de disposer des éléments techniques lui permettant de présenter son dossier auprès de l'Administration, et compte tenu :

- des travaux de remblaiement qui sont envisageables dans une partie des galeries accessibles,
- de la délimitation détaillée des zones de vides résiduels,
- des caractéristiques géologiques, hydrogéologiques et mécaniques des terrains,

SOGEREM a chargé ANTEA de procéder à une expertise géotechnique de façon à :

- apprécier la probabilité d'apparition de désordres souterrains (effondrements, affaissements, etc.) et évaluer leur incidence en surface ;

- délimiter en surface les zones soumises aux aléas de désordres miniers.

2. Moyens mis en œuvre

Une compilation des informations disponibles sur la géologie, l'hydrogéologie, les propriétés mécaniques de la roche, la fracturation, a été effectuée en premier lieu.

Ces données ont été acquises et analysées au travers des rapports d'études antérieures concernant le site et les mêmes formations géologiques (sur la fosse du Moulinal notamment) ainsi que par les documents (plans, coupes) fournis et commentés par SOGEREM lors d'une réunion de travail le 26/10/2005.

Ces données ont été complétées par l'examen géotechnique dans différentes galeries et voies de base représentatives, récentes ou anciennes et encore accessibles. Les photographies prises au cours de ces visites sont jointes en annexe B. Cet examen a pu être valorisé par les commentaires techniques apportés par les mineurs au cours de ces visites.

L'analyse de ces données a pour objectif d'évaluer l'étendue en surface de manifestations d'instabilités éventuelles en profondeur et de les cartographier. Cependant, cette approche ne prétend pas établir un pronostic sur la date de survenue de ces phénomènes en surface.

La démarche est d'apprécier, par l'analyse de chacun des quartiers dans son contexte géologique et structural, quel type d'évolution des vides est possible, et, dans l'affirmative, si cette évolution peut donner lieu, pour une zone exploitée :

- soit à une remontée de vide se propageant jusqu'en surface ou une mise en péril de la stabilité d'un ouvrage voisin,

- soit à une localisation en profondeur de la remontée de vide par approche de type « coefficient de foisonnement » (Tincelin).

Les résultats de cette analyse ont pour but d'évaluer la nature et la gravité des aléas de création éventuelle de fontis en surface de façon à pouvoir cartographier l'éventuelle étendue de manifestations d'instabilité en surface. Il convient alors de superposer la carte de zonage de l'aléa « instabilité en surface », à la carte des biens bâtis ou non, susceptibles d'être affectés de façon pénalisante par ces instabilités pour établir la carte de risques.

Si ces dommages sont jugés tolérables (absence de bâtiments par exemple), on peut, soit admettre les instabilités prévues, soit adapter les traitements pour éviter des ruptures brutales en surface. En fonction des enjeux définis par l'Exploitant, le niveau de risques en surface peut être évalué et les mesures de sauvegarde particulières à prendre, si nécessaire, peuvent être définies.

Si les effets en surface présentent un danger potentiel trop élevé, il faut alors envisager, soit des traitements permettant de les réduire ou de les éviter complètement (remblayage partiel ou total de vides critiques), soit de supprimer l'ouvrage existant en surface, par exemple.

3. Caractéristiques générales du site, du massif et de l'exploitation minière

3.1. Localisation

La mine de fluorine du Burc, située sur la commune de Paulinet (81) à 30 km à l'Est d'Albi, est exploitée en souterrain depuis 1954. Elle s'étend sur une longueur de près d'un kilomètre d'Ouest en Est, les extrémités se situant entre les coordonnées Lambert X = 605 150 et X = 606 100.

Le secteur est concerné par la carte IGN au 1/25 000 Alban (2342 E), dont un extrait agrandi au 1/5 000 est joint en annexe A.

3.2. Le bâti et les infrastructures existantes

Le site, au voisinage de la mine souterraine, est constitué par un relief vallonné dont l'altitude varie entre les cotes +500 et +600 m NGF.

Le bâti y est composé par :

- la ferme du Burc au Nord de l'exploitation,
- le hameau de la Bourrelié, à l'extrémité Est de l'exploitation,
- le bâtiment de bureaux de l'exploitation, et les bâtiments industriels situés au mur de la mine, et dont l'essentiel sera démonté.

Les bâtiments d'habitation sont généralement de type R+1 et construits en pierres maçonnées.

Les infrastructures routières sont constituées par la route privée de SOGEREM, permettant l'accès par l'ouest à la mine.

En dehors de ces aménagements existants, le site environnant est concerné par des champs cultivés, des prairies et des zones de terrain en friche, couvertes en partie de taillis.

3.3. Caractéristiques géologiques générales

Le substratum géologique est constitué par les « Schistes de l'Albigeois », série complexe de schistes, grès et quartzites du Paléozoïque.

Le gisement s'inscrivant dans ce substratum est constitué par un filon de fluorine. La direction de ce filon est globalement N 100, et son pendage est de 50 à 60 degrés vers le Nord.

Le filon est relativement continu sur une longueur horizontale de 1 000 m ; il est localement dédoublé.

Dans un plan horizontal, des flexures et décalages atteignant 20 à 30 mètres existent à la faveur de plusieurs failles transverses orientées N30 ; ces zones de failles découpent le gisement en cinq quartiers d'exploitation.

Les roches encaissant le filon diffèrent selon les quartiers d'exploitation. Il s'agit principalement de schistes noirs (en surface et à l'Ouest) et de schistes verts (en profondeur, présents surtout à l'Est). Les schistes noirs sont riches en matière organique et en pyrite finement disséminées.

La formation de « brèche tectonique hypersilicifiée » (BTH) présente au contact des schistes verts et du filon dans la carrière de Montroc et, de façon plus variable, dans la carrière du Moulinal, est, ici, présente de façon diffuse dans l'encaissant.

La minéralisation a été suivie jusqu'à une profondeur de 235 m sous la surface du sol. Le filon a une épaisseur moyenne estimée à 2,5 m mais celle-ci peut varier dans des proportions assez larges entre 0 et 8m.

3.4. Caractéristiques de l'exploitation

La mine a principalement été exploitée selon la méthode des tranches montantes remblayées, avec rampe au filon ou au stérile (recoupes). L'accès aux chantiers d'exploitation ou de traçage se fait par l'intermédiaire de descenderies et de remontes.

La carte de l'exploitation est présentée au 1/2 000 en annexe C. La vue frontale de l'exploitation, selon la direction Est-Ouest, est jointe à la même échelle en annexe D ; elle positionne les profils transversaux Nord-Sud joints en annexe E.

Schématiquement, en terme de volume, on peut résumer l'exploitation aux chiffres essentiels suivants :

Minerai extrait depuis le début de l'exploitation …..	1 435 000 T soit environ 574 000 m3
Vides créés depuis le début de l'exploitation……	674 000 m3
Remblai apporté depuis le début de l'exploitation….	540 000 m3
Volume total de vides actuels…….	***134 000 m3***

Les remblais d'apport ont diverses origines :

- Creusement des galeries d'infrastructure (volume estimé à 100 000 m3 environ),
- Déblais du carreau,
- Sables et graviers provenant de l'usine,
- Sous produits de l'usine du Burc,
- Concassé calcaire de piste pour le roulage des engins,
- Stériles rocheux provenant de la MCO de Montroc,

On peut ainsi estimer que l'apport de l'extérieur représente un volume global de l'ordre de 470 000 m3.

Le tableau joint en page suivante matérialise pour les 14 profils matérialisés en annexe E, le total des sections de galeries d'infrastructure, de vides dans le filon (voies de base et de tête) et la section de filon remblayé.

Tranche	**Ouvrage concerné**	Section totale (en m^2) de vides et remblais de comblement de filon exploité, au droit des profils n°														
		5200	**5250**	**5300**	**5375**	**5450**	**5575***	**5600***	**5650***	**5700***	**5800**	**5925**	**6075**	**6150**	**6200**	**Total**
TN à 50m	Galeries hors filon	---	---	---	15	---	12	12	24	12	---	---	---	---	---	75
	Voies de base ou de tête	---	---	---	12	9	9	9	---	---	---	10	---	---	---	49
	Filon remblayé	---	---	---	*25*	*90*	*140*	*90*	*40*	---	---	*70*	---	---	---	*455*
50 à 100m	Galeries hors filon	---	---	---	30	12	9	---	---	9	12	15	---	---	---	87
	Voies de base ou de tête	---	---	---	9	---	25	9	9	18	18	20	50	20	---	178
	Filon remblayé	---	---	*30*	*145*	*45*	*125*	*140*	*80*	*100*	*100*	*100*	*200*	---	---	*1065*
100 à 150m	Galeries hors filon	---	---	9	---	---	21	12	12	----	12	---	10	---	---	76
	Voies de base ou de tête	---	---	9	9	---	---	25	9	18	30	9	---	20	9	138
	Filon remblayé	---	---	*140*	*150*	*125*	*125*	*160*	*100*	*180*	*170*	*50*	*80*	*90*	*40*	*1410*
150 à 200m	Galeries hors filon	36	33	9	---	12	30	10	---	---	---	---	---	---	---	130
	Voies de base ou de tête	20	9	20	18	---	10	18	20	---	10	18	30	---	---	173
	Filon remblayé	*150*	*50*	*140*	*140*	*200*	*100*	*180*	*260*	*280*	*160*	*120*	*50*	---	---	*1830*
> 200m	Galeries hors filon	12	---	55	35	21	30	20	42	---	12	---	---	9	---	236
	Voies de base ou de tête	---	---	25	18	---	---	35	20	20	30	20	10	---	9	187
	Filon remblayé	*80*	*195*	*300*	*65*	*125*	---	---	*110*	*150*	*130*	*50*	*40*	---	---	*1245*
	QUARTIER	O1		O2			C				E1		E2			

Zone de remontée de vide * Zone de la ferme du Burc

3.4.1. Les quartiers d'exploitation

Le filon a été subdivisé par SOGEREM en cinq quartiers bien individualisés, correspondant aux zones exploitées :

- **le quartier central** (noté C sur la vue frontale),
- **le quartier Ouest** (O1),
- **le quartier extrême Ouest** (O2),
- **le quartier Est** (E1),
- **le quartier extrême Est** (E2).

Cette partition est due à la présence de :

- failles ayant divisé le filon en éléments distincts et ayant rejeté certains compartiments,

- passées stériles à l'intérieur de la caisse filonienne elle-même, qui n'ont pas été exploitées.

Sur la projection frontale figurent en hachuré, les zones exploitées et remblayées, ainsi que la position de leurs infrastructures d'accès.

3.4.2. Les infrastructures d'accès aux quartiers d'exploitation

Elles sont constituées des ouvrages suivants, pour chacun des chantiers décrits précédemment :

- ***un accès par descenderie*** ou remonte dans chaque chantier, tracé généralement au mur du filon ; les infrastructures d'accès sont reliées aux zones minéralisées par l'intermédiaire de recoupes d'une vingtaine de mètres de long,
- ***une cheminée de ventilation*** tracée dans le filon ou au mur de ce dernier.

La mine elle-même comporte les ouvrages principaux suivants :

- ***plusieurs descenderies*** (dont la principale qui relie les travaux souterrains au carreau) qui desservent les différents quartiers d'exploitation,
- ***un puits d'accès*** en zone centrale, de 220 m de longueur, relié au traçage de base par un travers banc de 150 m de long,
- ***trois cheminées latérales de ventilation*** principale par extracteurs d'air, réparties sur toute la longueur du gisement et connectant entre eux, aussi bien des chantiers remblayés (cheminées busées) que des infrastructures,
- ***des cheminées de jet***, soit entre différents niveaux, soit à partir de la surface.

En outre, les différents quartiers sont reliés entre eux par des ***voies de niveau*** :

- ***voie de base*** tracée dans la caisse filonienne, séparée des chantiers remblayés par un stot de protection de 2.5 m de hauteur verticale de minerai non exploité,
- ***voie de tête*** également tracée dans le filon, dont le sol repose sur les remblais ; ceux-ci ont été compactés au fur et à mesure par le passage des engins.

Ces deux voies ont été généralement conservées pour des raisons de ventilation.

3.4.3. Les soutènements réalisés

Tant en chantiers qu'en infrastructures, le soutènement réalisé a été *non systématique*.

Il a consisté en :

- un boulonnage du toit dans le filon, si requis par les conditions minières,
- un boulonnage, selon les cas, des parements et de la couronne, dans les galeries d'infrastructure.

Les boulons ont été de type ancrage par friction à partir des années 1990, et ancrages ponctuels auparavant.

Les infrastructures n'ont été cintrées qu'exceptionnellement :

- au droit des failles de mauvaise tenue minière,
- dans les voies de base des chantiers qu'il a été décidé de conserver.

Ces cintrages sont des ouvrages constitués, selon les cas :

- de cintres coulissants (profil TH 25 ou TH 29) entretoisés et garnis de bois,
- de carrures (piédroits en UPN et couronnes en IPN) également entretoisées et garnies de bois ou (rarement) de pneus.

3.5. Caractéristiques hydrogéologiques de la mine

Le filon de fluorine exploitée s'inscrit dans un massif essentiellement schisteux fracturé à faible perméabilité.

Une étude concernant le système hydrogéologique de la mine, et son évolution probable après l'arrêt de l'exhaure en fin d'exploitation, a été effectuée en octobre 2003 par le Centre d'Informatique Géologique de l'Ecole des Mines de Paris.

Cette étude a montré que le débit d'exhaure actuel de la mine (85 m^3/h en moyenne) provient du mélange de trois types d'eau :

- des eaux modérément basiques, très faiblement chargées, surtout observées dans les niveaux profonds, en particulier à l'Est, constituant au moins 60 % du débit total de l'exhaure ;

- des eaux modérément acides et peu chargées, correspondant à une alimentation superficielle à partir des zones altérées ;

- des eaux acides et chargées en métaux (Mn, Fe, Cu) et en fluor résultant de l'action du type d'eau précédent sur les minéralisations sulfurées et fluorées. Elles ne représentent actuellement qu'un pourcentage limité de l'exhaure.

Différents scénarios d'ennoyage de la mine, basés sur des modèles hydrogéologiques simples, ont été testés. Ils prédisent un temps de remplissage de la mine de 5 à 12 mois, et un débit final de débordement de l'ordre de 10 à 17 m^3/h s'effectuant au niveau de l'entrée de la descenderie ou du puits, soit à la cote +507 m NGF.

Ces deux voies ont été conservées jusqu'à présent pour des raisons de ventilation.

4. Analyse géotechnique des données

4.1. Documents examinés

Les documents mis à notre disposition ont consisté en la représentation topographique de l'ensemble de l'exploitation : descenderies, zones exploitées remblayées, voies de base, voies de tête, cheminées de jet et d'aération, etc., sous forme de vue en plan (annexe C), vue frontale (annexe D) et coupes transversales Nord-Sud.

Ces documents, qui ont représenté le support de l'expertise, ont été commentés par l'Exploitant préalablement aux visites.

4.2. Synthèse de la visite et des informations recueillies

La visite des galeries accessibles, répartie sur trois journées (26/10, 02 et 17/11/2005), n'avait pas pour objet de faire un examen exhaustif de toutes les galeries mais visait à identifier en différents secteurs l'état général des parois non renforcées ou objets de soutènement, à examiner le niveau d'homogénéité géotechnique des terrains rencontrés, les anomalies de comportement du massif rocheux. Ces visites ont permis, par ailleurs, de recueillir les témoignages techniques de chefs mineurs sur les difficultés rencontrées en cours de travaux.

Ces visites ont permis de faire des photos (jointes et commentées en 1ère page de l'annexe B) représentatives de l'état du massif rocheux au niveau des parois et voûtes de galeries.

4.2.1. Galeries d'infrastructure

Elles concernent les galeries principales d'accès : les descenderies d'accès orientées Est-Ouest (parallèlement au filon) et les travers-bancs orientés Nord-Sud ; elles sont schématiquement rectangulaire, de 9 à 12m2 de section moyenne selon la période de creusement. Elles sont creusées, par définition, hors du filon et localisées pour l'essentiel, dans la formation du mur, soit dans les schistes noirs, soit dans les schistes verts. A titre d'exemple, la photo 1, en annexe B, montre l'entrée de la descenderie au droit du carreau ; la photo 7 illustre un travers banc connecté à une voie de base.

Sur la majeure partie du linéaire de ces galeries, les parois présentent des conditions de stabilité satisfaisantes comme en témoignent les photo 6 et 7 à titre d'exemple. Le massif rocheux peut être classé dans l'ensemble en qualité moyenne selon la méthode RMR de classification de Bieniawski.

Au franchissement de zones de failles qui ont été rencontées entre les différents quartier d'exploitation ou à la traversée de zones localement altérées, les galeries ont localement fait l'objet, selon la gravité des désordres en cours de creusement, de confortement soit par boulonnage associé à des plaques ou à un grillage, soit par pose de cintres ou carrures avec blocage des parois dans les cas difficiles. Cette dernière situation est illustrée par la photo 10 qui correspond à un renforcement par plaques boulonnées complétées par grillage.

4.2.2. Voie de base et de tête

Les difficultés essentielles en cours d'exploitation pour le creusement des voies de base ont été rencontrées, comme pour le creusement des galeries d'infrastructure, au franchissement de zones de failles ; elles ont été dues à la combinaison d'un état de fracturation et d'altération important du massif rocheux et d'arrivée d'eau parfois significatives. Cette configuration a été rencontrée dans le passé en plusieurs points que l'un des chefs-mineurs (M. Clarenc) a décrit ci-après :

X= 5230 Z= +300	Quartier O2 : Rencontre d'une faille nord-sud avec arrivée d'eau, qui a justifié un traitement du passage avec pose de cadre en bois sur 10m de longueur.
X= 5240 Z= +275	Rencontre d'une faille nord-sud avec arrivée d'eau, qui a nécessité l'arrêt du creusement de cette galerie
X= 5990 Z= +465	Séparation entre quartier E1 et E2 : Eboulement de voûte de la voie de base au franchissement de la faille
X= 6100 Z= +320	Rencontre d'une faille nord-sud avec arrivée d'eau et débourrage de sable, formation d'une cloche de 10 m, ce qui a imposé l'arrêt de la poursuite du creusement

M. Clarenc nous a confirmé qu'en dehors de ces zones de faille, les travaux n'ont pas posé de problème majeur de stabilité des parois, ceux-ci étant généralement traité par pose de boulons, seuls ou associés à du grillage ou des plaques pour éviter la chute de blocs ou d'écailles localisées.

On peut noter qu'il n'y a jamais eu de problèmes de stabilité des voûtes de voies de base après remblaiement du filon exploité au-dessus ; on peut attribuer cet état de stabilité au frettage latéral des remblais apportés, confinés entre les deux épontes.

En ce qui concerne les voies de tête, les problèmes de stabilité ont été rencontrés en deux zones du chantier O1-24, aux profils 5340 et 5375, où la conjonction des arrivées d'eau associées à une forte fracturation et une altération du massif schisteux a obligé à abandonner ce chantier.

Les photos 11 (profil5340) et 12 (profil5375) illustrent l'instabilité de voûte par régression dans le filon et les épontes composées de schiste noir assez friable dans cette zone. Cet état de fracturation et d'altération est caractérisé sur la photo 4, à l'entrée de galerie.

4.2.3. Cheminées

Les cheminées dans le filon ont réalisées au fur et à mesure du comblement de celui-ci par les remblais. Elles ont été comblées dans la partie supérieure du filon (au dessus de la cote +410, pour la plupart d'entre elles.

En profondeur, le nombre de ces cheminées est sensiblement plus faible et correspond à la modernisation des techniques d'exploitation. Une cheminée a pu être examinée dans le quartier central (cote +290) et visitée dans sa partie inférieure (photo 8 de l'annexe B) ; elle a une section intérieure voisine de 2mx1m, composée de platelage et de poutres de chêne de section importante et apparaît en parfait état de conservation.

4.2.4. Gestion de l'eau

L'eau de nappe est pompée en permanence au fond de la mine, les écoulements provenant pour partie des niveaux supérieurs par le biais des galeries, voies et cheminées de communication. Mis à part un ravinement localisé en quelques secteurs lorsque les eaux transitent par certaines anciennes cheminées depuis les voies de tête, on ne constate pas de désordres importants induits par ces circulations d'eau dans les remblais au sein du filon.

4.2.5. Observations lithologiques et géotechniques

Les examens géologiques et structuraux ont été réalisés sur affleurements de surface et en galeries au voisinage de l'entrée de la descenderie.

La lithologie des affleurements examinés en surface du terrain, au niveau du carreau, est constituée par les schistes noirs, se caractérisant par une alternance :

- de niveaux dont la fraction altérée est sensible (altération AM 4/5 : très altérée à décomposée, au sens de la classification AFTES) ; c'est le cas au droit de la zone de l'entrée de galerie à 526 (X= 5480) qui reflète l'état du massif dans la frange superficielle du terrain qui peut atteindre quelques dizaines de mètres.

- de niveaux plus massifs, silicifiés, altération AM 2/3 : légèrement altéré non friable. Ce caractère est illustré par le secteur de l'entrée de la descenderie.

D'un point de vue structural, la schistosité est bien marquée. Le plissement, à l'échelle métrique, est bien visible sur les talus de déblais de direction Est-Ouest tel qu'au Nord de l'entrée de la descenderie (photo 2 en annexe B)

La direction moyenne des plans de schistosité est assez homogène, à plongement assez faible vers le Nord.

Le réseau de diaclases est plus diffus ; les joints de discontinuité sont, en moyenne, relativement espacés dans le massif schisteux encaissant (20 à 40 cm voire davantage) et de rugosité variable, la présence de niveaux localement plus graphiteux au sein des schistes réduisant localement cette rugosité.

5. Synthèse et évaluation de l'aléa « instabilité »

5.1. Stabilité globale de la mine

Le tableau présenté en page précédente et les coupes transversales de l'annexe E1 montrent que l'essentiel des excavations est maintenant remblayé de matériau granulaire dont la densité et la propriété de frottement assurent la stabilité des anciennes chambres.

Les vides résiduels sont principalement la descenderie et les quelques galeries de tête et de base. Ces ouvertures sont de petite section (typiquement 12 m²) et sont séparées en cote par plusieurs dizaines de mètres de rocher. Une éventuelle instabilité d'un tronçon de ces ouvertures ne se propagera donc pas jusqu'à un autre tronçon ; il n'y a donc pas de problème de stabilité globale de la mine.

5.2. Stabilité locale

On examine les configurations suivantes, représentatives de l'ensemble des situations des vides résiduels :

- une galerie de tête ou de base située dans le filon ;
- un tronçon de descenderie (hors filon) avec deux implantations : soit dans le rocher sain, soit dans une zone de faille.

Pour une galerie dans le filon, et aussi pour un tronçon de descenderie recoupé par une faille, les données de terrain montrent que leur stabilité à long terme n'est pas nécessairement assurée. On peut donc considèrer que ce type de galerie s'effondrera en créant une « cloche » qui s'auto-remblaiera de matériau foisonné au cours de son ascension.

Pour une galerie au rocher sain, on évaluera qualitativement sa stabilité en fonction de la qualité du massif et des dimensions de l'ouverture.

5.2.1. Galerie dans le rocher sain

On examine préférentiellement le cas de galeries peu profondes, donc implantées dans les schistes dits « noirs ». Pour émettre un pronostic de stabilité, on procède comme suit :

- estimation de la stabilité et de l'éventuel renforcement nécessaire pour ce type de galerie sur la base d'un indice de qualité du massif rocheux, et des pratiques communément adoptées en la matière ;
- comparaison de cette préconisation à la situation effectivement constatée pendant les années d'exploitation de la mine ;
- conclusion.

Il ne s'agit donc pas d'une démonstration valable dans l'absolu, mais d'une recherche de cohérence entre une approche de conception largement empirique et l'observation du terrain.

Cette approche empirique est celle établie sur une classification permettant d'élaborer l'indice « Q » de qualité du massif rocheux, dont on rappelle ici le principe.

Cette classification est issue des travaux de Barton et associés au Norwegian Geotechnical Institute (Barton 1974, revu en 1993, et repris en français dans le document de l'AFTES «Recommandation sur la caractérisation des massifs rocheux », *Tunnels et Ouvrages souterrains*, n° 177, mai-juin 2003) sur le comportement mécanique et hydromécanique des discontinuités. La qualité Q du massif est calculée à partir de la formule suivante :

$$Q = \frac{RQD}{Jn}\frac{Jr}{Ja}\frac{Jw}{SRF}$$

avec :
RQD la valeur de l'indice « Rock Quality Designation » (Deere 1964),
Jn traduisant le nombre de familles de discontinuités,
Jr la rugosité des discontinuités,
Ja le remplissage et l'altération des épontes,
Jw les conditions hydrogéologiques,
SFR est un facteur dit de réduction de contraintes.

Au numérateur, le premier terme est lié à la taille des blocs, le second à la résistance au cisaillement des joints, le troisième est un facteur de réduction dû à l'eau et à l'état de contraintes.

Q varie dans une large gamme de valeurs (0,001 à 1 000), mais est toujours interprété en échelle logarithmique.

Les valeurs des paramètres Jn, Jr, Ja, Jw et SFR se trouvent dans des tableaux descriptifs (voir Barton et al. 1974). Quand il y a plusieurs familles de discontinuités, Jr et Ja sont relatifs à la famille de plus mauvaises caractéristiques. Cependant, on doit aussi tenir compte de leur orientation, favorable ou défavorable, par rapport à l'ouvrage.

Connaissant Q, les dimensions et la destination de l'ouvrage, Barton propose un abaque donnant le type de soutènement à mettre en œuvre (voir la figure 1). En ordonnée de cet abaque, le terme ESR (excavation support ratio) varie de 0,8 pour les installations sensibles à 3,5 pour les galeries minières temporaires.

On notera que ce système, développé à l'origine pour des massifs de roche dure fracturés de type granite n'est applicable qu'avec prudence au cas de schistes. C'est pourquoi la confrontation de ce système avec la réalité du terrain est ici nécessaire.

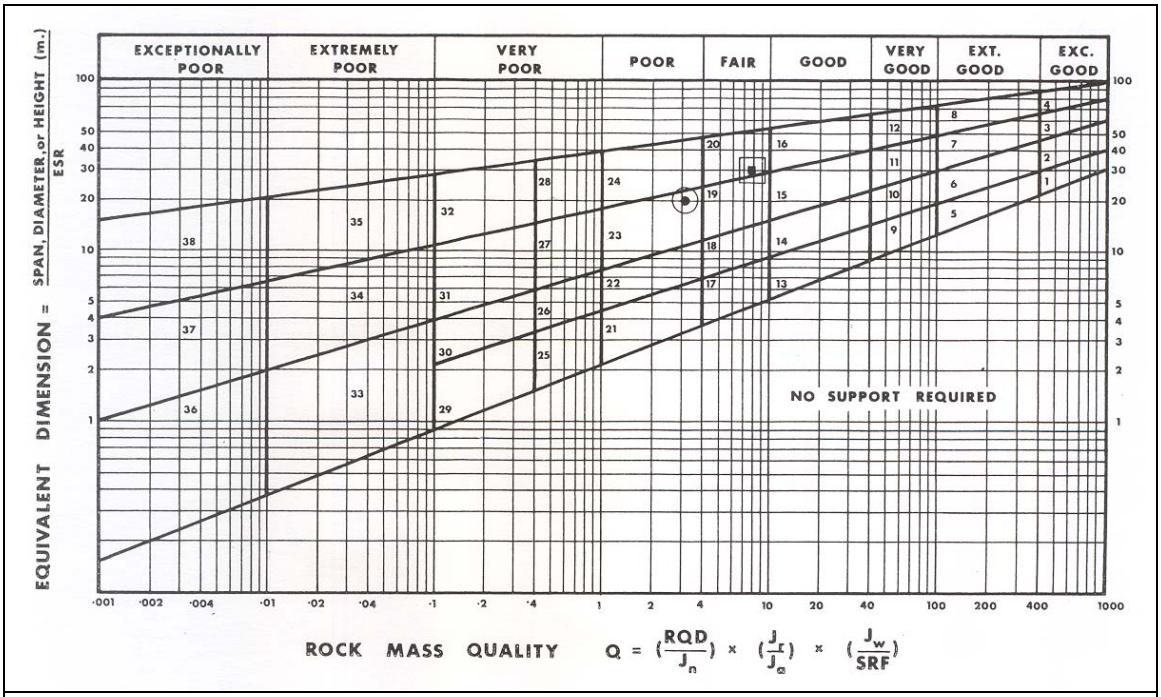


Figure 1 – Abaque de mise en œuvre de l'indice « Q » de Barton

Dans le cas des schistes noirs de la mine de Burc, les grandeurs entrant dans la formule de calcul sont choisies comme suit :

Paramètre	*Valeur*	*Justification*
RQD (%)	50	Valeur estimée comme prudente
Jn	12	Trois familles de joints plus une famille aléatoire
Jr	3 à 4	Joints irréguliers
Ja	2	Parois des joints peu altérées
Jw	0.66	Ecoulement d'eau modéré
SRF	5	Valeur moyenne
ESR	1.6	Valeur applicable à des descenderies de mine

La valeur de Q ainsi estimée est de 1 à 2, ce qui correspond à un massif de catégorie « poor = mauvaise ». Le choix de grandeurs descriptives un peu moins prudentes conduirait à évaluer une catégorie au maximum « fair = moyenne ». Cette qualité de massif est confirmée par le calcul indépendant d'un autre indice, le RMR de Bieniawski (cf. la même publication de l'AFTES), qui peut être évalué à 50/100, soit encore une qualité moyenne à mauvaise.

Etant maintenant donné la portée (« span ») de galerie, soit ici 4 m, la valeur du rapport span/ESR est de l'ordre de 2,5. On conclut ainsi, en se reportant à la figure 1, qu'un tronçon de descenderie peu profond est évalué à la limite entre la classe de soutènement « no support required = pas de renforcement nécessaire » et la classe n° 21, demandant un boulonnage en maille de 1 m.

De telles galeries peuvent donc être évaluées comme stables avec un minimum de renforcement, ce qui est conforme à l'observation et à la pratique de la mine. Le pronostic du maintien de cette stabilité à long terme après la fin de l'exploitation apparaît donc comme justifié, et ce, sans augmentation du soutènement actuel.

On notera que l'ennoyage de la mine ne changera pas cette situation, et ne pourra même que l'améliorer, en réduisant (par déjaugeage de la roche sous l'effet de la poussée d'Archimède) les contraintes effectives régnant en périphérie des galeries.

5.2.2. Galerie en filon ou au rocher en zone de faille

Dans ce cas, on peut considérer que l'éventuel renforcement finira par se dégrader au cours du temps, laissant le massif (à qualité nettement moins bonne que le rocher sain) libre de s'effondrer ; on pourra donc assister à la création d'une « cloche » remontant vers la surface, et ce, à peu près suivant la verticale, se comblant progressivement de rocher foisonné jusqu'à une hauteur limite. Il s'agit donc d'évaluer la hauteur que peut atteindre cette cloche au-dessus de la galerie, compte tenu du foisonnement du matériau éboulé.

Si on appelle F le « coefficient de foisonnement » de la roche, rapport de sa densité avant éboulement (d) à sa densité après éboulement (d', cette dernière étant plus faible vu la décohésion du massif éboulé), h la hauteur de la galerie initiale et H la hauteur de la cloche au-dessus de la galerie, remplie de roche éboulée, on a, par unité de surface de galerie :

$$H*d = (h+H)*d' \text{ (conservation de la masse de roche)}$$

soit en développant et regroupant :

$$H = h/(F-1)$$

La figure 2 représente la hauteur d'une telle cloche, formée au-dessus d'une galerie de 3 m de hauteur (valeur ordinaire dans la mine), pour différentes valeurs du coefficient de foisonnement F.

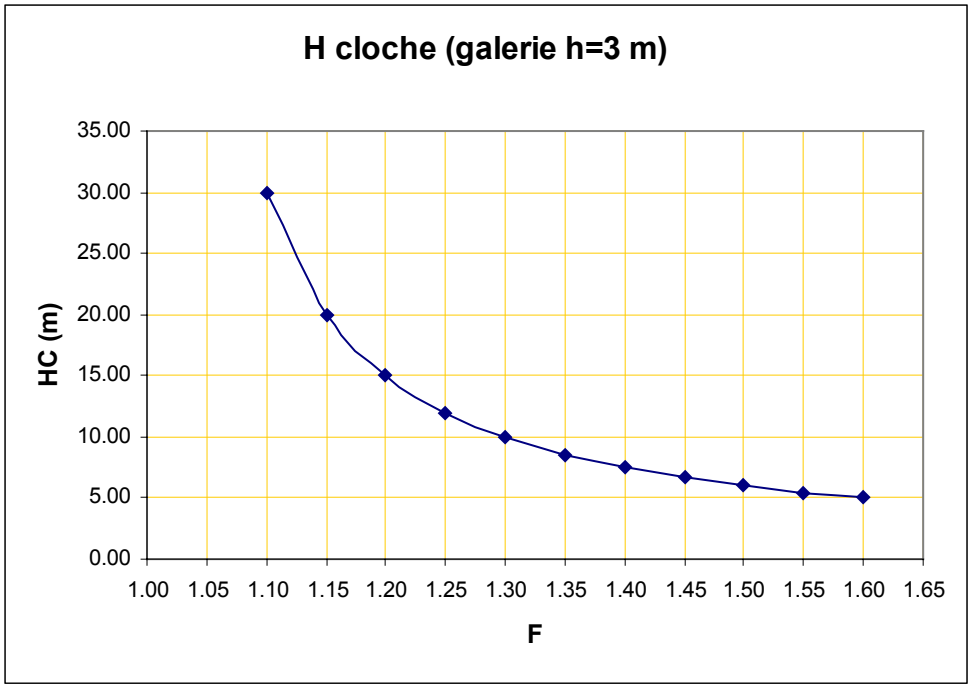


Figure 2 – Hauteur d'une cloche d'effondrement au-dessus d'une galerie en filon ou en zone de faille

Dans le matériau considéré ici, une valeur minimale de F de l'ordre de 1,2 est vraisemblable. Cela signifie que si une cloche d'effondrement se forme au-dessus d'une galerie en filon ou dans une zone de faille, sa hauteur sera de l'ordre de 15-20 m au plus. Cela signifie que seules les galeries de ce type les moins profondes seront susceptibles d'engendrer un effondrement localisé se propageant jusqu'en surface.

Cette situation ne sera que peu modifiée par l'ennoyage de la mine.

6. Evaluation des aléas en surface

L'application des considérations théoriques exposées précédemment au contexte de cette exploitation minière, illustrées par les 16 profils transversaux, permet d'avancer les conclusions suivantes :

6.1. Galeries hors filon

Elles sont constituées essentiellement par la descenderie située dans le mur du filon, dans les schistes noirs ou dans les schistes verts plus en profondeur.

Compte tenu de la très faible densité des galeries selon les différents profils transversaux, le risque de remontée de vide en surface peut être considéré comme négligeable d'une façon générale.

Au franchissement de zones localement de faibles caractéristiques mécaniques (zones faillées en particulier), la création éventuelle d'une cloche d'effondrement a une très faible probabilité de remonter en surface ; il faudrait en effet, que ce facteur soit conjugué à une épaisseur de couverture de l'ordre de 20 à 25 m.

Cette configuration géométrique existe dans la zone de l'entrée de la descenderie où les caractéristiques du massif rocheux sont de qualité correcte, les schistes apparaissant plus ou moins gréseux et silicifiés. Un comblement de la galerie sur une vingtaine de mètres à partir de l'entrée y est néanmoins recommandé par sécurité, compte tenu des effets de bords difficiles à apprécier sur le long terme.

6.2. Voies dans le filon

Les remontées de vide sont susceptibles d'intercepter la surface du sol si le toit de la galerie (voie de tête) est situé à une profondeur de l'ordre d'une vingtaine de mètres.

- On peut estimer que cet aléa est susceptible de se produire dans le secteur du profil 5450 où le phénomène de remontée est engagé à l'altitude +530 NGF. Il ne reste au-dessus de cette galerie qu'une quinzaine de mètres de couverture pour intercepter le sol. On peut estimer néanmoins que les effets à la surface seront limités et pourraient se traduire par un affaissement du sol affectant une bande de terrain d'une quinzaine de mètres de largeur au plus.

- Ce phénomène de remontée de vide est également constatable en deux secteurs au droit de la voie de tête dans le filon, à +510 (chantier 01-24) comprise entre les abscisses 5310 et 5380 ; la hauteur de filon en place entre la voie et la surface est comprise entre 20 m (extrémité Ouest) et plus de 30 m (extrémité Est). L'aléa de remontée de vide en surface a donc une faible probabilité d'occurrence, sauf en extrémité Ouest où la probabilité d'apparition est moyenne, mais assez localisée.

Pour ces trois secteurs, il faut considérer que la probabilité de l'aléa de création de fontis en surface du sol est moyenne à forte dans les deux secteurs de couleur orange figurés sur la première coupure de plan en annexe F. Sur ces deux zones, on peut estimer que la remontée de vide dans le filon peut se produire dans les mêmes conditions que pour les trois remontées de vides constatées (taches rouges sur ce plan).

Ces remontées de vides s'effectuent en général selon un conduit, au départ, et peuvent s'étendre ensuite linéairement selon le filon ainsi que transversalement. L'affaissement du sol induit par la remontée de vide jusqu'en surface est évidemment fonction de l'extension latérale du phénomène ; on peut estimer qu'à la création du fontis, son extension latérale sera assez limitée et l'affaissement correspondant sera susceptible d'atteindre certainement plusieurs mètres (3 à 5 m possibles en première approche), d'autant que les matériaux schisteux altérés aux épontes du filon pourront s'effondrer avec un coefficient de foisonnement assez faible.

- Dans les autres secteurs de l'exploitation, les caractéristiques géométriques et topographiques des galeries permettent de considérer que la probabilité d'aléa de remontée de vide en surface est tout à fait négligeable.

On peut en particulier souligner que :

- concernant ***les bâtiments de la ferme du Burc*** au Nord, les bâtiments du hameau de la Bourrelié à l'extrémité Est de l'exploitation, il n'y aura pas d'incidence en surface en cas d'effondrement au-dessus de certaines galeries en filon ou en zone de faille. En effet, si ces effondrements ont lieu en profondeur, la hauteur de la cloche sera très limitée par rapport à la distance les séparant de ces constructions ; si ces effondrements sont proches de la surface, ils ne pourront pas avoir d'impact latéralement sur ces habitations, compte tenu de la distance les séparant ;

- concernant ***le bâtiment de bureaux situé sur le carreau***, sa localisation au mur du filon exploité et la profondeur (environ 40 m) de descenderie au profil 5500 hors zone de faille, permettent d'estimer que la probabilité d'effondrement en surface sera également très faible.

Observations sur l'utilisation du rapport

Ce rapport, ainsi que les cartes ou documents, et toutes autres pièces annexées constituent un ensemble indissociable ; en conséquence, l'utilisation qui pourrait être faite d'une communication ou reproduction partielle de ce rapport et annexes ainsi que toute interprétation au-delà des indications et énonciations d'ANTEA ne saurait engager la responsabilité de celle-ci.

Annexe A

Plan de situation générale du site
(extrait agrandi au 1/5 000 de la carte IGN)

(1 page)

Annexe B

Dossier photographique

(5 pages)

Annexe C

Carte de l'exploitation et localisation des profils transversaux Nord-Sud
(éch. 1/2 000)
(document SOGEREM)

(2 pages)

Annexe D

Vue frontale synthétique Ouest-Est
de l'exploitation minière avec position des profils transversaux Nord-Sud

(2 pages)

Annexe E

Cahier des profils transversaux Nord-Sud
(éch. 1/1 000)
(document SOGEREM)

(14 pages)

Annexe F

Plan de localisation
des zones d'aléa moyen à fort d'effondrement en surface
et des dispositifs de contrôle topographique proposés

(2 pages)

Fiche signalétique

Rapport

Titre : **Mine souterraine du Burc – Paulinet (81). Evaluation géotechnique des aléas d'effondrement en surface suite à l'arrêt de l'exploitation.**

Numéro et indice de version : A 39809 /B
Date d'envoi : Novembre 2005 Nombre d'annexes dans le texte : 6
Nombre de pages : Nombre d'annexes en volume séparé : /
Diffusion (nombre et destinataires) : *Fichier pdf client*
1 ex. service de documentation *1 ex. (unité)*

Client

Coordonnées complètes :
SOGEREM
Bois des Vergnes
81120 MONTROC

Téléphone : 05 63 79 29 62
Télécopie : 05 63 55 74 06

Nom et fonction des interlocuteurs : *M. J.F. DURAND-SMET*

ANTEA

Unité réalisatrice : BOR
Nom des intervenants et fonction remplie dans le projet :
J.M. BONNART, chef de projet, auteur
Avec la participation de B. CÖME

Secrétariat : (signature)

Qualité

Contrôlé par : J. PIRAUD (signature)
Date : *février 2006 – Version B*

N° du projet : TOUP050182
Références et date de la commande : *JFDS/R/05/5375 du 27 octobre 2005*

Mots-clés : Tarn – mine souterraine – stabilité

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE

DES MINES DE PARIS

CENTRE D'INFORMATIQUE GEOLOGIQUE

LABORATOIRE D'HYDROGEOLOGIE MATHEMATIQUE

Téléphone : 01 64 69 47 02
Telefax : 01 64 69 47 03

35 rue Saint-Honoré
77305 FONTAINEBLEAU Cedex
FRANCE

Fontainebleau, le 7 octobre 2003

Société Sogerem

État actuel et évolution prévisionnelle du régime et de la qualité des eaux issues de l'exploitation de fluorine du Burg

E. LEDOUX, J.-M. SCHMITT

LHM/RD/03/28

SOMMAIRE

Sommaire **1**

Liste des figures **3**

Liste des tableaux **4**

1. Introduction **6**

1.1 Cadre et objectifs 6

1.2 Architecture du rapport 6

2. Situation du gisement **8**

2.1 Cadre régional 8

2.2 Le gisement du Burg 8

2.3 Minéralisation 8

3. État hydrochimique de l'exploitation **10**

3.1 Collecte des données et analyses 10

3.2 Revue des observations et données disponibles 12

3.2.1 Données anciennes 12

3.2.2 Étude Sogerem de 2002 12

3.3 Prélèvements réalisés dans le cadre de la présente étude et résultats analytiques 14

3.3.1 Localisation des prélèvements 14

3.3.2 Méthodologie 14

3.3.3 Résultats analytiques obtenus sur les eaux de mine 16

3.3.4 Résultats analytiques obtenus sur les eaux régionales et les eaux du carreau 20

3.3.5 Eaux des anciens travaux de Coutery 20

4. Étude thermodynamique des eaux **22**

4.1 Intérêt et méthode d'approche 22

4.2 Rappels sur le comportement du fluor dans les eaux 23

4.2.1 Principales propriétés chimiques du fluor 23

4.2.2 Solubilité du fluor dans les eaux superficielles 24

4.2.3 Phénomènes de complexation 26

4.2.4 Liaison avec les phénomènes de drainage acide 28

4.3 Thermodynamique et origine du chimisme des eaux prélevées 29
4.3.1 Les principaux types d'eau 29
4.3.2 Les eaux naturelles 29
4.3.3 Les eaux propres aux TMS 32
4.4 Fonctionnement hydrochimique actuel du site 35

5. Évolution probable du régime des eaux après arrêt de l'exploitation 37
5.1 Cadre hydrogéologique de l'exploitation 37
5.2 Données sur les eaux de mine 37
5.3 Les données d'exhaure 39
5.4 Étude de la remontée des eaux 41
5.4.1 Le modèle hydrogéologique 41
5.4.2 Évaluation des vides résiduels 41
5.4.3 Simulation de l'ennoyage, situation de référence 43
5.5 Simulation de la remontée des eaux, analyse de sensibilité 45

6. Prévisions relatives à l'évolution de la qualité des eaux 47
6.1 Qualité des eaux après fermeture des mines, aspects généraux 47
6.1.1 Période d'activité de la mine 47
6.1.2 Estimation de la qualité du remplissage initial 47
6.1.3 Période transitoire 49
6.1.4 Qualité des eaux à long terme 51
6.2 Prévisions relatives au remplissage initial de la Mine du Burg 51
6.2.1 Produits d'oxydation observés 51
6.2.2 Oxydation envisageable au cours de l'ennoyage et modèles d'eau du remplissage initial 52
6.2.3 Commentaires sur la qualité prévisionnelle du remplissage initial 53
6.3 Prévisions de l'évolution ultérieure de la qualité des eaux 55
6.3.1 Renouvellement des eaux 55
6.3.2 Méthode de simulation 55
6.3.3 Présentation des résultats 57
6.3.4 Commentaires sur les résultats obtenus pour les différents scénarios 57
6.4 Signification des résultats présentés 59
6.4.1 Comparaison avec les observations disponibles 59
6.4.2 Limitations de la méthode de simulation 61
6.4.3 Enseignements à tirer des simulations 62

7. Principales conclusions 64
7.1 Fonctionnement du système actuel 64
7.2 Prévisions concernant l'ennoyage de la mine et le débit de débordement 64
7.3 Qualité des eaux et impact à long terme 65
7.4 Suggestions pour la gestion environnementale du système 65

Références 66

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Situation du gisement du Burg. Topographie et points de prélèvements des eaux..7
Figure 2 : Géologie simplifiée et limite du bassin versant de la mine du Burg.....9
Figure 3 : Concentrations classées en fluor et corrélation avec Mn, Fe, Cu.....13
Figure 4 : Projection frontale des travaux miniers et des principales infrastructures.....15
Figure 5 : Solubilité totale du fluor dans l'eau de pluie en fonction du pH.....25
Figure 6 : Spéciation du fluor dans l'eau de pluie en fonction du pH.....25
Figure 7 : Solubilité du fluor dans l'eau de pluie en présence de fluorine seule.....27
Figure 8 : Solubilité du fluor dans l'eau de pluie en présence de fluorine et de kaolinite.....27
Figure 9 : Variation des indices de saturation de l'eau BF1 en fonction du potentiel redox..31
Figure 10 : Variation des indices de saturation de l'eau BF9 avec la fugacité de CO_2..... 31
Figure 11 : Variation des indices de saturation de l'eau BF11 en fonction du potentiel redox33
Figure 12 : Exhaure global mensuel de la mine en regard des précipitations.....39
Figure 13 : Emprise des chantiers et des infrastructures minières considérée pour le calcul des volumes résiduels.....40
Figure 14 : Courbe de remplissage de la mine dans les hypothèses de référence..... 44
Figure 15 : Modèle hydrogéochimique de remplissage des travaux miniers..... 48
Figure 16 : Évolution observée et modélisée des concentrations en zinc à l'exutoire des anciens travaux de Largentière.....49
Figure 17 : Simulation de l'évolution de la qualité des eaux. Scénario 1.....54
Figure 18 : Simulation de l'évolution du pH des eaux. Scénario 1.....54
Figure 19 : Simulation de l'évolution de la qualité des eaux. Scénario 2.....56
Figure 20 : Simulation de l'évolution du pH des eaux. Scénario 2.....56
Figure 21 : Simulation de l'évolution de la qualité des eaux. Scénario 3.....58
Figure 22 : Simulation de l'évolution du pH. Scénario 3..... 58
Figure 23 : Simulation de l'évolution de la qualité des eaux. Scénario 4.....60
Figure 24 : Simulation de l'évolution du pH. Scénario 4..... 61

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I : Analyses anciennes des eaux de l'exhaure et du carreau du Burg..... 10

Tableau II : Mine du Burg – caractéristiques des principales venues d'eaux..... 11

Tableau III : Coordonnées des principaux repères et points de prélèvement en surface au voisinage de la Mine du Burg..... 13

Tableau IV : Analyse des eaux des TMS du Burg. Campagne de mai 2003. (1/2)..... 17

Tableau V : Analyse des eaux des TMS du Burg. Campagne de mai 2003. (2/2)..... 18

Tableau VI : Analyse des eaux du carreau et des points d'eau régionaux. Campagne de mai 2003..... 19

Tableau VII : Compositions simulées des eaux de drainage acide pour différents types de minéralisations sulfurées..... 28

Tableau VIII : Exemple de spéciation du fluor dans les eaux acides chargées..... 33

Tableau IX : Types et débits (L/h) des venues d'eau identifiées au fond..... 38

Tableau X : Répartition des volumes résiduels par étage d'exploitation..... 42

Tableau XI : Variabilité du scénario de remplissage des travaux miniers en fonction du niveau des nappes de couverture et de la porosité des remblais..... 44

Tableau XII : Composition minéralogique des prélèvements solides réalisés sur les parements des TMS..... 50

Tableau XIII : Modèles d'eau du remplissage minier initial..... 53

Tableau XIV : Qualité prévisionnelle des eaux émises après abandon et en régime stabilisé par les TMS du Burg..... 59

1. INTRODUCTION

1.1 Cadre et objectifs

La Société Générale de Recherches et d'Exploitation Minières (SOGEREM) exploite dans le département du Tarn, sur le bassin versant du Dadou en amont du barrage de Rassisse, trois centres d'extraction de fluorine :

- au nord, la mine souterraine du Burg
- au sud-est, la mine à ciel ouvert du Moulinal
- et au sud-ouest, celle de Montroc.

Les installations de traitement du minerai sont situées au Burg pour ce qui concerne les produits grossiers concentrés par gravimétrie, et à Montroc pour ce qui est des matériaux fins traités par flottation.

Dans le cadre de la législation actuelle, l'exploitant est tenu de réaliser périodiquement un diagnostic environnemental de l'impact de ses activités. Les éléments ainsi rassemblés permettront la constitution progressive du dossier de fermeture ultérieur.

Le Centre d'Informatique Géologique d'ARMINES/École des Mines de Paris a été sollicité dans cet objectif, pour étudier l'état des lieux du régime et de la qualité des eaux issues de ces différents sites dans leur fonctionnement actuel, et aboutir à un pronostic de leur évolution future dans une perspective de réhabilitation après cessation de leur exploitation.

Compte tenu des problèmes particuliers liés aux exploitations souterraines et à ciel ouvert, nous avons proposé de découper l'étude en deux volets relatifs au Burg d'une part et à Montroc et au Moulinal d'autre part.

L'objectif de ce premier volet de l'étude est donc : (1) de faire le point sur la situation hydrodynamique et hydrochimique actuelle de l'exploitation du Burg ; (2) d'examiner les conditions d'ennoyage après arrêt des pompages ; et (3) d'évaluer, tant en débit qu'en qualité, l'exhaure naturelle qui s'établira dans les anciens travaux après ennoyage.

Une visite préliminaire des sites de Sogerem a eu lieu en janvier 2003. L'étude a débuté formellement en avril. Une mission sur place (E. Ledoux, J.-M. Schmitt) du 19 au 24 mai 2003 a permis la collecte des documents et données existantes et la réalisation de la campagne de prélèvements hydrochimiques nécessaire à l'étude. Le travail de synthèse et de modélisations exposé dans le présent rapport a été réalisé au C.I.G. de juin à août 2003

1.2 Architecture du rapport

Outre cette introduction, ce rapport comporte cinq parties respectivement consacrées à :

- la situation du gisement du Burg ;
- l'état hydrochimique de l'exploitation ;
- l'étude thermodynamique des eaux ;
- la prévision de l'ennoyage de la mine et du régime des eaux après arrêt de l'exploitation ;
- enfin à l'évolution prévisionnelle de la qualité des eaux émises par la mine.

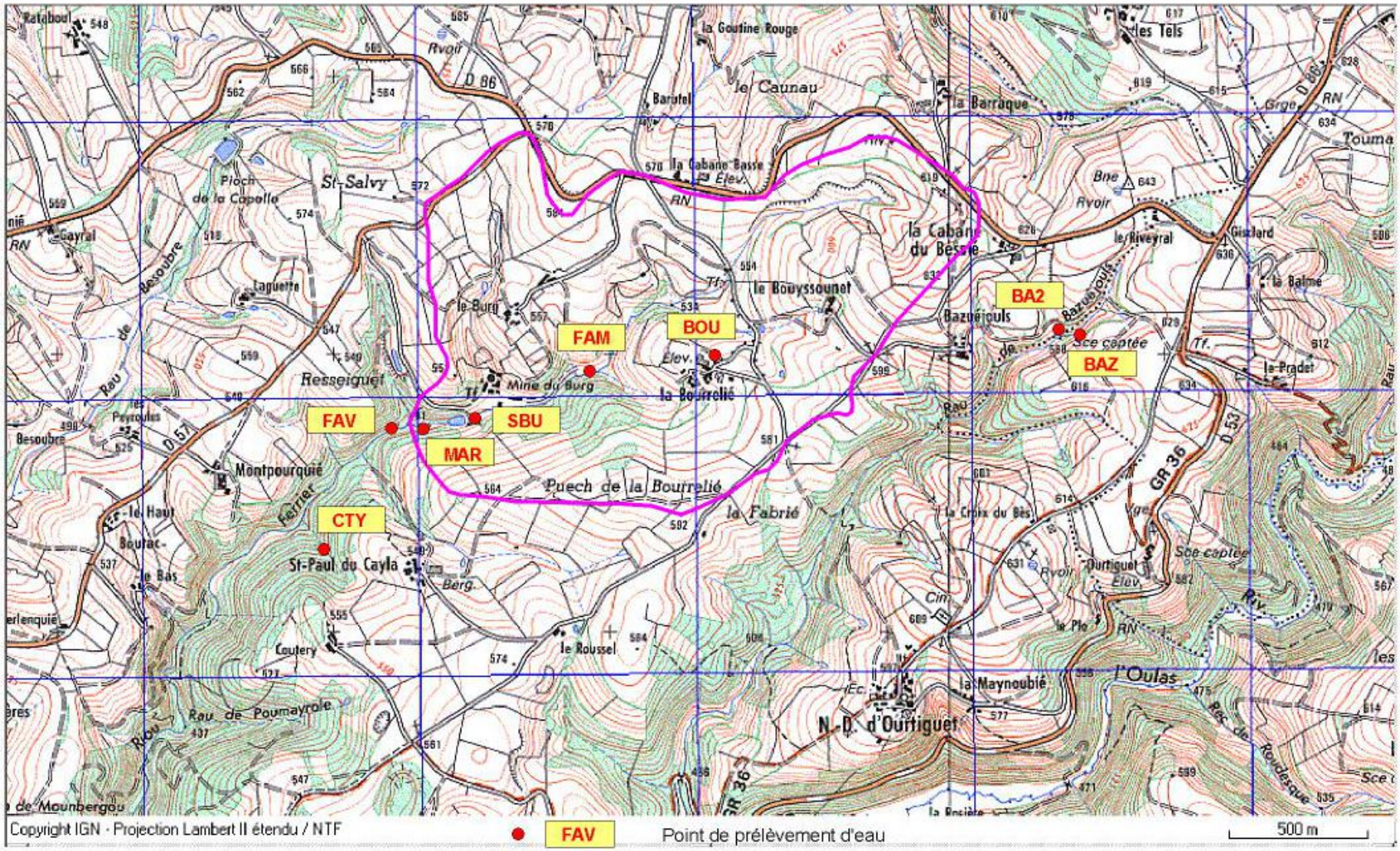


Figure 1 : Situation du gisement du Burg. Topographie et points de prélèvements des eaux
(fond IGN, feuille Alban 2342E *au 1/25 000)*

2. SITUATION DU GISEMENT

2.1 Cadre régional

Le gisement de spath-fluor du Burg est situé sur la commune de Paulinet, dans le département du Tarn, à 100 km à l'Est de la ville de Toulouse et 30 km d'Albi.

Le secteur est couvert par la carte topographique IGN *Alban* (2342E) au 1/25 000 (Figure 1) et par la carte géologique au 1/50 000^{e} *Réalmont* (n°959). Le relief est constitué par une surface haute d'altitude voisine de 600 m et faiblement inclinée vers le SW, entaillée de plus de 100 m par des vallées NE-SW. La région est drainée par le ruisseau du Riou Ferrier, affluent de l'Oulas, lui-même affluent du Dadou en amont de la retenue de Rasisse.

Le substratum géologique est constitué par les « Schistes de l'Albigeois », une série complexe de schistes, grès et quartzites paléozoïques épimétamorphiques d'âge cambro-ordovicien probable [1]. Ce substratum paléozoïque est recouvert, essentiellement sur les surfaces hautes et les interfluves, par d'anciennes alluvions sablo-argileuses et des formations superficielles résiduelles attribuées au Pliocène (Figure 2).

2.2 Le gisement du Burg

Le gisement de spath-fluor du Burg appartient avec les gisements de Mont-Roc et du Moulinal au sud, et les anciens gisements de Trébas et Padiès au nord, à la province à fluorine de l'Albigeois.

Le filon du Burg est porté par une fracturation de direction générale N110° avec un pendage moyen vers le nord de 60° environ. La puissance de la caisse filonienne varie de 0 à 10 mètres avec une valeur moyenne de 3,5 mètres. Son extension reconnue (Figure 2) est d'environ 1 km dans le sens latéral, et de 240 m dans le sens vertical [2]. Les travaux récents ont mis en évidence une extension ouest du filon, décalée de 30 m vers le sud par un accident sub-méridien (faille ouest).

La mine du Burg a été mise en exploitation en 1953. La production annuelle a atteint 60 000 t en 1999. L'exploitation se fait par tranche montante remblayée et accessoirement par remonte et recoupe [2]. La production totale du site s'élevait à environ 1,2 Mt de spath-fluor fin 2002.

2.3 Minéralisation

La minéralisation du Burg se présente sous forme filonienne, mode de gisement qui est d'ailleurs le plus courant pour la fluorine, avec les amas stratiformes [12]. Le minerai est constitué de fluorine massive (teneur en CaF_2 jusqu'à 95%), accompagnée de quartz, sidérite et chalcopyrite [2].

Outre ces minéraux 'primaires', un certain nombre de minéraux d'altération complètent la paragenèse comme nous le verrons plus loin : il s'agit essentiellement d'oxy-hydroxydes de fer, et de minéraux cuprifères (bornite, carbonates, sulfates…).

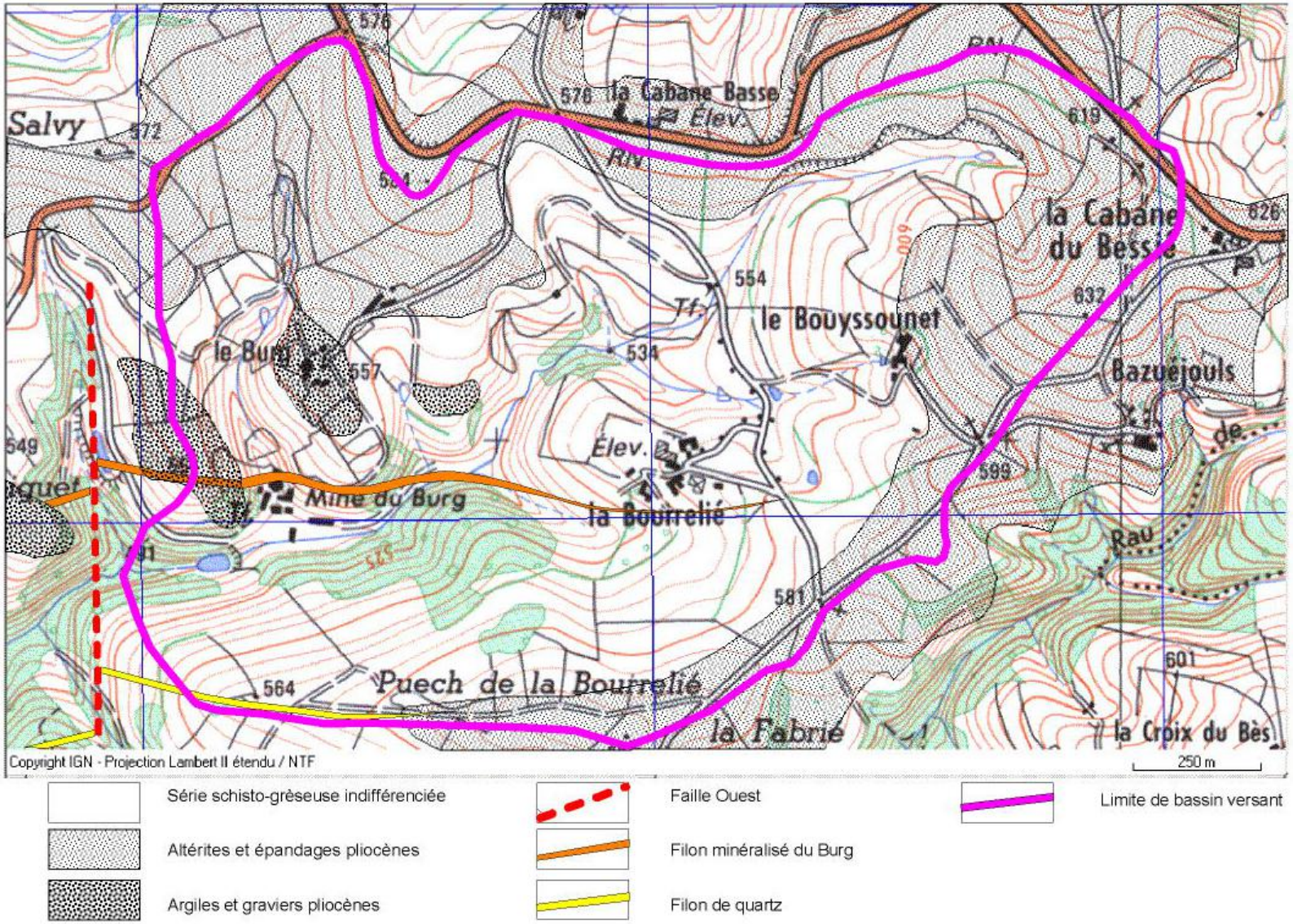


Figure 2 : Géologie simplifiée et limite du bassin versant de la mine du Burg
(fond IGN, feuille Alban 2342E *au 1/25 000, contours géologiques d'après documents Sogerem et feuille Réalmont au 1/50 000)*

3. ÉTAT HYDROCHIMIQUE DE L'EXPLOITATION

3.1 Collecte des données et analyses

Lorsque la présente étude a été entreprise, deux types de données hydrochimiques étaient disponibles pour la mine du Burg : (i) quelques données anciennes (1976-1986) relatives essentiellement à la qualité de l'exhaure ; (ii) un relevé des venues d'eaux en mine issu d'une reconnaissance systématique réalisée par Sogerem en 2002 [3].

Toutes ces données préexistantes sont précieuses, mais présentent toutefois un défaut majeur, celui d'être extrêmement incomplètes sur le plan des analyses chimiques : outre pH et conductivité électrique, seules quelques concentrations (fluor, quelques métaux, parfois sodium…) ont été systématiquement mesurées, ce qui ne fournit pas une image suffisante de la balance ionique et de l'état thermodynamique des eaux.

Pour cette raison, une campagne complémentaire de prélèvements des eaux du fond et des eaux superficielles a été réalisée. Ces nouveaux échantillons ont fait l'objet d'une analyse complète au laboratoire du CIG à Fontainebleau. Les anions et cations majeurs ainsi que la silice ont été analysés par chromatographie ionique (appareil DIONEX DX 500) et les concentrations en métaux ont été déterminées par spectrométrie d'absorption atomique (appareil Aanalyst 300 flamme/four de PERKIN ELMER), selon les méthodes habituelles du laboratoire [4, 5].

Tableau I : Analyses anciennes des eaux de l'exhaure et du carreau du Burg

Échantillon	**PCUK**	**PCUK**	**AEMP2**	**AEMP4**	**AEMP5**	**AEMP**
Localisation	Exhaure mine	Exhaure mine	Exhaure mine	Ferrier amont	Ferrier aval	Exhaure mine
Date	09/1976	02/1978	04/1984	04/1984	04/1984	10/1986
Temp en °C	-	-	17,8	8,2	15,2	-
pH	6,5	-	7,3-7,8	6,5-6,9	7,4-7,8	7,4
Cond en µS/cm	-	-	260	70	216	188
M.E.S. mg/L	-	-	359	4	314	<5,0
O_2 dissous mg/L	-	-	7,6	9,2	8,3	-
F^- mg/L	3	8	3,4	0,08	2,7	4,0
SO_4^{--} mg/L	-	-	23,7	<1	22,8	-
Na^+ mg/L	-	-	4,5	3,8	4,7	-
Fe mg/L	-	-	<0,1	<0,1	0,1	2,3
Cu mg/L	<0,05	0,5	0,022	0,005	0,008	0,19
Pb mg/L	<0,5	<0,01	<5	<5	<5	-
Zn mg/L	<0,05	0,1	-	-	-	-
Mn mg/L	-	-	1,7	<0,05	1,2	1,4

Tableau II : Mine du Burg – caractéristiques des principales venues d'eaux
(d'après étude Sogerem[3]*)*

N° point	chantier	caractérisation	débit corrigé L/h	T °C	pH	EC mS/cm	F mg/L	Cu mg/L	Mn mg/L	Fe mg/L
4	220-C	rigole amont-décanteur	-	19,3	7,2	0,7	6,45	2,24	6,70	10,85
5	220-C	albraque après flocul.	-	18,9	6,92	0,7	7,95	0,12	8,95	0,85
7	220-C	rigole	34560,0	20,6	6,97	0,5	5,60	0,23	6,39	10,77
8	220-E	écoul. sol/cheminée	36000,0	20,6	6,96	0,2	2,83	0,05	1,61	5,37
13	220-C	rigole/N100, 80N	92,2	16,1	3,45	2,2	42,20	1,73	62,95	10,93
18	220-E1	sondage 92	1440,0	20,4	6,49	0,2	2,97	0,02	1,34	2,47
23	170-C	puisard avant albraque	288,0	18,1	7,94	0,3	5,30	0,53	2,55	1,58
26	170-E1	montage	48,0	14,0	6,15	0,8	13,40	1,17	15,92	0,44
29	170-E2	au bout près soufflerie	960,0	-	6,93	0,2	4,82	0,21	1,12	1,87
30	220-O1	mur filon ?	18,4	-	6,8	1,1	7,75	0,37	6,38	0,02
31	220-O1		36,0	16,2	7,65	1,9	14,20	0,03	0,10	0,04
32	220-O1	montage	72,0	15,1	7,81	1,7	18,70	0,05	0,17	0,06
33	170-C	ruissellement montage	105,6	14,0	3,53	1,9	52,40	19,51	76,66	11,26
35	170-O1	cheminée et montage	115,2	14,2	5,94	0,8	16,60	4,03	12,01	0,72
38	170-O1	barreau aérage	110,8	17,0	5,09	1,8	73,00	152,97	60,05	0,94
41	220-O1	galerie stockage boue	76,8	16,2	7,47	0,6	5,15	0,31	0,92	5,30
42	200-O2	N170, 65S	32,4	16,5	7,74	0,2	3,66	0,02	0,01	0,01
43	220-O2	descenderie,N130, 70S	84,0	16,5	7,72	0,2	7,35	0,10	0,50	3,22
45	235-O2	filon O2-235	57,6	17,1	7,2	0,5	3,23	0,10	0,01	0,01
46	235-O2	descenderie , sondage	172,8	17,4	7,26	0,5	2,98	0,05	0,24	0,09
58	54-O1	descenderie, diaclases	13,7	14,4	5,12	1	14,50	0,07	32,48	18,25
59	54-O1	descend., sond.S39	19,2	12,7	6,26	0,9	6,00	0,51	5,21	1,66
61	54-O1	descenderie, sond.S40	7,7	-	6,31	0,3	3,23	1,23	2,87	0,34
63	54-C	descenderie	0,5	-	3,7	3	113,00	214,55	209,07	15,35
66	54-O1	descenderie	2,6	13,8	7,44	0,8	4,75	1,96	12,37	15,02
69	54-O1	descenderie	11,5	12,5	6,36	0,1	9,65	0,05	0,75	1,48
70	24-O1	descenderie	12,0	11,9	5,57	0,1	9,93	5,73	1,03	1,20
72	54-C	descend., N60-N70 ?	2,6	14,0	2,44	1	20,00	3,66	10,80	70,37
73	54-C	descenderie, N10	5,8	15,7	6,77	0,2	3,89	0,01	1,35	0,99
74	54-E1	descenderie	2,9	-	6,69	0,3	3,47	0,01	2,87	0,13
75	54-E1	descenderie	0,5	-	7,47	1,2	6,35	0,01	5,62	0,72
76	54-E1	descenderie	5,8	14,5	6,6	0,6	6,75	0,01	1,46	0,10
79	100-C	descenderie	10,6	14,0	7,14	0,8	3,47	0,01	12,32	1,76
82	100-C	desc., N100. Verticale	169,4	16,9	4,38	0,2	68,50	6,77	65,25	0,03
83	100-C	descenderie	9,0	13,8	3,12	1,8	49,80	11,38	57,43	7,80
84	170-C	montage	13,1	13,9	2,71	3,3	189,00	15,18	257,81	38,89
85	170-C	montage / Cu	88,2	14,0	6,3	1,4	25,00	2,61	8,74	1,65
86	170-C	montage	18,0	14,0	3,84	2,5	92,50	28,47	156,27	1,65
88	100-C		7,7	13,5	5,77	1,2	22,30	0,26	34,06	16,45
89	54-E1		4,6	12,3	4,88	0,4	1,34	0,01	11,96	6,45
92	135-O1	E-W	2,3	15,2	5,48	1,4	62,00	35,21	85,18	0,09
93	135-O1	écoulement sol	38,4	-	3,77	3,8	206,00	368,30	160,33	16,29
94	100-O1		16,0	14,1	5,59	1,3	45,40	14,24	21,16	33,10
95	100-O1	descenderie, E-W	4,8	15,0	2,72	1,8	72,50	32,84	44,94	42,23
96	100-O1		n.d	n.d	n.d	n.d	90,00	>400	28,00	165,00
97	100-O1	N135	5,8	14,6	7,09	0,2	4,57	1,03	0,40	3,27
98	100-O1	descenderie, rigole	7,2	14,0	4,95	2,4	73,00	125,58	45,02	60,87
101	200-E1	sondage	288,0	19,0	6,83	0,2	3,40	0,01	1,44	1,80
103	200-E1	mur filon ?	0,6	18,5	6,63	0,9	6,90	36,71	32,19	7,60
104	200-E1	pompe	864,0	19,0	7,18	0,2	3,07	24,03	1,54	50,10
105	54-C	flaque	0,5	11,0	2,65	2	90,00	26,30	27,43	164,78
106	100-O1	montage	15,8	13,7	5,33	0,8	31,60	24,48	6,97	0,06
107	100-O1		480,0	13,2	6,61	0,5	11,80	1,19	0,82	0,14
109	135-E1	écoulement sol	36,0	13,0	6,19	0,8	13,60	2,01	17,52	6,96
110	100-C	sortie tuyau	720,0	13,7	6,16	0,5	11,50	1,08	7,81	2,59
112	235-C	bougnou, rigole	32,9	14,9	7,75	0,3	2,18	0,09	0,63	8,67

3.2 Revue des observations et données disponibles

3.2.1 Données anciennes

Les données anciennes relatives aux eaux du Burg sont rassemblées dans le Tableau I. Les eaux de l'exhaure ont été prélevées en 1976, 1978, 1984 et 1986. Le pH paraît stabilisé autour de 7-7,5, et la conductivité est de l'ordre de 200 µS/cm.

Parmi les métaux dosés, aucun ne présente de concentration dissoute que l'on puisse considérer comme préoccupante. Seul le fluor excède en fait de façon constante la norme de potabilité (1,5 mg/L). Les concentrations actuelles de l'exhaure (2,6 mg/L en mai 2003, cf ci-dessous) ne semblent pas significativement différentes de ces valeurs anciennes.

Outre les eaux d'exhaure, le Tableau I fournit deux analyses des eaux du Ferrier, en amont et en aval des rejets. Ces deux analyses permettent d'apprécier l'impact de l'exploitation qui se caractérise essentiellement par une élévation très modérée du pH et de la charge des eaux (élévation banale pour tout apport d'eaux souterraines), par un certain marquage en manganèse, et surtout comme on pouvait s'y attendre, par une augmentation de la concentration en fluor qui ne dépasse cependant pas les 3 mg/L. Le flux massique moyen en fluor au niveau du rejet après traitement est évalué actuellement à 10 kg/j [6].

3.2.2 Étude Sogerem de 2002

Dans le cadre de cette étude (travail de stage de maîtrise de Vivien Ringuedé), toutes les venues d'eaux visibles et accessibles au fond ont été caractérisées (trous de sondage, fractures, égouttures de chantier, …) et localisées. Elles ont fait l'objet d'une évaluation du débit, de mesures *in situ* (température, pH, conductivité électrique), et dans la mesure du possible d'un prélèvement d'échantillon. Le laboratoire de la Sogerem à Mont-Roc a réalisé sur ces prélèvements le dosage du fluor, du cuivre, du fer et du manganèse.

Le Tableau II résume les données relatives aux principales venues d'eau (débits mesurables). Ces résultats révèlent une grande variabilité de la nature chimique des eaux, avec localement des eaux fortement acides (pH<4, F~200 mg/L) et des charges totales élevées (conductivité électrique > 3 mS/cm). Ce chimisme particulier apparaît lié à la présence de structures drainant des eaux d'origine plutôt superficielle, et à certaines zones remblayées.

Les pH faibles et les fortes conductivités sont fortement corrélés avec les concentrations élevées en fluor (qui varient de moins de 2 à plus de 200 mg/L), en fer (0,01 à près de 165 mg/L), en manganèse (0,01 à plus de 250 mg/L), et en cuivre (0,01 à plus de 350 mg/L). La corrélation entre fluor et métaux est bien illustrée par la Figure 3 (concentrations classées en fluor), tirée du rapport Sogerem [3].

L'essentiel du débit (près de 90%) provient toutefois des niveaux profonds de la partie est du gisement (venues référencées 7 et 8, Tableau II), et correspond à des eaux faiblement basiques et peu chargées. Ceci permet d'expliquer la bonne qualité globale des eaux d'exhaure.

Bien qu'étant incomplets sur le plan hydrochimique, les résultats de cette reconnaissance exhaustive ont permis en tout cas de guider nos propres prélèvements, et nous ont été d'une aide très précieuse pour la suite de ce travail.

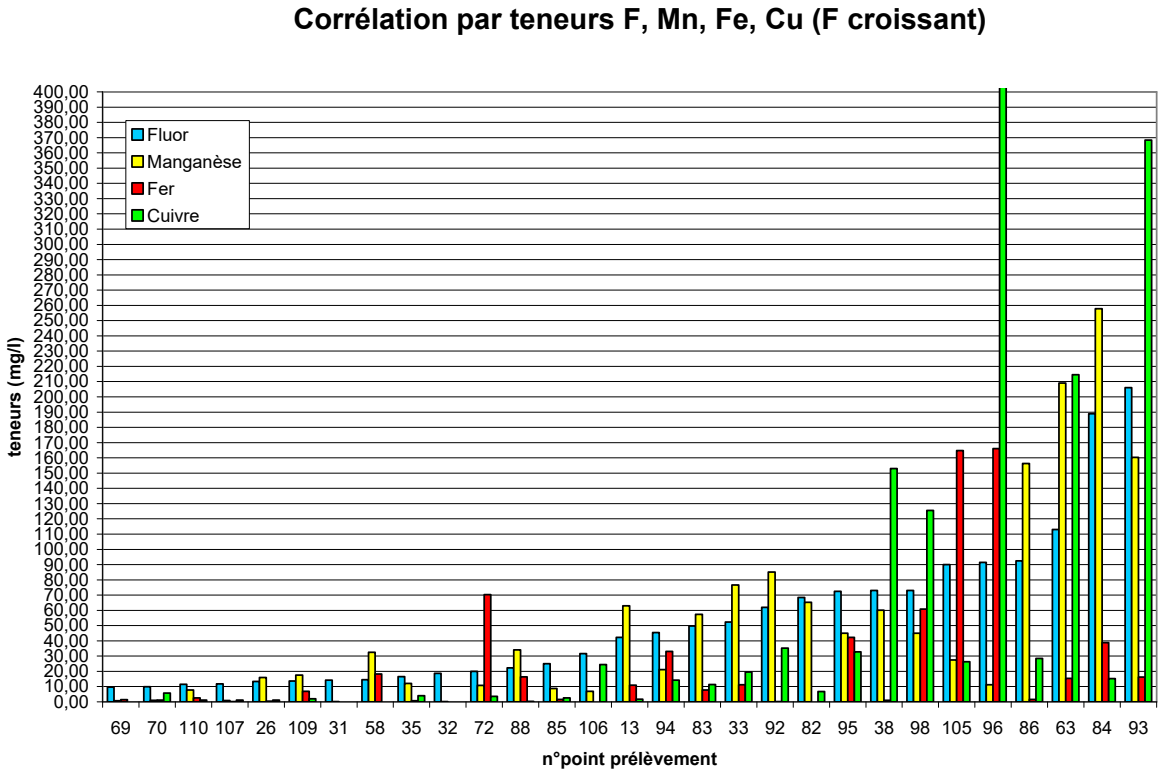


Figure 3 : Concentrations classées en fluor et corrélation avec Mn, Fe, Cu
(d'après étude Sogerem[3]*)*

Tableau III : Coordonnées des principaux repères et points de prélèvement en surface au voisinage de la Mine du Burg
(Coordonnées GPS Mercator Transverse Universal fuseau 31, système WGS84)

Point GPS	Localisation	N° prélèvement	X (m)	Y (m)	Z (m NGF)
PBURG	chevalement du Burg	BS7	0452273	4858034	507
BA2	réservoir Bazuéjouls	BS5	0454287	4858188	587
BAZ	source Bazuéjouls	-	0454386	4858219	598
BOU	puits La Bourrelié	BS6	0453075	4858130	566
FAM	Ferrier amont	BS1/BS8	0452650	4858076	516
SBU	Ferrier sortie buse	BS9	0452183	4857918	503
FAV	Ferrier aval	BS2	0451918	4857893	498
MAR	marigot Ferrier	BS10	0451987	4857867	492
CTY	halde Coutery	BS3-BS4	0451655	4857460	491

3.3 Prélèvements réalisés dans le cadre de la présente étude et résultats analytiques

3.3.1 Localisation des prélèvements

Les nouveaux prélèvements réalisés en mai 2003 dans le cadre de la présente étude et destinés à l'analyse complète ont porté :

- sur les points d'eau régionaux donnant accès aux eaux souterraines (puits et captage) ;
- sur les eaux du carreau aux différents points importants du dispositif de gestion des effluents ;
- sur les eaux du fond, aux points jugés importants en terme de débit ou de gisement, d'après les résultats de l'étude Sogerem discutée ci-dessus.

La Figure 1, et le Tableau III fournissent la localisation et l'identification des prélèvements du carreau et des eaux souterraines régionales. Les prélèvements réalisés au fond sont localisés sur la coupe de la Figure 4.

3.3.2 Méthodologie

Les prélèvements ont été réalisés à l'aide d'un préleveur manuel de type 'bailer' pour les échantillons prélevés en puits, en recueillant les écoulements en flacons préalablement rincés pour la plupart des venues d'eau en mine, et par puisage direct pour tous les autres échantillons.

Dans les minutes suivant chaque prélèvement, une partie de l'échantillon brut est soumise, chaque fois que possible in situ, à un ensemble de mesures, suivant le protocole utilisé classiquement au C.I.G. Ces mesures comprennent :

- la mesure de température ;
- les mesures de pH et de Eh qui sont réalisées respectivement sur un pH-mètre METTLER TOLEDO MP 120 avec une électrode pH et sur un pH-mètre PORTAMESS™ GS4 avec une électrode Eh (Bioblock™) ;
- la mesure de conductivité électrique grâce à un conductivimètre portatif METTLER TOLEDO MC 126 ;
- le dosage de l'oxygène dissous (oxymètre de terrain à microprocesseur WTW oxi 196).
- la mesure de l'alcalinité (TAC), qui est réalisée sur le terrain par méthode titrimétrique à partir de 100 mL de la fraction filtrée de l'échantillon. Cette détermination n'est toutefois réalisable que pour les échantillons présentant un pH suffisant (> 5,5 environ). Le titrage est réalisé à partir d'un titrimètre HACH™. La solution est placée dans un erlenmayer sous agitation magnétique. On y ajoute une dose d'indicateur coloré (rouge de méthyl + vert de bromocrésol) qui confère à la solution une coloration verte. Cette solution est ensuite titrée par H_2SO_4 (1,6 N) jusqu'au virage au rose fuchsia (pH = 4,6).

L'autre partie de l'échantillon brut, destinée à l'analyse, est filtrée à 0,45 µm grâce à un filtre WHATMAN™ en nitrate de cellulose uni, non stérile, de diamètre 47 mm et un dispositif de filtrage NALGENE™ de 500 mL de capacité comprenant une pompe manuelle à dépression. Ce dispositif est couramment utilisé et recommandé (Norme ISO S667-2 et S667-3), et assure en principe un filtrage efficace avec une perturbation minimale de l'échantillon, contrairement à un filtrage par pression par exemple.

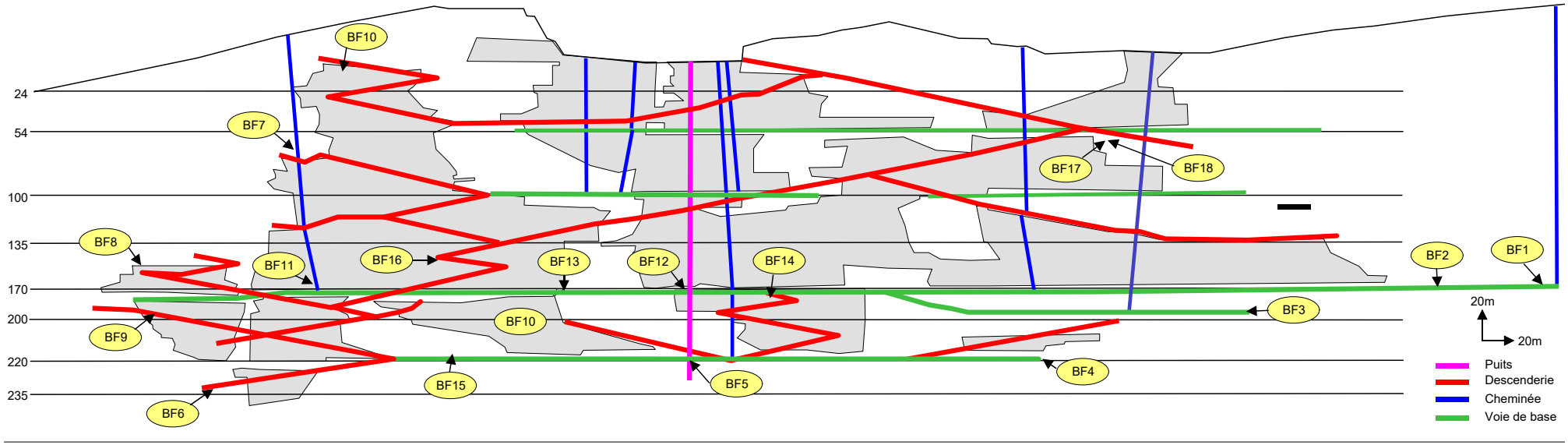


Figure 4 : Projection frontale des travaux miniers et des principales infrastructures
(en grisé : chantiers exploités et remblayés ; les repères numérotés indiquent la localisation des prélèvements d'eau effectués en mai 2003 modifié d'après documents Sogerem)

Directement après filtration, le prélèvement est scindé en 2 fractions, la première est destinée à l'analyse des anions, la seconde est préalablement acidifiée (1 mL/250 mL de $H_2NO_3^-$ Normapur à 65%) et destinée au dosage des cations et des métaux. Ces deux fractions sont conditionnées dans des flacons en polyéthylène de 125 mL à usage unique qui sont bouchés à vide d'air, puis conservés au froid (glacière de terrain puis réfrigérateur) avant analyse.

Nous présentons et commentons ci-dessous les résultats analytiques obtenus sur les prélèvements réalisés. Les caractéristiques et l'origine des principaux types hydrochimiques observés seront discutés ensuite dans la partie consacrée à la thermodynamique des eaux.

3.3.3 Résultats analytiques obtenus sur les eaux de mine

Les résultats analytiques sont présentés dans le Tableau IV et le Tableau V pour les prélèvements réalisés dans les travaux souterrains.

Comme l'étude Sogerem de 2002 l'avait déjà bien montré, les venues d'eaux observées dans les travaux miniers présentent une grande variabilité. La gamme de pH paraît toutefois ici plus réduite (5,4 à 7,9), ce qui peut s'expliquer par le fait que certains écoulements très faibles et probablement plus acides n'ont pas été échantillonnés lors de notre campagne. Les conductivités électriques s'étalent en revanche comme dans l'étude précitée, entre 250 et plus de 3000 µS/cm.

Les résultats confirment que les concentrations maximales en fluor et métaux (échantillons BF11, BF15, BF16) correspondent aux pH les plus faibles (< 6) et aux plus fortes conductivités. On observe de plus que ces charges élevées sont corrélées avec de très fortes concentrations en sulfate (1,5 à 2 g/L, à comparer avec un fond hydrochimique probable entre 15 et 50 mg/L pour les eaux régionales non marquées), et aussi en aluminium (plusieurs dizaines de mg/L).

La conjonction de ces paramètres (pH, conductivité, concentrations en sulfate et métaux) est révélatrice d'un phénomène typique de drainage acide. L'élévation concomitante des concentrations en fluor et aluminium est moins classique, mais nous reviendrons plus bas sur leur relation avec le processus de drainage acide.

Les eaux de mine qui présentent à la fois des pH élevés, les plus faibles conductivités, les plus faibles concentrations en fluor, sulfate et métaux, et les plus fortes alcalinités (échantillons BF1, BF8, BF9), proviennent des niveaux profonds, aux deux extrémités est et ouest de la mine. Ces prélèvements ne sont manifestement marqués par aucun phénomène de drainage acide, et paraissent représenter les eaux profondes du massif.

L'eau de l'exhaure a d'abord été prélevée au fond dans les albraques 170 et 220, avant traitement (BF14 et BF5). Ce sont des eaux à pH faiblement basique, de conductivité et d'alcalinité moyennes, mais riches en oxygène dissous. La concentration en sulfate atteint la centaine de milligramme, celles en fluor et manganèse s'élevant à 2-3 mg/L. Toutes les autres concentrations en métaux sont de quelques dizaines de microgrammes par litre au maximum. Hormis les valeurs élevées en O_2 dissous, qui indiquent une réoxygénation probable au sein des TMS, ces caractéristiques s'accordent évidemment avec la qualité moyenne (pondérée par les débits des différentes venues) des eaux du fond.

Tableau IV : Analyse des eaux des TMS du Burg. Campagne de mai 2003. (1/2)

Échantillon	BF1	BF2	BF3	BF4	BF5	BF6	BF7	BF8	BF9
Lieu	sondage cheminée est	sond. venue eau fer-malachite	extrémité du 200 en couronne	Sondage SG 3 - // au filon	Albraque avant traitement	écoul. boulon après faille	écoul. cheminée ouest en haut	écoulement chantier 170	Point 42 - flaque sous égouttage
Niveau/panneau	170	170	200	traçage 220	220	235 ouest	env. 67	O2-170	200
Temp en °C	18,2	18,1	18,8	20,8	19,6	16,8	14,8	15,3	15
pH	6,86 / 6,88	6,81	7,14	6,72	7,23 / 7,28	7,23 / 7,24	6,20	7,56	7,87 / 7,92
Eh /ENH en mV	230	306	327	220	390	393	454	352	331
Cond en µS/cm	297	255	327	279	480	828	757	508	381
TDS mg/L	*242*								*268*
O_2 dissous mg/L	3,4	3,7	8	2,6	9,1	5,14	9,1	8,5	8,8
HCO_3^- mg/L	126,88	85,4	85,4	100,0	87,8	207,4	0	168,4	142,7
F^- mg/L	0,46	2,01	2,00	1,68	3,42	2,41	9,15	1,69	0,49
Cl^- mg/L	2,84	3,78	4,62	3,53	4,14	6,21	5,47	7,16	6,34
NO_2^- mg/L	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,05	< 0,05	< 0,2	< 0,05	< 0,02
Br^- mg/L	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,05	< 0,05	< 0,2	< 0,05	< 0,02
NO_3^- mg/L	< 0,02	0,30	0,51	< 0,02	2,14	4,88	10,45	< 0,05	0,42
SO_4^{--} mg/L	15,52	32,37	76,83	33,77	126,4	265,0	357,6	89,62	42,28
Li^+ mg/L	< 0,01	< 0,01	< 0,02	< 0,01	< 0,02	< 0,02	< 0,1	< 0,02	< 0,01
Na^+ mg/L	0,98	2,46	3,25	2,26	4,63	5,96	4,01	3,06	1,36
NH_4^+ mg/L	< 0,01	< 0,01	< 0,02	< 0,01	< 0,02	< 0,02	0,25	< 0,02	< 0,01
K^+ mg/L	2,01	2,1	1,84	1,79	2,07	3,37	2,71	1,19	1,83
Mg^{++} mg/L	11,95	9,49	18,47	11,04	26,79	57,31	45,01	29,8	22,87
Ca^{++} mg/L	31,52	27,15	34,27	29,32	52,12	91,07	89,48	57,32	36,35
SiO_2(aq) mg/L	10,93	11,81	7,69	10,84	10,51	6,86	12,96	9,00	8,20
Fe mg/L	1,85	0,009	< 0,001	2,75	0,007	< 0,001	0,006	< 0,001	< 0,001
Cu mg/L	0,006	0,19	0,11	0,011	0,023	0,13	8,83	0,072	0,021
Pb mg/L	0,002	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
Cd mg/L	0,020	0,032	0,030	0,0018	0,001	<0,001	0,006	<0,001	<0,001
Zn mg/L	0,050	0,048	0,093	0,235	0,037	0,144	0,31	0,028	< 0,015
Co mg/L	< 0,002	0,012	0,014	0,025	0,023	0,019	0,16	0,003	0,002
Mn mg/L	0,68	1,40	1,29	1,65	3,42	0,034	5,14	0,14	0,004
Ni mg/L	< 0,002	0,018	0,070	0,067	0,101	0,36	0,29	0,031	0,019
Al mg/L	0,002	0,004	0,004	0,006	0,048	0,006	3,55	0,008	0,003
***f* CO_2**	*0,016*								*0,0015*

Tableau V : Analyse des eaux des TMS du Burg. Campagne de mai 2003. (2/2)

Echantillon	BF10	BF11	BF12	BF13	BF14	BF15	BF16	BF17	BF18
Lieu	chantier O1-24	pied cheminée ouest	égoutt. remblais C-170	égoutt. remblais O1-170	entrée albraque	égoutt. remblais O1-220	Point 55 descenderie	Point 54 en couronne	écoulement sondage
Niveau/panneau	env 0	170	170	170	170C	220	env. 139	traçage env 65	traçage env 65
Temp en °C	14,1	15,5	14,5	14,2	15,5	15,9	13,7	14,3	14,9
pH	5,64	5,43	6,75 / 6,78	6,8	7,56	7,01	5,9	6,29	6,21
Eh /ENH en mV	383	448	399	395	364	370	308	356	388
Cond en µS/cm	186	2330	1486	531	285	2950	3130	341	518
TDS mg/L									
O_2 dissous mg/L	6,5	9,2	9,1	9,3	9,1	8,9	7,1	9,3	9,5
HCO_3^- mg/L	13,4	12,2	57,3	13,42	97,6	200,1	28,1	11,0	14,6
F^- mg/L	0,60	63,71	14,37	11,14	1,83	20,48	54,48	3,87	5,46
Cl^- mg/L	7,23	9,76	9,72	6,96	4,08	12,28	11,52	5,05	5,2
NO_2^- mg/L	< 0,02	< 1	< 0,5	< 0,1	< 0,02	< 2	< 2	< 0,05	< 0,05
Br^- mg/L	< 0,02	< 1	< 0,5	< 0,1	< 0,02	< 2	< 2	< 0,05	< 0,05
NO_3^- mg/L	13,27	18,30	< 0,5	< 0,1	< 0,02	< 2	< 2	< 0,05	< 0,05
SO_4^{--} mg/L	39,82	1443	731,9	446,5	48,90	1554	1928	125,6	230,7
Li^+ mg/L	< 0,01	0,39	0,07	0,22	< 0,02	0,22	0,2	0,2	0,18
Na^+ mg/L	1,46	9,03	5,84	4,95	3,62	11,69	11,13	3,47	3,35
NH_4^+ mg/L	< 0,01	1,55	< 0,2	< 0,05	< 0,02	0,34	0,6	< 0,05	< 0,05
K^+ mg/L	1,18	4,43	4,93	3,46	1,39	7,13	5,5	2,17	2,14
Mg^{++} mg/L	5,31	198,3	94,73	57,73	12,92	271,8	217,9	17,86	30,31
Ca^{++} mg/L	9,98	193,9	217,0	113,2	27,29	388,3	398,6	31,26	43,16
SiO_2(aq) mg/L	8,25	13,96	12,96	12,84	10,26	8,48	7,73	6,65	7,62
Fe mg/L	1,18	0,80	0,037	< 0,001	< 0,001	< 0,001	86,07	0,58	0,007
Cu mg/L	4,69	135,6	1,19	0,95	0,20	0,062	0,21	0,15	0,44
Pb mg/L	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
Cd mg/L	<0,001	0,039	0,005	0,005	0,001	0,004	0,055	0,003	0,014
Zn mg/L	0,127	1,88	0,57	0,45	0,059	0,60	1,46	0,219	0,296
Co mg/L	0,029	1,21	0,038	0,062	0,028	0,002	1,03	0,034	0,030
Mn mg/L	1,04	55,06	7,21	8,84	2,20	0,061	69,16	4,48	5,86
Ni mg/L	0,068	1,92	0,33	0,33	0,072	0,42	1,66	0,159	0,26
Al mg/L	0,45	68,51	9,23	10,1	0,035	6,44	39,8	0,99	1,83
***f* CO_2**									

Tableau VI : Analyse des eaux du carreau et des points d'eau régionaux. Campagne de mai 2003

Echantillon	**BS1**	**BS2**	**BS3**	**BS4**	**BS5**	**BS6**	**BS7**	**BS8**	**BS9**	**BS10**	**Floculant**
Lieu	Ferrier amont carreau	Ferrier aval carreau	Coutery – débord. filon	Coutery – égoutt. remblais	Captage de Bazuéjouls	Puits ferme La Bourrelié	exhaure Burg à la buse	Ferrier amont - idem BS1	Ferrier sortie buse	Marigot Ferrier rive gauche	Floculant buse exhaure
Date											
Temp en °C	13,5	16,2	14,2	14,1	16,7	16,1	19,3	17,3	15,5	16,1	
pH	7,15	7,67	6,16	6,6	5,97	6,52	7,43	7,21	7,39	6,68	7,31
Eh /ENH en mV	358	347	375	288	391	373	347	342	337	356	
Cond en µS/cm	1545	437	81,6	122,2	175	422	477	161,1	272	225	542
TDS mg/L											
O_2 dissous mg/L	9,5	9,5	7	9,1	8,4	7,8	8,5	8,5	9,1	6,1	
HCO_3^- mg/L	32,9	91,5	29,3	31,7	20,7	37,8	93,9	30,5	41,5	50,0	79,3
F^- mg/L	0,057	2,68	1,08	1,38	0,04	< 0,05	2,64	< 0,02	0,95	1,52	3,6
Cl^- mg/L	9,54	5	4,37	4,92	11,37	39,64	4,67	10,06	8,3	4,89	22,78
NO_2^- mg/L	< 0,02	< 0,05	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,05	< 0,05	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,05
Br^- mg/L	< 0,02	< 0,05	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,05	< 0,05	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,05
NO_3^- mg/L	25,7	3,51	2,24	0,68	46,03	102,9	1,18	26,82	16,23	1,43	< 0,05
SO_4^{--} mg/L	3,61	124,5	7,59	11,79	1,19	4,05	132,7	3,91	49,03	45,94	136,70
Li^+ mg/L	0,67	0,2	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,02	0,1	< 0,01	< 0,02	< 0,02	< 0,2
Na^+ mg/L	2,51	5,4	1,29	1,33	2,42	17,1	5,05	5,73	6,12	3,5	17,378
NH_4^+ mg/L	< 0,01	0,15	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,02	< 0,04	< 0,01	0,1	0,04	1,45
K^+ mg/L	3,35	2,33	1,4	1,84	2,98	24,93	2,13	3,44	2,83	0,87	2,16
Mg^{++} mg/L	2,76	24,34	1,31	2,82	2,38	9,81	24,83	5,08	11,02	12,19	27,63
Ca^{++} mg/L	9,84	48,88	5,61	9,49	13,39	26,35	50,64	10,6	22,52	18,38	62,70
SiO_2(aq) mg/L	5,89	9,40	4,71	6,96	9,26	6,83	10,91	6,41	6,90	4,38	
Fe mg/L	0,024	< 0,001	0,027	1,00	< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,027	0,015	0,041	0,051
Cu mg/L	0,036	0,040	0,028	0,012	0,016	0,031	0,058	0,009	0,014	0,012	0,022
Pb mg/L	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
Cd mg/L	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
Zn mg/L	< 0,015	0,037	0,017	< 0,015	< 0,015	0,064	0,052	< 0,015	< 0,015	< 0,015	0,148
Co mg/L	< 0,001	0,018	0,002	0,003	< 0,001	0,002	0,026	< 0,001	0,007	< 0,001	< 0,001
Mn mg/L	0,021	2,58	0,33	0,43	0,007	0,010	3,41	0,036	1,00	0,62	0,25
Ni mg/L	< 0,001	0,084	0,004	< 0,001	< 0,001	0,006	0,121	< 0,001	0,027	< 0,001	0,060
Al mg/L	0,013	0,044	0,096	0,037	0,025	0,018	0,072	0,022	0,04	0,031	0,025
f CO_2											

L'exhaure a aussi été prélevé au pied du chevalement en surface (BS7, Tableau VI), à la sortie de la canalisation et en amont du tuyau d'ajout final de floculant. Ces caractéristiques restent semblables aux précédentes. Curieusement, le prélèvement de floculant que nous avons réalisé au même moment (« Floculant », Tableau VI) présente une composition apparemment très voisine.

3.3.4 Résultats analytiques obtenus sur les eaux régionales et les eaux du carreau

Les résultats analytiques sont présentés dans le Tableau VI pour les échantillons du carreau et les eaux régionales.

Les eaux de l'aquifère superficiel régional (Figure 1) prélevées au captage de Bazuéjouls et au puits de La Bourrelié (BS5 et BS6, Tableau VI) sont des eaux à pH 6-6,5 très fortement marquées en nitrate, pauvres en métaux, et à faible alcalinité. L'eau du Ferrier en amont du site (échantillons BS1 et BS8) est comme on peut le comprendre (puisqu'elle est essentiellement alimentée par cet aquifère), d'une nature très semblable.

L'eau du Ferrier a aussi été prélevée à la sortie de la buse en aval immédiat du carreau (BS9), de même que l'eau du 'marigot' (BS10) situé en rive gauche du lit du Ferrier en aval des bassins. Ces deux eaux sont de compositions voisines, et présentent, en comparaison avec les eaux du Ferrier en amont, un marquage sensible en sulfate (~50 mg/L), en fluor (1 à 1,5 mg/L), en manganèse (~1 mg/L) ainsi qu'un net enrichissement en calcium et magnésium. Il est très probable que ce marquage doive être attribué aux eaux du carreau lui-même, provenant pour partie des installations et du drainage des stocks de fluorine.

A l'aval de toutes les installations, le chimisme de l'eau du Ferrier (BS2) est évidemment marqué essentiellement par le rejet des eaux issues du traitement de l'exhaure, et enregistre une augmentation notable de l'alcalinité et là aussi des concentrations en sulfate, calcium, magnésium, de même qu'un marquage en fluor et manganèse (~2,5 mg/L).

3.3.5 Eaux des anciens travaux de Coutery

Nous avons prélevé, au cours de la même campagne, les eaux émises par l'ancienne exploitation du filon de fluorine situé au NW du hameau de Coutery, au sud du Burg. Deux échantillons (BS3 et BS4, Tableau VI) ont été collectés respectivement dans l'ancienne fosse noyée occupant la partie exploitée du filon, et à l'égoutture de l'ancienne halde constituée immédiatement en aval.

Ces deux eaux très semblables sont faiblement acides (pH~6.5) et modérément chargées. Par rapport aux eaux superficielles régionales, elles présentent un marquage net en sulfate, en fluor (1 à 1,4 mg/L), en manganèse (300 à 400 µg/L) et en aluminium (40 à 100 µg/L).

Ces prélèvements avaient été réalisés dans le but d'approcher la qualité des eaux de débordement émises par les exploitations anciennes de contexte et de minéralogie comparable à celle du Burg. On voit que la nature du marquage hydrochimique observé ici est *a priori* assez cohérente avec les observations faites au Burg.

Malheureusement la situation des anciens travaux de Coutery qui sont situés pratiquement dans un talweg et traversés par un écoulement superficiel qui vient se mêler

aux eaux de l’ancienne exploitation, n’apportent en fait qu’une réponse qualitative à cette question.

4. ÉTUDE THERMODYNAMIQUE DES EAUX

4.1 Intérêt et méthode d'approche

La mise en solution comme la fixation des métaux ou des éventuels polluants est gouvernée par les réactions chimiques intervenant entre les constituants de la phase solide et les eaux des aquifères. Ces interactions entre eaux et phases solides (à l'équilibre ou hors équilibre) ne peuvent être décrites et modélisées de façon fiable que grâce à des codes de calculs géochimiques, qui prennent en compte un nombre suffisant d'espèces chimiques et de phénomènes réactionnels (thermodynamique, cinétique, réactions d'oxydo-réduction, adsorption de surface, échange ionique, etc.).

L'utilisation d'un code géochimique permet d'effectuer une expertise thermodynamique complète des différents fluides récoltés, c'est-à-dire, (i) de déterminer leur état d'équilibre - ou de non-équilibre- physico-chimique et accessoirement de vérifier la validité de l'analyse (balance électrique), (ii) de calculer leur spéciation[1] complète, (iii) de déterminer l'ensemble des phases solides vis-à-vis desquelles ces eaux sont à l'équilibre (ces phases contrôlent donc certaines caractéristiques de la solution), sont sous-saturées (il y aura mise en solution), ou sont sursaturées (il y aura éventuellement précipitation, donc fixation de l'élément correspondant).

Le logiciel de calcul et de simulation thermodynamique mis en œuvre dans le cadre de notre étude est le code **CHESS** (**CH**emical **E**quilibrium of **S**pecies and **S**urfaces) mis au point au Centre d'Informatique Géologique par J. van der Lee [7, **http://chess.ensmp.fr**]. Ce logiciel [8] dispose des bases de données thermodynamiques aptes à traiter les problèmes hydrochimiques rencontrés au cours de l'étude.

Le calcul et la simulation thermodynamique ont donc été mis en œuvre ici pour :

1. préciser la spéciation et l'état d'équilibre des eaux prélevées ;
2. établir l'origine probable de leur chimisme ;
3. comprendre le fonctionnement actuel du système ;
4. simuler son évolution ultérieure.

Le fluor constituant le flux polluant majeur émis par le système, nous allons tenter ci-dessous de préciser, à partir des données bibliographiques, et de quelques simulations géochimiques simples, le comportement hydrochimique de cet élément, en préambule à l'étude thermodynamique des prélèvements réalisés.

---

[1] Les analyses d'eaux délivrées par les laboratoires indiquent uniquement des concentrations totales, par exemple en plomb. Le calcul de la spéciation permet d'établir les concentrations de **toutes** les espèces dissoutes contenant du plomb (Pb^{++}, PbF^{+}, $PbCl^{+}$, $PbCO3^{0}$, etc.). Seule cette spéciation caractérise réellement les espèces chimiques dissoutes et permet de prédire les minéraux susceptibles de se dissoudre ou de précipiter, donc les éléments qui vont être exportés, ou qui vont rester fixés dans la phase solide.

4.2 Rappels sur le comportement du fluor dans les eaux

4.2.1 Principales propriétés chimiques du fluor

4.2.1.1 Généralités

Élément chimique numéro atomique 9, le premier de la famille des halogènes, le fluor est le plus électronégatif et le plus réactif de tous les éléments chimiques. C'est un gaz faiblement coloré en jaune verdâtre dont l'odeur très forte et irritante rappelle celle de l'ozone [9].

Le fluor présente une extrême réactivité, due partiellement à sa grande électronégativité et à la relative facilité avec laquelle se dissocie la molécule F_2. Ceci lui procure des propriétés chimiques exceptionnelles : il réagit avec presque tous les éléments du tableau périodique, y compris certains gaz rares, ainsi qu'avec la plupart des substances organiques [10].

En raison de cette réactivité, et au même titre que les autres halogènes (chlore, brome et iode) [11], le fluor ne se rencontrera dans la nature qu'à l'état combiné, et pourra s'associer dans les solutions aqueuses à d'autres solutés pour former de nombreux complexes.

4.2.1.2 Le fluor dans l'écorce terrestre

Le fluor est un élément relativement abondant dans l'écorce terrestre [9], il paraît plus abondant que le cuivre par exemple. Il est présent sous forme de fluorure de silicium gazeux dans les fumerolles des volcans ainsi que dissous dans les eaux thermales. La source essentielle de fluor est constituée, par les fluorures naturels : en premier lieu, la *fluorine* (ou fluorite, ou spath-fluor), de formule CaF_2 ; ensuite la *cryolite* (Na_3AlF_6) ; et de façon plus exceptionnelle la *sellaïte* (MgF_2) et la *villiaumite* (NaF) [12].

Les caractères chimiques de l'ion *fluor* le font aussi se substituer aisément à O^{2-} et OH^- ; il s'incorpore ainsi aisément aux silicates hydroxylés, comme les micas et les amphiboles et aussi la topaze. Il peut se substituer à OH^- dans la *fluorapatite* ($Ca_5(PO_4)_3F$), minéral accessoire des roches éruptives et métamorphiques, et fréquent aussi dans les gîtes phosphatés sédimentaires [13].

4.2.1.3 Le fluor dans les eaux naturelles

Le fluor est généralement inclus, de façon plus ou moins arbitraire, en tant qu'ion majeur dans les analyses d'eaux naturelles. Pourtant, dans la plupart de celles-ci, les concentrations en fluor sont faibles, généralement inférieures à 1,0 mg/L [14], valeur que l'on peut comparer à la norme de potabilité, fixée à 1,5 mg/L. Dans les eaux de pluie, le fluor n'est habituellement pas détecté.

Alors que chlore, brome et iode, qui forment avec les éléments métalliques abondants des halogénures solubles, se sont concentrés dans les mers actuelles [11], la concentration moyenne en fluor de l'eau des océans est de 1,3 mg/L (ou ~ 1,3 g/tonne) seulement [14, 15]. Cette concentration est faible par rapport à sa valeur moyenne dans les roches (env. 600 g/t, [12]). Ceci s'explique par le fait que d'une part les fluorures naturels s'altèrent difficilement, et que d'autre part en mer, F précipite en CaF_2 (peu soluble) avec les carbonates, ou est fixé par les sédiments marins phosphatés [16].

Dans les eaux souterraines issues de sources ou de puits de pompage, Hem [14] rapporte des concentrations le plus souvent inférieures à 1 mg/L pour des charges totales dissoutes inférieures à 1 g/L. Des concentrations de plusieurs mg/L, approchant la saturation avec la fluorine, sont observées plus rarement dans certains aquifères sédimentaires ou volcaniques où la présence de ce minéral est probable.

Les concentrations les plus élevées observées dans les eaux naturelles (30 à 70 mg/L) correspondent presque toujours à des eaux de nappe très *alcalines* (pH ≥ 9). Beaucoup plus exceptionnellement, des concentrations du même ordre de grandeur ont été relevées dans des eaux *acides*, généralement d'origine volcanique. Nous avons nous-mêmes observé des concentrations fortes en fluor dans certaines eaux de drainage acide minier provenant de gisements de natures diverses (20 mg/L à pH 5,7 ou 44 mg/L à pH 5 par exemple).

Lorsque les concentrations en fluor dans les eaux naturelles excèdent les valeurs admissibles d'utilisation, le procédé habituel de traitement consiste à précipiter la fluorine par ajout de sulfate de calcium [15]. Ce procédé est en général insuffisant pour ramener les eaux aux normes de potabilité et des méthodes plus sophistiquées (ultrafiltration) sont parfois nécessaires pour produire de l'eau potable (< 1,5 mg/L).

Dans l'eau de boisson, le fluor constitue un oligo-élément indispensable à la croissance osseuse. En surdose, il devient toxique et engendre une fragilisation de la matière osseuse [17, 18] et différents troubles d'ordre neurologique [19, 20]. De tels problèmes sont assez fréquents dans les régions arides où la ressource en eau est peu diversifiée (Inde, États-Unis, Maroc) [21].

4.2.2 Solubilité du fluor dans les eaux superficielles

Pour illustrer la solubilité du fluor dans les eaux superficielles pures ou très peu minéralisées, considérons un système dans lequel une eau de pluie[2] est mise en équilibre avec une phase solide contenant de la fluorine. On simule le comportement de ce système entre pH 9 et pH 2. La Figure 5 montre l'évolution correspondante du fluor total en solution.

A pH proche de la neutralité, et dans une assez large gamme de pH (4 à 7,5) la concentration en fluor à saturation avec la fluorine est proche de 11 mg/L à 25°C. La solubilité augmente fortement à la fois à pH élevé (au dessus de 8), et à pH acide (au dessous de 3,5) pour atteindre environ 80 mg/L à pH 2.

La *spéciation* du fluor dans l'eau de pluie (en équilibre avec l'atmosphère) est illustrée par la Figure 6. A pH neutre ou basique, la quasi-totalité du fluor en solution (plus de 99,8%) se trouve sous forme d'anions fluorures libres F^-. A pH proche de la neutralité, la mise en solution du fluor est régie par l'équilibre :

$$Fluorite\ (CaF_2) \Leftrightarrow Ca^{2+} + 2*F^- \qquad (1)$$

[2] Il s'agit d'une eau de pluie de composition typique de zone tempérée, correspondant d'ailleurs à un prélèvement réalisé dans le sud du Massif Central.

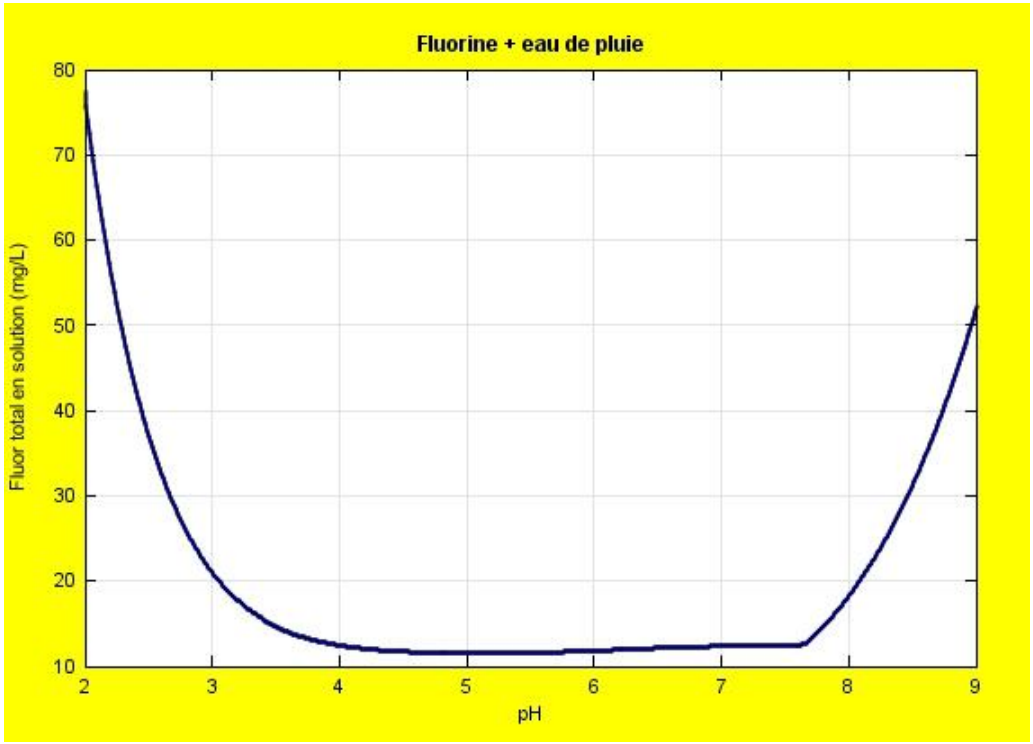


Figure 5 : Solubilité totale du fluor dans l'eau de pluie en fonction du pH

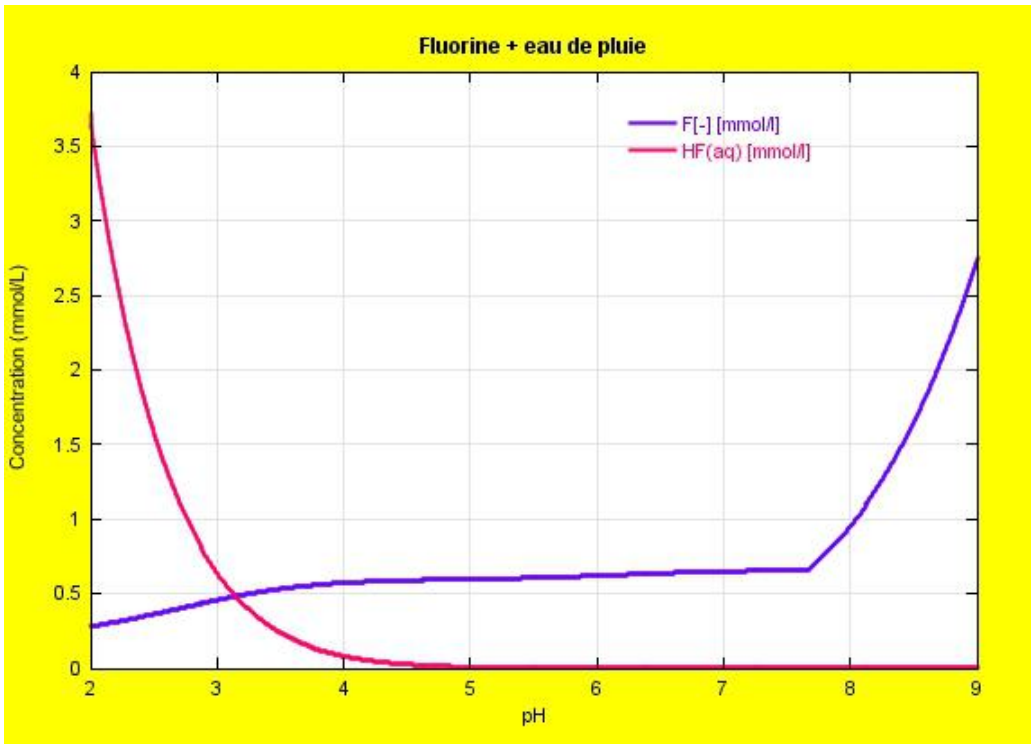


Figure 6 : Spéciation du fluor dans l'eau de pluie en fonction du pH

L'élévation de solubilité à pH acide résulte de la formation du complexe non ionique HF(aq), l'équilibre en jeu devenant :

$$Fluorite\ (CaF_2) + 2*H^+ \Leftrightarrow Ca^{2+} + 2*HF(aq) \qquad (2)$$

L'élévation de solubilité à pH basique est moins évidente, puisque l'espèce dominante reste F^-, et que l'équilibre *(1)* est indépendant du pH. Le phénomène en jeu est ici la précipitation de la calcite (qui débute à partir de pH 7,7 environ), et peut être représenté par l'équilibre suivant :

$$Fluorite\ (CaF_2) + CO_2(g) + 2*OH^- \Leftrightarrow Calcite\ (CaCO_3) + 2*F^- + H_2O \qquad (3)$$

Le fluor présente ainsi un caractère *apparemment* amphotère, illustré par les deux figures précédentes, qui explique les concentrations relativement élevées observées aussi bien dans des eaux naturelles plutôt acides que plutôt basiques, et signalées par Hem [14].

Les fortes concentrations en fluor observées sur certaines eaux du Burg correspondent clairement aux pH les plus acides, mais un rapide examen du Tableau II par exemple, montre que les valeurs observées (73 mg/L à pH 5, 113 mg/L à pH 3,7, …) excèdent très notablement la solubilité de cet élément dans l'eau de pluie. Ces valeurs s'expliquent comme nous allons le voir par les phénomènes de complexation très intenses qui affectent le comportement du fluor.

4.2.3 Phénomènes de complexation

Pour mettre en évidence ce phénomène, réexaminons d'abord le comportement du système précédent (eau de pluie en présence de fluorite) entre pH 7 et pH 2 uniquement (Figure 7). Comparons maintenant ce résultat à celui obtenu à partir d'un système identique au précédent, à ceci près qu'il comporte une phase solide où la kaolinite ($Al_2Si_2O_5(OH)_4$, l'espèce argileuse commune des zones d'altération) s'ajoute à la fluorite. La même simulation conduit alors au résultat de la Figure 8 :

- la concentration initiale en fluor total à pH 7 reste inchangée à 11 mg/L environ ;
- la solubilité augmente en revanche beaucoup plus rapidement et excède les 200 mg/L avant même que le pH n'ait chuté au dessous de 5, alors qu'elle atteignait à peine 80 mg/L à pH 2 dans la première simulation.

Pour expliquer cet accroissement considérable de la solubilité du fluor, il est nécessaire d'examiner comment évolue la *spéciation* de la solution :

- à pH 7, dans un cas comme dans l'autre, comme nous l'avions déjà vu plus haut, la quasi-totalité (plus de 99,8%) du fluor en solution se trouve sous forme d'anions fluorures libres F^-.
- au dessous de pH 6, et en présence de kaolinite, l'altération de ce minéral libère de l'aluminium en solution ; plus de 99,8% de cet aluminium se combine immédiatement (sous forme de complexes $AlF2^+$, AlF3(aq), AlF^{2+}, $AlF4^-$) au fluor en solution.
- ces complexes représentent corrélativement au dessous de pH 5 plus de 99,98% du fluor en solution, élevant ainsi de façon spectaculaire la solubilité apparente de la fluorine.

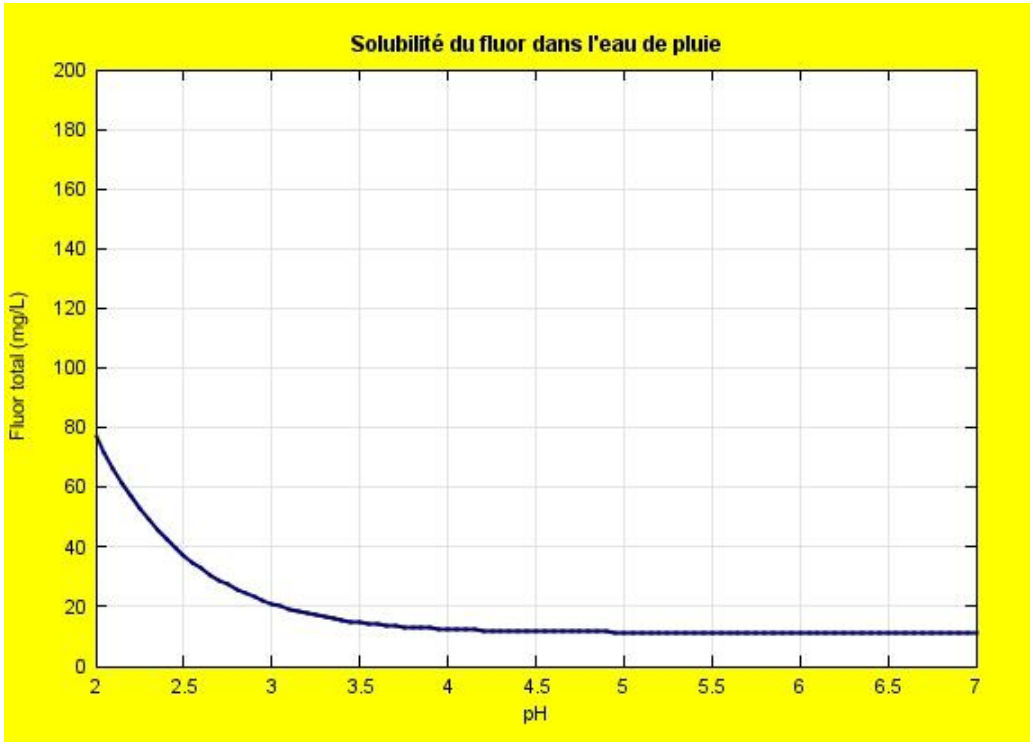


Figure 7 : Solubilité du fluor dans l'eau de pluie en présence de fluorine seule

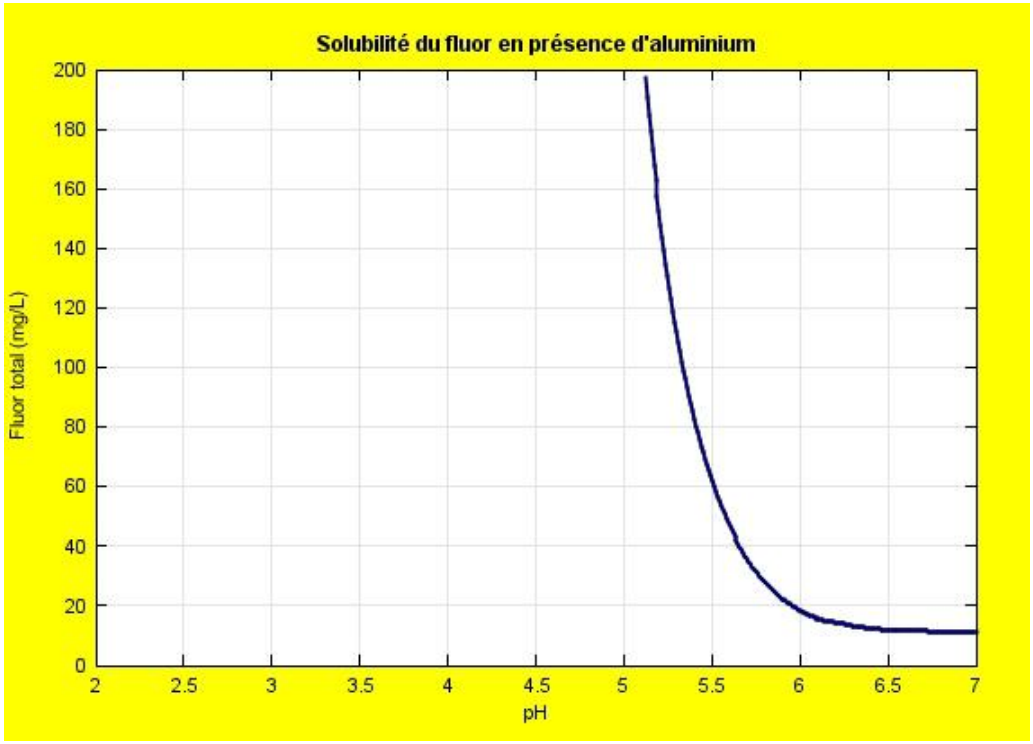


Figure 8 : Solubilité du fluor dans l'eau de pluie en présence de fluorine et de kaolinite

Tableau VII : Compositions simulées des eaux de drainage acide pour différents types de minéralisations sulfurées

(dans chaque cas, on a simulé la réaction de 5 g de sulfures avec un litre d'eau de pluie en zone non saturée ; les principaux minéraux secondaires potentiels sont indiqués en bas de tableau)

Phase sulfurée	**Pyrite** FeS_2, 5g	**Pyrrhotine** FeS, 5g	**Chalcopyrite** $CuFeS_2$, 5g			**Chalcocite** Cu_2S, 5g	**Blende** ZnS, 5g	**Galène** PbS, 5g
Accompa-nateurs	Aucun	Aucun	Aucun	Fluorine	Fluorine Kaolinite	Aucun	Aucun	Aucun
pH	1,79	2,86	3,04	3,34	4,82	4,51	5,55	5,55
TDS g/L	10,52	9,70	9,00	9,2	6,04	3,35	8,29	<0,1
SO_4^{--} g/L	7,83	5,34	5,12	5,12	2,64	1,97	4,82	0,012
F- g/L	-	-	-	0,11	1,41	-	-	-
Al g/L	-	-	-	-	0,77	-	-	-
Fe g/L	2,28	3,11	1,49	1,49	<0,001	-	-	-
Cu g/L	-	-	1,69	1,69	515	1,3	-	-
Pb g/L	-	-	-	-	-	-	-	0,026
Zn g/L	-	-	-	-	-	-	3,28	-
Minéraux secondaires potentiels	Hématite Fe_2O_3 Goethite FeOOH		Hématite, Goethite Antlérite $Cu_3(SO_4)(OH)_4$) Brochantite $Cu_4(SO_4)(OH)_6$	+ Gypse, Delafossite	+ Gypse Nontronite	Antlérite Brochantite	sulfates de Zn	Anglésite $PbSO_4$

4.2.4 Liaison avec les phénomènes de drainage acide

Le drainage minier acide (DMA, ou en anglais AMD) est un phénomène bien connu -et redouté sur le plan environnemental- des exploitants de minéralisations sulfurées. Il est classiquement attribué à l'oxydation de la pyrite FeS_2, très insoluble en milieu réducteur, mais sujette en milieu constamment réoxygéné, donc essentiellement en zone désaturée, à une réaction de *dissolution oxydative* dont l'équation bilan s'écrit :

$$\mathbf{Pyrite + H_2O + 3.5{*}O_2(aq) \rightarrow 2{*}H^+ + 2{*}SO_4^{--} + Fe^{++}} \qquad \textit{(4)}$$

Cette réaction libère des ions sulfates, du fer en solution, des protons et généralement, par contre-coup de l'acidification des eaux, d'autres métaux.

La pyrite est le sulfure à la fois le plus répandu, et celui pour lequel le problème du drainage acide est le plus marqué. Ce phénomène affecte toutefois à des degrés divers tous les autres sulfures, comme une modélisation simple qui consiste à faire réagir une eau de pluie, maintenue à l'équilibre avec l'atmosphère (ce qui correspond à peu près aux conditions de la zone désaturée) avec 5 g de sulfure, permet de le montrer (Tableau VII).

Comme l'indique cette simulation, l'acidification produite est maximale pour la pyrite, importante pour les autres sulfures de fer et de cuivre, mais très faible dans le cas de la blende et de la galène. Dans le cas du filon du Burg par exemple, où la chalcopyrite constitue le sulfure majeur, on voit que l'on peut s'attendre au moins ponctuellement, à observer des eaux acides chargées à pH voisin de 3.

L'acidification des eaux résultant des réactions du type *(4)* en présence de fluorine va évidemment, par l'intermédiaire de la réaction *(2)* ci-dessus, entraîner une mise en solution du fluor dont la concentration atteindrait environ 110 mg/L à pH 3,34 dans le cas d'une minéralisation à fluorine + chalcopyrite (Tableau VII, colonnes centrales). Le même tableau montre toutefois qu'en présence de kaolinite, et bien que le pH soit alors en partie tamponné, cette concentration dépasse les 1,4 g/L, illustrant ainsi l'importance du phéno-mène de complexation par l'aluminium en solution.

Le drainage acide des minéralisations sulfurées favorise donc à la fois directement la mise en solution du fluor par la baisse de pH qu'il provoque, et surtout indirectement par la mise en solution de l'aluminium, qui est libéré par l'hydrolyse des alumino-silicates présents (feldspaths, micas, phases argileuses), et qui agit dans ces conditions comme un puissant complexant.

4.3 Thermodynamique et origine du chimisme des eaux prélevées

4.3.1 Les principaux types d'eau

Pour comprendre à la fois le fonctionnement hydrochimique actuel du site minier, et tenter de modéliser l'évolution probable de la qualité des eaux qui seront émises ultérieurement, nous avons besoin de définir les principaux types d'eau –ou pôles hydrochimiques- alimentant le système, et d'en préciser autant que possible l'origine.

Les résultats présentés ici et les observations antérieures conduisent à distinguer pour les besoins de notre étude cinq pôles hydrochimiques, les trois premiers représentant les eaux naturelles régionales, les deux derniers étant propres aux travaux souterrains :

- les eaux de l'aquifère superficiel ;
- les eaux profondes de la partie est de la mine ;
- les eaux profondes de la partie ouest ;
- les eaux acides chargées en fluor et métaux ;
- les eaux diluées acides des niveaux supérieurs.

4.3.2 Les eaux naturelles

4.3.2.1 L'eau de l'aquifère superficiel régional

L'eau de l'aquifère superficiel régional est représentée par les échantillons de Bazuéjouls et La Bourrelié (BS5 et BS6, Tableau VI). Les deux eaux sont relativement semblables mais le puits de la Bourrelié paraît anormalement marqué en chlorure, sodium, potassium et surtout nitrate par des apports anthropiques. Nous nous intéresserons donc plutôt à l'eau du captage de Bazuéjouls (BS5), certainement mieux préservée sur ce plan.

Le calcul thermodynamique montre qu'il s'agit d'une eau faiblement acide (pH~6), de type carbonaté et chloruré calcique, et de charge dissoute très faible (71 mg/L seulement). Elle est sursaturée vis-à-vis du quartz, de la kaolinite et de la nontronite, mais proche de l'équilibre avec la calcédoine.

La fugacité calculée en CO_2 est de $10^{-2,24}$ (à comparer avec la valeur atmosphérique de $10^{-3,5}$). Cette valeur est typique d'une eau de nappe superficielle, et l'ensemble de ces caractères s'accordent bien avec le contexte d'un aquifère dans des altérites sur substratum cristallophyllien.

On note malgré tout une particularité, le quasi-équilibre avec la delafossite ($CuFeO_2$), qui peut marquer une anomalie régionale en cuivre. La concentration élevée en nitrate (près de 50 mg/L) dans cet environnement de prairies cultivées, est attribuée à l'activité agricole.

4.3.2.2 Les eaux profondes de la partie est de la mine

Ce type d'eau est représenté par l'échantillon BF1, correspondant aux eaux recueillies au pied de la cheminée est de l'exploitation. Comme nous l'avons vu plus haut, c'est une des eaux les plus alcalines, et l'eau la moins oxydante observée. La température est relativement élevée (18°C), le calcul thermodynamique indique une charge totale dissoute moyenne (242 mg/L) et une fugacité de CO_2 s'élevant à $10^{-1,8}$, indiquant un aquifère relativement profond.

L'eau BF1 est de type hydrogéno-carbonaté, calco-magnésien.

Elle n'est proche de l'équilibre avec aucune phase minérale ; elle est en revanche fortement sursaturée vis-à-vis à la fois d'oxy-hydroxydes métalliques (Fe, Cu, Zn, Al, …), et vis-à-vis d'un grand nombre de silicates (micas, felsdpaths, argiles de types divers). Ce fort déséquilibre indique une perturbation récente de l'échantillon, qui ne peut s'expliquer simplement que par un début de rééquilibrage de l'état d'oxydation et de la fugacité de CO_2, au contact de l'air des TMS.

La simulation géochimique permet de retrouver les caractéristiques initiales probables (avant mise en contact avec l'air) de cette eau :

- l'équilibre avec les principales phases silicatées est réalisé pour une fugacité de CO_2 de l'ordre de $10^{-1,3}$, ce qui correspond à un pH initial voisin de 6,1 ;
- en examinant les indices de saturation des principaux minéraux lorsque l'on simule une variation du potentiel redox (Figure 9), on montre de même que la valeur de l'Eh initial devait se situer aux environs de 30 mV.

Dans ces conditions, l'eau est simultanément proche de l'équilibre avec une paragenèse silicatée à *cristobalite* + *muscovite* + *montmorillonite-Ca*, et avec un assemblage métallique à *sidérite* + *magnétite*/*goethite* + *rhodocrosite* ($MnCO_3$) + *cuprite*/*chalcocite*. Elle est par contre fortement sous-saturée vis-à-vis de la fluorine.

Ces résultats permettent de discuter l'origine de ce type d'eau, qui constitue actuellement la venue essentielle constituant l'exhaure. L'absence de nitrates, la température relativement élevée, et la fugacité de CO_2 indiquent bien une eau d'origine profonde qui apparaît proche de l'équilibre avec l'encaissant schisteux. L'eau semble aussi au voisinage de l'équilibre avec une minéralisation cuprifère sulfurée, mais est fortement sous-saturée en revanche vis-à-vis de la fluorine[3]. Elle trouve donc très probablement son origine hors de la caisse filonienne principale elle-même.

---

[3] Sa concentration en fluor serait autrement de 7,5 mg/L environ, soit plus de 15 fois la concentration observée.

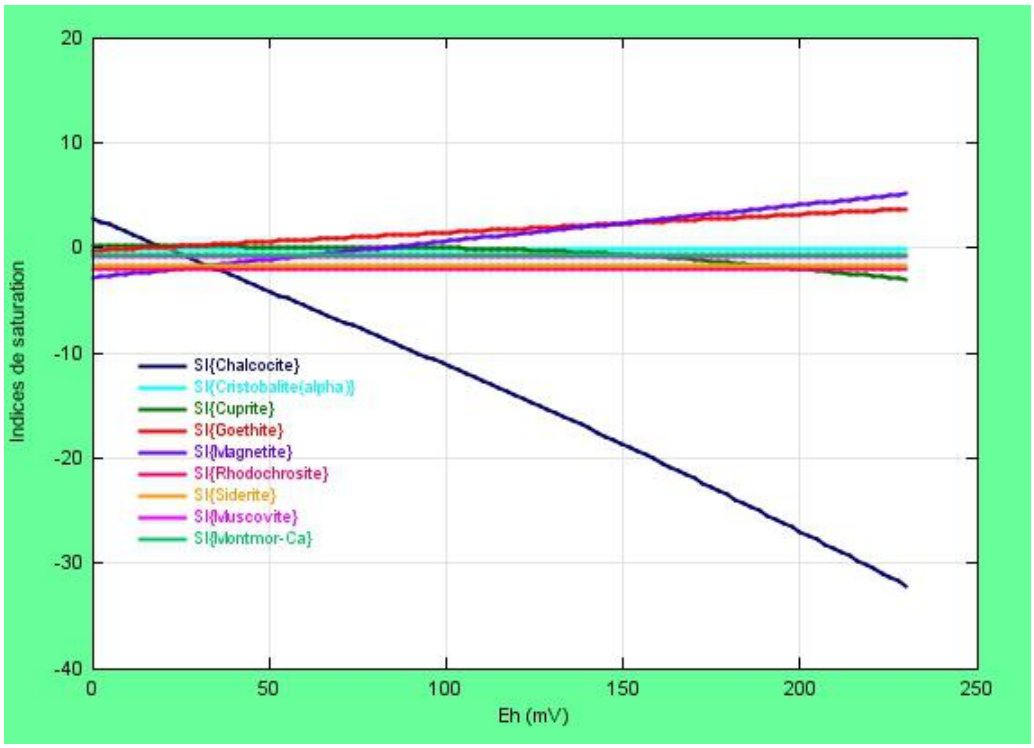


Figure 9 : Variation des indices de saturation de l'eau BF1 en fonction du potentiel redox
(la simulation indique un Eh initial voisin de 30 mV)

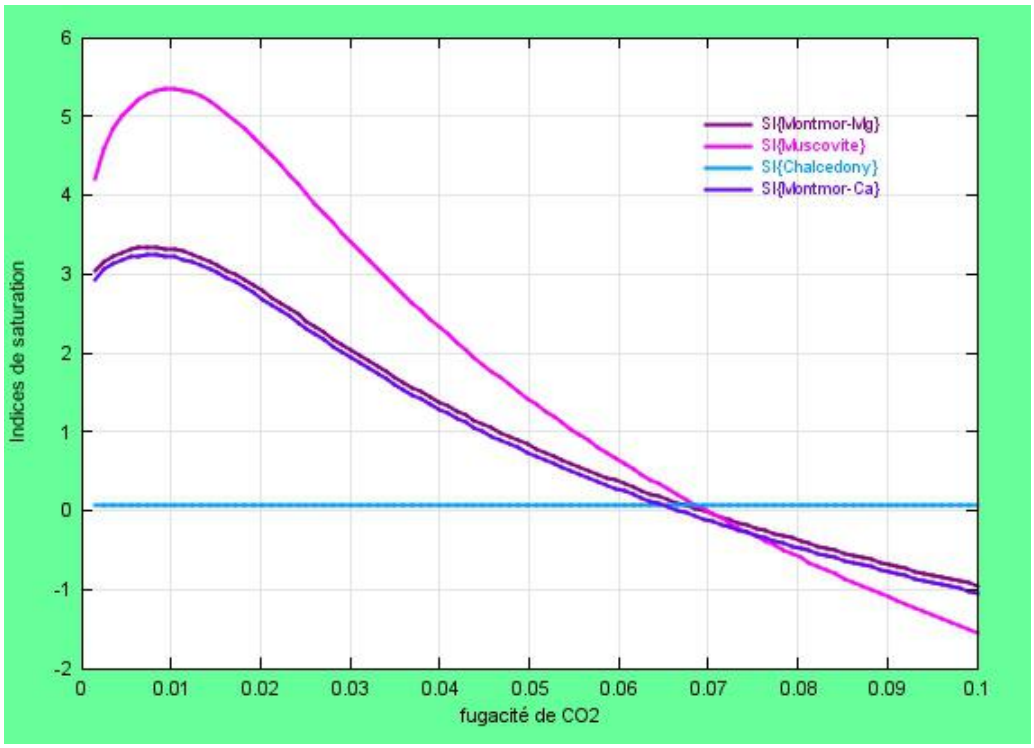


Figure 10 : Variation des indices de saturation de l'eau BF9 avec la fugacité de CO_2
(la simulation indique ici une fugacité initiale probable proche de $10^{-1,2}$)

4.3.2.3 Les eaux profondes de la partie ouest

Ce second type d'eau profonde est représenté par les prélèvements BF8 et BF9 (Tableau IV). Ce sont là aussi des eaux assez fortement alcalines, mais elles se distinguent des précédentes sur plusieurs points importants : les températures sont plus basses (15°C) ; le potentiel redox et la teneur en O_2 dissous notablement plus élevés ; le pH plus basique (7.5 à 8), les concentrations en sulfate plus fortes.

Nous nous intéresserons plus particulièrement à l'eau BF9, provenant du chantier 200-O2[4]. Le calcul thermodynamique indique une minéralisation totale voisine de la précédente, et toujours un chimisme de type hydrogénocarbonaté, calco-magnésien. L'eau est proche de l'équilibre avec la calcédoine, mais assez fortement sursaturée vis-à-vis des argiles (kaolinite, smectites), et même des micas et de la dolomite.

La fugacité en CO_2 calculée est de $10^{-2,8}$, pas très éloignée de la fugacité atmosphérique, mais les sursaturations précitées évoquent encore un rééquilibrage probable de cette fugacité au contact de l'air des TMS. La modélisation (Figure 10) indique une valeur initiale plus probable de l'ordre de $10^{-1,2}$, typique là aussi d'un aquifère profond, pour laquelle l'eau est en équilibre avec une paragenèse à *muscovite* + *calcédoine* + *montmorillonite*.

Malgré l'état d'oxydation relativement élevé de l'échantillon, la plupart des concentrations en métaux sont ici au dessous des seuils de détection analytique. Il est donc difficile de remonter à un potentiel redox initial et encore davantage à une paragenèse métallique à l'équilibre. On peut toutefois dire que ces eaux ne semblent pas avoir été en contact avec des minéralisations sulfurées, ni avec la caisse filonienne à fluorine puisque là aussi la concentration en fluor est très inférieure à la valeur de saturation.

On peut conclure en tout cas de ce qui précède que les eaux du secteur ouest du gisement se différencient assez clairement des eaux de l'est et paraissent équilibrées avec un encaissant schisteux relativement profond mais stérile.

4.3.3 Les eaux propres aux TMS

A côté des eaux profondes étudiées ci-dessus, l'étude Sogerem de 2002 [3] a montré l'existence au fond de venues d'eaux chimiquement marquées, nombreuses mais le plus souvent de débit très faible. Pour l'essentiel (cf Figure 3 et Tableau IV et suivants) ces venues montrent une corrélation nette entre acidité, conductivité électrique, concentration en fluor, sulfates et métaux. Dans notre échantillonnage, les prélèvements BF11 et BF16 sont typiques de ce pôle acide et chargé en métaux.

De façon beaucoup plus exceptionnelle, on observe dans les niveaux supérieurs des eaux acides, mais à faible conductivité et faibles teneurs en métaux dont l'origine sera aussi discutée ci-dessous.

---

[4] L'eau BF8 présente quelques indices de marquage par un début de drainage acide : pH plus faible, concentrations en sulfate, métaux et aussi fluor plus élevées.

Tableau VIII : Exemple de spéciation du fluor dans les eaux acides chargées
(résultat du calcul de spéciation dans l'échantillon BF11, cheminée ouest du Burg, niveau 170)

Espèce	moles	équivalent	% molal
AlF2[+]	0,0011483	0,002296600	66,94
AlF3(aq)	0,00029391	0,000881730	25,70
AlF[2+]	0,00021067	0,000210670	6,14
F[-]	3,0193e-005	0,000030193	0,88
AlF4[-]	2,2291e-006	0,000008916	0,26
MgF[+]	1,6786e-006	0,000001679	0,05
CuF[+]	2,9618e-007	0,000000296	0,01
MnF[+]	2,4817e-007	0,000000248	0,01
CaF[+]	2,3430e-007	0,000000234	0,01
HF(aq)	1,1408e-007	0,000000114	-
ZnF[+]	3,9785e-009	0,000000004	-
FeF[+]	2,4624e-009	0,000000002	-
NaF(aq)	7,2645e-010	0,000000001	-
FeF[2+]	1,0578e-011	-	-
FeF2[+]	2,1024e-012	-	-
HF2[-]	7,5403e-013	-	-
H2F2(aq)	4,9669e-014	-	-
Total moles		**0,003430687**	**100**

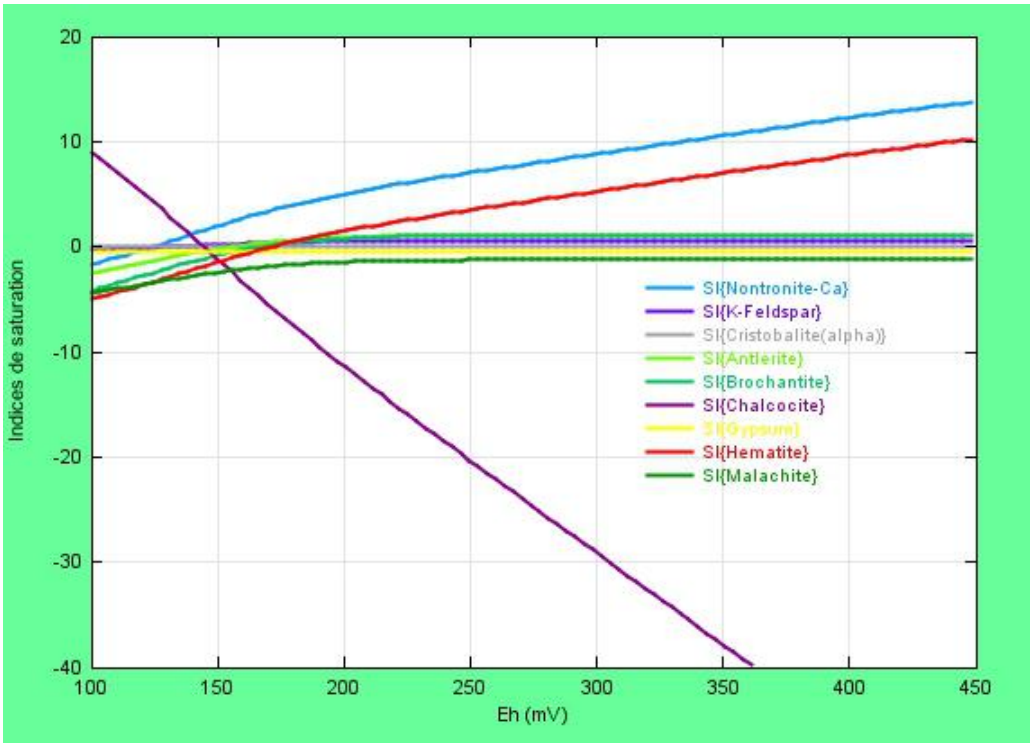


Figure 11 : Variation des indices de saturation de l'eau BF11 en fonction du potentiel redox
(la simulation indique un Eh initial proche de 150 mV)

4.3.3.1 Les eaux acides chargées

Ce type d'eau correspond aux échantillons de pH ≤ 5 et à conductivité généralement élevée (≥2 mS/cm), qui présentent les concentrations les plus élevées en fluor et métaux (Tableau II). Ces écoulements se rencontrent surtout aux niveaux 54, 135 et 170 (cheminée ouest) ; ils proviennent essentiellement de la caisse filonienne exploitée, et sont aussi observés ponctuellement dans la descenderie, mais toutes ces eaux proviennent clairement de la zone du massif désaturée par les travaux miniers.

L'échantillon BF11 (écoulement de la cheminée ouest, Tableau V) nous en fournit un bon exemple. C'est celui qui présente dans notre campagne le pH le plus faible, la plus forte concentration en fluor, en cuivre, en zinc, cobalt, aluminium et une des plus élevées en manganèse. Le calcul thermodynamique permet de préciser la spéciation et l'état de saturation de ces eaux vis-à-vis des différentes phases minérales.

La spéciation des espèces fluorées en particulier (Tableau VIII) mérite d'être examinée. Elle illustre bien l'importance de la complexation par l'aluminium discutée plus haut, puisque plus de 99% du fluor apparaît sous cette forme, alors que le fluorure libre représente moins de 0,9%, et que l'ensemble des complexes d'alcalins et de métaux divalents constitue les quelques 0,1% restant.

La charge totale dissoute calculée dépasse les 2,5 g/litre. L'eau est de type sulfaté magnésien et calcique. Elle est très proche de l'équilibre avec la *cristobalite alpha* (forme de silice à solubilité élevée) et la *jarosite* ($KFe_3(SO_4)_2(OH)_6$), mais fortement sursaturée vis-à-vis du *quartz*, du *diaspore* (hydroxyde d'alumine, AlOOH), de l'*antlérite* ($Cu_3(SO_4)(OH)_4$) et accessoirement de la *delafossite* ($CuFeO_2$). Elle semble rester sous-saturée en revanche vis-à-vis de la *fluorine* et du *gypse* notamment.

La concentration en oxygène dissous de ces eaux est très élevée (plus de 9 mg/L à 15,5°C) et proche de la saturation atmosphérique, ce qui manifeste une réoxydation permanente au contact de l'air des TMS. Cette réoxydation est probablement responsable pour une bonne part des sursaturations minérales observées. On peut appuyer ce fait en simulant grâce au code géochimique une diminution du potentiel redox et en examinant en fonction de celui-ci les indices de saturation des minéraux potentiels (Figure 11).

Cette simulation montre que la réoxygénation subie par l'échantillon a conduit à une élévation du potentiel redox d'environ 300 mV, depuis une valeur initiale proche de 150 mV, potentiel pour lequel l'eau se trouvait au voisinage de l'équilibre avec une paragenèse comprenant :

- cristobalite (SiO_2), K-feldspath et nontronite (argile de type smectite) ;
- des oxy-hydroxydes de fer : hématite et/ou goethite ;
- antlérite ($Cu_3(SO_4)(OH)_4$), brochantite ($Cu_4(SO_4)(OH)_6$), et chalcocite[5] (Cu_2S) ;
- gypse et malachite paraissent rester en revanche légèrement sous-saturés.

En conclusion, ces eaux acides s'avèrent résulter de la réaction d'eaux d'origine plutôt superficielle avec les minéralisations du filon et/ou les remblais, en zone non-saturée, c'est-à-dire au contact de l'air des TMS. Le phénomène de drainage acide qui en résulte entraîne la mise en solution du sulfate et des métaux, dont l'aluminium qui, comme nous l'avons vu, favorise à son tour, en le complexant, la mise en solution du fluor.

---

[5] sulfure de cuivre formé le plus souvent par altération supergène acide de la chalcopyrite

4.3.3.2 Les eaux acides diluées des niveaux supérieurs

Ces eaux n'ont pu être échantillonnées que dans un chantier supérieur (O1-24) de l'ouest du gisement. Elles ont toutefois aussi été observées dans la partie est, toujours dans les niveaux supérieurs (point 89, chantier 54-E1 de l'étude Sogerem). Elles sont représentées pour nous par l'analyse BF10 (Tableau V).

Ce type d'eau se caractérise à la fois par un pH bas (4,8 à 5,5), une conductivité électrique faible (< 200 µS/cm), et une charge dissoute basse (TDS ~ 100 mg/L). Le chimisme est peu marqué, de type mixte chloruré-carbonaté (accessoirement sulfaté), calco-magnésien.

L'eau est assez franchement oxydante, avec une concentration en oxygène dissous relativement élevée (~6,5 mg/L). La fugacité de CO_2 est de $10^{-2,4}$, typique d'une eau de sol ou de subsurface.

Sur le plan thermodynamique, l'eau est proche de l'équilibre avec la calcédoine, sursaturée vis-à-vis des oxy-hydroxydes de fer, et surtout de la kaolinite et d'une smectite (nontronite magnésienne), minéraux habituellement néoformés dans les couvertures d'altération.

Par l'ensemble de ces caractéristiques physico-chimiques cette eau est très proche de l'eau de l'aquifère superficiel régional. Seul le pH est un peu plus faible, et les traces en métaux un peu plus marquées (Cu, Zn, Co, Mn). On peut donc voir dans ce type d'eau une alimentation d'origine très superficielle, drainant la zone altérée au droit du gisement.

4.4 Fonctionnement hydrochimique actuel du site

Les eaux naturelles régionales correspondent à deux types distincts : (1) l'eau de l'aquifère superficiel régional, très peu minéralisée, faiblement acide, qui alimente les principales sources et puits fermiers ; (2) les eaux du substratum profond fracturé, qui ne sont en fait observables qu'au sein des travaux miniers, elles sont neutres à modérément basiques, fortement alcalines, avec deux sous-faciès chimiques, coté est et coté ouest du gisement, drainant vraisemblablement deux compartiments lithologiques ou structuraux différents. Aucune de ces eaux ne présente naturellement de concentrations notables en fluor, ce qui conduit à penser que même si la structure porteuse du filon constitue un drain préférentiel, les eaux ne circulent pas au sein de la *caisse filonienne minéralisée elle-même*.

Ce sont ces eaux profondes, alcalines et peu marquées, et notamment celles du secteur est, qui constituent la majeure partie du débit exhauré, ce qui est un facteur évidemment positif pour la qualité de celui-ci.

Dans les travaux souterrains eux-mêmes, s'observent deux autres types hydrochimiques : (1) des eaux faiblement acides, peu chargées et très peu marquées, correspondant à une alimentation d'origine superficielle en provenance des zones altérées superficielles ; (2) des eaux à la fois acides et chargées en fluor et en métaux, résultant de la réaction plus ou moins poussée des premières avec la minéralisation à fluorine et sulfures, au contact de l'air des TMS.

Cette réaction, de type drainage acide, est le principal phénomène conduisant à la solubilisation du fluor, par le biais des phénomènes de complexation particuliers à cet élément et explicités plus haut.

Dans l'état actuel de fonctionnement hydrochimique du site, ce sont surtout les eaux d'origine superficielle percolant verticalement à travers les chantiers qui paraissent ainsi responsables de la mise en solution du fluor et des métaux, alors que les eaux profondes en provenance du massif, qui constituent l'essentiel du débit d'exhaure, viennent neutraliser par leur alcalinité l'acidité produite, et diluer la charge polluante.

Ce schéma de fonctionnement hydrochimique est tout à fait classique des mines en activité [22], mais ne préjuge évidemment pas, comme nous le verrons, de la situation après abandon de l'exploitation. Les principaux pôles hydrochimiques mis en évidence nous serons néanmoins précieux pour envisager le comportement futur du système, puisqu'ils en constituent les sources d'alimentation.

ÉVOLUTION PROBABLE DU RÉGIME DES EAUX APRÈS ARRÊT DE L'EXPLOITATION

5.1 Cadre hydrogéologique de l'exploitation

Le site de la mine du Burg se trouve sur le bassin versant du Ferrier qui présente une superficie d'environ 2,2 km^2 au point coté 491 en contrebas des bassins de contrôle des eaux. La structure filonienne se développe vers l'est sur ce bassin versant ; elle s'étend par contre hors du bassin vers l'ouest, en même temps qu'elle se trouve décalée par la faille majeure reconnue à la faveur des travaux miniers (cf. Figure 2). Le point d'altitude minimale où la structure filonienne recoupe la topographie se trouve à 507 m NGF sur le carreau de la mine.

L'hydrogéologie du site du Burg n'a pas fait l'objet d'étude spécifique détaillée. L'essentiel des informations qui suivent provient de considérations générales issues de la géologie et d'observations effectuées dans la mine souterraine et en surface sur l'emprise du bassin versant.

D'après l'esquisse géologique effectuée plus haut, l'environnement hydrogéologique général est constitué en profondeur par un massif de schistes et de grès très compacts. La perméabilité d'interstice de ces roches est très faible et seule les fractures interconnectées entre elles permettent au massif d'acquérir une certaine perméabilité, mais qui reste globalement faible. Le substratum ne contient donc pas de véritable aquifère d'extension régionale, ce qui a d'ailleurs motivé la construction de retenues dans les vallées, telle celle de Rasisse, pour subvenir à l'alimentation en eau des collectivités de quelque importance.

Sur les surfaces hautes et dans les fonds de vallons, les altérites de schistes et les couvertures d'alluvions anciennes constituent des milieux poreux renfermant des nappes perchées discontinues. Les exutoires de ces nappes sont soulignés par des sources pérennes apparaissant en tête des vallons, qui constituent des ressources en eau locales. La source captée de Bazuéjouls (altitude 598 NGF, point BAZ, Figure 1) à l'est du secteur en est un exemple. Ces nappes des altérites sont également captées par des puits fermiers. Le puits de la ferme de la Bourrelié (BOU, même figure), située à l'extrémité est de la structure filonienne, a été échantillonné ; le niveau de la nappe s'y trouvait à la cote 551 m NGF en mai 2003, pour une profondeur de l'eau d'environ 15 m.

5.2 Données sur les eaux de mine

En juillet-août 2002, l'exploitant a procédé à un inventaire aussi exhaustif que possible des eaux du fond, assorti de mesures de débit et de prélèvements pour analyses chimiques (stage de Vivien Ringuédé). L'ensemble de ces données permet d'avoir une bonne vision de l'origine des différentes eaux. On peut ainsi distinguer :

- des eaux percolant à travers des réseaux de fractures ou des failles recoupant les infrastructures minières ; deux familles principales de fractures subverticales sont identifiables : un réseau d'orientation N70-130 et un réseau d'orientation moyenne N350 ;
- des eaux percolant à travers la caisse filonienne ;
- des eaux s'écoulant par le canal des cheminées et montages ;

- des eaux issues de certains forages de reconnaissance ;
- des eaux diverses collectées dans des rigoles et canaux.

Les valeurs mesurées des débits correspondant à ces différentes venues sont consignées dans le Tableau IX.

On constate que le total inventorié de 275 m^3/h dépasse largement l'exhaure moyen de 80 m^3/h constaté au même moment. Ceci s'explique par le fait que l'on comptabilise plusieurs fois les mêmes eaux en échantillonnant les rigoles et autres venues d'eau. Le total des eaux d'origine primaire (67,2 m^3/h) représenté par les fractures, le filon, les cheminées et les sondages est par contre inférieur à l'exhaure, ce qui montre que l'on manque une partie des eaux primaires qui se retrouvent cumulées dans l'exhaure. L'exploitant, grâce à sa connaissance des lieux s'est livré à une correction des différents des débits dans le but de supprimer la comptabilisation multiple d'une même eau. Ces débits figurent dans le Tableau II. La valeur cumulée est de 80 m^3/h ce qui est parfaitement cohérent avec l'exhaure.

On retient alors les caractéristiques suivantes pour les eaux du fond :

- près de 60% des eaux percolent par l'intermédiaire de la structure filonienne[6] ;
- le reste provient des réseaux de fractures recoupant les infrastructures (dans la mesure où les cheminées et sondages sont également alimentés par des fractures sans que cela soit directement visible) ;
- environ 90% des venues d'eau proviennent du secteur de la mine situé à l'est du puits ;
- la venue d'eau majeure (22 m^3/h) provient de l'extrémité est du traçage 200 ;
- les venues d'eau apparaissent plus importantes en profondeur : 13 m^3/h estimés au niveau 170 et 67 m^3/h au niveau 220 ; cette évaluation n'est cependant pas très précise car des eaux visibles en profondeur peuvent provenir de niveaux supérieurs à travers les remblais.

Tableau IX : Types et débits (L/h) des venues d'eau identifiées au fond
(d'après document Sogerem [3]*)*

Fractures et failles	**Caisse filonienne**	**Cheminées et montages**	**Sondages**	**Rigoles**	**Autres**	**Total**
22770	38463	466	5545	205615	2120	274980
67247				207735		
34%	57%	8,3%	0,7%			

[6] Les eaux ne semblent pas transiter par la caisse filonienne elle-même comme nous l'avons vu plus haut, mais circulent probablement le long de ses épontes, comme nous avons pu l'observer dans la MCO du Moulinal par exemple.

5.3 Les données d'exhaure

Les données d'exhaure ne sont pas disponibles avant 1991. Une information partielle existe pour les années 1991 et 1992, mais elle ne devient fiable selon l'exploitant, qu'à partir de 1993 au moment où des compteurs horaires ont été mis en place sur les pompes d'exhaure. Actuellement l'exhaure s'effectue par le puits à partir de deux stations de pompage situées au 170 et au 220. Des pompes intermédiaires permettent de diriger les eaux vers les albraques de ces deux niveaux, avec le souci de minimiser la quantité d'eau à pomper en profondeur.

La Figure 12 synthétise l'ensemble des données d'exhaure disponibles au pas de temps mensuel en regard des précipitations mesurées sur le carreau. On constate que l'exhaure est relativement peu variable autour de 80-85 m^3/h depuis que les mesures sont fiables. Il existe incontestablement une variabilité annuelle de l'ordre de 20 % suivant le régime des pluies ; le décalage entre le maximum de l'exhaure et le maximum de pluviométrie est de 2 à 3 mois, ce qui montre que la mine est essentiellement alimentée par de l'eau en provenance de réservoirs aquifères.

Il n'existe pas de données permettant de corréler l'exhaure avec l'extension des travaux miniers et notamment leur profondeur ; les données des années 1991 et 1992 ne sont pas suffisamment significatives pour risquer une telle évaluation.

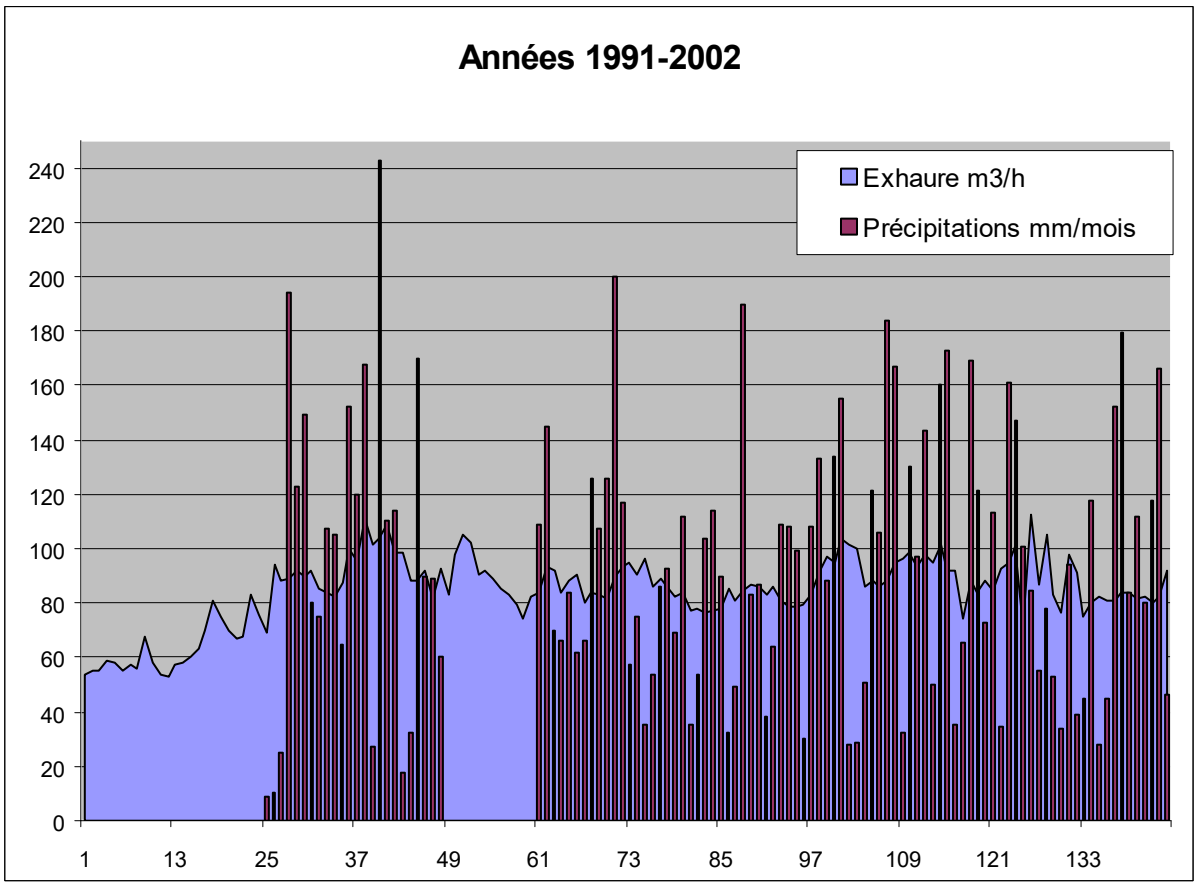


Figure 12 : Exhaure global mensuel de la mine en regard des précipitations
(les valeurs de précipitations des années 1991-92 et 1995 manquent)

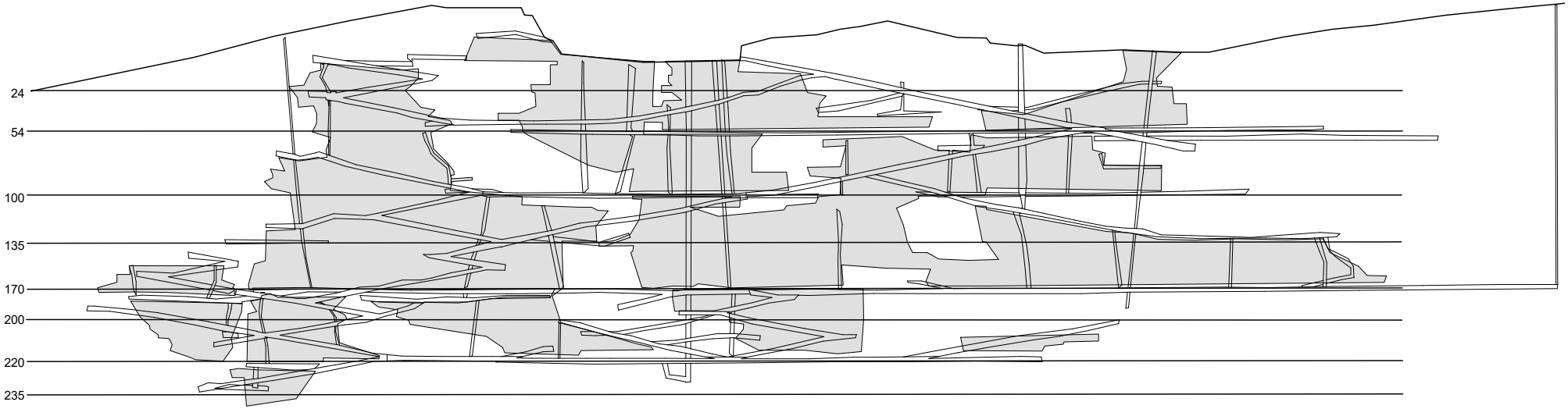


Figure 13 : Emprise des chantiers et des infrastructures minières considérée pour le calcul des volumes résiduels
(d'après documents Sogerem)

5.4 Étude de la remontée des eaux

La prévision de la remontée des eaux après arrêt de l'exhaure nécessite de disposer d'un modèle hydrogéologique des mécanismes de remplissage des travaux miniers, d'une évaluation des vides résiduels au moment du début de l'ennoyage et d'une estimation du débit d'ennoyage. Nous formulerons différentes hypothèses permettant de quantifier ces informations.

5.4.1 Le modèle hydrogéologique

Les données qui précèdent suggèrent le modèle hydrogéologique suivant pour expliquer les venues d'eau au fond.

Le massif schisteux très peu perméable n'est que médiocrement aquifère et ne participe que pour une faible part aux venues d'eau. Celles-ci proviennent essentiellement de la structure porteuse du filon et des aquifères de couverture via cette structure et les réseaux de fractures qui jouent le rôle de drain. L'ensemble peut ainsi être assimilé à une tranchée drainante collectant les eaux d'un réservoir plus superficiel. Ce schéma est classique dans les mines exploitant des structures filoniennes subverticales pour lesquelles on constate habituellement que les venues d'eau augmentent lors des traçages de nouveaux étages, le temps de drainer la caisse filonienne ou ses épontes, puis qu'elles se stabilisent par la suite. La corrélation entre la profondeur des travaux et le débit est le plus souvent difficile à établir et dépend essentiellement des zones fracturées qui sont interceptées au fur et à mesure de l'avancement des travaux.

Nous avons vu que le drainage s'effectuait à plus de 90 % vers l'est, c'est-à-dire vers l'amont du bassin versant superficiel dont la superficie est de l'ordre de 2,2 km^2. Compte tenu de la pluviométrie relativement élevée de la région (1133 mm/an en moyenne sur 1993-2002), nous estimons entre 8 et 10 $L/s/km^2$ (soit 20 à 30 % des pluies) l'alimentation du système hydrogéologique superficiel. Ceci signifie qu'il faudrait drainer une superficie de l'ordre de 2,2 à 2,8 km^2 pour fournir le débit d'exhaure moyen de 80 m^3/h (22,2 L/s). Ce drainage n'est certainement pas limité au bassin versant du Ferrier, car dans ce cas, le débit de base du ruisseau aurait été fortement diminué, ce qui ne semble pas être vérifié bien que les données manquent sur ce point. Il est donc probable qu'il faille considérer des limites du bassin versant souterrain alimentant la mine au delà du bassin superficiel. Il n'est pas exclu que le débit de basses eaux de la source de Bazuéjouls ait été influencé par les travaux miniers, sans que cela compromette la ressource en eau. Là encore, les données manquent pour se prononcer. Il existe néanmoins une cohérence certaine entre le débit d'exhaure et l'étendue du système hydrogéologique qui l'alimente.

5.4.2 Évaluation des vides résiduels

Les vides résiduels actuels ont été évalués d'après les données fournies par l'exploitant concernant :

- les différentes infrastructures qui resteront ouvertes après arrêt de l'exploitation (puits, descenderie, cheminée, voies de base, voies d'accès aux chantiers) représentées sur la Figure 13 ;
- les chantiers exploités qui sont dans leur quasi totalité remblayés et dont l'extension générale est aussi dessinée sur la Figure 13.

Les infrastructures retenues ont été reportées sur un plan frontal au 1/2500 permettant de définir la surface projetée des vides. Les volumes ont ensuite été calculés en multipliant la surface par l'ouverture moyenne de l'ouvrage considéré. Pour les chantiers, l'exploitant a proposé la méthode suivante : l'emprise des chantiers est rapportée sur le plan frontal et la surface des projections est calculée automatiquement. Un premier volume est obtenu en multipliant par l'épaisseur moyenne de minerai. Un coefficient correctif est ensuite appliqué pour tenir compte du fait que l'on abat une épaisseur de roche supérieure à celle du minerai pour des raisons pratiques. On constate qu'il est nécessaire d'appliquer un coefficient correctif de «salissage» de l'ordre de 2 pour que le volume cumulé estimé cadre avec la quantité globale de minerai exploité. Il reste enfin à multiplier par la porosité estimée des remblais pour obtenir les volumes résiduels.

Ces différents volumes (infrastructures et chantiers) ont ensuite été repartis arbitrairement de façon linéaire par niveau d'exploitation, en tenant compte de la cote réelle de chacun des niveaux. Les résultats exprimés par niveaux sont rassemblés dans le Tableau X.

On constate que le volume résiduel des infrastructures est du même ordre de grandeur que celui des chantiers remblayés. Ces valeurs sont évidemment influencées par deux paramètres qui ne sont pas mesurables : le coefficient de salissage et la porosité des remblais, dont nous avons estimé la valeur la plus vraisemblable.

Tableau X : Répartition des volumes résiduels par étage d'exploitation
(les calculs considèrent une porosité de 20% pour les remblais de chantiers et un coefficient de «salissage» de 2)

Niveau	**24**	**54**	**100**	**135**	**170**	**200**	**220**	**235**
Cote NGF (m)	487	459	411	377	342	320	290	264
Infrastructures (m^3)	5852	12044	20552	12913	10592	17695	12001	7117
Chantiers (m^3)	6432	10907	17633	13354	25722	9040	11221	1108
Total (m^3)	12284	22951	38185	26268	36314	26735	23222	8225

5.4.3 Simulation de l'ennoyage, situation de référence

L'encaissant de la structure filonienne étant peu perméable, on peut attendre que les vides résiduels se rempliront sous l'effet des arrivées d'eau, jusqu'à un niveau déterminé par le point d'intersection de cote la plus basse des travaux miniers avec un milieu de forte perméabilité capable d'absorber le débit de débordement. Compte tenu de la topographie et de la disposition des infrastructures minières débouchant au jour, ce point se situera selon toute vraisemblance dans le vallon affluent du Ferrier où se trouve établi le carreau de la mine.

Le débordement devrait donc s'établir aux alentours de la cote 507 mNGF par l'intermédiaire du puits ou de la descenderie, ou encore au sein des remblais du carreau. Il serait alors nécessaire de prévoir au moment de l'abandon un drainage de ces remblais pour canaliser l'eau de débordement. Cette cote de remplissage du réservoir minier étant inférieure aux cotes de drainage naturel des aquifères qui occupent les surfaces hautes (qui sont de l'ordre de 550 m NGF), le réservoir minier une fois rempli continuera à être alimenté et il faut s'attendre à l'installation d'un débit de débordement permanent.

En l'absence de mesures piézométriques suffisantes sur les aquifères de bordure, il est difficile de quantifier, de manière très argumentée, le débit de remplissage et son évolution dans le temps, ainsi que le débit de débordement. En fonction de ce qui précède nous proposerons le modèle suivant :

- le débit initial de remplissage de la mine est le débit d'exhaure moyen actuel, soit 80 m^3/h ;
- ce débit initial correspond à un drainage par la caisse filonienne à la cote 290 mNGF (niveau de l'étage 220) ;
- les venues d'eau sont alimentées par un réservoir aquifère superficiel dont le niveau piézométrique est 551 mNGF (niveau observé dans le puits de la ferme de la Bourrelié) ;
- le niveau d'eau dans les travaux miniers progressera de manière horizontale jusqu'à la cote de débordement 507 mNGF ;
- le débit des eaux souterraines varie linéairement au cours de la remontée.

On établit, sous ces hypothèses, la courbe de la Figure 14 représentant l'évolution du niveau au cours du temps dans les travaux miniers, ainsi que l'évolution du débit de remplissage.

On constate que dans cette situation de référence, le remplissage des travaux miniers s'effectue en 8 mois et que le débit de débordement se stabilise autour de 13,5 m^3/h. Notons que la durée de remplissage est vraisemblablement sous-estimée car on a négligé dans le calcul les vides représentés éventuellement par la structure filonienne non exploitée et par le réseau de fractures aux épontes qui ont été drainés pendant l'exploitation.

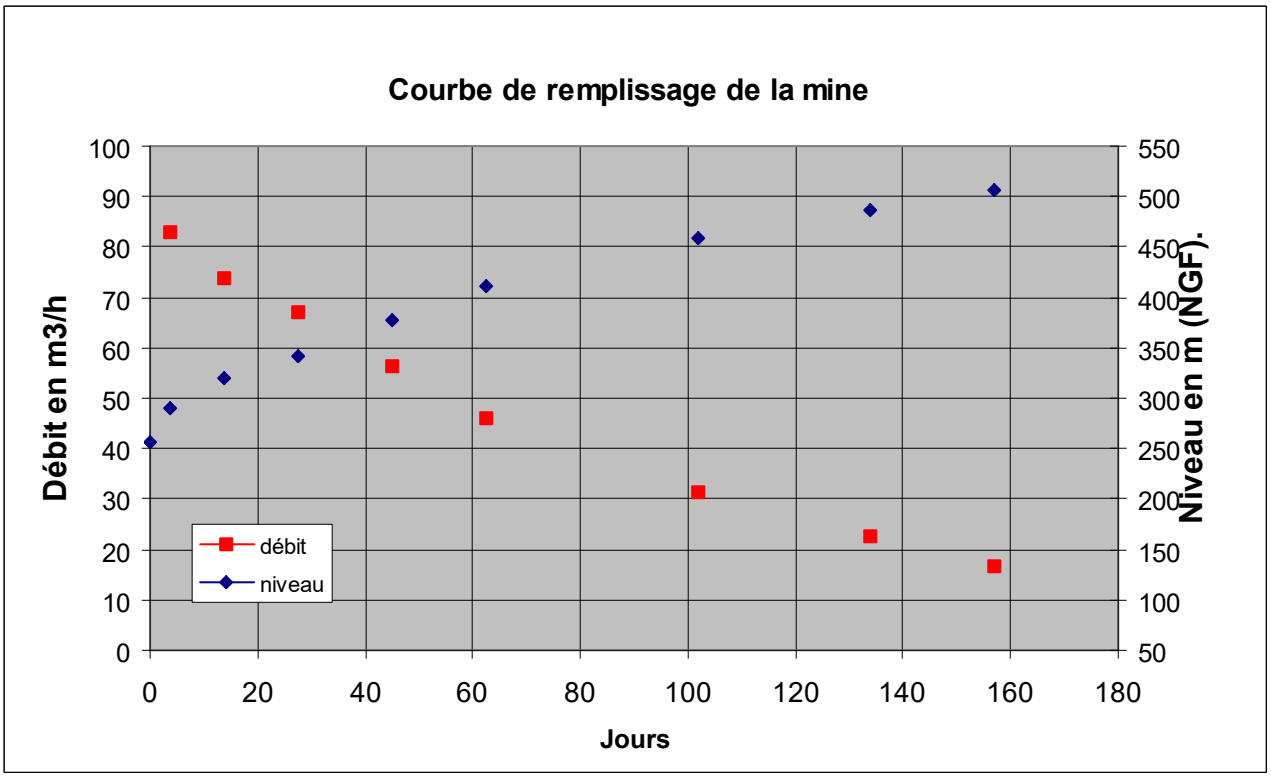


Figure 14 : Courbe de remplissage de la mine dans les hypothèses de référence
(débit initial 80 m³/h, débit final 13,5 m³/h, cote de débordement 507 mNGF)

Tableau XI : Variabilité du scénario de remplissage des travaux miniers en fonction du niveau des nappes de couverture et de la porosité des remblais
(Dr = durée de remplissage (jours), Q = débit de débordement (m³/h), Tr = temps de renouvellement de l'eau dans les travaux miniers (jours), en gras simulation de référence)

Niveau nappe / Porosité	561			**551**			541		
	Dr	Q	Tr	Dr	Q	Tr	Dr	Q	Tr
30%	260	16,6	609	290	13,5	747	330	10,5	967
20%	208	16,6	489	**232**	**13,5**	**600**	265	10,5	776
10%	157	16,6	369	175	13,5	453	199	10,5	586

5.5 Simulation de la remontée des eaux, analyse de sensibilité

Nous avons proposé ci-dessus une simulation de référence qui repose cependant sur un certain nombre de paramètres mal connus. Nous allons à présent examiner l'influence de ces incertitudes sur les conditions de remplissage.

En conservant le modèle conceptuel précédent, deux paramètres jouent un rôle essentiel :

- le niveau piézométrique des réservoirs aquifères occupant les surfaces hautes ;
- la porosité des remblais des chantiers.

Nous présenterons sous la forme d'un tableau à double entrée (Tableau XI) l'effet d'une variation de ces paramètres dans une fourchette vraisemblable sur les résultats exprimés en termes de durée de remplissage, débit de débordement et durée de renouvellement de l'eau du réservoir minier, une fois le régime d'écoulement permanent établi.

En conclusion de ces simulations, les fourchettes d'incertitude apparaissent les suivantes :

- débit de débordement moyen: **10 à 17 m^3/h**
- durée de remplissage : **5 à 12 mois**
- temps de renouvellement du stock d'eau dans le réservoir minier : **1 à 2,6 ans**

6. PRÉVISIONS RELATIVES À L'ÉVOLUTION DE LA QUALITÉ DES EAUX

6.1 Qualité des eaux après fermeture des mines, aspects généraux

L'exploitation en travaux miniers souterrains (TMS), du fait qu'elle nécessite très généralement le dénoyage des ouvrages, engendre, pendant et après la période d'activité, des perturbations notables du régime hydrodynamique naturel [23], qui s'accompagnent le plus souvent d'une dégradation de la qualité des eaux.

Les différents phénomènes qui contrôlent la qualité des eaux de mine ont été analysés, particulièrement pour le cas des minéralisations sulfurées, en s'appuyant sur des études réalisées sur plusieurs anciennes mines métalliques [22]. Ces études conduisent à distinguer dans la vie de la mine, pour ce qui concerne l'évolution de la qualité des eaux, les phases suivantes.

6.1.1 Période d'activité de la mine

Durant cette période, les eaux de l'exploitation sont rassemblées dans les points bas et ramenées au jour par le pompage d'exhaure. On constate généralement que la qualité de ces eaux d'exhaure ne constitue pas un souci majeur, ce fait étant attribué à la conjonction de plusieurs circonstances favorables : (i) les eaux pompées proviennent pour une grande part de l'encaissant même des minéralisations, et sont donc proches de l'équilibre thermodynamique avec celles-ci ; (ii) les entrées d'eaux d'origine superficielle (qui sont, elles, potentiellement réactives vis-à-vis des minéralisations) sont autant que possible évitées, et ces eaux sont presque toujours interceptées dans des albraques intermédiaires (dans un simple souci d'économie d'énergie) ; et (iii) le temps de résidence des eaux exhaurées au sein des travaux, est de toute façon très réduit, et limite les réactions qui pourraient intervenir avec les minéralisations au contact de l'air présent dans les vides miniers.

La situation actuelle de la mine du Burg, telle que nous l'avons comprise, correspond bien à ce comportement général observé sur les autres gisements durant leur période d'activité.

Ces circonstances favorables ne seront toutefois plus réunies lors de l'arrêt de l'exploitation, et pour ces raisons, les eaux de remplissage des mines n'auront pas malheureusement le faciès chimique des eaux d'exhaure.

6.1.2 Estimation de la qualité du remplissage initial

6.1.2.1 Exemples connus

A l'issue de l'exploitation, l'arrêt des pompages d'exhaure entraîne la remontée des eaux dans les anciens travaux, généralement jusqu'à la reprise d'un écoulement gravitaire par le point bas des travaux au jour. L'expérience montre que la qualité des eaux émises à ce moment constitue le souci environnemental majeur poser par la fermeture d'une mine.

La mine de Largentière [24] fournit un exemple des phénomènes qui peuvent se produire lors de cette phase : lors du premier débordement suivant l'ennoyage, une pollution en sulfate, en fer, et surtout en zinc - cette dernière concentration atteignant alors 105 mg/L - s'est déclarée à l'exutoire, et divers prélèvements et essais de pompage ont montré que des concentrations proches étaient présentes dans l'ensemble du réservoir constitué par les TMS. Les concentrations initiales en métaux sont assez variables[7] d'un gisement à l'autre, mais cette mauvaise qualité des eaux de remplissage initial apparaît malheureusement comme une règle très générale, du moins dans tous les gisements où des sulfures sont présents. La charge totale dissoute est souvent très forte (plusieurs grammes par litre), mais la génération d'eaux très acides n'est pas, par contre, une généralité et se limite aux minerais pyriteux (cf Tableau VII) et à certains types d'encaissant.

A Largentière, l'étude thermodynamique permet de montrer que chaque litre de l'eau de débordement a dû consommer près de 250 mg d'O_2 (pour une concentration à saturation voisine de 10 mg/L) pour acquérir son contenu en zinc. L'interprétation que l'on peut donner des phénomènes survenant lors du remplissage est illustrée par la Figure 15 : après arrêt de l'exhaure, les ouvrages souterrains se remplissent avec les eaux provenant des aquifères encaissants, et pour partie avec des eaux d'origine superficielle.

En ruisselant sur les parois des vides et sur la sole des galeries, ces eaux se chargent rapidement, principalement en sulfates et en métaux, par suite d'un double processus : (1) la mise en solution des produits d'oxydation solubles (sulfates ferriques, aluns, autres phases minérales métalliques…) stockés à la surface du minerai exposé ; (2) la dissolution rapide des sulfures soumis au ruissellement des eaux, en présence de l'air occupant les travaux encore dénoyés.

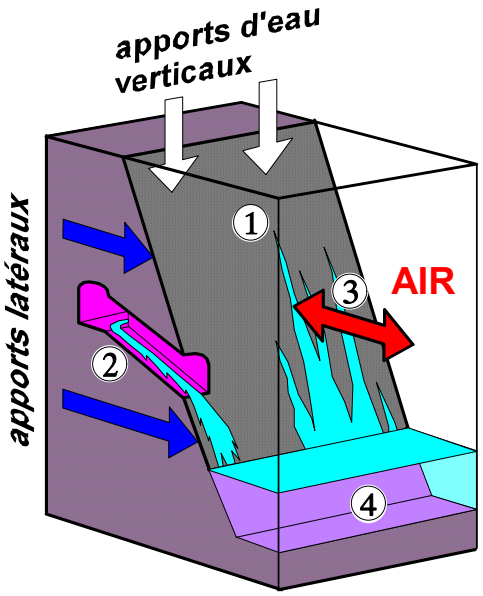


Figure 15 : Modèle hydrogéochimique de remplissage des travaux miniers
(L'eau (1) (2) lessive les sels solubles et réagit avec les sulfures en se rééquilibrant avec l'air présent dans les travaux (3).L'eau du remplissage initial (4) se charge ainsi en sulfate et en métaux)

[7] Dans le seul cas du zinc on a ainsi observé des valeurs allant de 40 mg/L (Les Malines) à près de 1,5 g/L (dans une mine de Sardaigne).

6.1.2.2 Critères d'estimation

Le premier des deux facteurs évoqués ci-dessus dépend de l'*abondance*, de la *solubilité*, et de la *teneur* en polluants potentiels des minéraux secondaires formés sur les parois des vides miniers. La quantité de minéraux secondaires formés sera dans une certaine mesure proportionnelle au temps d'ouverture de la mine, quand à la *nature* de ces minéraux elle dépend bien sûr de la composition de la paragenèse initiale du minerai. C'est cet aspect qui a motivé notre campagne d'échantillonnage des produits et dépôts secondaires observés sur les parements des TMS.

L'étude thermodynamique montre par ailleurs qu'il y a réoxygénation répétée (l'équivalent de 25 fois dans le cas de Largentière) au cours du remplissage. Cet apport d'oxygène est évidemment difficile à prévoir, mais on comprend par exemple qu'il sera d'autant plus important que le temps nécessaire à la remise en eau des travaux miniers sera plus long.

Nous verrons plus bas comment évaluer de façon approximative, à partir de ces critères, la qualité future du remplissage de la mine.

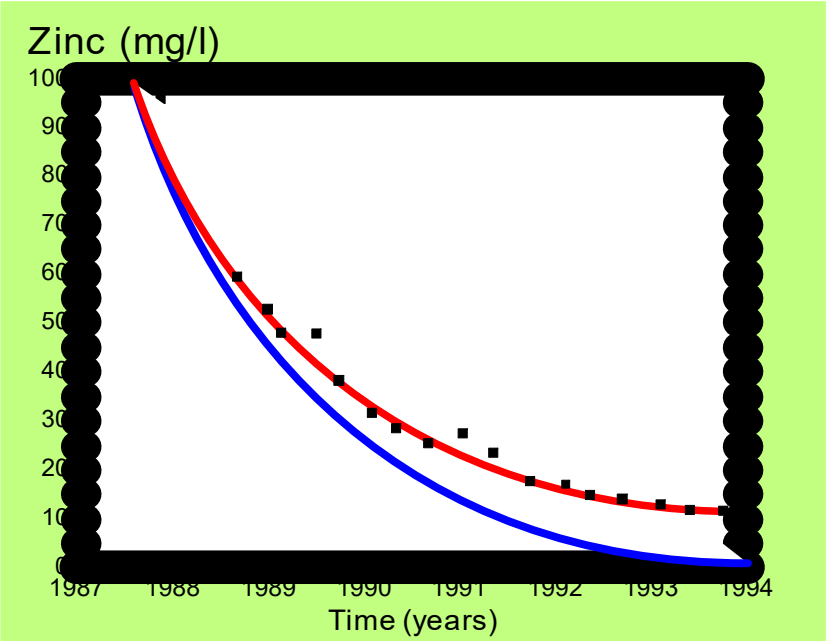


Figure 16 : Évolution observée et modélisée des concentrations en zinc à l'exutoire des anciens travaux de Largentière
(en bleu hypothèse d'un rinçage simple, en rouge, modèle tenant compte d'une remise en solution du zinc par les eaux traversant les TMS - d'après [24]*)*

6.1.3 Période transitoire

A l'issue de la phase de remplissage, les travaux miniers constituent donc généralement un réservoir d'eaux fortement chargées. Ce réservoir peut être alimenté par des eaux provenant de la surface et/ou par les eaux des terrains aquifères profonds, mais les unes comme les autres sont généralement peu chargées vis-à-vis des eaux du remplissage initial. Il va s'en suivre un processus de « rinçage » conduisant à une amélioration d'abord rapide puis de plus en plus lente de la qualité des eaux émises à l'exutoire.

Tableau XII : Composition minéralogique des prélèvements solides réalisés sur les parements des TMS
(Analyses par diffraction RX, Laboratoire du C.I.G., à Fontainebleau)

N° Ech	Description sommaire	argile	quartz	calcite	sidérite	fluorite*	brochantite $Cu_4SO_4(OH)_6$	posnjakite $Cu_4SO_4(OH)_6H_2O$	malachite $Cu_2CO_3(OH)_2$	sulfate Cu ?	goethite FeOOH
BM1	enduits blanchâtres disparus au séchage		X		X	XXX					x?
BM2	enduits plastiques vert pâle		XX			X		XX		XX	
BM3	enduits plastiques bleu vert									XXXX	
BM4	stalactites formés verts	x?					XXXX	X	X		
BM5A	type malachite vert sombre	x?					XXXX				
BM5B	idem vert pâle						XXX		XXX		
BM5C	idem substrat brun & ocre		XX								XX
BM6	massif, apparence secondaire	X	XXX								
BM7A	schiste blanchi	50	50								
BM7B	idem enduit brun noir	x	XX		X	X					
BM8	siderite + fluorine probable		X		XXX						
BM9	enduit gris sur chalcopyrite	X		XX	XX	XX					
BM10A	idem brun gris		XX		XX	x					
BM10B	idem gris argent	XX	XX		X	x					
BM11A	fluorine + dolomite ?		x			XXX(F)					
BM11B	dépôt argileux gris sur précédent	XXX	XX		x	XX					
BM12	dépôt hydroxydes										
BM13	dépôt argileux gris ocre										

(XXXX : très abondant ; XXX : abondant ; XX : accessoire ; X : très accessoire ; les autres minéraux en traces ne sont pas figurés)

Le volume du réservoir constitué par les TMS correspond aux vides miniers résiduels (il est nécessaire de tenir compte de la porosité des zones remblayées) situés en dessous de la cote de remplissage. L'importance des apports correspond, en régime stabilisé, au débit observé en sortie. Dans la mesure où les travaux noyés se comportent comme un mélangeur plus ou moins parfait, il est alors possible de prévoir comment et à quel pas de temps la qualité des eaux recueillies au point de débordement est susceptible de s'améliorer.

La Figure 16 montre les résultats de ce calcul pour les concentrations en zinc à l'exutoire des anciens travaux de Largentière. Les travaux miniers sont ici alimentés presque exclusivement par des eaux d'origine superficielle, dépourvues de zinc. Le calcul conduit alors à la courbe en bleu sur la figure. Toutefois les concentrations réellement observées (carrés noirs) ne sont correctement reproduites (aux fluctuations saisonnières près) que par la courbe en rouge, qui tient compte d'une contribution d'environ 8,5 mg/L de zinc par le flux balayant le système. On a pu montrer que cette concentration de base résultait précisément de la quantité de blende (sphalérite) que les eaux d'origine superficielle pouvaient oxyder (en fonction de leur contenu en oxygène) en traversant les anciens travaux.

6.1.4 Qualité des eaux à long terme

Lorsque le taux de renouvellement est suffisant (de l'ordre de 8) les concentrations à l'exutoire approchent une valeur asymptotique (un palier de concentration) qui dépend donc des quantités de métal solubilisables par les eaux entrantes. On atteint ainsi un état stationnaire susceptible de se prolonger pendant de très longues durées (de l'ordre de la centaine d'années ou plus), jusqu'à l'épuisement des phases réactives qui sont encore accessibles aux circulations au sein des anciens travaux.

Suivant les cas, la concentration atteinte lors de cet état stationnaire sera acceptable ou pourra toujours nécessiter un traitement des eaux avant rejet. La qualité des eaux à ce stade dépend de deux facteurs principaux :

1. la présence éventuelle de volumes de minerais sulfurés qui resteront toujours dénoyés même après la remontée des eaux ;
2. la quantité d'oxygène dissous introduite dans le système par les eaux d'origine superficielle qui permet une oxydation lente des minéralisations et une dissolution corrélative des métaux, même au sein des anciens quartiers noyés.

6.2 Prévisions relatives au remplissage initial de la Mine du Burg

6.2.1 Produits d'oxydation observés

Dans le cas de la mine du Burg, nous avons réalisé, en même temps que notre campagne de prélèvement des eaux du fond, une reconnaissance rapide des produits d'oxydation qui se sont formés sur les parements des travaux souterrains. Ces produits sont soit des encroûtements ou enduits recouvrant les parois rocheuses ou la minéralisation, soit des précipités, plus rarement des concrétions, formés par certaines venues d'eau. Les échantillons ont été soumis à une analyse minéralogique par diffraction des rayons X au Laboratoire du CIG à Fontainebleau. Les résultats obtenus sont rassemblés dans le Tableau XII.

Les minéraux secondaires détectés sont les suivants (par ordre de fréquence approximatif) :

- la brochantite ($Cu_4(SO_4)(OH)_6$), et un précurseur hydraté de celle-ci, la posnjakite ($Cu_4(SO_4)(OH)_6.H_2O$), qui constituent à eux seuls des stalactites, ou des enduits vert pâle à vert sombre, ou bien accompagnent l'espèce suivante ;
- la malachite ($Cu_2CO_3(OH)_2$), elle aussi constituant des stalactites vertes, et en dépôts encroûtés rubanés vert sombre et vert pâle avec la brochantite ;
- un sulfate mixte de cuivre indéterminé, localement présent en enduits bleu-vert sur certains parements, ou accompagnant brochantite et posnjakite ;
- la goethite, accompagnée d'hydroxydes de fer amorphes probablement dominants (mais qui ne diffractent pas), seule, ou accompagnant les dépôts rythmés de malachite.

On retrouve dans cette liste plusieurs des phases sursaturées dans les eaux acides chargées des TMS. Toutes les autres phases observées (fluorine, sidérite, quartz, argiles, et aussi feldspaths et micas) appartiennent à la paragenèse primaire minéralisée ou à l'encaissant. Bien que l'existence d'autres minéraux néoformés peu fréquents soit possible, on n'a pas mis en évidence ici de dépôts de gypse, d'aluns, ou d'autres sulfates acides solubles. Aucune phase secondaire fluorée n'a non plus été détectée.

6.2.2 Oxydation envisageable au cours de l'ennoyage et modèles d'eau du remplissage initial

Outre la présence des produits d'oxydation ci-dessus, c'est la réoxydation des eaux au cours de la phase d'ennoyage qui va gouverner la qualité du remplissage initial. Il est difficile de prévoir *a priori* l'importance relative de ces deux phénomènes, mais on voit tout de suite ici que les minéraux oxydés ne devraient avoir qu'une influence limitée : les hydroxydes de fer et la malachite sont des minéraux peu solubles ; les autres minéraux détectés (brochantite, ou posnjakite) pourraient contribuer de façon limitée aux concentrations en cuivre et sulfate, mais les eaux de mine sont déjà proches de la saturation avec ces phases. Aucun des minéraux secondaires détectés n'influera par ailleurs sur la concentration en fluor.

Nous avons donc admis ici que la réoxydation au cours de la période d'ennoyage était probablement le facteur dominant. Deux modèles ont été construits :

- le premier modèle est basé sur l'expérience de Largentière, et correspond à une quantité d'oxygène consommé de 250 mg/L ; ce premier modèle est considéré comme pessimiste, dans la mesure où, à Largentière, le temps d'ennoyage des travaux (4,5 ans), donc la durée autorisant une réalimentation de l'eau de remplissage en oxygène, était largement supérieur à celui qui est prévu ici (5 à 12 mois) ;
- le second modèle a donc été construit en admettant une réoxydation limitée proportionnellement à une durée d'ennoyage probable de *1 an*, soit 56 mg/L d'oxygène consommé.

Dans les deux cas, le modèle d'eau de remplissage initial a été obtenu en simulant la titration de la quantité correspondante d'oxygène dans un litre d'eau en présence d'une paragenèse simplifiée (quartz, muscovite, fluorine, chalcopyrite, pyrolusite) représentant à la fois la caisse filonienne et son encaissant. Les résultats sont reportés dans le Tableau XIII.

Tableau XIII : Modèles d'eau du remplissage minier initial

(Le modèle 1 correspond à une consommation d'oxygène de 250 mg/L, le modèle 2 à une consommation réduite proportionnellement à la durée d'ennoyage prévisible, voir texte)

Modèle d'eau de remplissage		Modèle 1	Modèle 2
Temp	°C	20	20
pH		5,87	6,47
Eh /ENH	mV	100 à 850	0 à 100
TDS	mg/L	763	200
F^-	mg/L	40,8	13,6
SO_4^{--}	mg/L	402	88
Fe	mg/L	0,005	0,002
Mn	mg/L	63,2	12,64
Cu	mg/L	33,1	27,5
Al	mg/L	14,1	1,14

6.2.3 Commentaires sur la qualité prévisionnelle du remplissage initial

Nous ne disposons pas jusqu'ici de méthode 'déterministe' pour prévoir la qualité du remplissage initial. La méthode empirique de modélisation adoptée est basée sur l'expérience acquise sur d'autres gisements sulfurés. Elle permet d'estimer une qualité *moyenne* du réservoir minier en fonction de la *quantité d'oxygène* assimilée par celui-ci, au cours de son remplissage[8].

Les résultats présentés dans le Tableau XIII doivent donc être considérés comme indicatifs. Ils ne paraissent pas néanmoins aberrants en regard des qualités d'eaux observées en certains points des travaux miniers actuels.

On retiendra que l'on peut s'attendre :

1. à un pH de l'ordre de 6 ou légèrement inférieur ;
2. à une charge totale dissoute de plusieurs centaines de mg/L ;
3. à une concentration en sulfate de l'ordre d'une à quelques centaines de mg/L ;
4. à une concentration en fluor d'une quinzaine à quelques dizaines de mg/L ;
5. à une concentration en aluminium de 1,5 à 20 mg/L, en cuivre de l'ordre de 25 à 30 mg/L, et en manganèse de 10 à 100 mg/L.

[8] Au cours de ces simulations, on a admis que seuls les minéraux secondaires proches de l'équilibre avec les eaux réellement observées en mine pouvaient réellement précipiter (il s'agit essentiellement de la brochantite et de la nontronite). Ceci évite de sous-estimer à la fois certaines concentrations finales en polluant, ainsi que l'acidité produite.

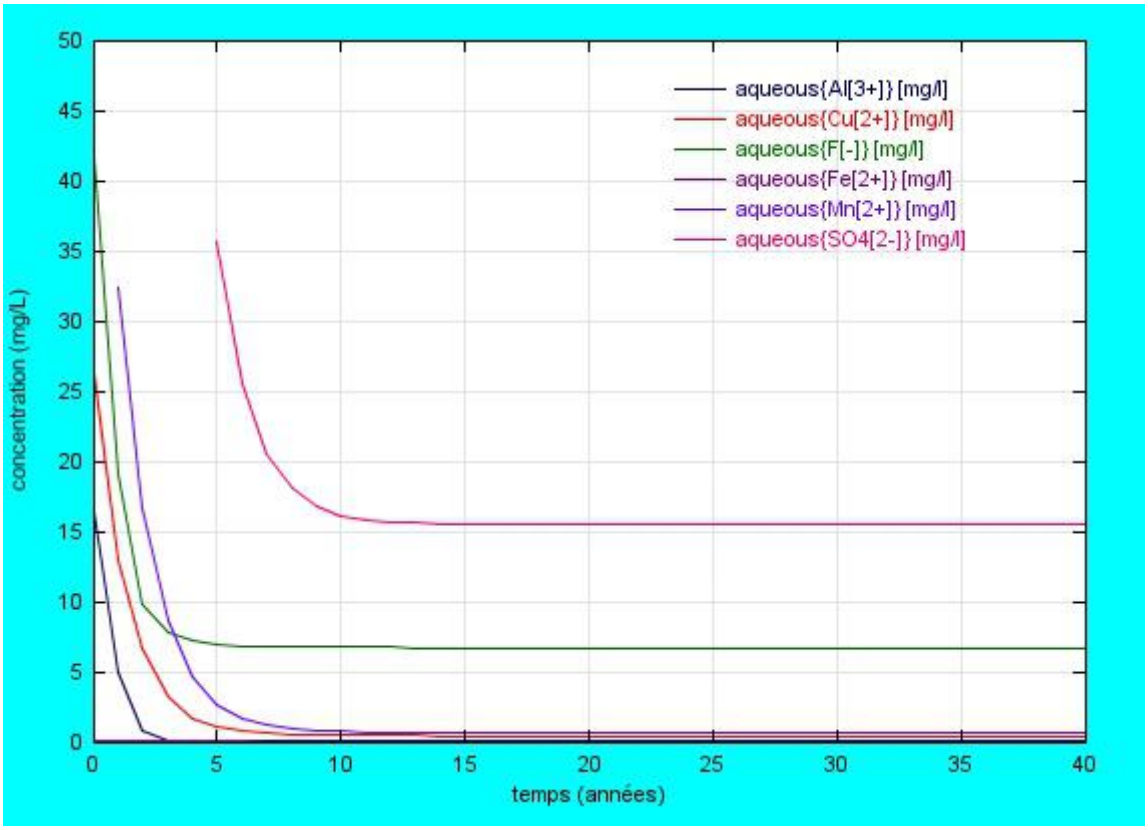


Figure 17 : Simulation de l'évolution de la qualité des eaux. Scénario 1
(Oxydation maximale initiale, alimentation par eaux profondes)

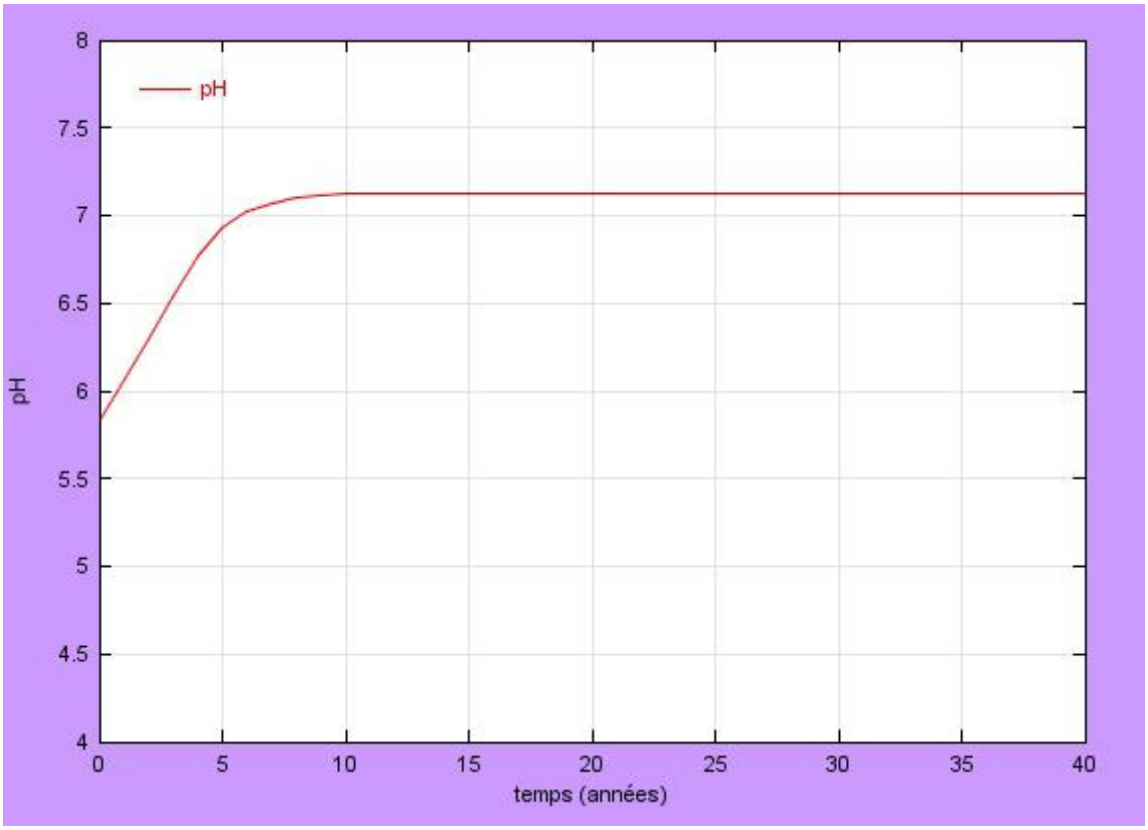


Figure 18 : Simulation de l'évolution du pH des eaux. Scénario 1
(Oxydation maximale initiale, alimentation par eaux profondes)

6.3 Prévisions de l'évolution ultérieure de la qualité des eaux

6.3.1 Renouvellement des eaux

L'évolution ultérieure de la qualité des eaux dépend comme nous l'avons vu de deux facteurs principaux : le rythme de renouvellement du réservoir constitué par le volume noyé des travaux souterrains, et la qualité moyenne des eaux qui l'alimentent.

Le temps de renouvellement du stock d'eau a été estimé, d'après l'étude hydrogéologique entre 1 et 2,6 années. La qualité moyenne des eaux d'alimentation n'est pas directement déterminable. L'expérience montre que deux cas extrêmes peuvent se présenter : une réalimentation par des eaux d'origine profonde, ou par des eaux d'origine essentiellement superficielle.

Dans le cas du Burg, on peut considérer que les venues d'eau observées à l'est au niveau 170 forment l'alimentation d'origine profonde la plus probable. Ces venues d'eau constituent actuellement le débit majeur alimentant la mine, mais il n'est pas sûr qu'il en soit toujours ainsi une fois que le niveau de débordement sera atteint.

Si l'on envisage au contraire une alimentation par des eaux d'origine superficielle, quelques échantillons prélevés aux niveaux 24 et 54 permettent d'en déterminer les caractéristiques chimiques possibles.

Dans les simulations qui suivent, on envisagera successivement ces deux possibilités, qui permettent d'encadrer avec une certaine confiance l'évolution ultérieure du système.

6.3.2 Méthode de simulation

L'évolution de la qualité des eaux postérieurement au débordement des ouvrages a donc été simulée pour quatre scénarios, correspondant aux modèles 1 et 2 de l'eau de remplissage (cf Tableau XIII) et dans les deux cas, soit à une alimentation d'origine profonde, soit à une alimentation d'origine superficielle.

On part dans chaque cas d'un volume initial constitué par l'eau de remplissage. Dans tous les cas, ce volume a été renouvelé 20 fois par l'eau d'alimentation, ce qui correspond à une durée de 40 ans dans le cas où l'on admet un temps de renouvellement de l'eau des TMS de 2 ans.

La simulation est menée comme précédemment en présence des minéraux principaux de la paragenèse (quartz, muscovite, argiles, fluorite, minéraux cuprifères …). L'eau de renouvellement est un modèle basé sur l'échantillon BF1 (Tableau IV) pour les scénarios avec réalimentation profonde.

Pour les scénarios avec réalimentation superficielle, c'est l'échantillon BF10 (Tableau V), considéré comme exemplaire de ce type qui a été choisi, en considérant toutefois – à titre de précaution là encore - qu'il était saturé en oxygène (~9 mg/L d'oxygène dissous au lieu des 6,5 mg/L observés).

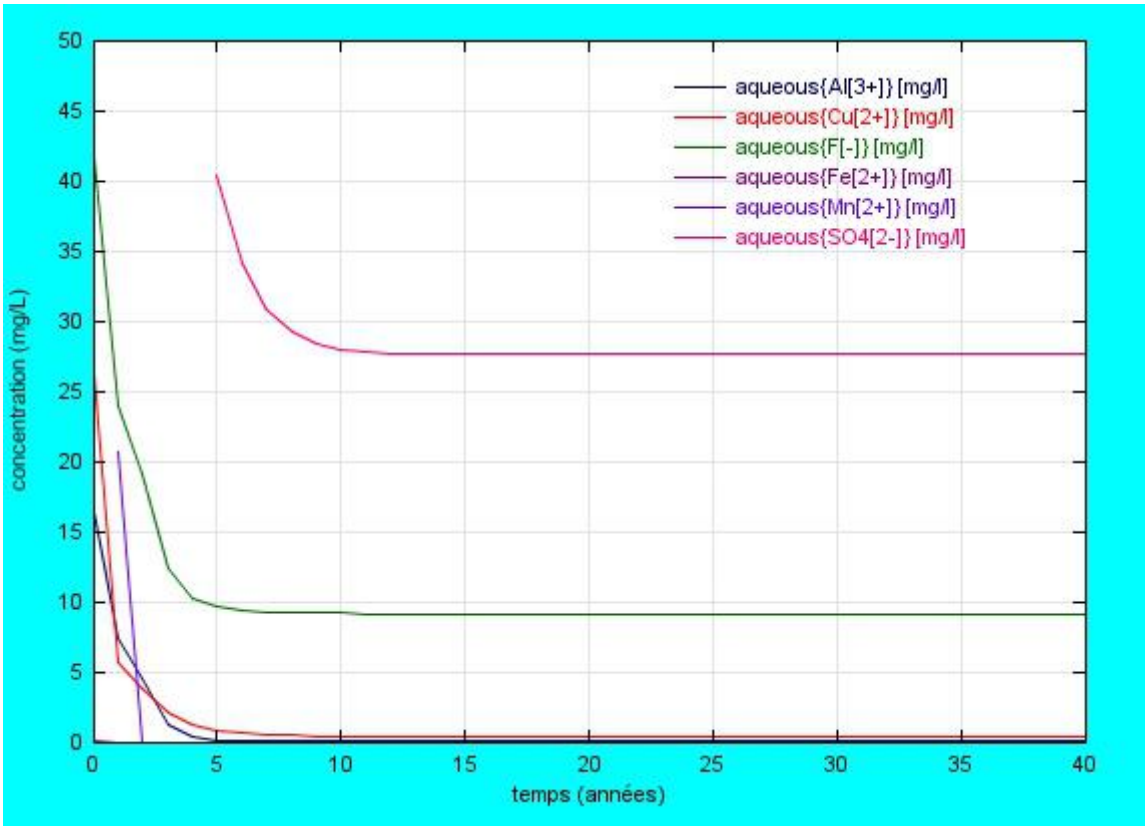


Figure 19 : Simulation de l'évolution de la qualité des eaux. Scénario 2
(Oxydation maximale initiale, alimentation par eaux superficielles)

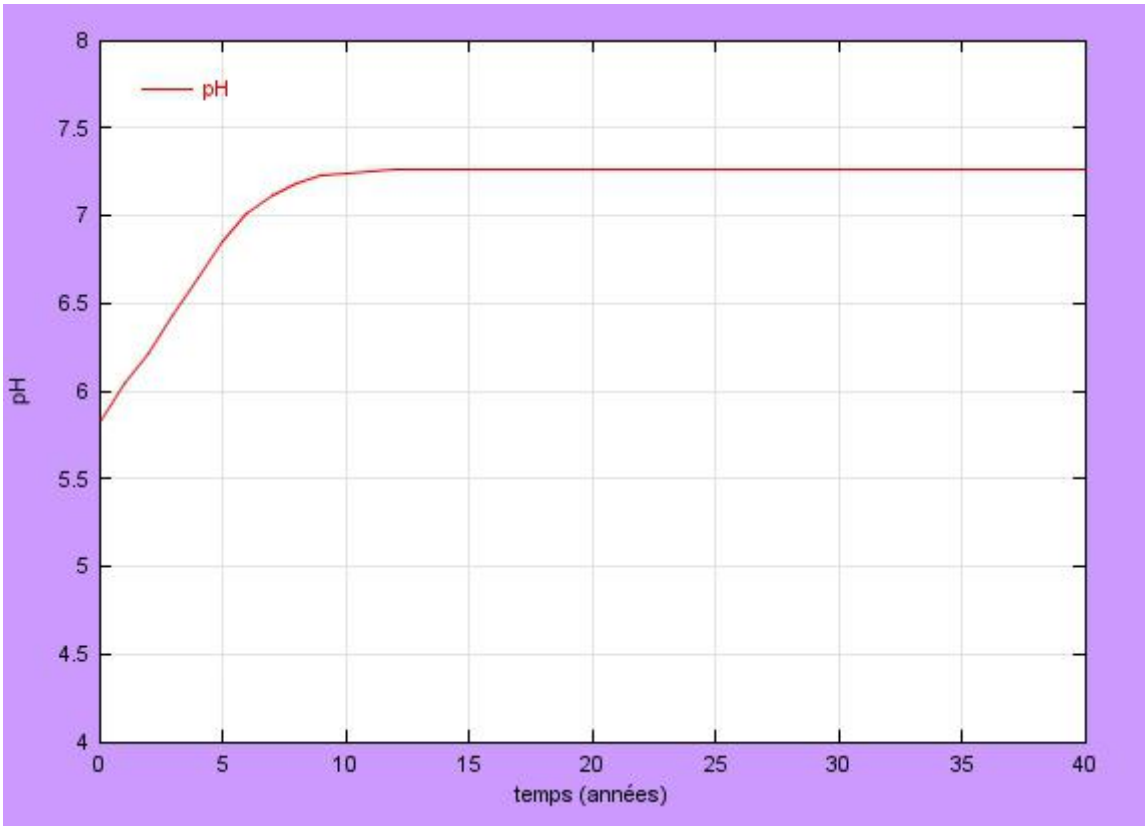


Figure 20 : Simulation de l'évolution du pH des eaux. Scénario 2
(Oxydation maximale initiale, alimentation par eaux superficielles)

6.3.3 Présentation des résultats

Les quatre scénarios de simulation retenus sont donc les suivants :

- *Scénario 1* – Oxydation maximale au cours du remplissage initial, cas d'une alimentation ultérieure par des eaux d'origine profonde ;
- *Scénario 2* – Oxydation maximale au cours du remplissage initial, cas d'une alimentation ultérieure par des eaux d'origine superficielle ;
- *Scénario 3* – Oxydation réduite au cours du remplissage initial, cas d'une alimentation ultérieure par des eaux d'origine profonde ;
- *Scénario 4* – Oxydation réduite au cours du remplissage initial, cas d'une alimentation ultérieure par des eaux d'origine superficielle.

Les résultats de ces différentes simulations sont illustrés dans les figures ci-dessous (Figure 17 à Figure 23) qui présentent d'abord l'évolution du pH, puis celle des concentrations en sulfate, aluminium, fer, cuivre, et fluor des eaux émises à l'exutoire, en fonction du temps écoulé depuis la fin de l'ennoyage (premier débordement).

Le Tableau XIV permet de comparer la qualité des eaux atteinte en fin de simulation (régime quasi-stabilisé) pour ces mêmes paramètres et pour la charge totale dissoute, pour chacun des quatre mêmes scénarios.

6.3.4 Commentaires sur les résultats obtenus pour les différents scénarios

Ces résultats appellent les principaux commentaires ci-dessous :

1. On vérifie dans tous les cas que la qualité moyenne des eaux après débordement ne peut que s'améliorer avec le temps[9], et qu'un régime stabilisé est atteint à partir de 15 années, ce qui correspond à un facteur de renouvellement des eaux de 7 à 8, comme pour les autres gisements. Ce comportement exclut de plus, en l'absence de perturbations extérieures au système (changement d'alimentation des eaux, pompages dans les anciens travaux, …) une quelconque dégradation à long terme.
2. Pour tous les scénarios retenus, le pH évolue rapidement et se stabilise vers une valeur comprise entre 7 et 8, et aucun phénomène notable d'acidification des eaux ne paraît réellement à redouter.
3. La qualité des eaux pendant les premières années est évidemment dictée par le modèle de l'eau de remplissage initial choisi (Tableau XIII), mais la qualité en régime stabilisé ne dépend pratiquement que de l'origine de l'eau d'alimentation. Les scénarios 1 et 3 d'une part, et 2 et 4 d'autre part, sont donc à très peu près identiques sur ce plan.
4. En régime stabilisé (Tableau XIV) les concentrations en aluminium et fer devraient être notablement inférieures aux normes de rejet. La charge totale dissoute (< 100 mg/L) et la concentration en sulfate (< 30 mg/L) resteront faibles dans tous les cas.

---

[9] Abstraction faite de fluctuations transitoires dues à une éventuelle hétérogénéité des eaux au sein des TMS.

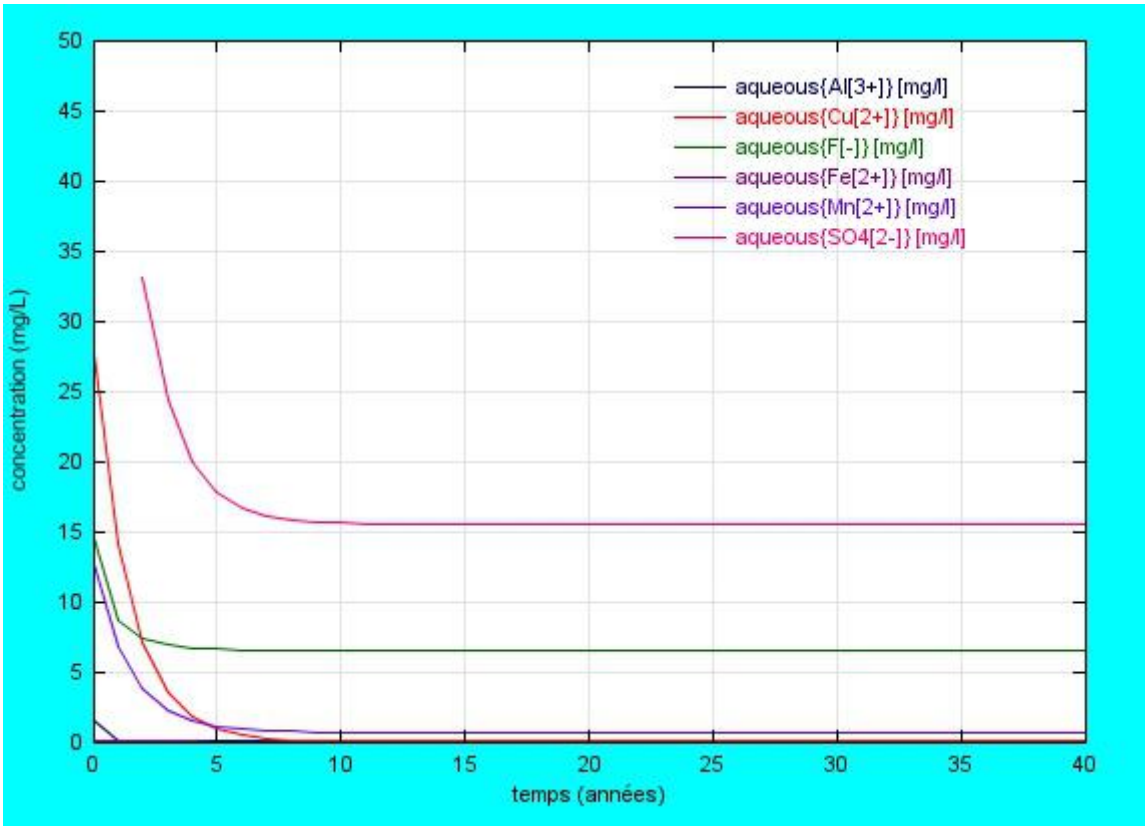


Figure 21 : Simulation de l'évolution de la qualité des eaux. Scénario 3
(Oxydation initiale réduite, alimentation par eaux profondes)

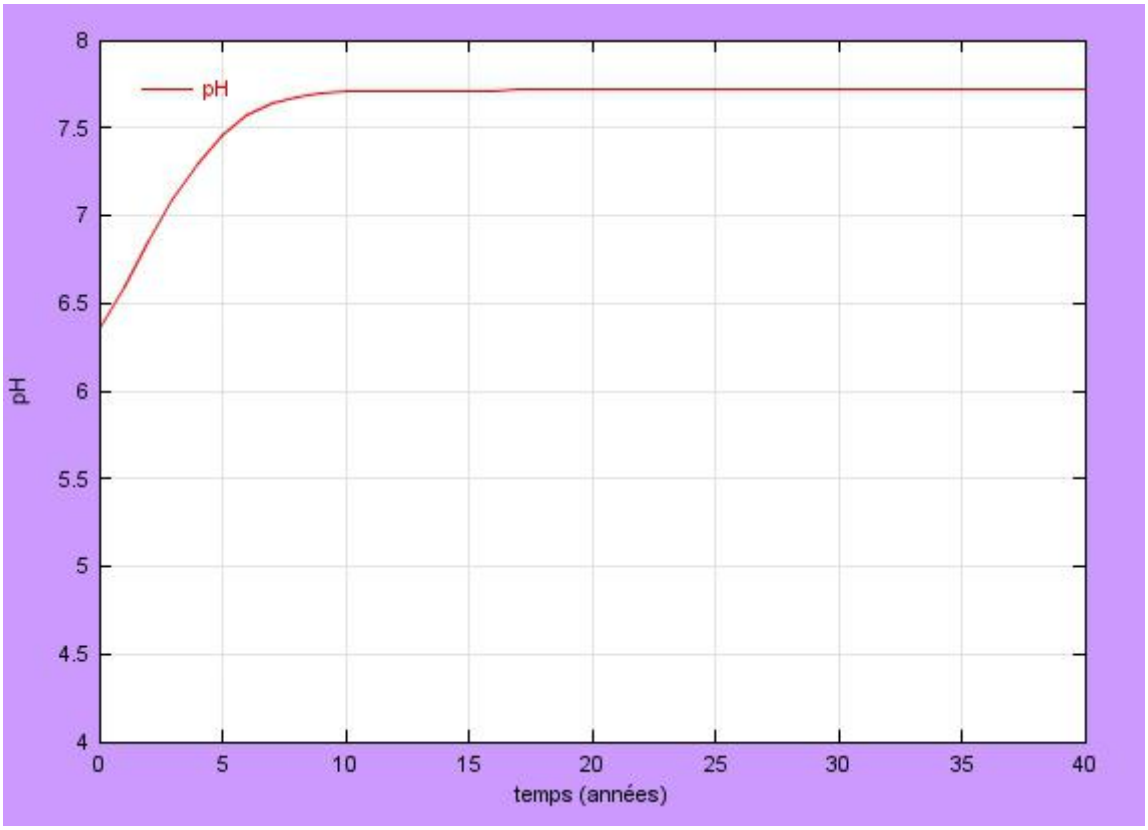


Figure 22 : Simulation de l'évolution du pH. Scénario 3
(Oxydation initiale réduite, alimentation par eaux profondes)

5. La concentration en fluor en régime stabilisé pourrait s'élever à environ 10 mg/L pour une alimentation superficielle, mais elle ne devrait être que de 6 ou 6,5 mg/L dans le cas d'une alimentation profonde. Un contraste notable est aussi à prévoir pour les concentrations - d'ailleurs faibles - en manganèse (0,68 mg/L contre moins de 0,02 mg/L)
6. Les concentrations prévisionnelles en cuivre montrent suivant les scénarios des variations assez importantes mais restent là-aussi, modestes en régime stabilisé : 0,14 à moins de 0,01 mg/L.

Tableau XIV : Qualité prévisionnelle des eaux émises après abandon et en régime stabilisé par les TMS du Burg
(l'eau d'exhaure actuelle et l'eau des anciens travaux de Coutery sont rappelées pour comparaison)

Scénario de fonctionnement		**Scénario 1**	**Scénario 2**	**Scénario 3**	**Scénario 4**	**BS7 *Burg exhaure***	**BS4 *Coutery***
oxydation initiale		*maximale*	*maximale*	*réduite*	*réduite*	*(pour comparaison)*	
alimentation		*profonde*	*superficielle*	*profonde*	*superficielle*		
pH		7,13	7,27	7,71	7,27	7,43	6,6
Eh	mV	324	798	207	798	347	288
TDS	mg/L	193	95	68	78		
F^-	mg/L	6,7	9,1	6,5	9,1	2,64	1,38
SO_4^{--}	mg/L	15,5	27,6	15,5	29,4	133	11,8
Fe	mg/L	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,001	1,00
Mn	mg/L	0,68	0,02	0,68	<0,01	3,4	0,43
Cu	mg/L	0,061	0,4	0,006	0,14	0,058	0,012
Al	mg/L	0,002	0,002	<0,001	0,002	0,072	0,037

6.4 Signification des résultats présentés

6.4.1 Comparaison avec les observations disponibles

On a intégré pour comparaison dans le Tableau XIV, à la fois les eaux de l'exhaure actuel des travaux miniers du Burg, et les eaux émises par l'ancienne exploitation noyée du filon de fluorine de Coutery, au sud du gisement (cf Figure 1).

L'eau de l'exhaure actuel peut être comparée à la fois aux modèles d'eau de remplissage initial, et aux eaux des premiers stades de simulation des différents scénarios. Elle s'en rapproche par la charge dissoute (TDS) et la concentration en sulfate. Elle apparaît toutefois notablement plus basique, et plus pauvre aussi bien en en fluor qu'en métaux (Mn, Cu, et accessoirement aluminium). Comme dans les autres gisements, on peut attribuer ceci

au fait que, pour l'essentiel, les eaux exhaurées n'ont pas eu la possibilité ou le temps d'interagir avec les minéralisations.

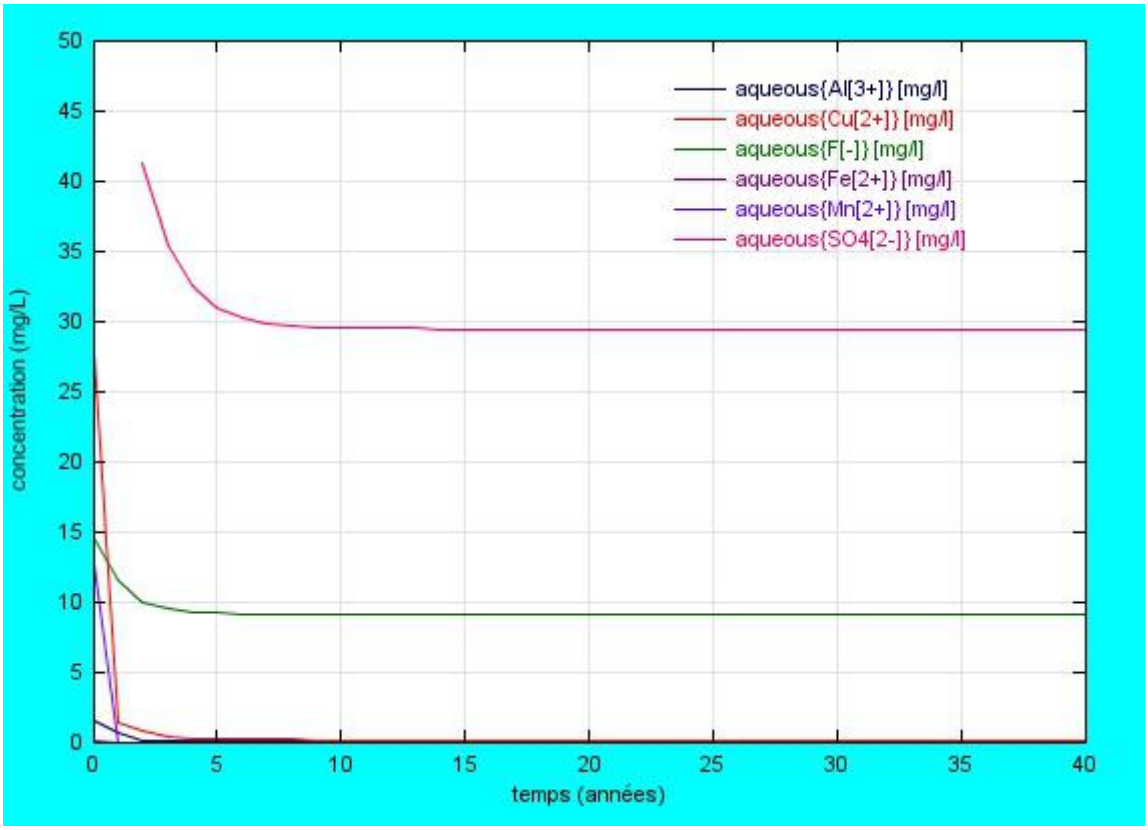


Figure 23 : Simulation de l'évolution de la qualité des eaux. Scénario 4
(Oxydation initiale réduite, alimentation par eaux superficielles)

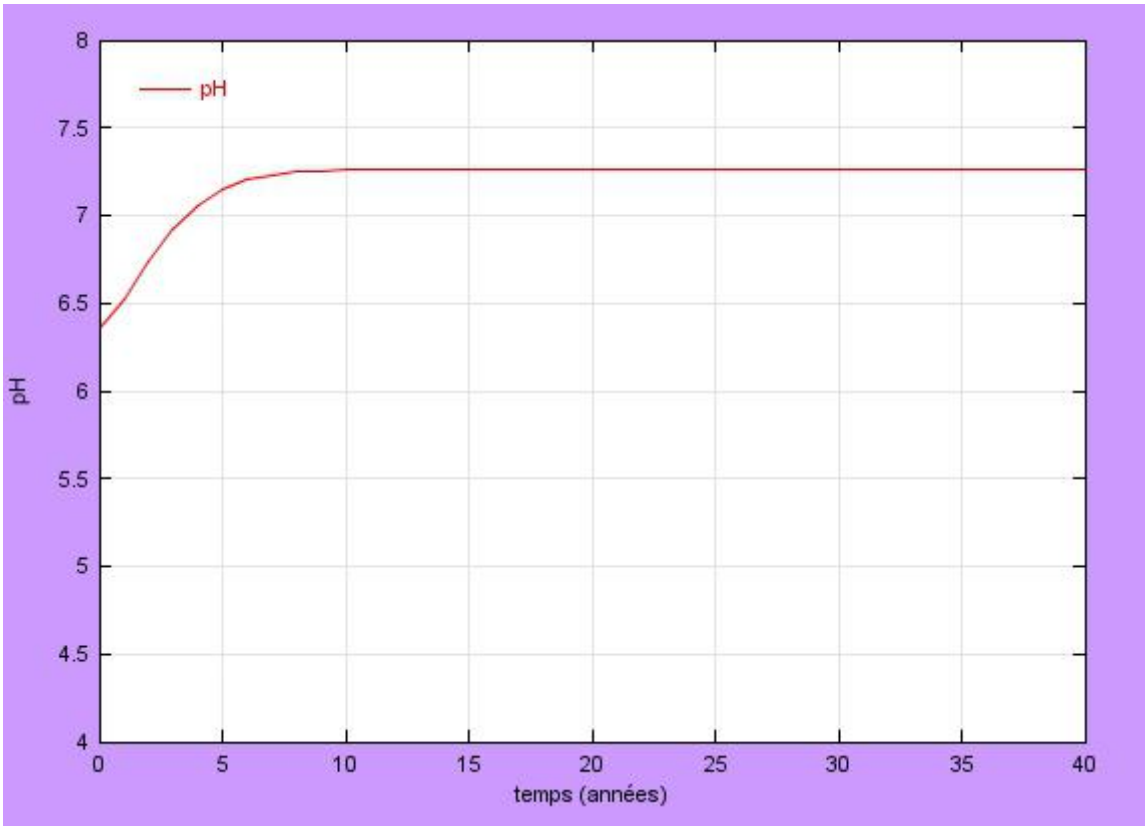


Figure 24 : Simulation de l'évolution du pH. Scénario 4
(Oxydation initiale réduite, alimentation par eaux superficielles)

La comparaison des eaux de Coutery avec les simulations en régime stabilisé présentées dans le Tableau XIV est plus importante, puisque ces eaux représentent effectivement, même de façon imparfaite, l'évolution à long terme des écoulements miniers. On peut constater que le chimisme observé est effectivement cohérent avec la gamme des valeurs obtenues lors de nos simulations pour le Eh, la charge totale, et les concentrations en manganèse et cuivre.

Le pH plus bas et les concentrations en fer et aluminium un peu plus élevées de l'eau de Coutery peuvent s'expliquer par la contamination –avérée- de celles-ci par des eaux superficielles. La concentration considérablement plus faible en fluor (1,4 contre 6,5 à 9 mg/L) impliquerait en outre que seule une partie des eaux émises a effectivement réagi avec la minéralisation fluorée, ce qui nous amène à discuter les limitations de l'approche retenue.

6.4.2 Limitations de la méthode de simulation

Comme nous l'avons déjà souligné plus haut, la méthode de simulation utilisée repose essentiellement sur l'expérience acquise sur d'autres gisements métalliques sulfurés. Les différents scénarios adoptés couvrent en principe toute la gamme de fonctionnement envisageable des TMS après abandon.

Sur le plan géochimique les modélisations réalisées reposent en outre sur deux postulats fondamentaux, qui sont eux-aussi justifiés globalement par les observations faites sur les autres gisements :

1. On suppose en premier lieu que le réservoir que représentent les TMS noyés constitue un mélangeur parfait.
2. On admet à chaque instant que, pour l'essentiel, les réactions entre l'eau du remplissage et les phases minérales présentes se font à l'équilibre (donc de façon instantanée).

La remise en cause partielle du premier postulat conduit à envisager certaines fluctuations de la qualité des eaux émises, spécialement dans la ou les premières années suivant l'abandon. Ces fluctuations devraient malgré tout rester mineures et en tout cas s'amortir rapidement.

La non vérification du second postulat peut avoir au contraire des répercussions à long terme : si par exemple les eaux ne s'équilibrent pas complètement avec la fluorine présente dans les TMS, alors la concentration en fluor dissous sera surestimée dans la prévision. C'est ce que pourrait suggérer la concentration observée dans l'eau de Coutery.

Quelques hypothèses annexes (formation des sulfates de cuivre, de certaines argiles, …) peuvent conduire de la même manière à surestimer dans les simulations certaines concentrations. Néanmoins, les choix qui ont été faits ont visé comme nous l'avons souligné, (i) à respecter les saturations et équilibres observés dans les prélèvements en mine, et (ii) à préférer en cas de doute une hypothèse maximisant l'impact potentiel.

6.4.3 Enseignements à tirer des simulations

Outre l'évaluation prévisionnelle des pH, et des gammes de concentration en polluants potentiels des eaux de débordement initial et de leur évolution future, les simulations précédentes permettent de suggérer certaines actions qui pourraient optimiser la gestion des eaux des TMS en vue de leur abandon :

1. Les simulations montrent l'incidence sur la qualité des eaux du type d'alimentation - superficielle ou profonde - du système ; toutes les mesures propres à limiter les entrées d'eaux oxydantes en provenance de la surface devront donc être envisagées.
2. Dans tous les cas, les eaux émises en régime stabilisé présentent - dans les conditions de nos simulations, c'est-à-dire à l'équilibre - des concentrations en fluor excédant les normes habituelles de rejet. Pour minimiser cette concentration, et éventuellement s'affranchir d'un traitement des eaux à long terme, il faudrait empêcher que l'ensemble des eaux émises puisse s'équilibrer avec la minéralisation fluorée ou du moins que les eaux n'entrent pas en contact avec celle-ci dans leur totalité.
3. Une autre voie envisageable est de disposer dans les limites du site d'un flux d'eau non marquée qui permette une dilution des eaux de mine avant rejet.

Le fonctionnement hydrogéologique et hydrochimique du site présente une opportunité sur ces deux derniers points : celle de capter sélectivement les venues d'eaux profondes à

l’est et éventuellement à l’ouest des TMS, avant que celles-ci n’entrent en contact avec les minéralisations de la zone exploitée. Leur drainage pourrait être assuré gravitairement en parallèle à celui du flux issu des TMS proprement dits, de façon à minimiser celui-ci, et à permettre une dilution éventuelle avant rejet à l’aval du carreau.

7. PRINCIPALES CONCLUSIONS

7.1 Fonctionnement du système actuel

L'environnement hydrogéologique de l'exploitation filonienne du Burg est constitué en profondeur par un massif schisto-gréseux fracturé à faible perméabilité (Schistes de l'Albigeois). Sur les surfaces hautes, des altérites et des alluvions anciennes renferment des nappes perchées discontinues alimentant régionalement certaines sources pérennes, et captées par quelques puits fermiers.

L'exhaure actuel des travaux miniers souterrains représente un débit moyen de l'ordre de 85 m^3/h. Les eaux sont sulfatées, de pH faiblement basique, et de charge dissoute modérée. Elles présentent des concentrations en fluor et manganèse de 2 à 3 mg/L (et très faibles pour les autres métaux), et ne subissent qu'un traitement simple par floculation décantation. Ce traitement est réalisé pour partie au niveau des albraques ainsi qu'au jour, conjointement avec les eaux du carreau.

L'inventaire systématique (réalisé par Sogerem) et l'étude hydrochimique (présentée dans le présent rapport) des venues d'eaux ponctuelles observées en mine permet d'expliquer la qualité globalement acceptable des eaux d'exhaure :

- Les venues d'eaux majeures (au moins 60 % du total de l'exhaure) sont observées dans les niveaux profonds, essentiellement à l'est, et accessoirement à l'ouest du gisement. Elles proviennent de la structure filonienne et correspondent à des eaux de pH modérément basique, assez alcalines, très faiblement chargées et proches de l'équilibre avec l'encaissant schisteux.
- Des eaux modérément acides, mais peu chargées correspondant à une alimentation superficielle à partir des zones altérées, sont observées dans les niveaux supérieurs des TMS.
- Les eaux à la fois acides (pH 3 à 5) et à charge élevée en fluor et en métaux résultent de la réaction plus ou moins poussée des précédentes avec la minéralisation fluorée et sulfurée au contact de l'air des vides miniers. Ces eaux ne représentent toutefois qu'une proportion limitée de l'exhaure total.

La bonne qualité relative des eaux d'exhaure est attribuée dans beaucoup de gisements en activité au même type de fonctionnement.

7.2 Prévisions concernant l'ennoyage de la mine et le débit de débordement

La simulation de l'ennoyage après arrêt de l'exhaure a été réalisée à partir d'un modèle hydrogéologique simple, construit sur la base des données qui sont disponibles et de la répartition estimée des volumes résiduels par étage d'exploitation. Les différents scénarios conduisent à prévoir une durée de remplissage de 5 à 12 mois (232 jours pour la simulation de référence).

Le débordement devrait s'établir aux alentours de la cote 507 mNGF par l'intermédiaire du puits ou de la descenderie, voire au sein des remblais du carreau, ce qui nécessiterait de prévoir à ce niveau un drainage pour canaliser l'eau de débordement.

La cote de débordement étant inférieure aux cotes de drainage naturel des aquifères de la surface haute, le réservoir minier continuera à être alimenté et un débit de débordement permanent moyen estimé entre 10 et 17 m^3/h devrait s'établir.

Ce débit implique un temps de renouvellement des eaux du réservoir minier compris entre 1 et 2,6 ans, ce taux de renouvellement étant un paramètre majeur pour prévoir l'évolution de la qualité des eaux émises par les anciens travaux.

7.3 Qualité des eaux et impact à long terme

Les simulations réalisées indiquent pour les eaux du remplissage initial, un pH faiblement acide, une charge totale dissoute de quelques centaines de milligrammes par litre, mais aussi des concentrations en fluor et en métaux qui nécessiteront dans tous les cas un traitement des eaux avant rejet.

Après le premier débordement, et quelles que soient les hypothèses adoptées sur l'alimentation (superficielle ou profonde) du système, une amélioration assez rapide, puis une stabilisation définitive de la qualité des eaux doivent survenir dans un délai maximum d'une quinzaine d'années.

Le souci environnemental majeur en régime stabilisé restera la concentration des eaux en fluor qui, dans les hypothèses les plus défavorables, pourrait rester voisine de 10 mg/L.

7.4 Suggestions pour la gestion environnementale du système

La nécessité d'un traitement des eaux pendant les premières années suivant la fin de l'ennoyage des TMS apparaît certaine. Diverses dispositions relatives à la gestion des eaux des travaux miniers sont néanmoins envisageables pour améliorer de façon sensible les concentrations en métaux en régime stabilisé, voire pour s'affranchir à terme de la nécessité d'un traitement.

Les voies à examiner concernent d'une part le contrôle de l'alimentation d'origine superficielle, et d'autre part la collecte sélective des venues d'eau profondes à l'est et éventuellement à l'ouest du gisement. Certaines dispositions complémentaires de gestion des eaux du carreau devront également être considérées.

La définition précise des mesures qu'il serait opportun de prendre au moment de la fermeture de la mine pour satisfaire aux principes évoqués ci-dessus dépend du développement à venir des travaux miniers et d'une faisabilité technique qui ne peut être discutée qu'avec l'exploitant.

RÉFÉRENCES

1 Guérangé-Lozes J. (1987) – Les nappes varisques de l'Albigeois cristallin. Lithostratigraphie, volcanisme et déformations (thèse État, univ. Paul-Sabatier, Toulouse). *Documents BRGM*, n°135, 259 p.

2 *Anonyme* (1999) – Mine du Burg. Plaquette, Sogerem, sans pagination.

3 *Anonyme* (2002) – Création d'une collecte de données sur les circulations des eaux de la Mine du Burg. Rapport inédit, Sogerem, 10 p. + Annexes.

4 Huet-Taillanter S., Thiry M. (1998) – Méthodes d'analyse des eaux : I – Chromatographie ionique en phase liquide. *Rapport École des Mines de Paris*, CIG/ARMINES, LHM/RD/98/32, 45 p.

5 Huet-Taillanter S., Thiry M. (1998) – Méthodes d'analyse des eaux : II – Spectrométrie d'absorption. *Rapport École des Mines de Paris*, CIG/ARMINES, LHM/RD/98/33, 40 p.

6 *Anonyme* (2003) – L'industrie et l'environnement en midi-pyrénées. Les 150 plus gros risques et rejets industriels par entreprise, *Drire Midi-Pyrénées*, (http://www.geotrouvetout.fr/drire_mp/indexflash.asp).

7 van der Lee J. (1998) – Thermodynamic and mathematical concepts of CHESS. Rapport Technique, École des Mines de Paris, *CIG/ARMINES*, LHM/RD/98/39, 99 p.

8 van der Lee J., De Windt L. (2002) – CHESS tutorial and cookbook, updated for version 3.0. User's manual. Rapport Technique, École des Mines de Paris, CIG/ARMINES, LHM/RD/02/13, 112 p.

9 Portier J. (2002) – Fluor. In : Encyclopaedia Universalis, version 8, *Encyclopaedia Universalis France S.A.*, Paris.

10 Domange L. (1960) – Fluor. In : P. Pascal dir., *Nouveau Traité de chimie minérale*, t. XVI, Masson, Paris.

11 de Pape R. (2002) – Halogènes. In : Encyclopaedia Universalis, version 8, *Encyclopaedia Universalis France S.A.*, Paris.

12 Roger G. (2002) – Fluorures naturels. In : Encyclopaedia Universalis, version 8, *Encyclopaedia Universalis France S.A.*, Paris.

13 Lubin J.-C. (2002) – Apatites. In : Encyclopaedia Universalis, version 8, *Encyclopaedia Universalis France S.A.*, Paris.

14 Hem J.D. (1985) Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water. 3rd ed. *USGS Water-Supply Paper*, **2254**, 263 p.

15 Appelo C.A.J., Postma D. (1996) – Geochemistry, groundwater and pollution. Balkema, Rotterdam, 536 p.

16 Letolle R. (2002) – Géochimie. In : Encyclopaedia Universalis, version 8, *Encyclopaedia Universalis France S.A.*, Paris.

17 Whitford G.M. (1959) - The metabolism and toxicity of fluoride. *Monographs of Oral Science*, Vol 13, 1-160.

18 Truhaut R., Ferrando R. (edit.) (1978) – Toxicology and nutrition, Karger, Paris.

19 Li X.S. *et al.* (1995) - Effect of fluoride exposure on intelligence in children. *Fluoride*, Vol 26, No.4, 189-192.

20 Ding, L.I., Hu, Y.H., *et al.* (1992) - The nervous systemic complications of chronic fluorosis *Chinese Journal of Endemiology*, Vol 2., 63-70.

21 Avioli V.L., Krene S.M. (1990) – Metabolic bone disease and clinically related disorders (2nd ed.). Saunders, Philadelphia (Pa).

22 Schmitt J.-M., Combes P., Ledoux E. (2003) - Qualité des eaux après fermeture des mines : remplissage initial, évolution transitoire, stabilisation à long terme et gestion environnementale. Colloque GISOS-Après-Mine 2003, Nancy (*Revue fr. Géotechnique*, sous presse).

23 Ledoux E., Combes P., Schmitt J.-M. (1999) - Évaluation des impacts environnementaux, de la mesure au modèle. *Les Techniques de l'Industrie Minérale* No 3, 35-45.

24 Schmitt J.-M., Combes P. (1996). - Impact hydrogéologique et géochimique de l'abandon d'une mine métallique. Cas de Largentière (Ardèche, France). *Mines & Carrières*, Les Techniques **V**(96), 38-48.

RAPPORT D'ÉTUDE 28/11/2005

DRS-05-72908/R01

Mine du Burg (81)

Conception et dimensionnement des traitements de mise en sécurité du puits et des cheminées d'aérage

CONCEPTION ET DIMENSIONNEMENT DES TRAITEMENTS DE MISE EN SECURITE DU PUITS ET DES CHEMINEES D'AERAGE

DIRECTION DES RISQUES DU SOL ET DU SOUS-SOL

SOGEREM

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	Nicolas POIROT	Xavier DAUPLEY	Medhi GHOREYCHI
Qualité	Ingénieur de la Direction des Risques du Sol et du sous-sol	Responsable de l'unité Risques Géotechniques liés à l'Exploitation du sous-sol	Directeur des Risques du Sol et du sous-sol
Visa			

TABLE DES MATIERES

1. INTRODUCTION 5

2. TERRAINS ENCAISSANTS 5

3. ETUDE DE LA MISE EN SECURITÉ DU PUITS PAR UN BOUCHON AUTOPORTANT : FAISABILITE ET DIMENSIONNEMENT 6

3.1 Caractéristiques techniques du puits.....6

3.2 Principe du bouchon autoportant 7

3.3 Positionnement du bouchon autoportant.....7

3.4 Hauteur du bouchon.....8

3.4.1 Hypothèses..... 8

3.4.2 Résultats..... 8

3.5 Vérification de la stabilité du complexe bouchon – muraillement - Scellement 9

3.6 Préalables à la réalisation du bouchon autoportant 10

3.7 Coupe technique du bouchon et mode de realisation 11

4. ETUDE DU TRAITEMENT DE MISE EN SÉCURITÉ DES CHEMINÉES 13

4.1 Caractéristiques techniques des cheminées (données SOGEREM).....13

4.1.1 Cheminée Ouest..... 13

4.1.2 Cheminée Est 13

4.1.3 Cheminée Bourrelié 13

4.2 Définition et dimensionnement des traitements de mise en sécurité des cheminees.....14

4.2.1 Traitement envisagé par la SOGEREM pour la mise en sécurité des cheminées 14

4.2.2 Avis sur le traitement proposé et dimensionnements complémentaires .. 14

4.3 Coupe type de la mise en sécurité d'une cheminée.....17

5. PRÉCONISATIONS GÉNÉRALES POUR LA RÉALISATION DES MISES EN SÉCURITÉ.....19

5.1 Réalisation des bouchons autoportants 19

5.2 Conditions sur le remblayage en tête des bouchons autoportants.....19

5.3 Bouchon de finition.....19

1. INTRODUCTION

La mine du Burg se situe dans le Tarn (81). La société SOGEREM y extrait en souterrain de la fluorine. L'exploitation est menée par la méthode des chambres montantes remblayées.

La cessation de l'activité conduit la SOGEREM à mettre en sécurité quatre ouvrages, à savoir, un puits et 3 cheminées d'aérage.

2. TERRAINS ENCAISSANTS

Les ouvrages réalisés ont été foncés dans des schistes noirs. Les éléments à notre disposition consistent en des résultats d'essais et des observations effectuées lors de notre visite de la mine, le 24 octobre 2005.

Ces schistes noirs présentent des plans de schistosité, dont l'orientation apparaît variable (Figure 6), néanmoins il semblerait qu'elle soit sensiblement subhorizontale à proximité des ouvrages selon l'exploitant.

Les propriétés mécaniques des schistes noirs obtenues sur le site de Montroc, site à ciel ouvert situé à 8 km sont tirées d'essais réalisés par le BRGM et compilées dans le tableau ci-après.

Références des études BRGM	Caractéristiques physiques et mécaniques						
	Matrice rocheuse					Discontinuités	
	Poids volumique en kN/m^3	c (kPa)	φ	E (MPa)	ν	c (kPa)	φ
Desurmont et Vidal (1978)	27,3						26° à 31° (schistosité)
Bonnart (1981)	26	20 à 550	13° à 28°	10 000	0,3		
Bonnart (1985)		100 45	30° 25°			0 à 130	14° à 22°
Delaunay (1994)	26	100 45					

Tableau 1 : caractéristiques mécaniques et physiques des schistes
(c = cohésion, φ = angle de frottement, E = module d'Young, ν = coefficient de Poisson)

Les caractéristiques mécaniques des schistes apparaissent assez dispersées. Cette dispersion est imputable à l'hétérogénéité et à l'anisotropie (schistosité) de ces matériaux. La cohésion moyenne peut, tout de même, être qualifiée de moyenne à élevée.

L'inspection visuelle de ce matériau, réalisée lors de notre visite, a permis de constater que les premiers mètres de schistes noirs, altérés, apparaissent moins résistants que ce même matériau observé à une profondeur de 54 m (au niveau de la première recette du puits). Des veines de quartz ont également été distinguées au sein des schistes noirs, favorisant leur cohésion localement (Figure 7).

Sur le plan hydraulique, l'exploitant a indiqué qu'aucune venue d'eau n'a été observée dans les 50 premiers mètres de la colonne du puits. Ce point a pu être confirmé lors de notre visite. Cependant à l'arrêt de l'exhaure, les eaux remonteront et viendront ennoyer les travaux miniers jusqu'à la cote altimétrique correspondant au point d'exhaure situé à proximité du carreau (étude CESAME). La colonne du puits devrait donc être quasiment totalement ennoyée.

3. ETUDE DE LA MISE EN SECURITE DU PUITS PAR UN BOUCHON AUTOPORTANT : FAISABILITE ET DIMENSIONNEMENT

3.1 CARACTERISTIQUES TECHNIQUES DU PUITS

Le puits a été foncé entre 1960 et 1963 par une méthode traditionnelle. Sa profondeur est de 220 m. Il comporte cinq recettes, dont la première se situe à une profondeur de 54 m.

A la fin des années 1980, un muraillement en moellons bétons pleins d'épaisseur 150 mm a été élevé jusqu'en surface depuis une profondeur de 135 m. A l'extrados, l'espace entre le muraillement et les schistes noirs a été comblé par du béton.

Pour les besoins de sa réalisation, ce muraillement comporte une série de réservations rectangulaires, se répartissant à 2 par section, espacées verticalement de 1,25 m environ le long de la colonne du puits.

Concernant le soutènement de ce muraillement, l'exploitant nous a indiqué qu'aucune fondation ne le soutenait en pied, il est donc suspendu. Il est maintenu, d'une part, par frottement le long du scellement, d'autre part, par le boulonnage des guides. Ces ancrages ponctuels sont au nombre de 2 par section, espacées verticalement tous les mètres environ. Ces boulons ont une longueur estimée à 1,5 m et un diamètre de 18 mm.

La coupe technique du puits en exploitation, réalisée par la SOGEREM est présentée en Figure 1. Actuellement, ce puits est équipé de guides skip, guides cage, de poutres, de câbles et d'échelles (Figure 8).

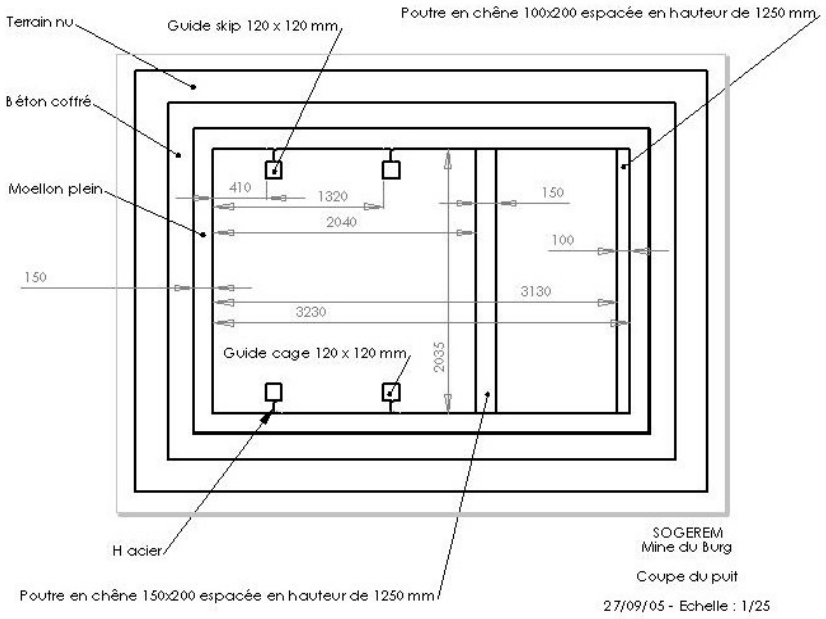


Figure 1 : coupe technique du puits transmise par SOGEREM

On a également pu constater lors de notre visite, l'absence de galeries techniques, réserves et recettes dans la colonne du puits entre la surface et la profondeur de 54 m.

3.2 PRINCIPE DU BOUCHON AUTOPORTANT

La mise en place d'un bouchon autoportant a pour objectif de condamner définitivement l'accès aux anciens travaux et garantir la stabilité des terrains de surface.

La technique consiste à combler toute la partie supérieure du puits par un matériau autostable qui retransmet au massif, par l'intermédiaire du revêtement, son propre poids ainsi que la ou les charges qui peuvent lui être appliquées.

Ces bouchons rigidifient la tête de puits et les terrains qui l'environnent et permettent d'éviter, sur toute leur hauteur, l'effondrement du revêtement ou l'écoulement d'un matériau boulant dans le puits.

3.3 POSITIONNEMENT DU BOUCHON AUTOPORTANT

Afin de s'assurer que la mise en place d'un bouchon autoportant permette d'écarter tout risque d'une rupture de la tête du puits, il est tout d'abord nécessaire de s'assurer de la présence de terrains encaissants suffisamment compétents pour recevoir le bouchon à des profondeurs accessibles.

Dans le cas de la mine du Burg, les informations disponibles transmises par la SOGEREM complétées par la visite du site ont révélé la présence de schistes noirs sur toute la hauteur de la colonne du puits.

Ces schistes possèdent, aux vues de notre expérience et des données acquises, des propriétés mécaniques suffisantes, pour pouvoir accueillir en leur sein un bouchon autoportant (Figure 9).

L'homogénéité des terrains encaissants nous impose uniquement d'éviter la frange supérieure des terrains pouvant être altérée et où les schistes pourraient avoir des propriétés mécaniques dégradées. Celle-ci a été estimée grâce à la coupe des terrains visibles dans la descenderie principale, dont l'orifice se situe à quelques dizaines de mètres de celui du puits.

Compte tenu des observations effectuées, nous considérons qu'une implantation de la tête du bouchon à 15 m du sol permet de s'affranchir des terrains altérés de surface.

3.4 HAUTEUR DU BOUCHON

3.4.1 HYPOTHESES

Les hypothèses retenues pour estimer la hauteur du bouchon sont présentées dans le Tableau 2. Les calculs ont été menés pour plusieurs valeurs de la résistance au cisaillement de l'interface béton, muraillement.

L'élancement minimal est fixé à 2. Cette condition sur l'élancement du bouchon permet d'en faciliter le blocage dans la colonne du puits et d'en accroître ainsi sa stabilité.

Bien qu'il n'y ait pas de risque de débourrage localement (le puits ne sera pas remblayé), une pression de succion a tout de même été intégrée dans le calcul afin de prendre en compte d'éventuel mouvement d'air lié à un débourrage dans le voisinage du puits.

Profondeur	15 m
Longueur	3,23 m
Largeur	2,035 m
Poids volumique du béton	25 kN/m^3
Poids volumique du remblai saturé	25 kN/m^3
Succion liée à un éventuel débourrage	100 kPa
Surcharge de surface	100 kPa
Résistances au cisaillement de l'interface béton, agglo testées	De 100 kPa à 240 kPa
Elancement minimal du bouchon (rapport entre la hauteur du bouchon et la moyenne de la largeur et de la longueur)	2
Coefficient de sécurité recherché	3

Tableau 2 : hypothèses de calcul de la hauteur du bouchon autoportant

3.4.2 RESULTATS

Selon la résistance au cisaillement retenue, la hauteur du bouchon varie entre 20,2 m et 5,6 m. La feuille de calcul est présentée en annexe 1.

Qs (kPa)	100	120	140	160	180	200	220	240
Hauteur du bouchon (m)	20,2	14,7	11,6	9,5	8,1	7,0	6,2	5,6

Tableau 3 : calcul de la hauteur du bouchon en fonction de la résistance au cisaillement de l'interface
(Qs : résistance au cisaillement de l'interface béton – revêtement)

Pour une interface béton-béton, il est raisonnable de supposer une résistance au cisaillement moyenne Qs de l'ordre de 180 kPa. Par conséquent, une hauteur de bouchon de 8,1 m dont la tête est placée à 15 m de profondeur permet d'assurer la stabilité de l'ensemble bouchon - remblai avec un coefficient de sécurité de 3.

De plus, les réservations au sein du muraillement, une fois remplies de béton constitueront des points d'ancrage du bouchon contribuant à une augmentation du facteur de sécurité.

3.5 VERIFICATION DE LA STABILITE DU COMPLEXE BOUCHON – MURAILLEMENT - SCELLEMENT

Suite au calcul précédent, on assure la stabilité du bouchon par frottement le long du muraillement. Il est maintenant nécessaire de s'assurer que la surcharge que constitue le bouchon et ses éléments sus-jacents ne conduisent pas à la déstabilisation du muraillement.

A cet effet, on se place dans l'hypothèse où le muraillement est uniquement maintenu par frottement le long du scellement sur une hauteur égale à celle du bouchon. Cette hypothèse apparaît pénalisante, car elle suppose une hauteur de frottement minimale et n'intègre aucun autre mode de soutènement du muraillement.

La démonstration de la stabilité de l'ensemble est faite en assimilant le complexe bouchon - remblai – muraillement à un bouchon dit « équivalent » (Figure 2) dont les caractéristiques sont présentées dans le tableau ci-après.

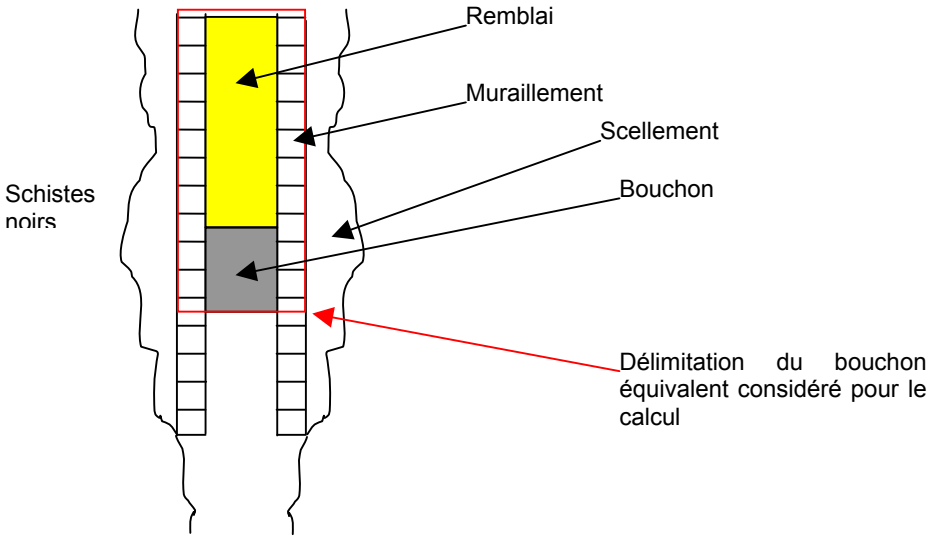


Figure 2 : schéma de principe de la modélisation
(l'échelle n'est pas respectée sur ce schéma de principe illustratif)

Profondeur	0 m
Hauteur	23,1
Longueur	3,38 m
Largeur	2,185 m
Poids volumique des matériaux constitutifs du bouchon équivalent	25 kN/m^3
Succion liée à un éventuel débourrage	100 kPa
Surcharge de surface	100 kPa
Résistances au cisaillement de l'interface muraillement, scellement	100 kPa
Coefficient de sécurité calculé	8,1

Tableau 4 : hypothèses et calcul du coefficient de sécurité la hauteur du bouchon autoportant

Dans le cadre des hypothèses retenues, le coefficient de sécurité calculé est de 8,1 pour une résistance au cisaillement minimale de 100 kPa (la feuille de calcul est placée en annexe 1). Par conséquent la mise en place du bouchon autoportant ne remet pas en cause la stabilité du muraillement par frottement le long du scellement.

On ajoutera de plus, que la partie inférieure du muraillement en reprenant des efforts par cisaillement augmentera la stabilité de l'ensemble, sans oublier le boulonnage des guides qui favorise également la tenue du muraillement.

3.6 PREALABLES A LA REALISATION DU BOUCHON AUTOPORTANT

Actuellement le puits étant équipé, il est nécessaire de s'interroger sur le devenir de ces équipements.

Dans le cadre de cette étude, le devenir des éléments est étudié uniquement sur le plan de la stabilité du bouchon et non sous l'angle de la réalisation (encombrement, difficulté d'accès…).

La présence d'éléments dans la colonne du puits favorise la stabilité du bouchon en constituant une « armature », dans la mesure, où les éléments présents ne gênent pas la mise en place des matériaux.

En conséquence, on préconise de laisser les poutres et les différents guides. En revanche, il apparaît nécessaire de procéder au démontage de tout autre équipement pouvant constituer des « ponts », susceptible de bloquer le matériau et d'engendrer des vides au sein du remblai. On procédera notamment au démontage du réseau d'échelles.

3.7 COUPE TECHNIQUE DU BOUCHON ET MODE DE REALISATION

La coupe présentée est un schéma de principe et non un plan d'exécution, les échelles ne sont donc pas respectées.

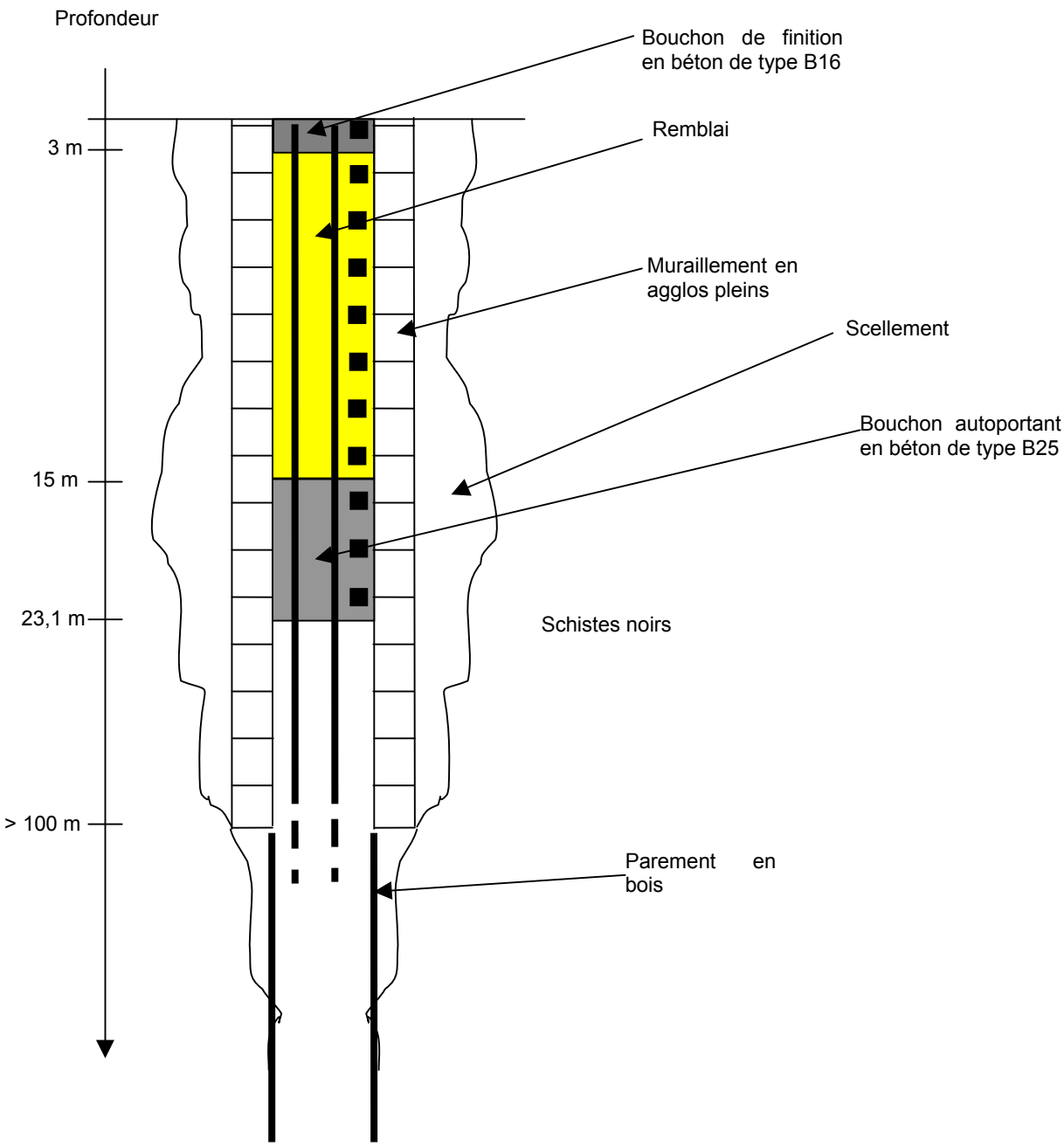


Figure 3 : coupe technique du principe du bouchon autoportant pour la mine du Burg

Remarque :

Il n'a pas semblé nécessaire de prévoir une réservation pour l'évacuation de l'eau ou du gaz, dans la mesure où un autre exutoire sera aménagé sur ou à proximité du carreau (descenderie ou autre) évitant le piégeage d'effluents à la base du bouchon.

La réalisation de ce bouchon autoportant nécessite la mise en place d'une assise permettant de supporter le bouchon en attendant sa prise. Communément, il existe deux modes de soutènement, le premier consiste en un prébouchon (supporté par un soutènement léger) et le second en un plancher.

Dans le cas de la mine du Burg, l'accès possible à la colonne du puits par sa première recette (profondeur de 54 m) et la présence de réservations au sein du muraillement permettent de s'orienter vers la réalisation d'un plancher.

Ce plancher devra être dimensionné par le maître d'œuvre pour supporter le poids du bouchon autoportant avant sa prise. Pratiquement, si ce type de structure n'est pas réalisable, on pourra réaliser le bouchon en deux étapes et ainsi recourir à une structure de soutènement plus légère.

Par exemple, le plancher pourra être conçu pour soutenir uniquement un prébouchon d'une hauteur de 2,8 m. En effet, un bouchon de 2,8 m une fois pris permet de retenir la surcharge que constitue le reste du bouchon durant sa prise avec un coefficient de sécurité de 2 (cf. note de calcul présentée en annexe).

Les préconisations générales sur la réalisation du traitement ont été placées au paragraphe 1.

4. ETUDE DU TRAITEMENT DE MISE EN SECURITE DES CHEMINEES

Trois cheminées sont à mettre en sécurité dans la cadre de l'arrêt de la mine du Burg. Elles suivent toutes les trois le filon et ont donc un pendage proche de 60° Nord.

4.1 CARACTERISTIQUES TECHNIQUES DES CHEMINEES (DONNEES SOGEREM)

4.1.1 CHEMINEE OUEST

Cette cheminée inclinée est profonde d'environ 185 m. Elle comporte 2 recettes aux niveaux -100 et -135 m[1]. Elle débouche au niveau –170 m dans les travaux souterrains.

La forme et les dimensions de sa section varient selon la technique de forage employée :

- de 0 m à 150 m (méthode « raise boring »), section circulaire de 1,8 m de diamètre ;
- de 150 m à 185 m (méthode traditionnelle), section rectangulaire de 2 m de longueur pour 1,5 m de largeur.

4.1.2 CHEMINEE EST

Cette cheminée débouche au niveau –170 m. Elle est donc profonde d'environ 175 m. Elle comporte 2 recettes aux niveaux –54 m et –135 m. Sa réalisation a été effectuée par « raise boring », son diamètre est de 1,8 m.

Actuellement, le tronçon entre les niveaux –170 m et –135 m est équipé d'un tubbing métallique colmaté par des remblais et de la boue. Ce tronçon est donc considéré comme remblayé.

La recette à –135 m est remblayée par de la boue et rempli d'eau. L'accès à –170 est, quant à lui, muré. La seule voie d'accès possible demeure le niveau –54.

La présence d'eau au niveau –135 m indique que le niveau d'eau se situerait entre les niveaux –135 m et –54 m.

4.1.3 CHEMINEE BOURRELIE

Cette cheminée d'une profondeur d'environ 170 m a été forée au « raise boring ». Elle a une section circulaire de 1,8 m de diamètre.

Actuellement, elle est visitable depuis les niveaux –100 m et –170 m. Elle le sera par le niveau –135 m en janvier 2006 (d'après l'exploitant).

---

[1] :la profondeur des niveaux est établie à partir du carreau.

4.2 DEFINITION ET DIMENSIONNEMENT DES TRAITEMENTS DE MISE EN SECURITE DES CHEMINEES

4.2.1 TRAITEMENT ENVISAGE PAR LA SOGEREM POUR LA MISE EN SECURITE DES CHEMINEES

La SOGEREM a prévu de mettre en sécurité les cheminées par bouchon autoportant coulé sur remblai déversé au préalable dans la colonne des cheminées.

La procédure pressentie par l'exploitant consiste à :

1. repérer visuellement la limite de la zone altérée de surface et définir ainsi la profondeur à laquelle sera placé la tête du bouchon ;
2. mettre en place un remblai constitué de tout venant jusqu'à cette cote ;
3. couler en tête du remblai un bouchon « autoportant » sur une hauteur de 3 m.

4.2.2 AVIS SUR LE TRAITEMENT PROPOSE ET DIMENSIONNEMENTS COMPLEMENTAIRES

Comme précisé pour le puits, le concept du bouchon autoportant est une méthode de mise en sécurité recevable dans les schistes noirs observés sur le site, à condition qu'il soit placé en dessous de la frange des terrains de surface altérée.

Nature des matériaux de remblai :

On attire l'attention sur le fait que le matériau de remblai doit être choisi avec soin pour :

- en permettre sa bonne mise en place et ainsi éviter un tassement brutal lors du coulage du bouchon ;
- éviter la pollution des eaux de mine une fois le réservoir minier rempli.

Le matériau de remblai devra donc être choisi inerte et à granulométrie étalée pour satisfaire les conditions précédentes.

Dimensionnement des bouchons autoportants :

Le dimensionnement du bouchon proposé par la SOGEREM avec une hauteur de 3 m ne satisfait pas la condition sur l'élancement minimal qui est de 2. La hauteur, a priori, devrait être supérieure ou égale à 3,6 m.

De plus, la hauteur du bouchon doit être définie en fonction de la profondeur à laquelle il sera placée. Dans le cas des cheminées, la profondeur, a priori, n'étant pas connue, une étude paramétrique a été effectuée.

Hypothèses du calcul

Les cheminées sont inclinées de 30° par rapport à la verticale, ce qui conduit à une diminution de 13% de l'effort à reprendre par frottements sur les schistes. Cependant pour les besoins du calcul, les cheminées ont été supposées

verticales, ce qui conduit à surestimer légèrement la hauteur de bouchon nécessaire.

La gamme de profondeur de la tête du bouchon varie entre 5 m et 40 m (Tableau 5).

Profondeur de la tête du bouchon autoportant	De 5 à 40 m
Rayon	90 cm
Poids volumique du béton	25 kN/m^3
Poids volumique du remblai saturé[2]	25 kN/m^3
Succion lié à un éventuel débourrage	100 kPa
Surcharge de surface	100 kPa
Résistances au cisaillement de l'interface béton, agglo testées	160 kPa, 180 kPa et 200 kPa
Elancement minimal du bouchon (rapport entre la hauteur du bouchon et la moyenne de la largeur et de la longueur)	2
Coefficient de sécurité recherché	3

Tableau 5 : hypothèses de calcul de la hauteur du bouchon autoportant dans les cheminées

Résultats

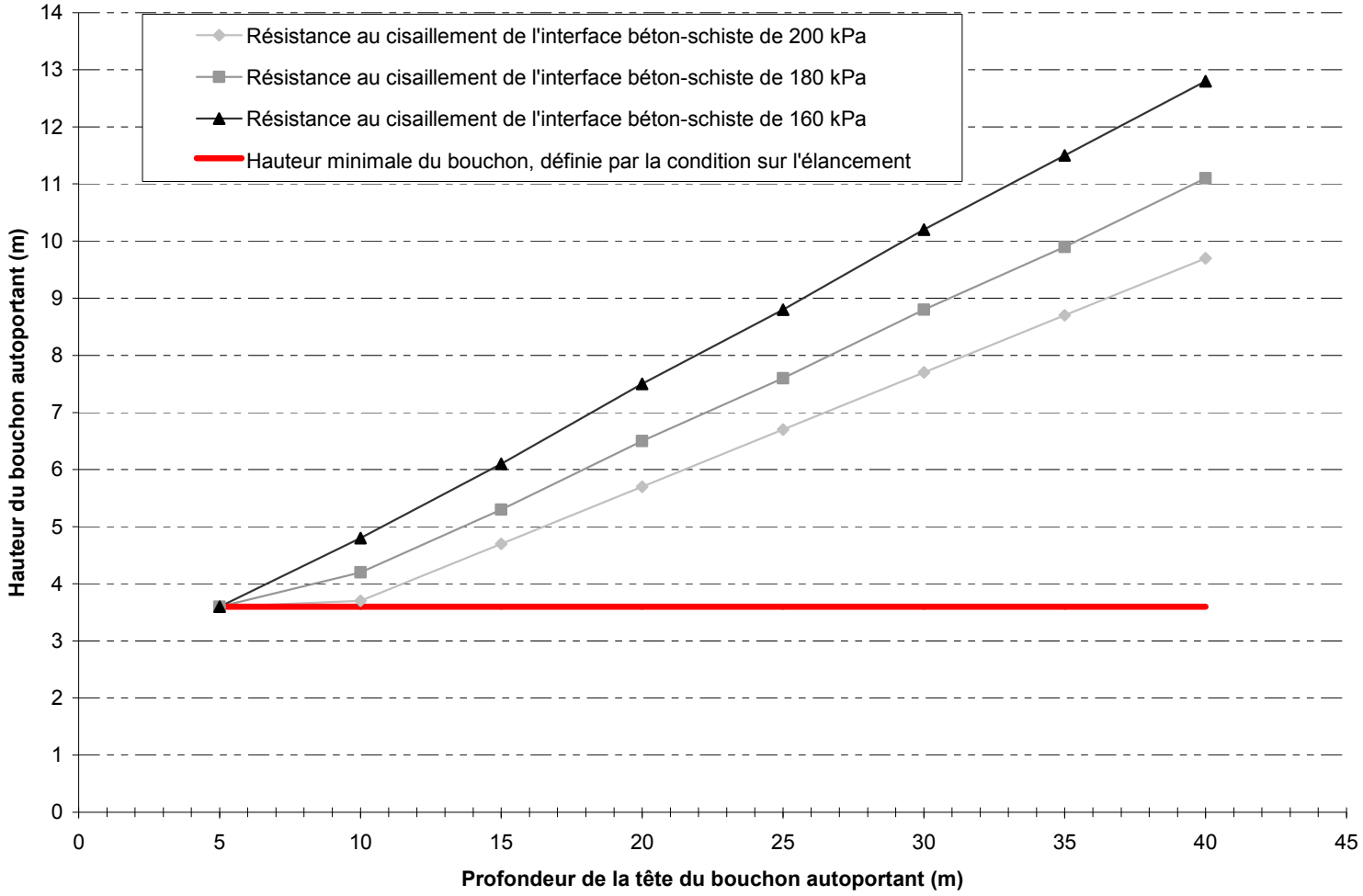
La Figure 4 ci-après fournie pour 3 valeurs de la résistance au cisaillement de l'interface béton - schiste noirs, la hauteur nécessaire du bouchon pour assurer sa stabilité et celle des éléments sus-jacents avec un coefficient de sécurité de 3. Ainsi, une fois définie la profondeur à laquelle on souhaite placer le bouchon, il est possible de déterminer la hauteur du bouchon qui doit être supérieure à 3,6 m.

Cependant la simple inspection visuelle n'est pas suffisante pour déterminer la profondeur du bouchon. L'inclinaison des cheminées par rapport à la verticale rend probable l'apparition d'un aléa de type « fontis ». On préconise donc de placer la tête du bouchon à une profondeur supérieure à 18 m, même si la qualité des matériaux supérieure apparaît bonne.

D'une façon générale, on propose donc de placer un bouchon autoportant d'une hauteur de 7 m à une profondeur de 18 m, les observations réalisées près du puits ayant montré qu'à cette profondeur les terrains ne sont plus altérés.

[2] : ce poids volumique a été estimé pour un remblai d'une densité de 2 avec une porosité accessible à l'eau de 50%.

Figure 4 : Dimensionnement de la hauteur du bouchon autoportant dans les cheminées



4.3 COUPE TYPE DE LA MISE EN SECURITE D'UNE CHEMINEE

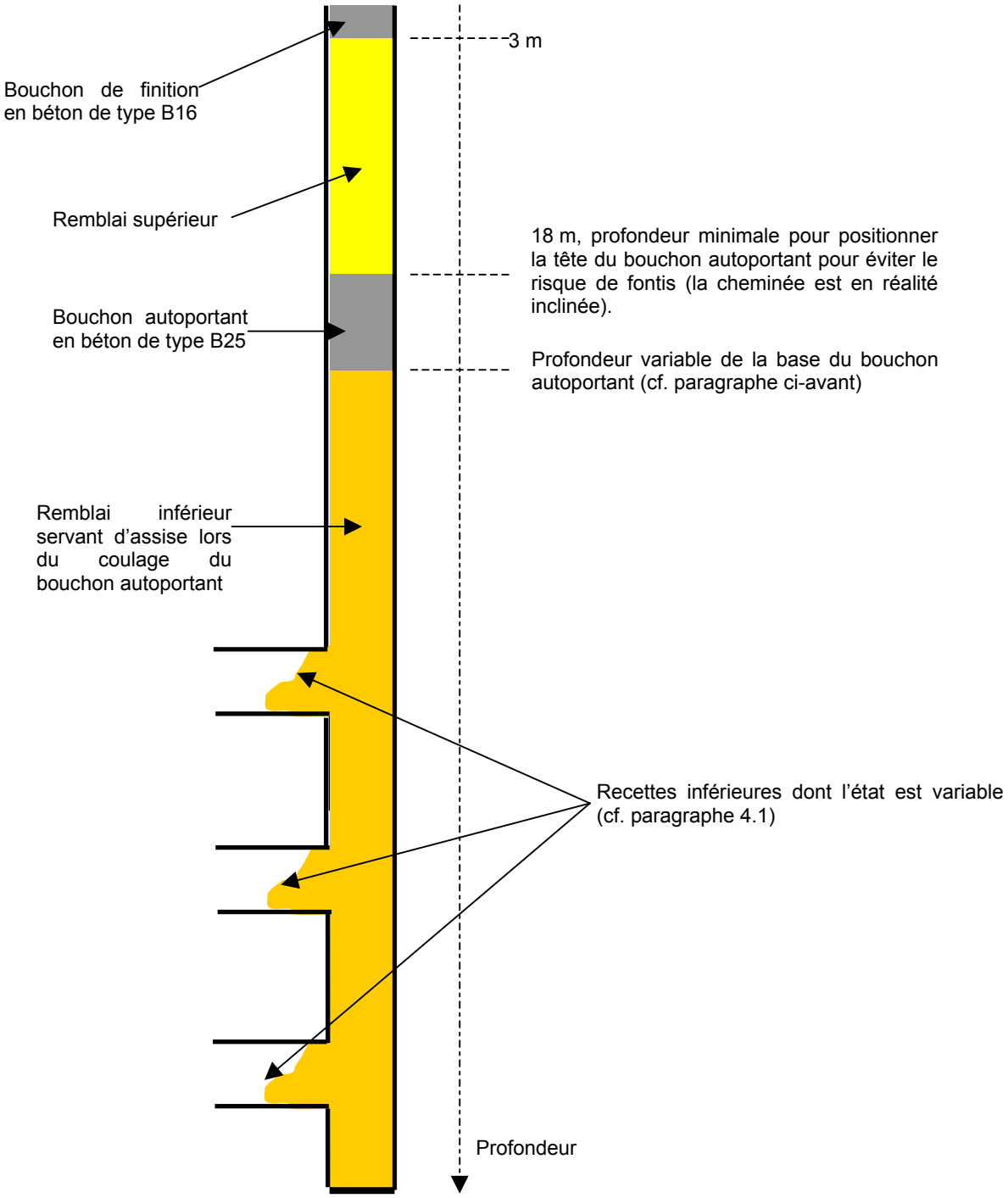


Figure 5 : coupe type du traitement d'une cheminée
(cette coupe est un schéma de principe, l'échelle n'est donc pas respectée)

Les préconisations générales sur la réalisation du traitement ont été placées au paragraphe 1 ci-après.

5. PRECONISATIONS GENERALES POUR LA REALISATION DES MISES EN SECURITE

5.1 REALISATION DES BOUCHONS AUTOPORTANTS

Le béton à employer pour réaliser les bouchons autoportants devra être de type B25 et vibré lors de sa mise en place. La qualité du béton devra être vérifiée par la prise d'échantillon à tester et validation des caractéristiques en laboratoire selon les normes en vigueur.

5.2 CONDITIONS SUR LE REMBLAYAGE EN TETE DES BOUCHONS AUTOPORTANTS

La mise en sécurité préconisée consiste à utiliser un remblai. Le matériau employé pour réaliser ce remblayage doit être :

- chimiquement inerte, afin de ne pas polluer les eaux après saturation de la colonne du puits ;
- à granulométrie étalée, afin d'en faciliter sa mise en place.

On veillera, d'ailleurs, au cours du remplissage à s'assurer de la correspondance entre le volume de matériau déversé et le volume théoriquement nécessaire en mesurant la cote de la colonne remblayée. Ce contrôle permettra de détecter une éventuelle mauvaise mise en place du matériau (effet de voûte).

5.3 BOUCHON DE FINITION

Après la mise en sécurité d'un ouvrage, il convient de réaliser un bouchon de finition de deux ou trois mètres en tête de la colonne de l'ouvrage. Il permet de garder le souvenir de l'existence des ouvrages miniers.

Le béton employé peut être moins résistant que pour le bouchon autoportant. Il peut par exemple être de type B16.

6. LISTE DES FIGURES

Repère	Désignation	Nombre de pages
Figure 6 Figure 7	Vue des déformations affectant les schistes Vue des schistes noirs comportant des veines de quartz	1 A4
Figure 8 Figure 9	Vue générale du puits depuis la surface Aspect des schistes noirs une fois la frange d'altération passée	1 A4
Annexe 1	Principe de dimensionnement d'un bouchon autoportant au sein d'un puits de mine	9 A4
Annexe 2	Dimensionnement d'un bouchon autoportant des cheminées à une profondeur de 18 m	3 A4

Figure 6 : vue des déformations affectant les schistes

Figure 7 : Vue des schistes noirs comportant des veines de quartz

Figure 8 : Vue générale du puits depuis la surface

Figure 9 : Aspect des schistes noirs une fois la frange d'altération passée

ANNEXE 1 – DIMENSIONNEMENT DU BOUCHON AUTOPORTANT DU PUITS

ANNEXE

PRINCIPE DE DIMENSIONNEMENT D'UN BOUCHON AUTOPORTANT AU SEIN D'UN PUITS DE MINE

Principes et hypothèses de calcul

La cohésion entre le bouchon autoportant et le revêtement du puits est essentiellement assurée par le contact béton-revêtement dont la résistance au cisaillement dépend de l'état et de la nature du revêtement ainsi que des propriétés mécaniques du matériau constituant le bouchon.

Pour évaluer la taille des colonnes à réaliser dans la colonne de puits, on considère un bouchon vertical de hauteur *h*, coulé dans la colonne de puits. Le contact latéral béton-revêtement présente une résistance au cisaillement q_s. Outre son propre poids (déterminé par son poids volumique γ_b), on suppose que le bouchon est soumis à une charge de surface P_1, une contrainte de succion en pied P_2 ainsi qu'au poids de la colonne de matériau mise en place à son sommet (déterminé par le poids volumique de ce matériau γ_r et l'épaisseur de la colonne h_r).

Le bouchon est dimensionné pour être autoportant c'est-à-dire que sa stabilité n'est pas tributaire de la présence de remblais qui lui servent d'appui en pied. En cas de tassement de ces remblais, la structure est capable d'assurer sa propre stabilité par effet de frottement latéral. On note *K* le coefficient de sécurité de l'ouvrage. Le calcul, en statique, des différents efforts s'exerçant sur le bouchon s'exprime de la manière suivante :

- pour un puits de section circulaire (de rayon *r*) :

$$K\pi r^2.(\gamma_b h + P_1 + P_2 + \gamma_r h_r) = 2\pi r.h.q_s$$

On en déduit la valeur du coefficient de sécurité pour une hauteur de bouchon donnée :

$$\boxed{K = \frac{2hq_s}{r(\gamma_b h + P_1 + P_2 + \gamma_r h_r)}}$$

- pour un puits de section rectangulaire (de longueur *L* et largeur *l*)

$$K.L.l.(\gamma_b h + P_1 + P_2 + \gamma_r h_r) = 2.(L + l).h.q_s$$

la valeur du coefficient de sécurité s'exprime alors de la manière suivante :

$$K = \frac{2.(L+l).h.q_s}{L.l.(\gamma_b h + P_1 + P_2 + \gamma_r h_r)}$$

Dans le cas général, le poids volumique du béton γ_b sera considéré voisin de **25 kN/m^3** et celui des matériaux déversés en surface γ_r est voisin de **20 kN/m^3** (on suppose le remblai humide).

Les **contraintes verticales dues aux surcharges de surface et de succion** sont supposées toutes deux respectivement égales à **100 kPa**.

La valeur de 100 kPa en succion correspond à une pression de 1 bar (environ 1 atmosphère) équivalant à la dépression entre le sommet et la base du bouchon dans le cas d'un débourrage dynamique de la colonne de remblais générant un effet de vide au niveau de la base du bouchon.

La contrainte de 100 kPa s'exerçant en surface n'a pas une justification physique aussi claire. Elle équivaut à une surcharge de 10 tonnes/m^2 correspondant au passage d'un engin en surface.

Calcul de la charge pesante des matériaux sus-jacents

Suivant le type de matériau surplombant le bouchon autoportant profond, le calcul de la charge superficielle exercée sur la surface de l'ouvrage prendra les hypothèses de calcul suivantes :

- on considère que l'intégralité du remblai pèse sur le bouchon ;
- on intègre l'effet silo qui corrige la charge réelle s'exerçant sur le bouchon ;
- on suppose que l'intervalle supérieur est rempli par un matériau autoportant.

Dans la première hypothèse la hauteur de remblais pesante est supposée égale à la profondeur de la tête du bouchon.

Dans la seconde hypothèse, on suppose qu'une partie du poids des remblais est reprise par friction latérale sur les parois du puits [6]. Pour que la prise en compte de l'effet silo soit pertinente, la profondeur de la tête du bouchon doit être supérieure à 4 fois le rayon du puits (pour un puits de section circulaire). Les paramètres fondamentaux du calcul sont les suivants :

$$ho = \frac{r}{2\tan\psi\tan^2\left(\frac{\pi}{4}-\frac{\varphi}{2}\right)} \quad \text{et} \quad \alpha = \frac{P_{réelle}}{P_{totale}} = \frac{ho}{H}\left(1-e^{-\frac{H}{ho}}\right)$$

Le second coefficient permet de pondérer l'épaisseur de la tête du bouchon pour déterminer la hauteur réelle de matériau pesant.

Dans la dernière hypothèse enfin, on considère que le matériau autoportant reporte quasiment intégralement son propre poids sur le revêtement du puits et les terrains environnants, par mesure de précaution et pour prévenir la fatigue future de l'ouvrage on supposera quand même que 10 % de la colonne de matériau reporte son poids en surface du bouchon.

Elancement minimum du bouchon

Quelles que soient les valeurs fournies par le calcul pour le dimensionnement des bouchons autoportants, on considérera systématiquement que l'élancement de la structure ne doit pas être inférieur à 2. On ne réalisera donc pas de bouchon dont la hauteur serait inférieure à 2 fois le diamètre du puits. Cette disposition permet de bénéficier de l'apport de l'effet de forme (le bouchon épouse les ondulations de grande amplitude de la paroi du puits) qui facilite le blocage du bouchon en cas de déstabilisation de la structure.

Caractérisation du contact bouchon-revêtement

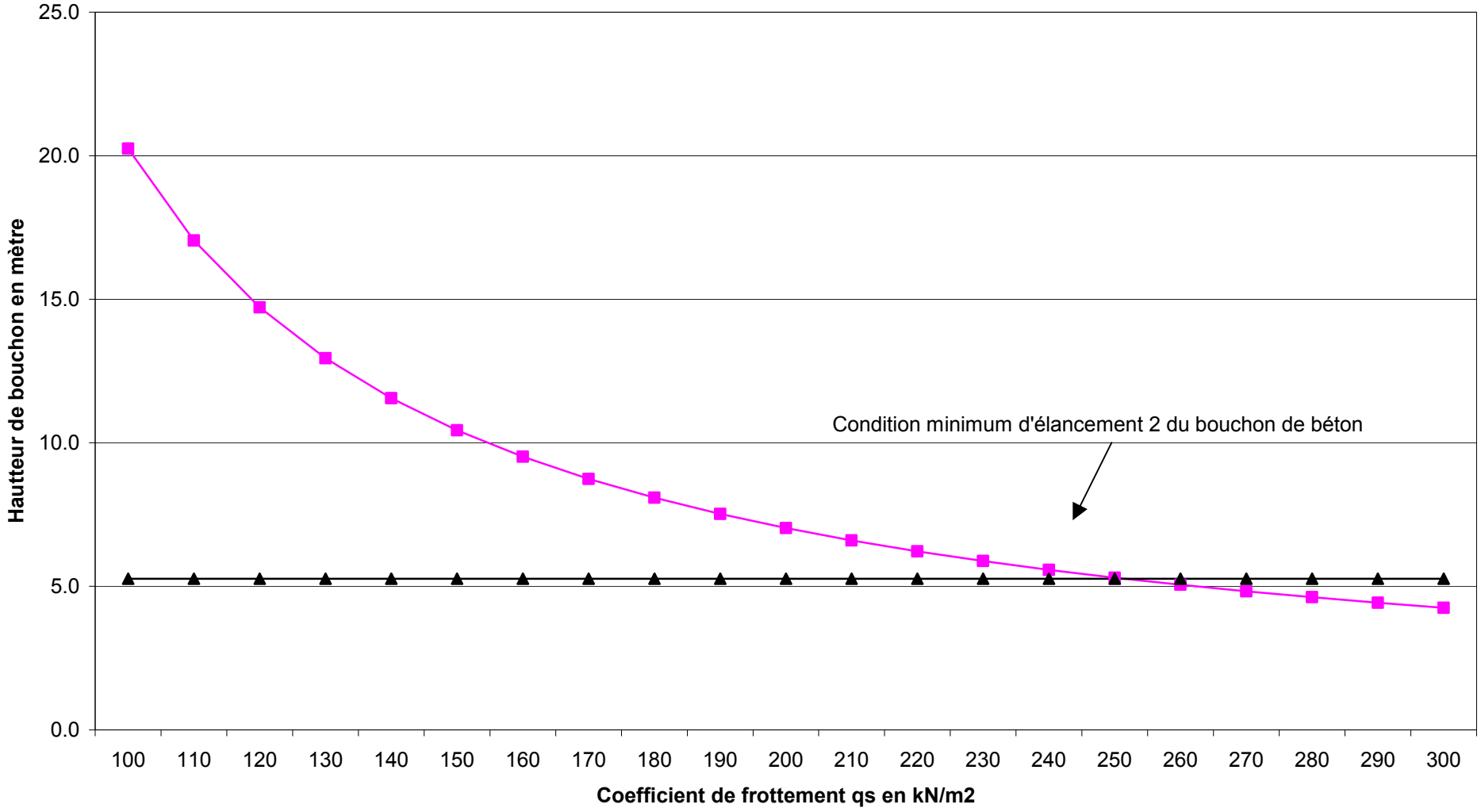
D'après l'étude réalisée par l'INERIS pour le compte du Ministère de l'Industrie traitant des principes de fermeture des anciens ouvrages miniers débouchant au jour [guide méthodologique pour l'arrêt définitif des exploitations minières souterraines - INERIS], la valeur moyenne de la résistance au cisaillement qui peut être retenue pour caractériser le frottement béton-revêtement est voisine de 180 kPa. On retiendra donc cette valeur pour le dimensionnement des bouchons autoportants classiques réalisés en coulant plusieurs passes successives de béton au sommet d'une colonne de remblais.

Note de calcul du bouchon du puits

Hauteur du bouchon de béton nécessaire pour garantir un coefficient de sécurité de 3 (remblais totalement pesants)		
qs (kPa)	h (m)	élancement minimum (m)
100	20,2	5,265
110	17,0	5,265
120	14,7	5,265
130	12,9	5,265
140	11,6	5,265
150	10,4	5,265
160	9,5	5,265
170	8,7	5,265
180	8,1	5,265
190	7,5	5,265
200	7,0	5,265
210	6,6	5,265
220	6,2	5,265
230	5,9	5,265
240	5,6	5,265
250	5,3	5,265
260	5,1	5,265
270	4,8	5,265
280	4,6	5,265
290	4,4	5,265
300	4,3	5,265

Calcul du coefficient de sécurité		
h (m)	8,1	à renseigner
L (m)	3,23	
l (m)	2,035	
P1 (kPa)	100	
P2 (kPa)	100	
≅r (kN/m3)	25	
hr (m)	15	
≅b (kN/m3)	25	
qs (kPa)	180	
Succion plus surcharge (kN)	1315	
Poids du bouchon (kN)	1331	
Poids remblais (kN)	2465	
Résistance en frottement (kN)	15353	
Coefficient de sécurité K	3,0	

Hauteur du bouchon de béton nécessaire pour garantir un coefficient de sécurité de 3



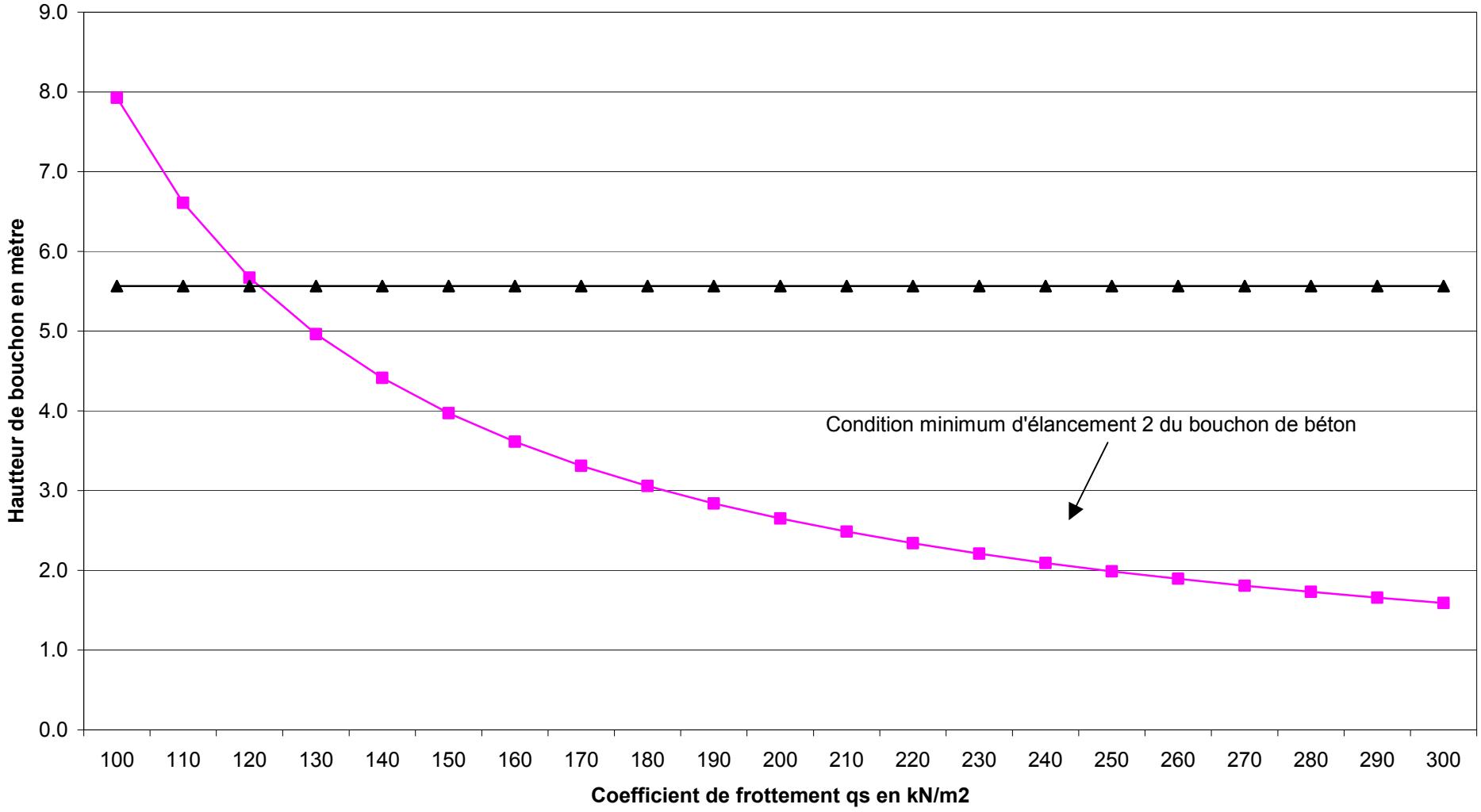
Réf. : INERIS – DRS – 05 – 71382/R01

Note de calcul du bouchon équivalent du puits

Hauteur du bouchon de béton nécessaire pour garantir un coefficient de sécurité de 3 (remblais totalement pesants)		
qs (kPa)	h (m)	élancement minimum (m)
100	7,9	5,565
110	6,6	5,565
120	5,7	5,565
130	5,0	5,565
140	4,4	5,565
150	4,0	5,565
160	3,6	5,565
170	3,3	5,565
180	3,1	5,565
190	2,8	5,565
200	2,7	5,565
210	2,5	5,565
220	2,3	5,565
230	2,2	5,565
240	2,1	5,565
250	2,0	5,565
260	1,9	5,565
270	1,8	5,565
280	1,7	5,565
290	1,7	5,565
300	1,6	5,565

Calcul du coefficient de sécurité		
h (m)	23,1	
L (m)	3,38	
l (m)	2,185	
P1 (kPa)	100	
P2 (kPa)	100	à renseigner
◊r (kN/m3)	25	
hr (m)	0	
◊b (kN/m3)	25	
qs (kPa)	100	
Succion plus surcharge (kN)	1477	
Poids du bouchon (kN)	4265	
Poids remblais (kN)	0	
Résistance en frottement (kN)	46279	
Coefficient de sécurité K	8,1	

Hauteur du bouchon de béton nécessaire pour garantir un coefficient de sécurité de 3



Hauteur du bouchon de béton nécessaire pour garantir un coefficient de sécurité de 3 (remblais totalement pesants)		
qs (kPa)	h (m)	élancement minimum (m)
100	11,7	5,265
110	9,9	5,265
120	8,5	5,265
130	7,5	5,265
140	6,7	5,265
150	6,0	5,265
160	5,5	5,265
170	5,1	5,265
180	4,7	5,265
190	4,3	5,265
200	4,1	5,265
210	3,8	5,265
220	3,6	5,265
230	3,4	5,265
240	3,2	5,265
250	3,1	5,265
260	2,9	5,265
270	2,8	5,265
280	2,7	5,265
290	2,6	5,265
300	2,5	5,265

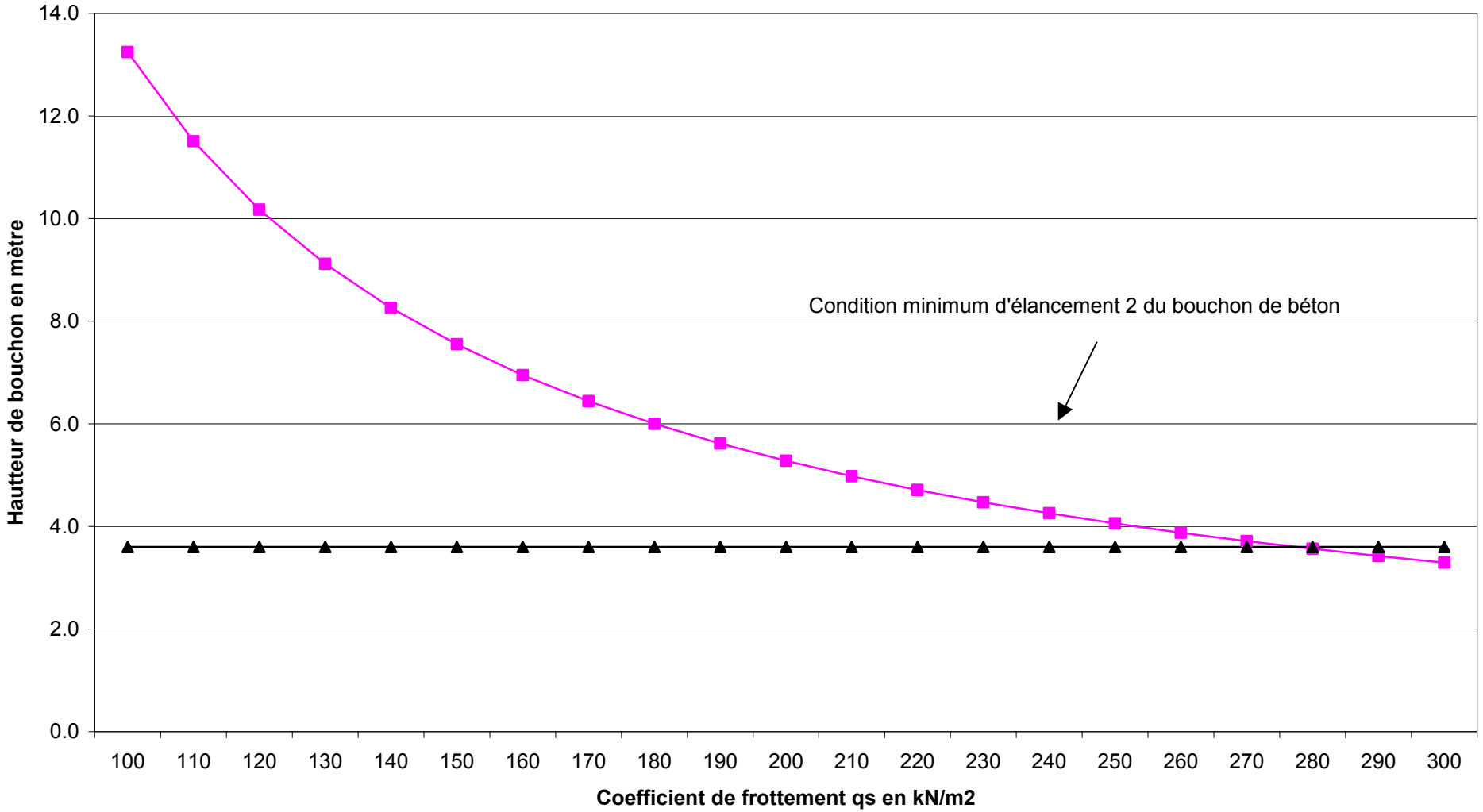
Calcul du coefficient de sécurité		
h (m)	2,8	
L (m)	3,23	
l (m)	2,035	
P1 (kPa)	100	
P2 (kPa)	100	à renseigner
◊r (kN/m3)	25	
hr (m)	5,3	
◊b (kN/m3)	25	
qs (kPa)	180	
Succion plus surcharge (kN)	1315	
Poids du bouchon (kN)	460	
Poids remblais (kN)	871	
Résistance en frottement (kN)	5307	
Coefficient de sécurité K	2,0	

ANNEXE 2 – DIMENSIONNEMENT DU BOUCHON AUTOPORTANT DES CHEMINEES A UNE PROFONDEUR DE 18 m

Hauteur du bouchon de béton nécessaire pour garantir un coefficient de sécurité de 3 (remblais totalement pesants)		
qs (kPa)	h (m)	élancement minimum (m)
100	13,2	3,6
110	11,5	3,6
120	10,2	3,6
130	9,1	3,6
140	8,3	3,6
150	7,5	3,6
160	7,0	3,6
170	6,4	3,6
180	6,0	3,6
190	5,6	3,6
200	5,3	3,6
210	5,0	3,6
220	4,7	3,6
230	4,5	3,6
240	4,3	3,6
250	4,1	3,6
260	3,9	3,6
270	3,7	3,6
280	3,6	3,6
290	3,4	3,6
300	3,3	3,6

Calcul du coefficient de sécurité		
h (m)	7	
r (m)	0,9	
P1 (kPa)	100	
P2 (kPa)	100	
πr (kN/m3)	25	à renseigner
hr (m)	18	
πb (kN/m3)	25	
qs (kPa)	160	
Succion plus surcharge (kN)	509	
Poids du bouchon (kN)	445	
Poids remblais (kN)	1145	
Résistance en frottement (kN)	6333	
Coefficient de sécurité K	3,0	

Hauteur du bouchon de béton nécessaire pour garantir un coefficient de sécurité de 3



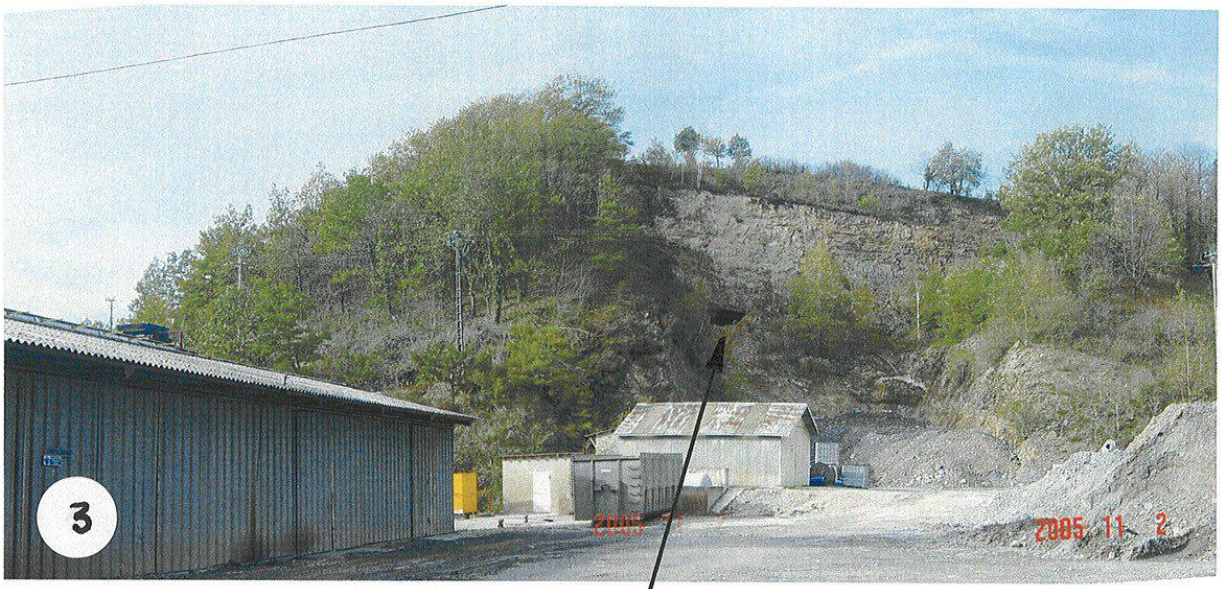
Réf. : INERIS – DRS – 05 – 71382/R01

SOGEREM
Mine du Burc

Description des photos
(annexe B)

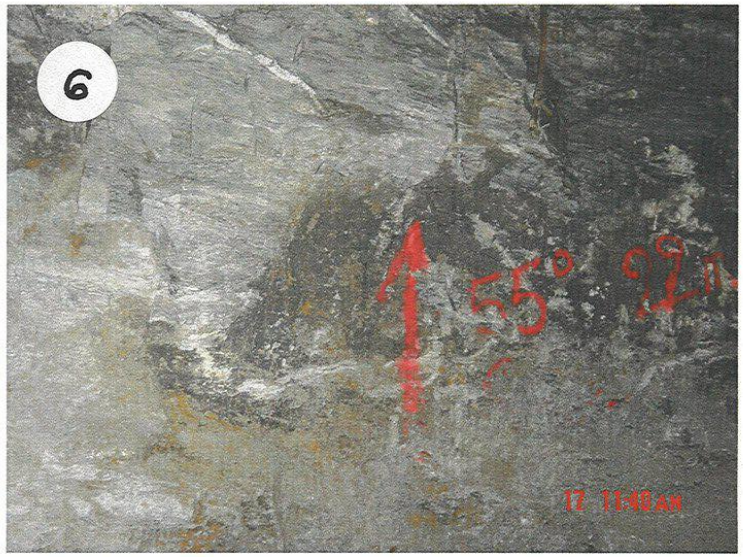
Photo 1	Bureaux de la mine ; colline revêtue d'arbres, taillis et broussailles à l'arrière plan
Photo 2	Entrée de la descenderie et talus de déblai rocheux côté Nord (schiste onduleux)
Photo 3	Entrée de galerie Z ≃ 525 du côté Est de la colline vue depuis le Sud en photo 1
Photo 4	Entrée de galerie (détail). Massif schisteux altéré et très fracturé
Photo 5	Recette 200. Galerie N-S – Paroi Ouest à 30 m/filon : hors profil dans schistes ± gréseux avec passées de schistes altérés Grillage en voûte ; écoulement d'eau côté gauche photo.
Photo 6	Travers banc depuis vue de base 220, schiste vert gréseux moyennement fracturé.
Photo 7	Boulonnage et plaques de protection (traitement localisé)
Photo 8	Ancienne cheminée boisée (chêne) dans le remblai du filon
Photo 9	Eboulement de voie au franchissement d'une zone de faille
Photo 10	Zone de galerie renforcée par boulonnage et plaque au franchissement d'une zone de faille (profil 6130)
Photo 11	Remontée de vide en voie de tête (profil 5340) cote +510
Photo 12	Remontée de vide (profil 5375) dans le filon cote +510

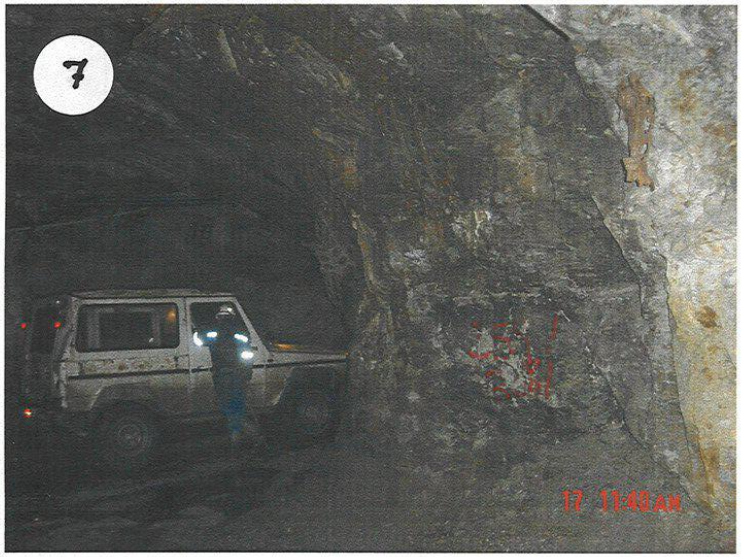
SOGEREM - MINE DU BURC

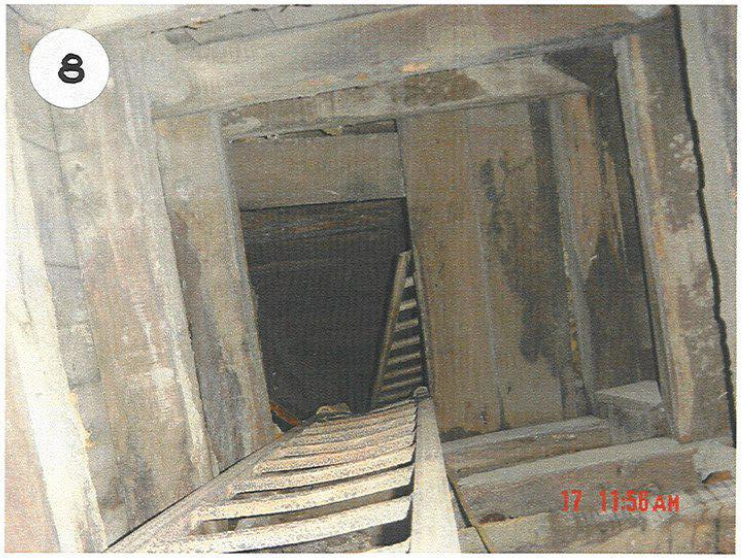


SOGEREM - MINE DU BURC

5
17 10:55 AM

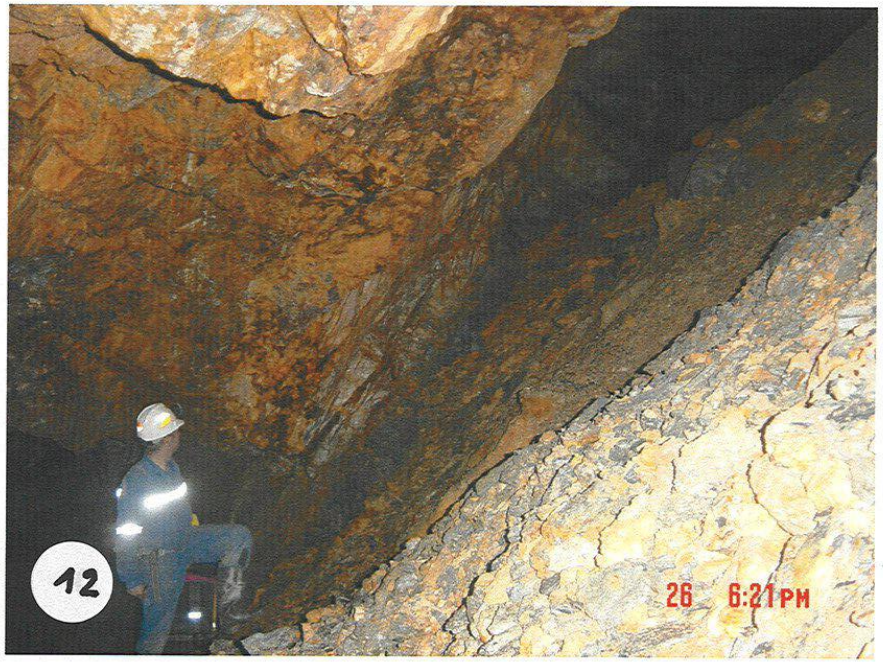

6
17 11:48 AM

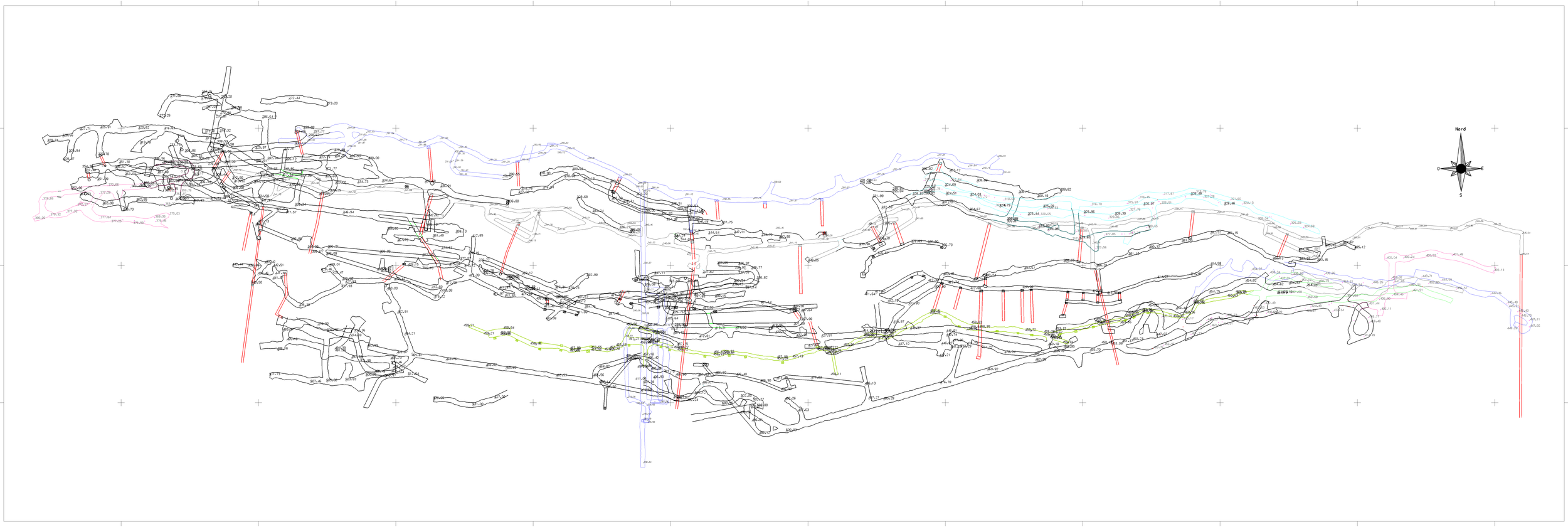

7
17 11:48 AM


8
17 11:56 AM

SOGEREM - MINE DU BURC

11


12
26 6:21PM



DC\0206.CDS DATE : 07/03/06 Echellon1/1000

SOGEREM
Le bois des Vergnes
81 120 MONTROC

CESAME
Bureau d'études

Mine du Burc (81)

-

Bilan relatif aux effets sur l'eau des travaux et de leur arrêt

Décembre 2005

CESAME, Z.A. du Parc, secteur Gampille 42 490 FRAISSES Téléphone : 04 77 10 12 10 Télécopie : 04 77 10 12 11

Sommaire

1 AVANT-PROPOS....3

2 GENÉRALITÉS CONCERNANT L'IMPACT HYDROGÉOLOGIQUE DES ANCIENS TRAVAUX MINIERS....4

2.1 La création d'un aquifère minier....4
2.2 CARACTÉRISTIQUES DES NAPPES MINIERES....5
2.2.1 Caractéristiques physiques....5
2.2.2 Caractéristiques chimiques....6
2.3 IMPACT SUR LE MILIEU....7
2.3.1 Impact quantitatif....7
2.3.2 Impact qualitatif....8

3 CAS DE LA MINE DU BURC....9

3.1 Localisation....9
3.2 Contexte....9
3.2.1 Climatologie....9
3.2.2 Géologie....10
3.2.3 Hydrogéologie....10
3.2.4 Hydrologie....11
3.3 Les travaux miniers....12
3.3.1 Localisation – Historique....12
3.3.2 Les eaux d'exhaure....13
3.3.3 Qualité des eaux....14
3.3.4 Bilan en eau....16
3.3.4.1 Suivi 1995 – 2005....16
3.3.4.2 Campagne de mesures septembre 2005....17
3.3.4.3 Synthèse....18
3.4 Conséquence de la fermeture de la mine....19
3.4.1 Remplissage des travaux miniers souterrain....19
3.4.1.1 Volume des vides résiduels....19
3.4.1.2 Vitesse de remplissage....20
3.4.2 Point de débordement....23
3.4.2.1 Cas 1 : Débordement sur le carreau inférieur par ouvrage minier – Point bas infrastructure minière....23
3.4.2.2 Cas 1 bis : Création d'un forage de décharge vers le carreau inférieur....25
3.4.2.3 Cas 2 : Débordement par ouvrage minier sur le carreau supérieur....26
3.4.2.4 Cas 3 : Aménagement d'un forage de décharge à environ 500 m NGF....27
3.4.2.5 Synthèse....28
3.4.3 Influence de l'ennoyage sur la qualité des eaux....29
3.4.3.1 Qualité prévisionnelle du trop plein minier....29
3.4.3.2 Aménagement pouvant être mis en œuvre pour l'amélioration de la qualité des eaux....33
3.4.4 Préconisations de suivi de l'ennoyage....38
3.4.5 Les installations de surface....38

4 CONCLUSIONS....40

Liste des figures

● Figure 1 : Quelques principes d'hydrogéologie minière
● Figure 2 : Localisation
● Figure 3 : Contexte climatique
● Figure 4 : Contexte géologique
● Figure 5 : Les minéralisations fluorées de l'Albigeois
● Figure 6 : Contexte hydrographique
● Figure 7 : Les travaux miniers
● Figure 8 : Les travaux miniers – Emprise au jour
● Figure 9 : Schéma du circuit des eaux
● Figure 10 : Localisation des venues d'eau dans la mine
● Figure 11 : Exhaure – Mine du Burc
● Figure 12 : Localisation des prélèvements
● Figure 13 : Campagne d'analyses – ENSPM – Mai 2003
● Figure 14 : Campagne d'analyses – ENSPM – Mai 2003 – Représentation de Schœller Berkaloff
● Figure 15 : Suivi eaux superficielles
● Figure 16 : Suivi eaux superficielles (débit spécifique)
● Figure 17 : Synthèse terrain – septembre 2005
● Figure 18 : Zone d'alimentation préférentielle des travaux miniers
● Figure 19 : Vitesse de remplissage des travaux miniers
● Figure 20 : Surverse sur carreau inférieur – Cas 1
● Figure 21 : Surverse sur carreau inférieur – Cas 1 bis
● Figure 22 : Surverse sur carreau supérieur– Cas 2
● Figure 23 : Surverse aval carreau – Cas 3
● Figure 24 : Les différentes possibilités de surverse de la mine du Burc
● Figure 25 : Principe de fermeture des galeries
● Figure 26 : Evolution de la qualité prévisionnelle du trop plein minier *(source ENSMP)*
● Figure 27 : Evolution de la qualité prévisionnelle du trop plein minier selon le volume de réservoir renouvelé – Cas des sulfates
● Figure 28 : Evolution du mode d'alimentation de la mine
● Figure 29 : Aménagements Eaux souterraines
● Figure 30 : Exemple d'influence des battements de la nappe sur la minéralisation de l'eau
● Figure 31 : Aménagements Eaux superficielles
● Figure 32 : Crue décennale – Ferrier amont

1 AVANT-PROPOS

La présente étude a été entreprise par le Bureau d'études C.E.S.AME à la demande de la société SOGEREM dans le cadre du projet de fermeture de la mine du Burc située sur la commune de Paulinet (81).

Cette étude a pour but de définir, décrire et comprendre la structure hydrogéologique de l'exploitation minière, de quantifier et qualifier les volumes d'eau concernés par les modifications du contexte hydrogéologique induites par l'exploitation minière.

Le présent rapport a été rédigé par Stéphane MOREL sous la direction de Agnès BLACHERE et a pour objectif dans un premier temps de **décrire et synthétiser les différents travaux réalisés dans le domaine de l'hydrogéologie, puis de présenter les conséquences de l'arrêt de l'exploitation souterraine sur le fonctionnement hydrogéologique local en fonction de plusieurs scénarios de fermeture.**

La problématique liée à la fermeture de la mine du Burc a déjà fait l'objet d'une approche qualitative dans une étude de l'école des mines de Paris en 2003 (modélisation géochimique prévisionnelle de la qualité des eaux). Nous reprendrons donc les principales conclusions mises en évidence par cette modélisation.

L'analyse réalisée dans le présent rapport s'appuie :
- sur une phase de terrain réalisée entre le 12 et le 14 Septembre 2005,
- sur l'analyse des données fournies par l'exploitant (plans, suivi exhaure, suivi débit réseau hydrographique, rapport école des mines...).
- sur l'expérience acquise par le bureau d'études CESAME en hydrogéologie minière depuis près d'une quinzaine d'années auprès de Charbonnages de France et des Mines de Potasse d'Alsace.

Conformément à la mission confiée par SOGEREM au bureau d'études CESAME, cette étude permettra de :

- décrire la structure hydrogéologique de la mine, préciser les caractéristiques hydrogéologiques de sa zone d'alimentation,
- déterminer la part des apports d'eau superficielle et d'eau profonde dans l'exploitation au moment des campagnes de terrain ou sur un cycle hydrologique,
- prévoir en conséquence l'évolution potentielle du débit et ses variations temporelles pendant la phase de remplissage et/ou en cas de détournement ou de séparation des eaux superficielles par rapport aux ressources souterraines,
- proposer des aménagements visant à limiter les échanges entre l'eau et les terrains miniers exploités, en agissant aussi bien dans l'environnement qu'au niveau de la mine elle même,
- proposer éventuellement des aménagements visant à limiter le remplissage de la mine en créant un exutoire en un point jugé intéressant par sa

topographie et/ou pour la place disponible pour y mettre en œuvre un dispositif de traitement passif des eaux de débordement de la mine.

Cette étude est menée conformément à l'article 44 du code minier (modifié par le décret 2001-209 du 6 mars 2001) concernant la procédure d'arrêt des travaux.

2 GENÉRALITÉS CONCERNANT L'IMPACT HYDROGÉOLOGIQUE DES ANCIENS TRAVAUX MINIERS

Une exploitation minière, quelle qu'elle soit, se caractérise en premier lieu par les cavités et ouvrages souterrains qui la constituent.

Ces vides générés dans la roche exploitée peuvent être à l'origine de modifications du contexte hydrogéologique local.

Dans les paragraphes ci-dessous seront évoqués les grands principes de l'hydrogéologie minière. Ces principes s'appliquent pour la plupart des sites miniers français.

2.1 La création d'un aquifère minier

Les vides artificiels créés par l'extraction du minerai et par le biais des éventuels affaissements miniers, se répartissent dans l'ensemble des terrains situés à leur aplomb.

Il se développe ainsi une zone décomprimée dont l'extension au jour obéit à la notion d'angle limite et correspond à la zone ayant été influencée par les travaux miniers.

Les fissures qui se développent à l'aplomb des zones exploitées sont en général ouvertes et jouent un rôle de drain, conférant ainsi au volume d'influence des travaux des coefficients de perméabilité bien plus élevés que ceux des secteurs vierges.

Les eaux peuvent donc s'infiltrer vers les travaux, rendant nécessaire, pendant l'exploitation, leur pompage et leur remontée vers le jour, ou bien leur évacuation gravitaire par galerie basse, lorsque la topographie le permet.

Après arrêt de l'exhaure minière, les zones ayant été influencées par l'exploitation font l'objet d'un remplissage progressif par les eaux d'infiltration, aboutissant à la création d'une « nappe ». Les limites de l'aquifère créé correspondent à l'enveloppe extérieure des travaux.

Dans le cas particulier où les travaux étaient drainés gravitairement par galeries lors de l'exploitation, la situation n'est pas modifiée, sauf établissement de serrements (barrages) : les travaux sont donc maintenus hors d'eau par les galeries

d'écoulement, voire partiellement ennoyés si les capacités d'écoulement de ces ouvrages ont été réduites (établissement de barrage, remblayage de galeries par exemple).

À terme, le trop plein de la nappe entraîne l'apparition d'émergences généralement situées aux points bas du système et apparaissant soit de façon diffuse dans le cours d'eau ou le talweg constituant le point bas ; soit de façon plus ponctuelle par l'intermédiaire d'une faille, d'un affleurement du filon ou d'un ouvrage minier débouchant au jour.

Éventuellement, si des niveaux très perméables se trouvent en contact avec la zone exploitée et fracturée à des cotes inférieures à celles des points d'émergence potentiels, une évacuation du trop plein de la nappe des travaux miniers est envisageable par ce biais.

2.2 CARACTÉRISTIQUES DES NAPPES MINIERES

2.2.1 Caractéristiques physiques

Comme nous l'avons dit plus haut, le nouvel aquifère se restreint aux terrains situés dans la zone d'influence des travaux, là où les vides liés à l'exploitation se sont répercutés du fait des affaissements, créant ainsi un cône de fortes perméabilités.

La cote de stabilisation de l'aquifère dépend de la nature et de l'emplacement de l'exutoire : on peut considérer de manière simplifiée que cette cote correspond à la cote topographique minimale située dans l'enveloppe d'influence des travaux dans le cas d'une résurgence classique, ou à la cote de l'aquifère exutoire dans le cas d'une évacuation par nappe.

Dans le cas où une couverture imperméable surplombe les travaux, le déversement peut se faire par l'intermédiaire de l'orifice minier suffisamment perméable le plus bas, ou de manière diffuse à travers cette couverture, avec possibilité de mise en charge sous cet horizon : la cote de stabilisation dépend alors des pertes de charge à travers cette couverture.

On ne peut véritablement parler de perméabilité pour un aquifère minier, les communications hydrauliques s'effectuant par les fractures engendrées par les affaissements voire par des galeries au rocher non éboulées. Dans ces conditions, les gradients hydrauliques sont en général très faibles, parfois de l'ordre du mètre par kilomètre.

Toutefois, les techniques d'exploitation et la géologie propre du gisement peuvent être à l'origine de la création de secteurs peu perméables (remblayage hydraulique systématique, serrements réalisés sur des galeries de communications entre compartiments d'exploitation) sources de pertes de charges, voire de compartimentation franche.

D'une manière générale, quand les travaux miniers sont densément répartis, le gradient est très faible et la cote de la nappe très homogène.

2.2.2 Caractéristiques chimiques

Les eaux d'émergences minières ont un faciès physico-chimique particulier lié à la nature de l'encaissant rocheux et plus particulièrement aux minéralisations associées.

Elles se caractérisent en général par une charge minérale élevée (forte conductivité, fort résidu sec) matérialisée par des teneurs élevées en calcium, magnésium, bicarbonates, sulfates, et la présence d'éléments métalliques (fer, manganèse, cuivre, zinc...). En revanche les teneurs en chlorures restent souvent relativement faibles et les pollutions de type organique sont souvent absentes.

Les paramètres les plus typiques et qui posent en général problème par rapport à la qualité des eaux sont les sulfates et les éléments métalliques. Sulfates et éléments métalliques proviennent du lessivage des minéraux sulfurés (pyrite, chalcopyrite, calcocite, blende, galène...) souvent associés au minerai exploité.

La qualité des eaux d'émergence est également variable suivant le fonctionnement de l'aquifère. En effet, la solubilisation du fer et du manganèse, par exemple, est plus forte pour des aquifères nouvellement noyés fonctionnant en surverse que pour des travaux drainés par galeries basses.

De même, la qualité des eaux "de mine" est variable dans le temps :

- Pendant l'exploitation, le niveau de l'eau est maintenu dans les travaux à une cote à peu près constante : ce sont toujours les mêmes surfaces de terrain qui sont lessivées par les eaux et les teneurs observées sur l'exhaure sont relativement stables et faibles.

- Après arrêt du pompage, ou suite à des modifications hydrogéologiques (remontée des eaux dans certains quartiers, fermetures de galeries), une tranche de terrains qui jusqu'alors n'avaient pas été noyée se retrouve sous l'eau : de nouveaux trajets hydrauliques sont créés, **entraînant une lixiviation des éléments solubles oxydés sur des surfaces jusqu'alors non lessivées. La concentration en éléments solubles augmente donc.**

- Lorsque l'aquifère trouve un exutoire, la situation est à nouveau stabilisée. **L'émergence évacue alors les eaux qui ont assuré le premier lessivage des terrains oxydés et baigné les travaux pendant parfois plusieurs années, et qui sont donc fortement chargées. Par la suite, le renouvellement de l'aquifère se poursuit et la qualité des eaux s'améliore progressivement.**

2.3 IMPACT SUR LE MILIEU

2.3.1 Impact quantitatif

Pendant les travaux, l'eau gagnant le fond par l'intermédiaire de la fracturation est pompée et rejetée au jour, dans le réseau hydrographique.

Après arrêt de ces travaux, plus aucune raison ne subsiste en général pour maintenir ce pompage : l'eau qui continue à gagner les travaux n'est plus rejetée au jour et participe au remplissage des vides.

Le niveau de l'aquifère s'élève ainsi jusqu'à ce que la nappe dispose d'un exutoire.

Le cycle de l'eau a donc localement été modifié par la présence des travaux miniers :

- augmentation des capacités d'infiltrations à l'aplomb des zones exploitées,

- modification de la répartition géographique des écoulements, la zone ayant été influencée par les travaux peut en effet recouper en surface plusieurs bassins versants distincts et restituer en son point de résurgence (sur un bassin versant donné) des eaux qui naturellement se seraient réparties sur plusieurs ruisseaux,

- modification des débits de transfert des systèmes hydrologiques ou hydrogéologiques : augmention du débit au point d'émergence au détriment des bassins versants captés,

- modification de la répartition temporelle des écoulements, les eaux s'infiltrant dans le sous sol séjournent assez longtemps dans le milieu souterrain pour que leur arrivée à l'exutoire soit décalée par rapport à la situation où elles ruisselleraient en surface : l'effet tampon de la nappe restitue donc au milieu récepteur des débits aux variations amorties.

Les figures Aa, Ab et Ac (voir figure 1) permettent de visualiser schématiquement ces modifications par rapport à la situation naturelle pendant et après les travaux. Ce schéma est représentatif du fonctionnement simple dans un contexte sans couverture sédimentaire sus-jacente. Dans ce cas la résurgence s'effectue au jour dans un talweg ou via un ouvrage minier.

La figure B représente le cas d'une évacuation de la nappe des travaux dans un aquifère contenu dans une formation sédimentaire sus-jacente : suivant les caractéristiques de cet aquifère, l'évacuation peut n'être que partielle.

La figure C schématise le cas où le point bas topographique est constitué d'alluvions perméables : dans ce cas la résurgence peut ne pas être visible au jour. Il s'agit en fait d'une variante du cas évoqué sur la figure B, si ce n'est que la

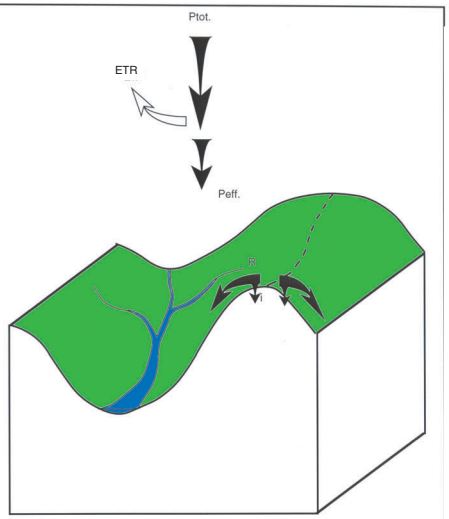


FIGURE Aa : Situation initiale (avant travaux)

La pluie efficace est restituée au réseau hydrographique, essentiellement sous forme de ruissellement, répartie entre les bassins versants tropographiques. On peut ainsi estimer sur les terrains houillers que 5 % seulement de la lame d'eau efficace (voire moins) s'infiltre.

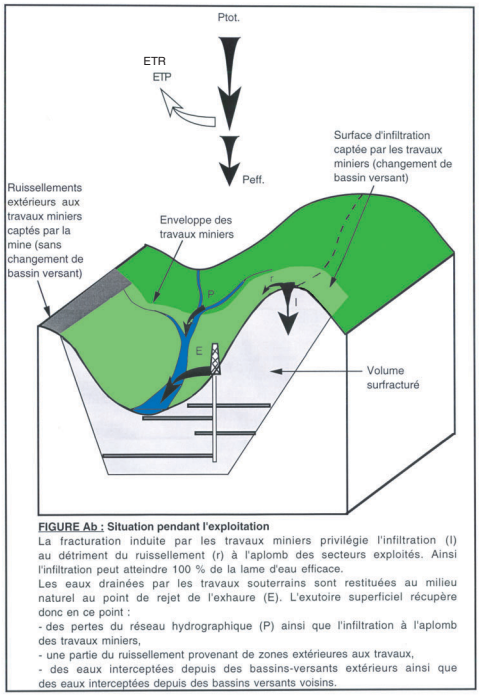


FIGURE Ab : Situation pendant l'exploitation

La fracturation induite par les travaux miniers privilégie l'infiltration (I) au détriment du ruissellement (r) à l'aplomb des secteurs exploités. Ainsi l'infiltration peut atteindre 100 % de la lame d'eau efficace.
Les eaux drainées par les travaux souterrains sont restituées au milieu naturel au point de rejet de l'exhaure (E). L'exutoire superficiel récupère donc en ce point :
- des pertes du réseau hydrographique (P) ainsi que l'infiltration à l'aplomb des travaux miniers,
- une partie du ruissellement provenant de zones extérieures aux travaux,
- des eaux interceptées depuis des bassins-versants extérieurs ainsi que des eaux interceptées depuis des bassins versants voisins.

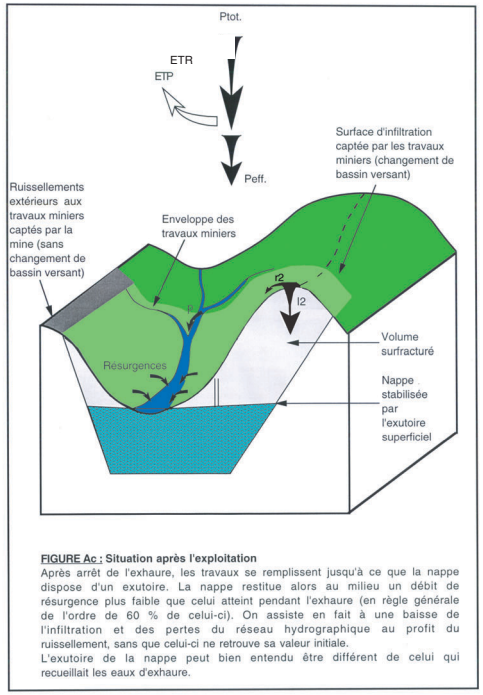


FIGURE Ac : Situation après l'exploitation

Après arrêt de l'exhaure, les travaux se remplissent jusqu'à ce que la nappe dispose d'un exutoire. La nappe restitue alors au milieu un débit de résurgence plus faible que celui atteint pendant l'exhaure (en règle générale de l'ordre de 60 % de celui-ci). On assiste en fait à une baisse de l'infiltration et des pertes du réseau hydrographique au profit du ruissellement, sans que celui-ci ne retrouve sa valeur initiale.
L'exutoire de la nappe peut bien entendu être différent de celui qui recueillait les eaux d'exhaure.

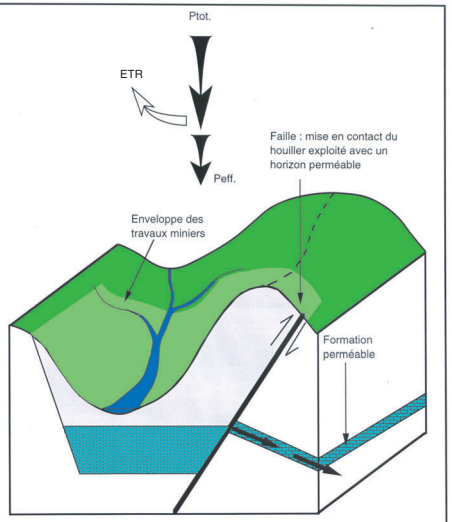


FIGURE B : Cas d'une évacuation par une formation aquifère

Au cours de sa remontée, la nappe peut rencontrer un horizon suffisament perméable qui autorise l'évacuation de son trop plein.
Dans le cas figuré ci-dessus, la mise en contact s'effectue par l'intermédiaire d'une faille : elle pourrait également s'effectuer par les ouvrages ayant traversé la couverture (puits, découvertes) ou par mise en charge.

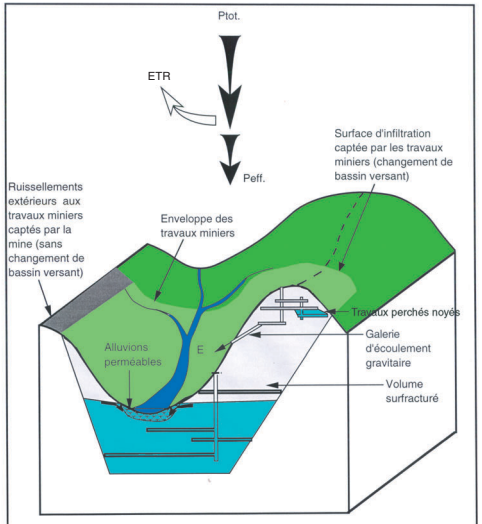


FIGURE C : Cas de figure d'évacuation par alluvions et par galerie basse

L'évacuation par alluvions perméables n'est qu'une variante du cas évoqué sur la figure B, avec une formation perméable sus-jacente de faible extension.

Le deuxième cas évoqué sur cette figure est celui des travaux réalisés en secteurs très pentus : le drainage des travaux peut alors être assuré par une galerie d'écoulement gravitaire.

Ptot : Précipitation
ETR : Evapotranspiration
Peff : Pluie efficace

Figure 1 : Quelques principes d'hydrogéologie minière

couverture sédimentaire est de faible extension et se situe uniquement dans les points bas.

Nous avons également représenté sur cette figure le cas où les travaux sont perchés et drainés par une galerie basse : c'est généralement la situation que l'on rencontre pour des travaux anciens ou en zone de montagne. Dans ce cas, la galerie qui permettait de maintenir gravitairement les travaux hors d'eau pendant l'exploitation continue à assurer cette fonction après l'arrêt de l'exploitation.

2.3.2 Impact qualitatif

La création d'un aquifère minier conduit, à terme, à l'apparition d'une résurgence minéralement chargée.

Quand des eaux de ce type rejoignent le milieu naturel, elles entraînent entre autre une augmentation de la conductivité de l'eau, de son résidu sec et de sa teneur en sulfates, qui peuvent dépasser certaines normes de qualité des cours d'eau ou de production d'eau potable, sans pour cela présenter de caractère toxique. En général ces problèmes sont résolus grâce au taux de dilution existant entre le débit de la résurgence et le débit du cours d'eau récepteur.

Elles entraînent aussi, le plus souvent, une augmentation en éléments métalliques qui, généralement, se trouvent en faible quantité dans les eaux superficielles à cause de leur solubilité faible dans les eaux à pH et/ou potentiel redox élevé.

Généralement les éléments tel que le fer et le manganèse, solubles dans les eaux de mine, qui ont un potentiel redox et parfois un pH généralement bas, précipitent à leur point d'émergence et entraînent l'apparition d'une turbidité élevée avec une coloration orangée typique, due aux hydroxydes de fer précipités. Comme nous l'avons déjà précisé, les eaux issues de travaux perchés drainés par des galeries basses ont moins tendance à présenter ce comportement.

Cette pollution n'a pas de caractère toxique mais a un caractère visuel, elle limite la pénétration des rayons lumineux dans l'eau, et la décantation des hydroxydes provoque sur quelques dizaines de mètres dans les cours d'eau un colmatage du fond et une coloration des alluvions.

Sur certain site, selon les sensibilités du milieu naturel et les caractéristiques chimiques des eaux d'émergence, un traitement peut être mis en œuvre (filière de traitement passif ou station de traitement physico-chimique).

3 CAS DE LA MINE DU BURC

3.1 Localisation

La mine du Burc exploite en souterrain depuis 1954 un filon de fluorine situé sur la commune de Paulinet, dans le département du Tarn. L'exploitation se situe une vingtaine de kilomètres au Sud-Est d'Albi (voir figure 2). La zone d'étude se situe dans un contexte rural. Les installations minières sont distantes d'environ 5 km du bourg d'Alban.

D'un point de vue morphologique, ce secteur est très vallonné : les points hauts se situent aux alentours de 600 m NGF et les fonds de vallée aux alentours de 400 m NGF.

La mine du Burc se situe dans la vallée du Ferrier, affluent de l'Oulas, lui même affluent du Dadou, quelques centaines de mètres en amont de la retenue de Rasisse.

3.2 Contexte

3.2.1 Climatologie

D'un point de vue climatique, la région est sous climat aquitanien continental. Les précipitations sont réparties tout au long de l'année avec des valeurs maximales en avril, en novembre et en décembre. Annuellement les précipitations sont de l'ordre de 1000 mm (voir figure 3).

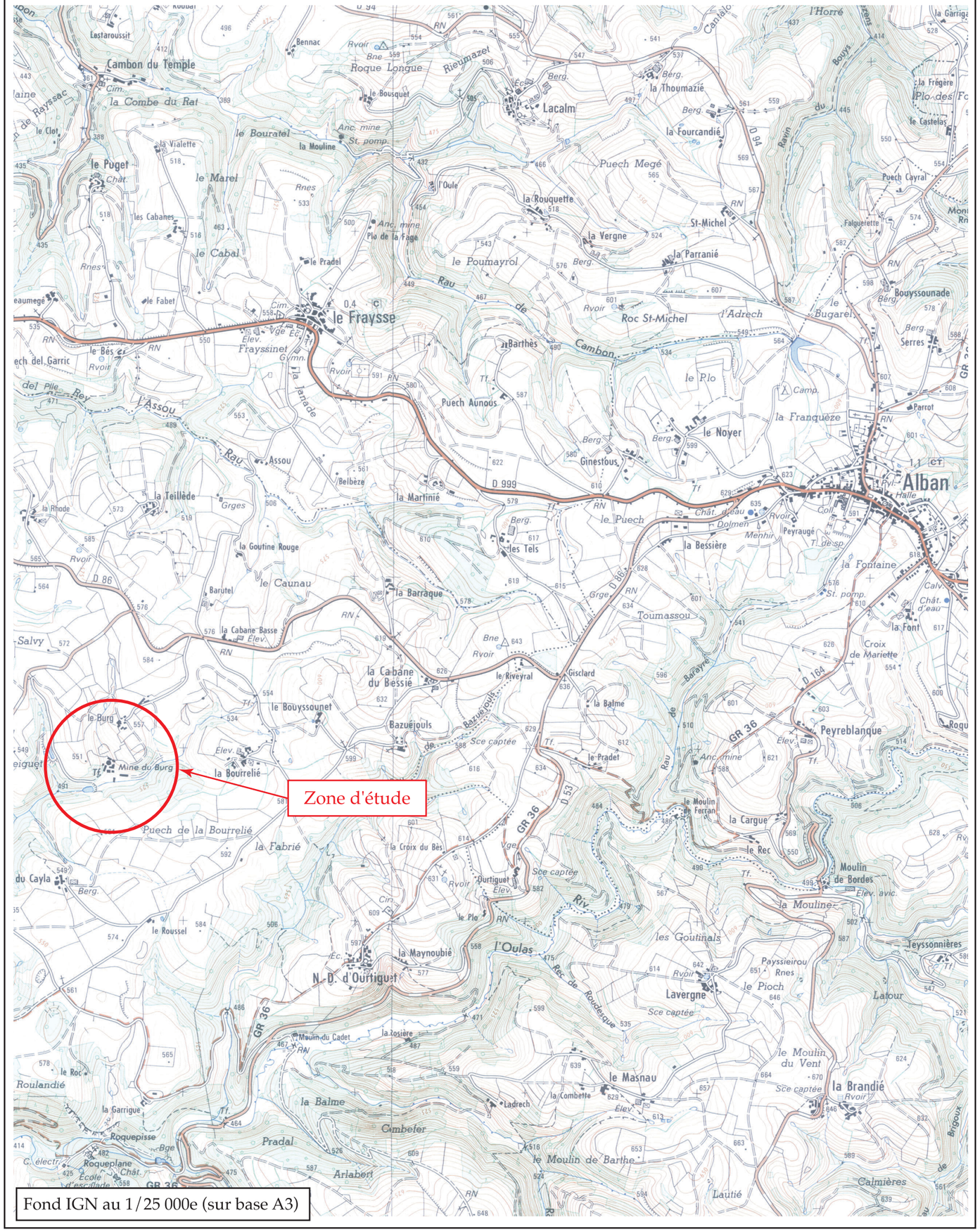
Les données climatiques en notre possession (précipitations et températures moyennes mensuelles entre 1995 et 2005 au niveau des stations Météofrance de Paulinet et de Bastides Solages, ainsi que les précipitations mensuelles au niveau de Montroc (*données SOGEREM*)) permettent de calculer à l'aide de la méthode de Tornthwaite[1], l'évapotranspiration potentielle (ETP) et l'évapotranspiration réelle (ETR).

Cette valeur qui correspond à la quantité d'eau prélevée sur la pluie totale par l'évaporation et la transpiration des plantes, permet de déduire l'eau disponible pour

[1] La méthode de Tornthwaite est une méthode régionale de calcul de l'évapotranspiration potentielle basée uniquement sur les données de températures et pluviométrie mensuelles d'une station météorologique, avec un coefficient correcteur mensuel dépendant de la latitude de la station (et intégrant des phénomènes d'ensoleillement, de rayonnement, d'albédo,...)

La formule de calcule est la suivante : $ETP\ (mm/mois) = 16(10t/I)^a$. F(Y) avec
- F'(Y) : coefficient fonction de la latitude
- t : température moyenne mensuelles
- a : fonction complexe de l'indice I : $a = 6{,}75.10^{-7}.I^3 - 7{,}71.10^{-5}.I^2 + 1{,}79.10^{-2}.I + 0{,}49$
- I : indice thermique annuel correspondant à la somme des douze indices mensuels i
- $i : (t/5)^{1{,}514}$

Figure 2 : Localisation



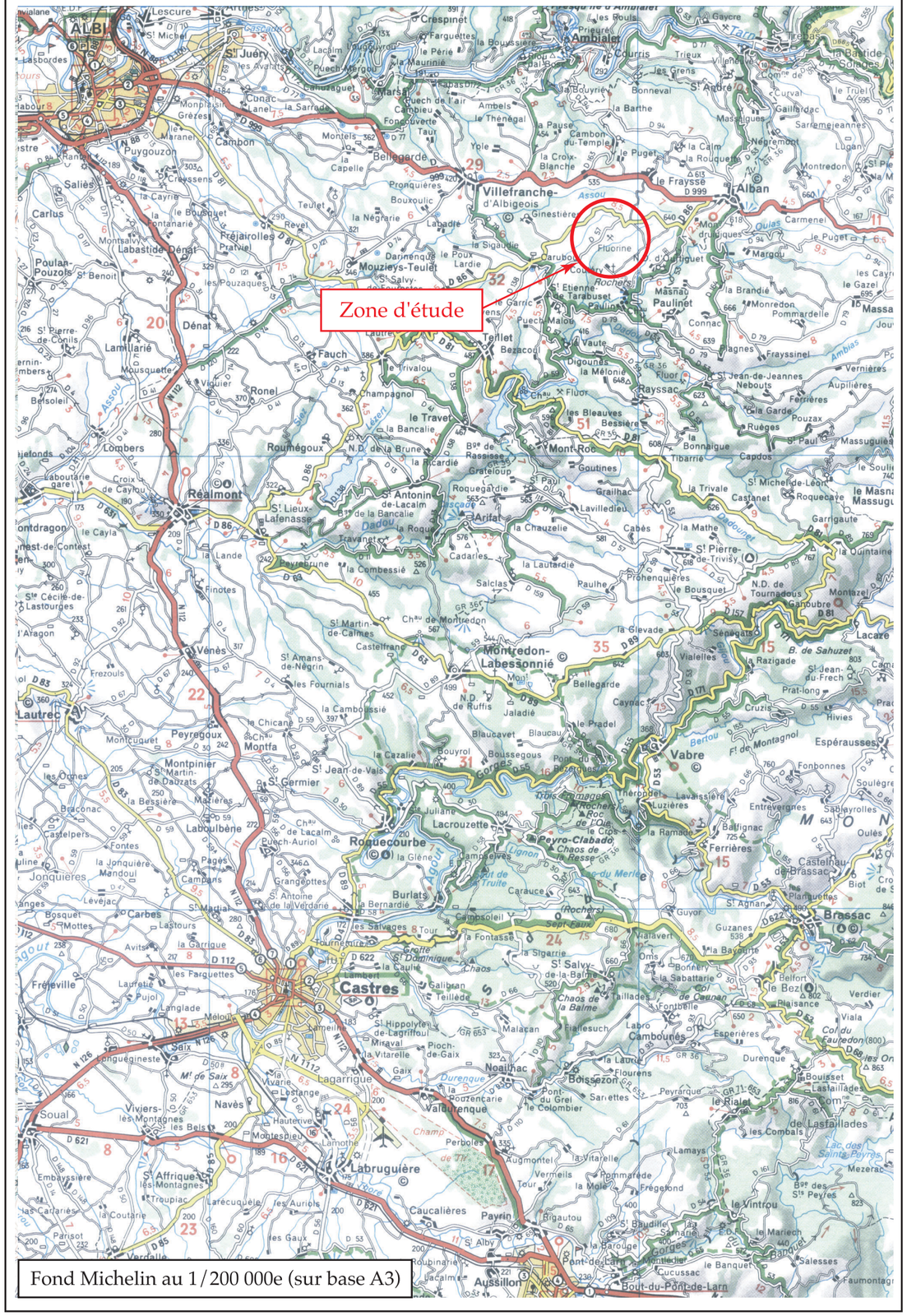
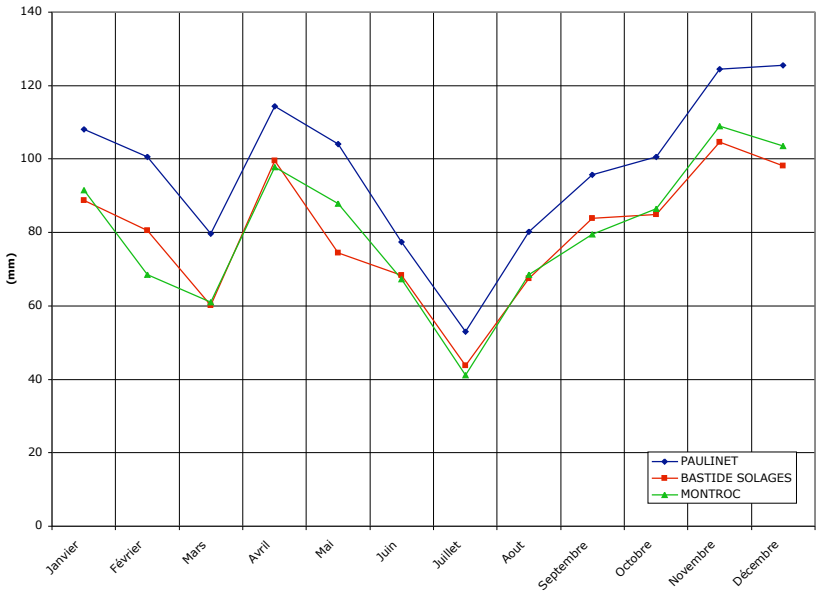


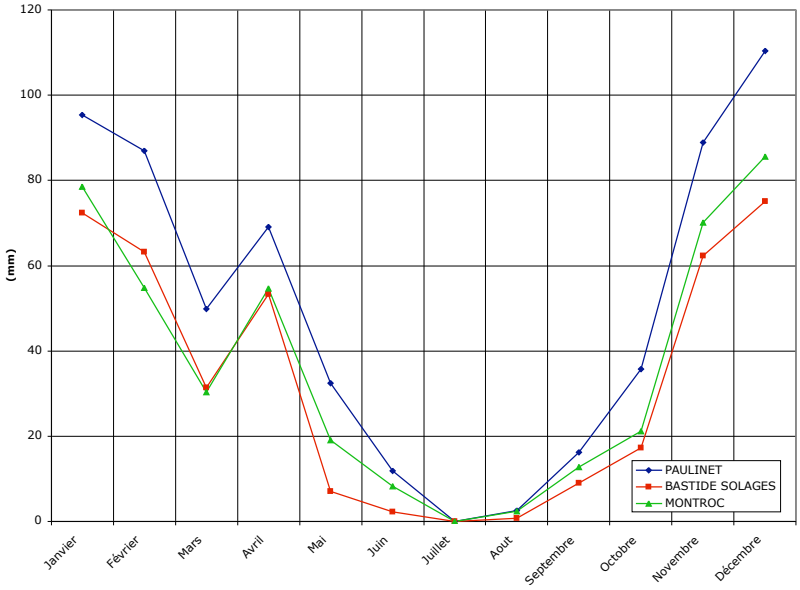
Figure 3 : Contexte climatique

	PAULINET (météofrance)		**BASTIDE SOLAGES** (météofrance)		**MONTROC** (Sogerem)	
	Précipitations	Pluie efficace	Précipitations	Pluie efficace	Précipitations	Pluie efficace
Janvier	108,1	95,3	88,7	72,4	91,5	78,5
Février	100,6	86,9	80,6	63,2	68,5	54,8
Mars	79,7	49,9	60,2	31,4	61,0	30,3
Avril	114,5	69,0	99,5	53,4	97,8	54,6
Mai	104,1	32,5	74,5	7,1	87,8	19,1
Juin	77,4	11,9	68,3	2,2	67,3	8,3
Juillet	52,9	0,0	43,7	0,0	41,1	0,0
Aout	80,2	2,6	67,5	0,7	68,5	2,5
Septembre	95,8	16,2	83,9	9,0	79,6	12,8
Octobre	100,7	35,7	84,8	17,3	86,5	21,2
Novembre	124,4	88,9	104,5	62,4	109,0	70,1
Décembre	125,6	110,3	98,2	75,1	103,5	85,6
Total	1163,9	599,2	954,5	394,2	962,2	437,8

Evoltion des précipitations mensuelles (moyenne 1995-2005)



Evolution de la pluie efficace mensuelle (moyenne 1995-2005)



le ruissellement et l'infiltration (= pluie efficace) et en conséquence d'avoir une idée du taux d'infiltration ou de ruissellement dans les bassins versants pour lesquels nous disposons d'une mesure de débit. Les résultats de ces calculs sont présentés sur la figure 3 et en annexes.

Localement la lame d'eau participant aux écoulements et aux infiltrations est comprise entre 400 et 600 mm, ce qui correspond à un débit spécifique compris entre 12,5 et 19 l/s/km².

3.2.2 Géologie

Le substratum géologique de la zone d'étude est constitué par des formations datées du Paléozoique correspondant à la nappe de Saint-Salvi-de-Carcavès (voir figure 4). Il s'agit d'une épaisse série de schiste noir reposant sur une série schisto-gréseuse verte. Cet ensemble est recoupé par de nombreux filons minéralisés.

La mine du Burc exploite d'ailleurs un de ces filons riche en fluorine. Ce filon présente une direction générale N110 et un pendage moyen vers le Nord de l'ordre de 60°. Localement d'autres filons riches en fluorine ont également fait l'objet d'une exploitation : Peyrebrune, Mont-Roc, Roquefayre, la Pialade, le Moulinal, le Franciman, Nébouts, Coutéry, Peyreblanque, Margou, le Fraysse, l'Embournegade (voir figure 5).

La mise en place des minéralisations fluorées de l'Albigeois correspond à des remplissages successifs dans de grandes zones de fracturation E-W. Ces fracturations N90° à N120° s'accompagnent également d'un réseau de fractures secondaires de direction générale N30° et N330°.

Les minéralisations fluorées généralement massives, présentent souvent un faciès rubané alternant des lits de fluorine et des lits de quartz témoignant des remplissages successifs.

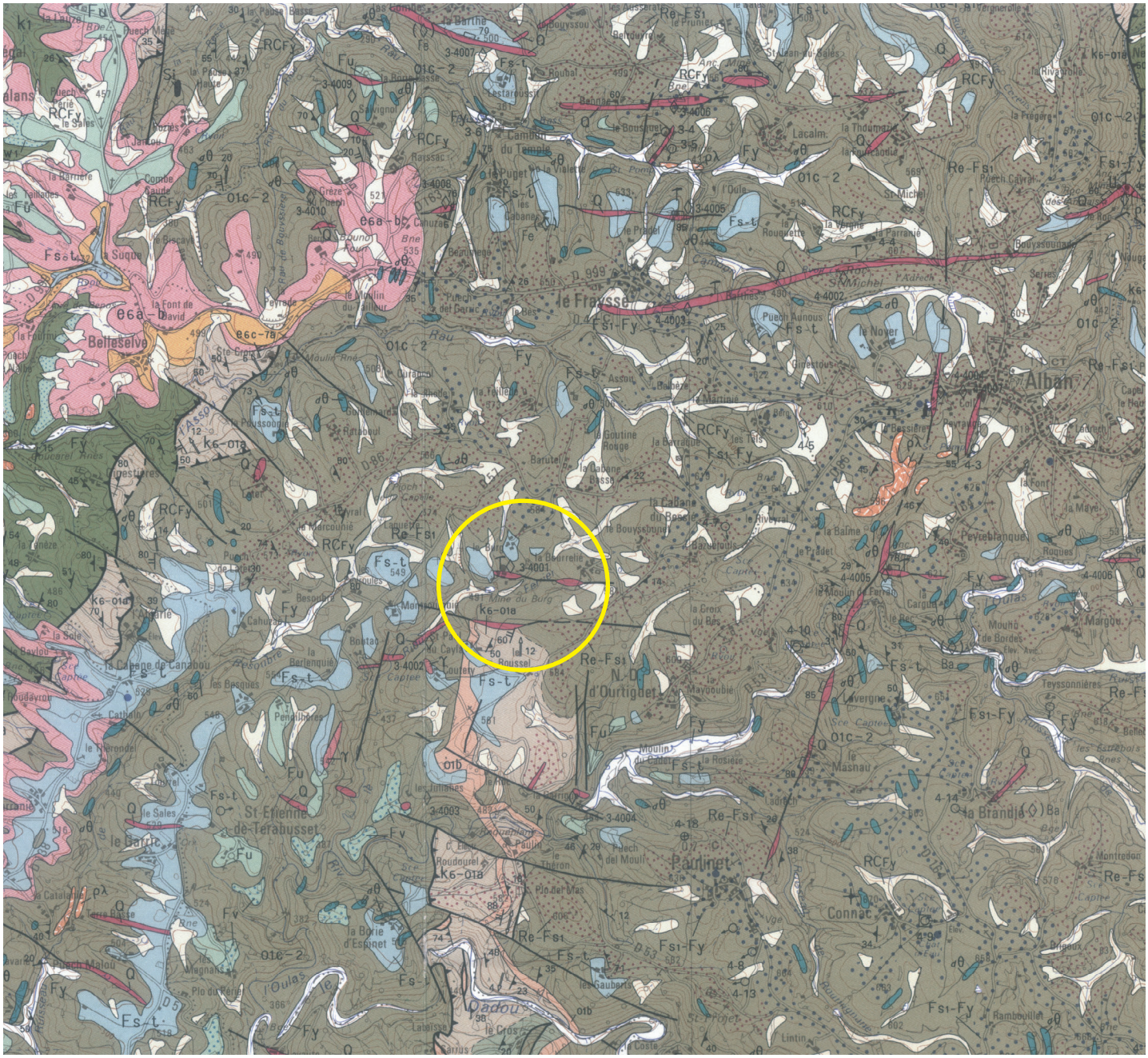
3.2.3 Hydrogéologie

Les formations schisteuses du Paléozoique, sont par nature peu perméables et n'offrent que très peu de ressources aquifères.

En terme de comportement hydrogéologique, des écoulements souterrains sont cependant possibles dans le réseau de fracturation de la roche (porosité de fracturation), notamment au niveau des grands accidents tectoniques (réseau de fractures lié à la mise en place des structures filoniènes).

La frange d'altération de la roche (arène) peut quant à elle être le siège de développement d'aquifères peu profonds et réduits. L'existence de ces écoulements sous-cutanés est principalement liée à la nature et à l'épaisseur de l'altération. En effet plus les matériaux d'altération sont de nature sableuse, plus les possibilités d'infiltration et de circulations souterraines sont importantes. Dans ce cas de figure,

Figure 4 : Contexte géologique



LÉGENDE

NÉOGÈNE - QUATERNAIRE

Formations colluviales

RCFy — Holocène
Colluvions des talwegs et des fonds des vallées secondaires

Pliocène supérieur terminal - Pléistocène inférieur

Fs-t — Fu - palier inférieur
Fs-t - palier supérieur

Formations résiduelles polygéniques, épandages

Fs1-Fy / Re-Fs1 — Pliocène supérieur à actuel
Débris schisteux et quartzeux

ROCHES MAGMATIQUES ET FILONIENNES TARDI-VARISQUES

Q 60 1 — Filons de quartz "BTH" (brèche tectonique hypersilicifiée), plus ou moins minéralisés
1 - avec pendage

Nappe de Saint-Salvi-de-Carcavès

Série schisteuse noire

01c-2 - Grès sombres ; schistes noirs homogènes à intercalations gréseuses ("schistes de l'Albigeois")

dθ - Sills et coulées de métadolérites et métabasaltes

ρλ - Tufs rhyolitiques

Si - Silexites noires

Série schisto-gréseuse verte

01b - Formation du Moulin - Mont-Roc : grès quartzitiques blancs *(niveau repère en Albigeois)*

k6-01a - Formation du Masnau-Massuguiès - Rayssac : schistes homogènes gris à verts

RESSOURCES DU SOUS-SOL ET EXPLOITATIONS

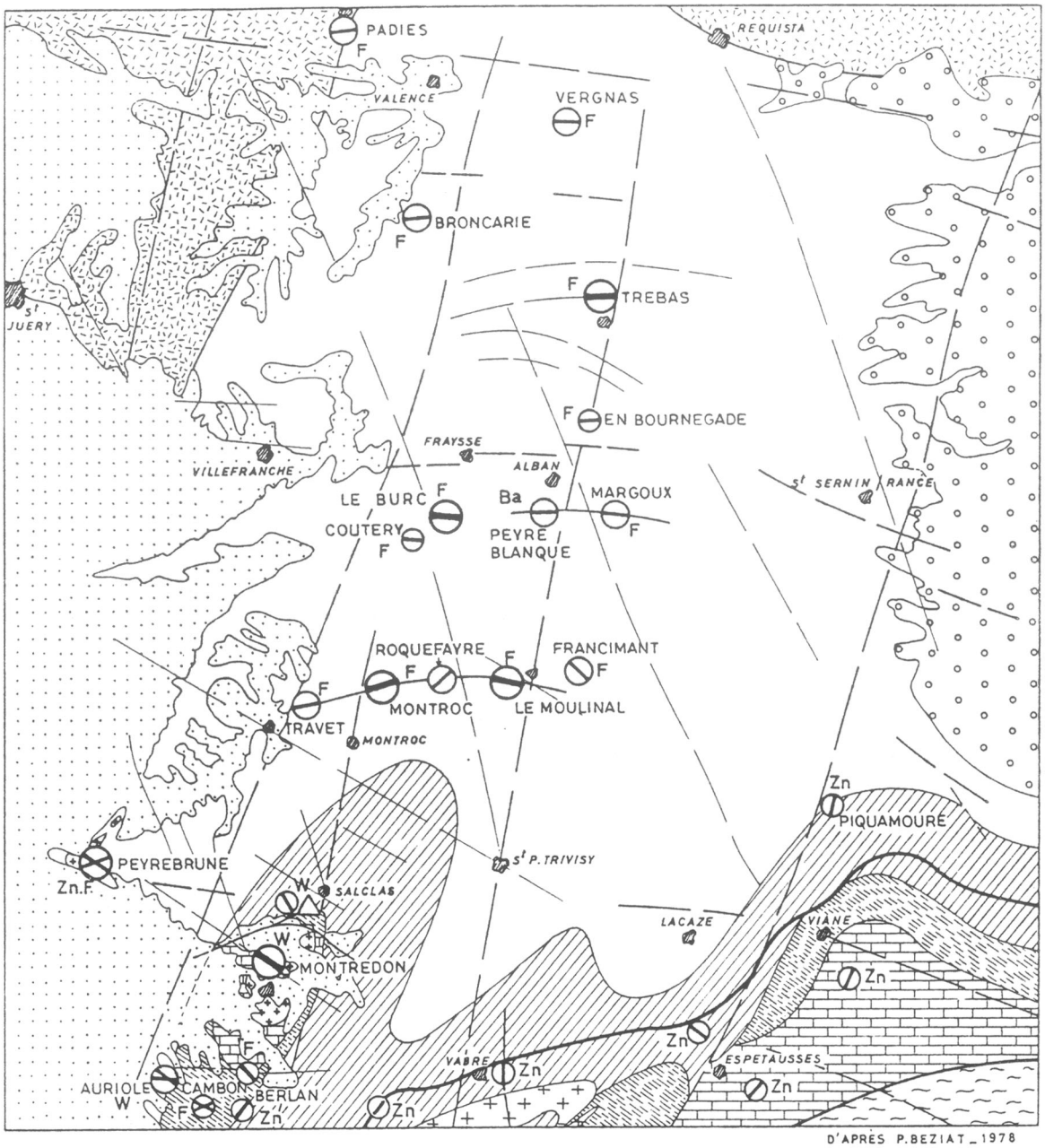
◊ (◊) 1 — Indice ou gîte minéralisé
1 - Localisation imprécise d'indices décrits mais non retrouvés

7-4005 — Numéro d'archivage des gîtes minéraux au Service géologique national

T — Mine romaine

Extrait de la carte géologique de la France du BRGM au 1/50 000e (sur base A4), feuille de Réalmont

Figure 5 :
Les Minéralisations fluorées de l'Albigeois



les écoulements ont tendance à se faire au contact entre le rocher sain et la frange altérée.

Il est à noter que les sols rencontrés au droit des formations schisteuses sont essentiellement de texture argilo-limoneuse et donc peu favorables à l'infiltration des eaux météoriques, de même que les matériaux d'épandage superficiels localement observés sur les crêtes (formations du Pléistocène).

3.2.4 Hydrologie

La zone d'étude se situe dans le bassin versant du Ferrier, petit affluent de l'Oulas, lui même affluent du Dadou, quelques centaines de mètres à l'amont de la retenue de Rasisse (voir figure 6).

Le Ferrier est un petit ruisseau qui présente un sens d'écoulement NW-SE. Son bassin versant total couvre une superficie de 5,1 km^2. A l'amont du carreau de mine, son bassin versant couvre une superficie de 1,34 km^2 seulement.

Au niveau du carreau de mine, le Ferrier est canalisé dans une galerie béton rectangulaire (≈ 1 m x 1,5 m) puis dans un ovoïde béton de type T180. A l'aval du carreau l'écoulement redevient aérien et reçoit les eaux d'exhaure des travaux souterrains. A l'aval du carreau le débit et la qualité des eaux du ruisseau sont donc très fortement influencés par l'exhaure minière.

Il n'existe aucune station de suivi hydrologique sur le Ferrier et sur l'Oulas. La station hydrométrique la plus proche se situe sur le Dadou au niveau de Paulinet (Réseau de suivi RNDE). Les données moyennes issues de cette station de suivi sont les suivantes (voir également annexes) :

Tableau 1 : Débits caractéristiques (source Banque Hydro – RNDE)

	Le Dadou à Paulinet *(BV : 72 km^2)* *Moyenne 1968-2005*	
Module	1,52 m^3/s	21,1 l/s/km^2
Qmna5	0,056 m^3/s	0,78 l/s/km^2
Etiage quinquennal (VCN10)	0,036m^3/s	0,5 l/s/km^2
Crue décennale journalière	36 m^3/s	513 l/s/km^2

- Qmna5 : débit moyen mensuel le plus faible de l'année à la fréquence quinquennale sèche,
- Etiage Quinquennal (VCN10) : débit moyen des 10 jours consécutifs les plus faibles à la fréquence quinquennale sèche.

On constate que le module interannuel du Dadou (21 l/s/km^2, moyenne 1968-2005) est très proche de la valeur de la pluie efficace calculée au niveau de la station météorologique de Paulinet (19 l/s/km^2, moyenne 1995-2005, voir §3.2.1). L'intégralité des précipitations générées sur le bassin versant se retrouve donc bien

Zone d'étude

R. de Cambon

R. de Besoubre

R. de Bazuéjouls

le Ferrier

le Dadou

l'Assou

l'Oulas

l'Ambias

Retenue de Rasisse

Alban

le Fraysse

Belleserve

Lacalm

Cormenel

Miolles

la Martinié

Massals

Montfranc

Pourrenças

Rayssac

Flatinet

Connac

Pommardelle

N.-D. d'Ouriguet

Cours d'eau

Retenue

Echelle (sur base A3) :
Fond IGN réduit au 1/45 000e

Figure 6 :
Contexte hydrographique

en ruissellement dans le réseau hydrographique superficiel, confirmant le faible potentiel du substratum géologique pour l'infiltration des eaux météoriques.

3.3 Les travaux miniers

3.3.1 Localisation – Historique

- **Structure de l'exploitation**

La mine du Burc présente une structure relativement simple qui suit la direction générale du filon. Plusieurs galeries subhorizontales, de direction E-W, ont été tracées à différentes profondeurs, directement dans le filon. On distingue ainsi 8 grands niveaux d'exploitation (voir figures 7 et 8) :

- le niveau 24 (situé à environ 24 m de profondeur par rapport au carreau de la mine, soit alentours de 486 m NGF),
- le niveau 54 (situé aux alentours de 457 m NGF),
- le niveau 100 (situé aux alentours de 411 m NGF),
- le niveau 135 situé aux alentours de 377 m NGF),
- le niveau 170 (situé aux alentours de 341 m NGF),
- le niveau 200 (situé aux alentours de 322 m NGF),
- le niveau 220 (situé aux alentours de 291 m NGF),
- le niveau 235 (situé aux alentours de 270 m NGF).

Ces galeries subhorizontales sont reliées entre elles par de nombreuses descenderies situées généralement au mur du filon ainsi que par de nombreuses cheminées utilisées pour l'aérage et/ou le remblayage des chantiers.

L'exploitation souterraine est également desservie par un puits qui relie le jour à la base de l'exploitation. Les différentes recettes du puits desservent les niveaux 54, 100, 135, 170 et 220.

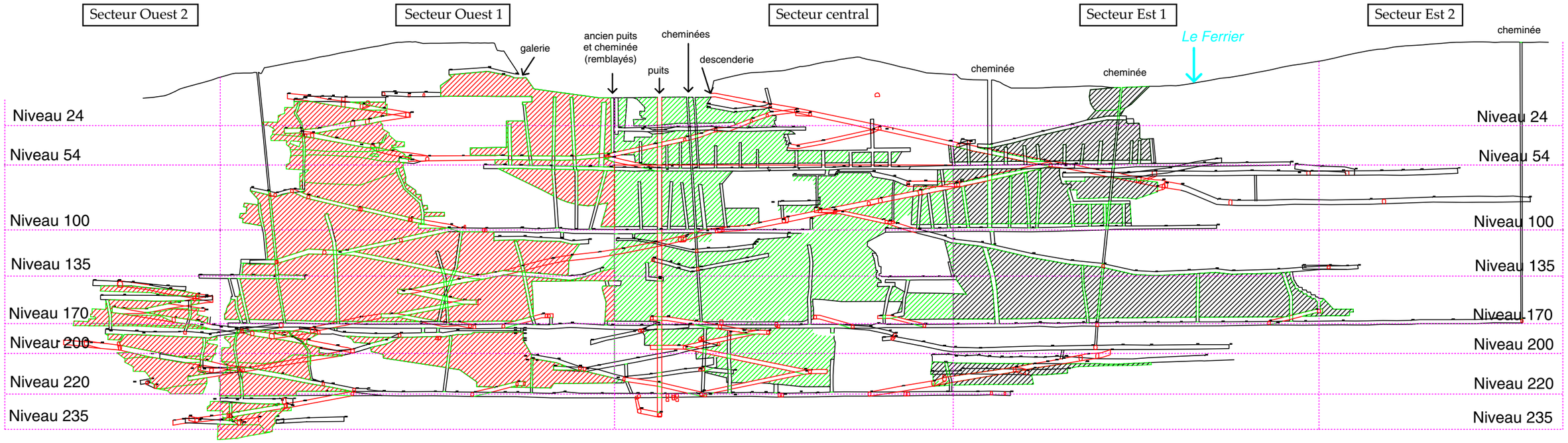
L'exploitation du minerai se fait par « tranches montantes remblayées ». L'épaisseur moyenne du filon est comprise entre 2 et 4 m. L'extension latérale des travaux souterrains atteint 1100 m environ. L'exploitation a été divisée en 3 secteurs d'exploitation : le quartier Ouest, le quartier central et le quartier Est. Dans ces trois secteurs, le filon a été exploité sur la totalité de sa hauteur c'est-à-dire de la surface topographique à la cote de 270 m NGF environ (voir coupe jointe, figure 7).

Les ouvrages débouchant au jour sont peu nombreux. La localisation des principaux ouvrages est synthétisée sur la figure 7, on distingue :

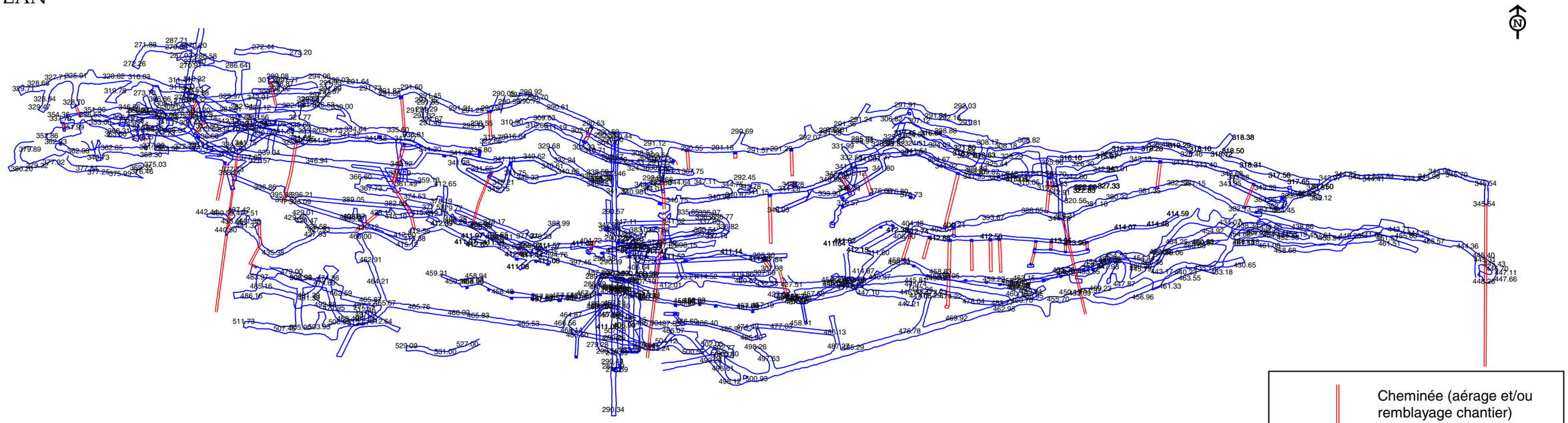
- la grande descenderie actuellement utilisée pour la remonte des matériaux (cote jour : 508,7 m NGF),
- le puits et diverses cheminées débouchant directement sur le carreau de mine entre 508,4 et 508,6 m NGF. Il est à noter que certains de ces ouvrages ont déjà fait l'objet d'un remblayage,

Figure 7 : Les travaux miniers

EN COUPE



EN PLAN



Echelle (sur base A3) : 1/3000e

Figure 8 :
Les travaux miniers
Emprise au jour

Talweg Ressegnet

Talweg Le Burg

Le Ferrier

Talweg La Bourrelié

Le Ferrier

Infrastructure minière (galeries)

Cheminée

Section de cours d'eau canalisé

530 Courbe de niveau

290.69 Cote ouvrage minier

Echelle (sur base A3) : 1/2500e

- d'anciennes galeries correspondant à de vieux travaux. Quatre sont actuellement connues. Deux se situent dans la partie basse du carreau, aux alentours de la cote 505,8 m NGF, les deux autres se situent à flanc de coteau à une altimétrie beaucoup plus importante (> 527 m NGF),
- des cheminées utilisées pour l'aérage (Cheminée Ouest à 526,05 m NGF, cheminées Est à 521, 516 et 550 m NGF).

● **Historique**

C'est la Société Electrochimique d'Ugine qui a lancé l'exploitation industrielle sur le site du Burc en 1953. L'exploitation a débuté par des grattages superficiels et souterrains au niveau du siège actuel du carreau minier. L'exploitation souterraine se fait alors par de petites galeries directement percées à flanc de coteau et par un petit puits d'une trentaine de mètres de profondeur.

En 1961 et 1962 le fonçage d'un nouveau puits (= puits actuel) et le traçage de galeries Est et Ouest au niveau 24 permet le développement de l'exploitation souterraine. En 1963 le fonçage du puits atteint le niveau 100, le niveau 170 est quant à lui atteint au milieu des années 70. Dans tous ces niveaux, l'infrastructure de la mine se développe et de nombreux abattages sont réalisés.

De 1981 à 1982 une descenderie relie le niveau 170 au niveau 220. Dans la foulée, le puits est également foncé jusqu'à ce niveau. A partir de la fin des années 80 la configuration de la mine correspond à la configuration actuelle.

Dans les années 90 des traçages confirment la présence du minerai sur les bordures Est et Ouest de l'exploitation. Il est à noter que les sondages de reconnaissance réalisés sur la bordure Ouest ont montré un décalage d'une trentaine de mètres du filon vers le Sud, dû à la présence d'un accident majeur (faille Nord-Sud).

3.3.2 Les eaux d'exhaure

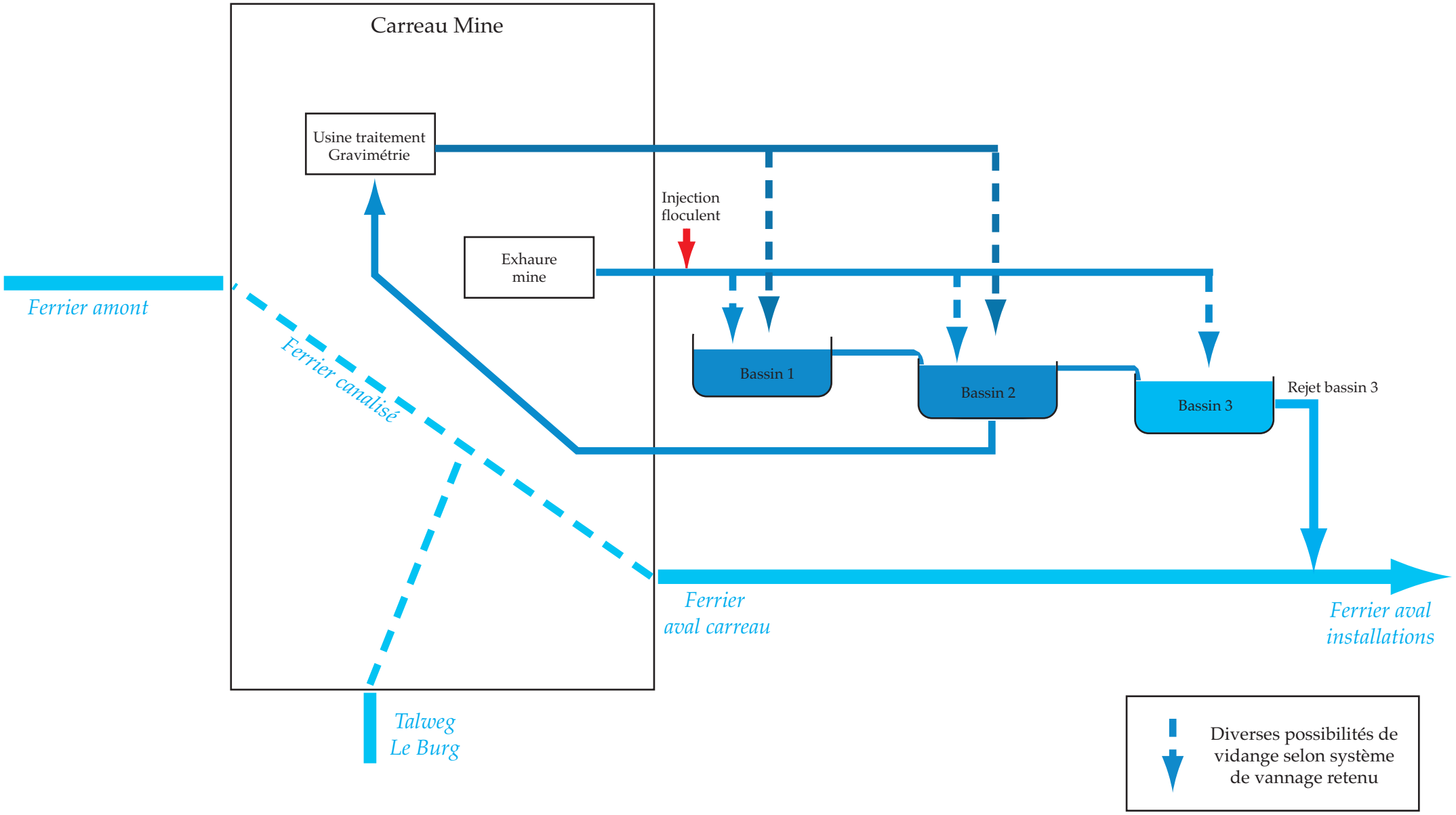
● **Généralités**

L'exploitation souterraine a recoupé plusieurs venues d'eau. Il s'agit pour la plupart de venues d'eau très localisées qui se situent pour l'essentiel dans la partie centrale et la partie Est de l'exploitation.

Toutes ces venues d'eau sont amenées gravitairement et/ou par pompage jusqu'aux recettes 170 et 220 du puits où des albraques ont été creusées. La capacité de ces albraques est de 3000 m^3 à chaque niveau

L'eau stockée est ensuite remontée au jour par la colonne du puits par pompage. Un caniveau traversant le carreau permet l'évacuation des eaux d'exhaure vers les bassins de traitement. Le traitement correspond à une injection de floculant et à une décantation dans 3 bassins installés en série avant le renvoi vers le Ferrier.

Figure 9 : Schéma du circuit des eaux



Une partie des eaux d'exhaure est utilisée dans le process de l'usine de traitement du minerai (gravimétrie) présent sur le carreau. Le prélèvement ne se fait pas directement en sortie de puits mais dans les bassins de traitement. L'eau prélevée finit de toute façon à terme par être renvoyée dans les bassins de décantation (voir figure 9).

En 2003 SOGEREM a réalisé une campagne de mesures de débit de toutes les venues d'eau transitant dans la mine. Une analyse quantitative de ces mesures a ensuite été réalisée afin de bien individualiser chaque venue d'eau et ne pas la comptabiliser deux fois (cas par exemple d'une rigole recueillant plusieurs venues d'eau et se retrouvant dans un niveau inférieur). Les résultats de cette campagne sont synthétisés sur la figure 10. On constate que l'essentiel de l'exhaure provient de venues d'eau issues de la partie centrale et Est du gisement. Deux importantes venues d'eau situées à l'extrémité Est du gisement aux niveaux 200 et 220 constituent plus du tiers de l'exhaure de la mine du Burc.

- **Débit**

L'exhaure à la sortie du puits fait l'objet d'un suivi régulier. Son évolution mensuelle depuis 1995 est représentée sur la figure 11 *(source SOGEREM)*. Sur cette figure sont également représentées les fluctuations de l'exhaure aux niveaux 220 et 170.

Le débit moyen de l'exhaure de la mine du Burc entre 1995 et 2005 s'établit aux alentours de 88 m^3/h. Les valeurs maximales atteignent mensuellement 113 m^3/h et 53 m^3/h pour les minimales soit une amplitude de l'ordre de 2 seulement.

Le suivi de la répartition de l'exhaure entre le niveau 170 et le niveau 220 montre qu'à partir de 1998, les volumes pompés à 220 ont augmenté alors que ceux pompés à 170 ont diminué. Ce phénomène est probablement lié à un report de certaines venues d'eau dans les niveaux inférieurs de l'exploitation suite à la recoupe de la fracture d'alimentation à un niveau inférieur (avancement travaux, percement galerie...)

Sur la figure 11, nous avons également comparé les fluctuations de l'exhaure avec celle de la pluie efficace (voir § 3.2.1). On constate que l'évolution mensuelle de l'exhaure se cale bien avec celle de la pluie efficace montrant ainsi la relation qu'il existe entre les venues d'eau transitant dans les travaux miniers et le régime climatique et hydrologique observé en surface.

3.3.3 Qualité des eaux

Dans le cadre de l'étude de l'école des mines de Paris, de nombreuses venues d'eau recoupées par l'exploitation ont fait l'objet d'un prélèvement pour analyse. Ces prélèvements souterrains se sont accompagnés de prélèvements en surface. La localisation des points échantillonnés ainsi que les résultats d'analyses sont présentés sur la figure 12.

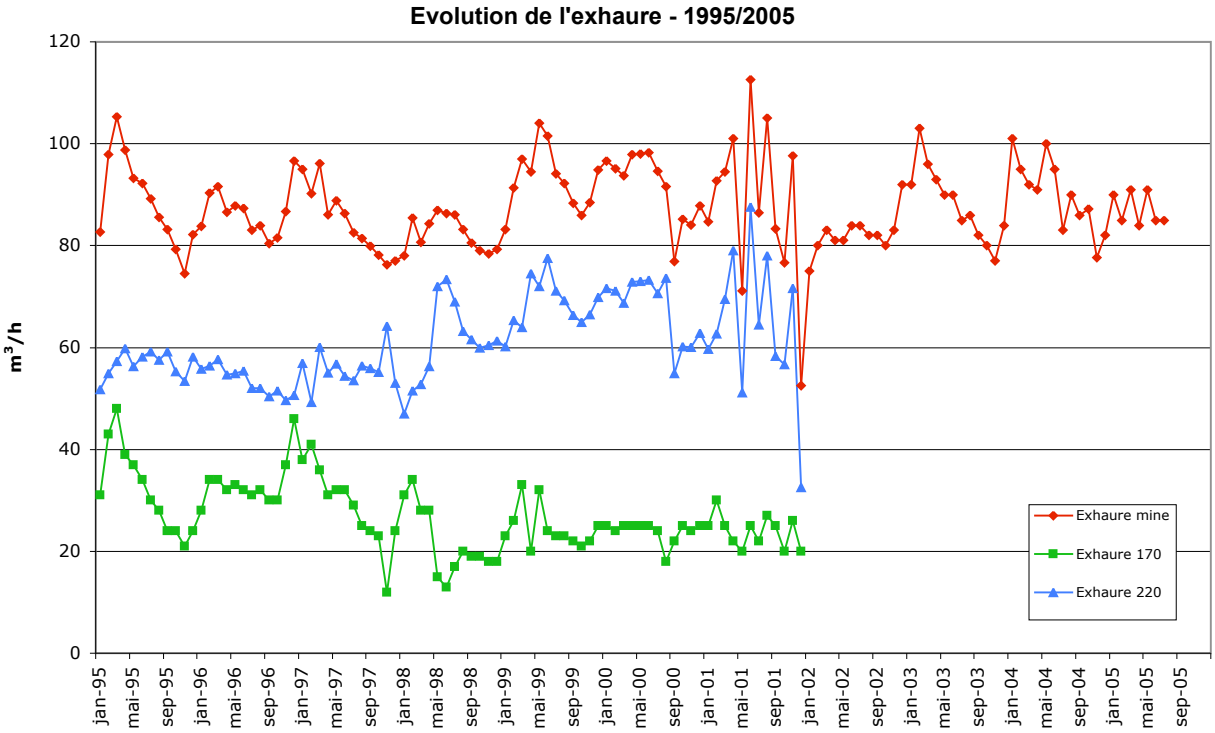
Figure 10 : Localisation des venues d'eau dans la mine (d'après étude SOGEREM 2003)

	Ouest			Centre			Est		
	ref Sogerem	Localisation	Débit (l/h)	ref Sogerem	Localisation	Débit (l/h)	ref Sogerem	Localisation	Débit (l/h)
Niveau 24	*70 - O1*	descenderie	12						
niveau 54	*66 - O1*	descenderie	2,6				*89 - E1*		4,6
	69 - O1	descenderie	11,5	*105*	flaque	0,5	*74 - E1*	descenderie	2,9
	61 - O1	descenderie S40	7,7	*73*	descenderie N10	5,8	*75 - E1*	descenderie	0,5
	59 - O1	descenderie S39	19,2	*72*	descenderie N60-N70	2,6	*76 - E1*	descenderie	5,8
	58 - O1	descenderie diaclase	13,7						
niveau 100	*94 - O1*		16	*79*	descenderie	10,6			
	95 - O1	descenderie E-W	4,8	*82*	descenderie N100	169,4			
	97 - O1	N135	5,8	*83*	descenderie	9			
	98 - O1	descenderie rigole	7,2	*88*		7,7			
	106 - O1	montage	15,8	*110*	sortie tuyau	720			
	107 - O1		480						
Niveau 135	*92 - O1*	E-W	2,3						
	93 - O1	écoulement sol	38,4						
Niveau 170				*84*	montage	13,1			
	35 - O1	cheminée montage	115,2	*85*	montage	88,2	*26 - E1*	montage	48
	38 - O1	barreau aérage	110,8	*86*	montage	18	***29 - E2***	au bout soufflerie	960
				23	puisard avant albraque	288			
				33	ruissellment montage	105,6			
niveau 200	***42-O2***	N170-65S	32,4				*101 - E1*	sondage	288
							103 - E1	mur filon	0,6
							104 - E1	pompe	864
niveau 220	*30 - O1*	mur filon	18,4						
	31 - O1		36	*7*	rigole	34560	*8 - E1*	ecoul sol/cheminée	36000
	32 - O1	montage	72	*13*	rigole N100 80	92,2	*18 - E1*	sondage 92	1440
	41 - O1	galerie stockage boue	76,8						
	43-O2	descenderie N130-70s	84						
Niveau 235	***45-O2***	filon O2-235	57,6	*112*	rigole	32,9			
	46-O2	descenderie	172,8						

Synthèse - Débit en l/h

	Ouest	Centre	Est	Total
Niveau 24	12	0	0	12
Niveau 54	55	9	14	77
Niveau 100	530	917	0	1 446
Niveau 135	41	0	0	41
Niveau 170	226	513	1 008	1 747
Niveau 200	32	0	1 153	1 185
Niveau 220	287	34 652	37 440	72 379
Niveau 235	230	33	0	263
Total	1 413	36 124	39 614	77 151

Figure 11 : Exhaure - Mine du Burc



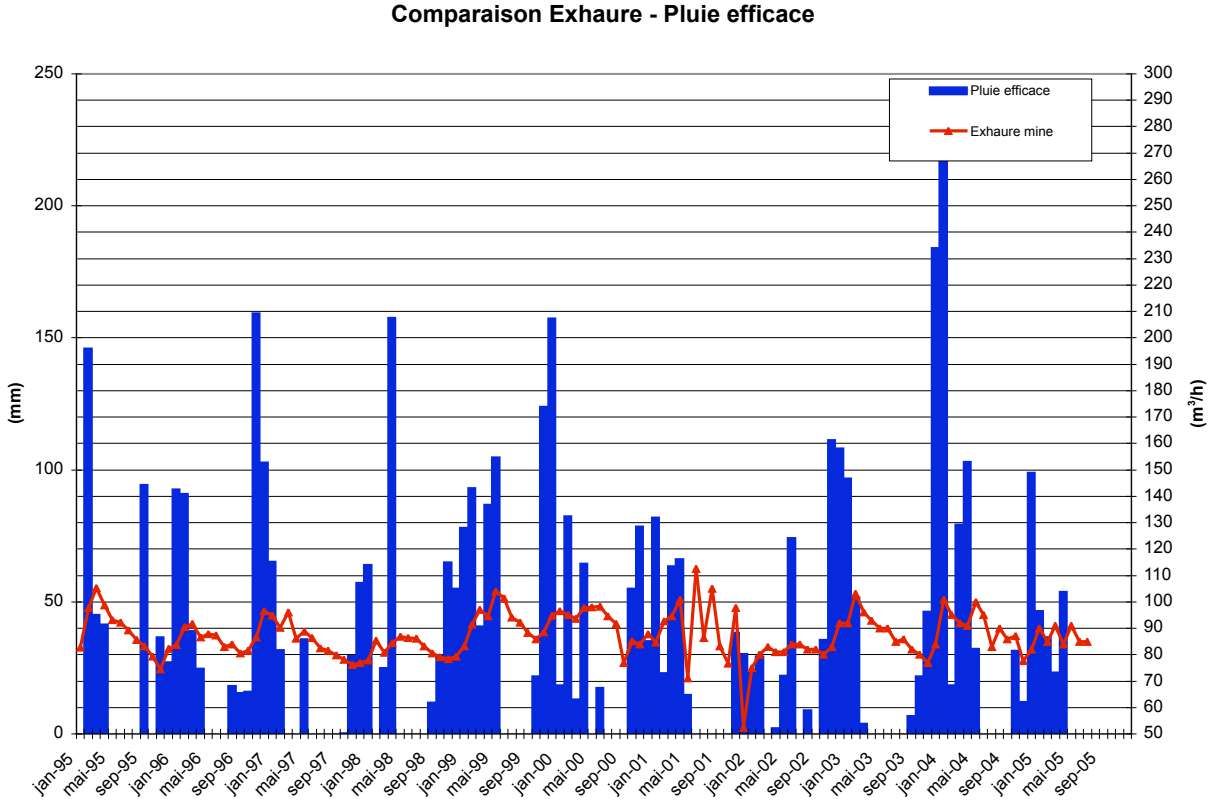
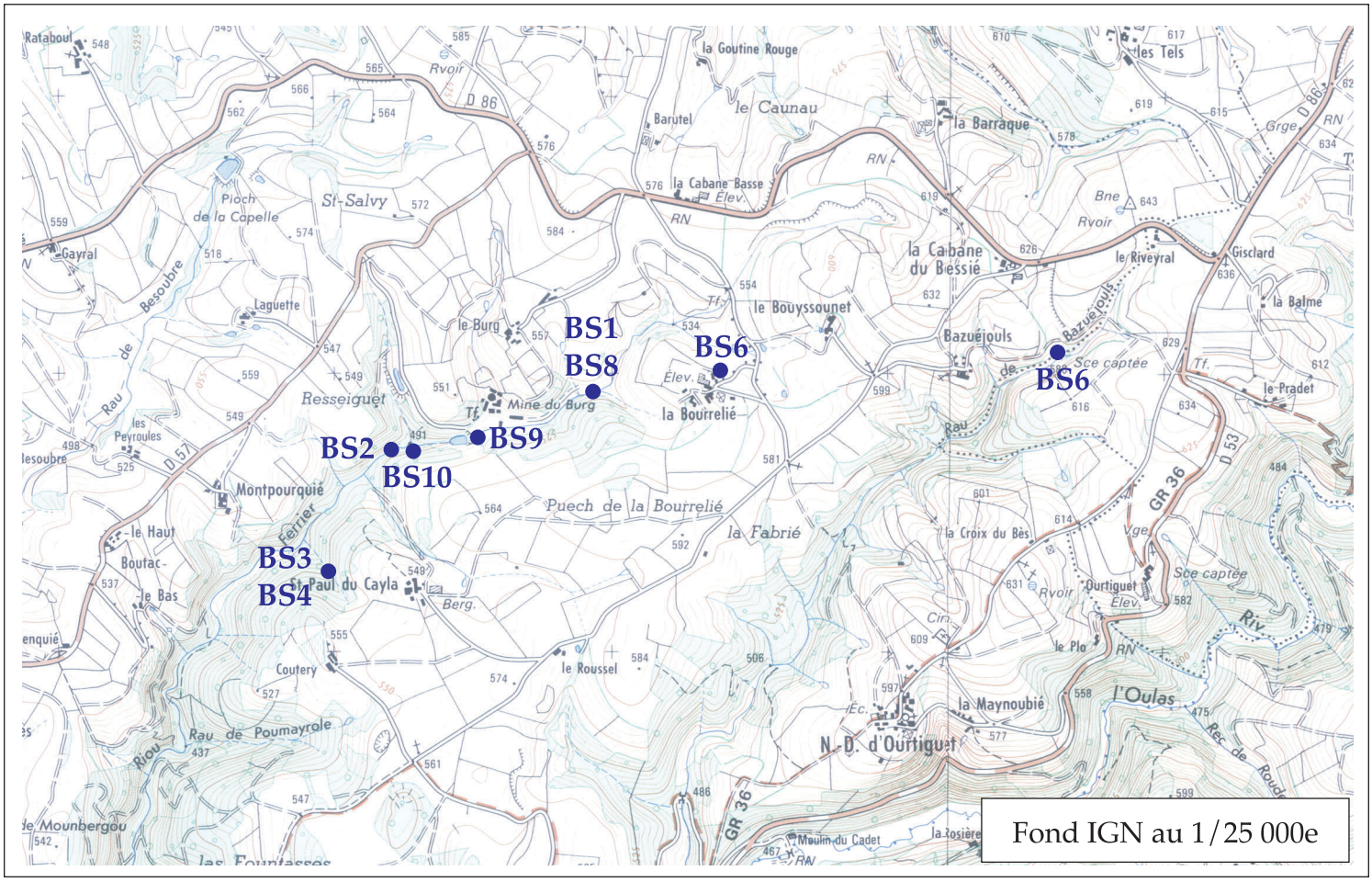
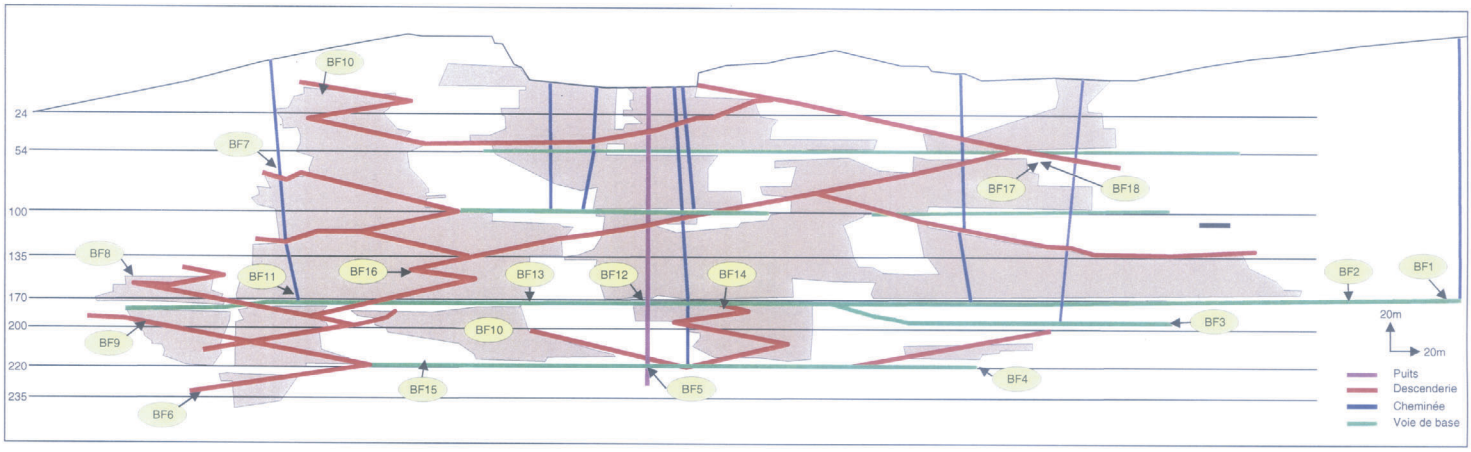


Figure 12 :
Localisation des prélèvements

Prélèvements "Eaux superficielles"



Prélèvements "Eaux souterraines"



Localisation des prélèvements d'eau effectués en mai 2003

Ces échantillons d'eau ont fait l'objet d'une analyse physico-chimique relativement complète. Les résultats de ces mesures sont présentés sur la figure 13. Sur la figure 14, nous avons représenté ces résultats selon une représentation de Schoeller-Berkaloff. Il s'agit d'une représentation graphique d'une analyse chimique exprimée en milliéquivallents par litre sur un diagramme semi-logarithmique. Sur l'axe des abscisses sont disposés à intervalle régulier et successivement de gauche à droite les teneurs suivantes Ca, Mg, Na, K, Cl, SO4, TAC, TH, F et sur l'axe des ordonnées, gradué suivant une échelle logarithmique, le nombre de milliéquivalents de chacun de ces éléments (H. Schoeller 1962). Cette représentation graphique permet de visualiser le ou les pôles d'ions dominants caractéristiques de l'échantillon d'eau analysé.

Le milliéquivalent par litre (meq/l) est défini comme étant le rapport de la concentration en mg/l d'un ion donné à son équivalent chimique (= masse atomique de l'ion considéré / valence de l'ion).

Au vu des résultats cinq grandes familles physico-chimiques peuvent être individualisées.

- **Famille 1 : Les eaux peu minéralisées bicarbonatées calciques**

Les échantillons concernés sont BS1, BS3, BS4, BS5. Aucune venue d'eau souterraine dans la mine n'est concernée. Il s'agit généralement d'eau fortement influencée par l'origine superficielle des écoulements (influence des eaux météorique). La minéralisation de ces écoulements est proche de 100 mg/l seulement.

- **Famille 2 : Les eaux moyennent minéralisées chlorurées**

Un seul échantillon est concerné. Il s'agit d'un puits de ferme situé à La Bourrelié (BS6). La présence de chlorures dans les eaux, contrairement à tous les autres échantillons, met en évidence une pollution anthropique. Cette influence est d'ailleurs confirmée par la forte teneur en nitrate dans cet ouvrage (102,9 mg/l).

- **Famille 3 : Les eaux moyennement minéralisées bicarbonatées calciques**

Le faciès physico-chimique de cette famille diffère de la première famille par l'apparition d'un pôle sulfaté en plus du pôle bicarbonaté. Il s'agit de venues d'eau recoupées dans l'exploitation souterraine. Les échantillons concernés sont BF1, BF2, BF4, BF8, BF9, BF14.

L'influence des minéralisations sulfurées associées au filon commence à se faire sentir sur la chimie des eaux. La minéralisation moyenne de ces écoulements se situe aux alentours de 220 mg/l et quelques traces de fluorures sont présentes (0,5 à 2 mg/l).

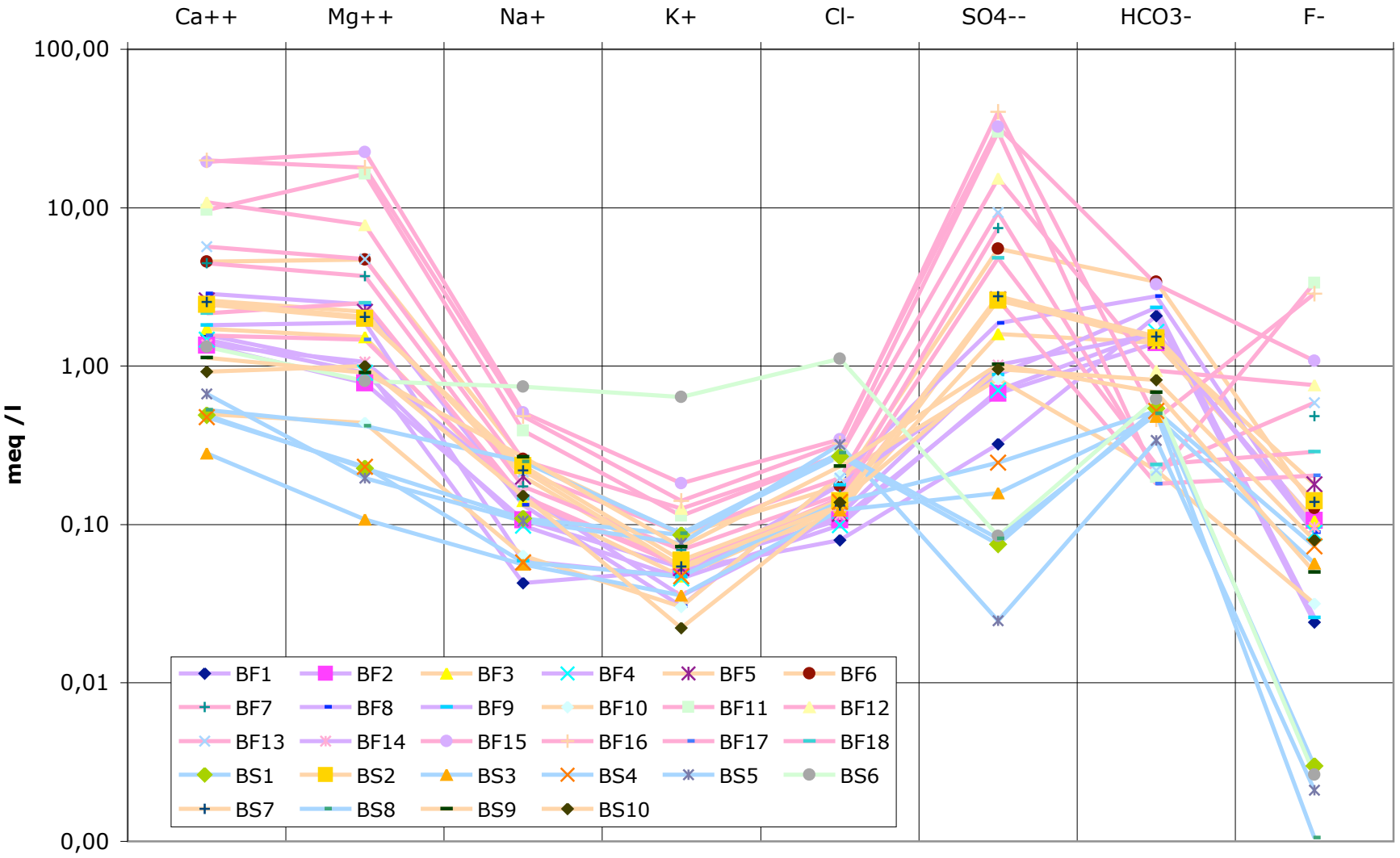
Figure 13 : Campagne d'analyses - ENSMP - mai 2003

		Prélèvements "mine"																	Prélèvements "hors exploitation"									
	Echantillon	**BF1**	**BF2**	**BF3**	**BF4**	**BF5**	**BF6**	**BF7**	**BF8**	**BF9**	**BF10**	**BF11**	**BF12**	**BF13**	**BF14**	**BF15**	**BF16**	**BF17**	**BF18**	**BS1**	**BS2**	**BS3**	**BS4**	**BS5**	**BS6**	**BS7**	**BS8**	**BS9**	**BS10**
	Lieu	sondage Cheminée Est	Sondage Venue d'eau fer-malachite	Extrémité du 200 en couronne	sondage SG3 // filon	Albraque avant traitement	Ecoulement boulon après faille	Ecoulement Cheminée Ouest	Ecoulement chantier 170	Point 42 flaque	Chantier O1-24	pied cheminée Ouest	égouttage remblai	égouttage remblai O1-170	entrée Albraque	égouttage remblai O1-220	Point 55 descenderie	point 54 en couronne	Ecoulement sondage	Ferrier amont carreau	Ferrier aval carreau	Coutery débordement filon	Coutery egouttage remblai	Captage de Bazuéjouls	Puits ferme La bourrelié	Exhaure Burg	Ferrier amont idem BS1	Ferrier sortie buse aval carreau	Marigot Ferrier Rive gauche
	Niveau/panneau	170	170	200	traçage 220	220	235 Ouest	≈67	O2 -170	200	≈ 0	170	170	170	170C	220	≈ 139	tracage≈ 65	8										
in-situ	*T° en °C*	18,2	18,1	18,8	20,8	19,6	16,8	14,8	15,3	15	14,1	15,5	14,5	14,2	15,5	15,9	13,7	14,3	14,9	13,5	16,2	14,2	14,1	16,7	16,1	19,3	17,3	15,5	16,1
	pH	6,86/6,88	6,81	7,14	6,72	7,23/7,28	7,23/7,24	6,2	7,56	7,87/7,92	5,64	5,43	6,75/6,78	6,8	7,56	7,01	5,9	6,29	6,21	7,15	7,67	6,16	6,6	5,97	6,52	7,43	7,21	7,39	6,68
	Eh/ENH en mV	230	306	327	220	390	393	454	352	331	383	448	399	395	364	370	308	356	388	358	347	375	288	391	373	347	342	337	356
	Conductivité (µS/cm)	297	255	327	279	480	828	757	508	381	186	2330	1486	531	285	2950	3130	341	518	1545	437	81,6	122,2	175	422	477	161,1	272	225
	O2 dissous (mg/l)	3,4	3,7	8	2,6	9,1	5,14	9,1	8,5	8,8	6,5	9,2	9,1	9,3	9,1	8,9	7,1	9,3	9,5	9,5	9,5	7	9,1	8,4	7,8	8,5	8,5	9,1	6,1
Anions	*HCO3 (mg/l)*	126,88	85,4	85,4	100	87,8	207,4	0	168,4	142,7	13,4	12,2	57,3	13,42	97,6	200,1	28,1	11	14,6	32,9	91,5	29,3	31,7	20,7	37,8	93,9	30,5	41,5	50
	T.A.C. (°F)	10,4	7,0	7,0	8,2	7,2	17,0	0	13,80	11,70	1,10	1,00	4,70	1,10	8	16,40	2,30	0,90	1,20	2,70	7,5	2,40	2,60	1,70	3,10	7,70	2,5	3,40	4,10
	F mg/l	0,46	2,01	2	1,68	3,42	2,41	9,15	1,69	0,49	0,6	63,71	14,37	11,14	1,83	20,48	54,48	3,87	5,46	0,057	2,68	1,08	1,38	0,04	***0,05***	2,64	***0,02***	0,95	1,52
	Cl (mg/l)	2,84	3,78	4,62	3,53	4,14	6,21	5,47	7,16	6,34	7,23	9,76	9,72	6,96	4,08	12,28	11,52	5,05	5,2	9,54	5	4,37	4,92	11,37	39,64	4,67	10,06	8,3	4,89
	NO2 (mg/l)	***0,02***	***0,02***	***0,02***	***0,02***	***0,02***	***0,05***	***0,20***	***0,05***	***0,02***	***0,02***	***1***	***0,50***	***0,1***	***0,02***	***2***	***2***	***0,05***	***0,05***	***0,02***	***0,05***	***0,01***	***0,01***	***0,01***	***0,05***	***0,05***	***0,02***	***0,02***	***0,02***
	Br (mg/l)	***0,02***	***0,02***	***0,02***	***0,02***	***0,02***	***0,05***	***0,20***	***0,02***	***0,02***	***0,02***	***1***	***0,50***	***0,1***	***0,02***	***2***	***2***	***0,05***	***0,05***	***0,02***	***0,05***	***0,01***	***0,01***	***0,01***	***0,05***	***0,05***	***0,02***	***0,02***	***0,02***
	NO3 (mg/l)	***0,02***	0,3	0,51	***0,02***	2,14	4,88	10,45	***0,05***	0,42	13,27	18,3	***0,50***	***0,1***	***0,02***	***2***	***2***	***0,05***	***0,05***	25,7	3,51	2,24	0,68	46,03	102,9	1,18	26,82	16,23	1,43
	SO4 (mg/l)	15,52	32,37	76,83	33,77	126,4	265	357,6	89,62	42,28	39,82	1443	731,9	446,5	48,9	1554	1928	125,6	230,7	3,61	124,5	7,59	11,79	1,19	4,05	132,7	3,91	49,03	45,94
Cations	*T.H. (°F)*	13	11	16	12	24	46	41	27	18	5	130	93	52	12	209	189	15	23	4	22	2	4	4	11	23	5	10	10
	Li (mg/l)	***0,01***	***0,01***	***0,02***	***0,01***	***0,02***	***0,02***	***0,01***	***0,02***	***0,01***	***0,01***	0,39	0,07	0,22	***0,02***	0,22	0,20	0,20	0,18	0,67	0,20	***0,01***	***0,01***	***0,01***	***0,02***	0,1	***0,01***	***0,02***	***0,02***
	Na (mg/l)	0,98	2,46	3,25	2,26	4,63	5,96	4,01	3,06	1,36	1,46	9,03	5,84	4,95	3,62	11,69	11,13	3,47	3,35	2,51	5,40	1,29	1,33	2,42	17,10	5,05	5,73	6,12	3,50
	NH4 (mg/l)	***0,01***	***0,01***	***0,20***	***0,01***	***0,02***	***0,02***	0,25	***0,02***	***0,01***	***0,01***	2	***0,02***	***0,05***	***0,02***	0	1	***0,05***	***0,05***	***0,01***	0	***0,01***	***0,01***	***0,01***	***0,02***	***0,01***	***0,01***	0	0
	K (mg/l)	2,01	2,10	1,84	1,79	2,07	3,37	2,71	1,19	1,83	1,18	4,43	4,93	3,46	1,39	7,13	5,50	2,17	2,14	3,35	2,33	1,40	1,84	2,98	24,93	2,13	3,44	2,83	0,87
	Mg (mg/l)	11,95	9,49	18,47	11,04	26,79	57,31	45,01	29,8	22,87	5,31	198,3	94,73	57,73	12,92	271,8	217,9	17,86	30,31	2,76	24,34	1,31	2,82	2,38	9,81	24,83	5,08	11,02	12,19
	Ca (mg/l)	31,52	27,15	34,27	29,32	52,12	91,07	89,48	57,32	36,35	9,98	193,9	217	113,2	27,29	388,3	398,6	31,26	43,16	9,84	48,88	5,61	9,49	13,39	26,35	50,64	10,6	22,52	18,38
Métaux	*SiO2 (aq)mg/l)*	10,93	11,81	7,69	10,84	10,51	6,86	12,96	9	8,2	8,25	13,96	12,96	12,84	10,26	8,48	7,73	6,65	7,62	5,89	9,4	4,71	6,96	9,26	6,83	10,91	6,41	6,9	4,38
	Fe total(mg/l)	1,85	0,009	***0,001***	2,75	0,007	***0,001***	0,006	***0,001***	***0,001***	1,18	0,8	0,0037	***0,001***	***0,001***	***0,001***	86,07	0,58	0,007	0,024	***0,001***	0,027	1	***0,001***	***0,001***	***0,001***	0,027	0,015	0,041
	Cu (mg/l)	0,006	0,19	0,11	0,011	0,023	0,13	8,83	0,072	0,021	4,69	135,6	1,19	0,95	0,2	0,062	0,21	0,15	0,44	0,036	0,04	0,028	0,012	0,016	0,031	0,058	0,009	0,014	0,012
	Pb (mg/l)	0,002	***0,001***	***0,001***	***0,001***	***0,001***	***0,001***	***0,001***	***0,001***	***0,001***	***0,001***	***0,001***	***0,001***	***0,001***	***0,001***	***0,001***	***0,001***	***0,001***	***0,001***	***0,001***	***0,001***	***0,001***	***0,001***	***0,001***	***0,001***	***0,001***	***0,001***	***0,001***	***0,001***
	Cd (mg/l)	0,02	0,032	0,03	0,0018	0,001	***0,001***	0,006	***0,001***	***0,001***	***0,001***	0,039	0,005	0,005	0,001	0,004	0,055	0,003	0,014	***0,001***	***0,001***	***0,001***	***0,001***	***0,001***	***0,001***	***0,001***	***0,001***	***0,001***	***0,001***
	Zn (mg/l)	0,05	0,048	0,093	0,235	0,037	0,144	0,31	0,028	***0,015***	0,127	1,88	0,57	0,45	0,059	0,6	1,46	0,219	0,296	***0,015***	0,037	0,017	***0,015***	***0,015***	0,064	0,052	***0,015***	***0,015***	***0,015***
	Co (mg/l)	***0,002***	0,012	0,014	0,025	0,023	0,019	0,16	0,003	0,002	0,029	1,21	0,038	0,062	0,028	0,002	1,03	0,034	0,03	***0,001***	0,018	0,002	0,003	***0,001***	0,002	0,026	***0,001***	0,007	***0,001***
	Mn (mg/l)	0,68	1,4	1,29	1,65	3,42	0,034	5,14	0,14	0,004	1,04	55,06	7,21	8,84	2,2	0,061	69,16	4,48	5,86	0,021	2,58	0,33	0,43	0,007	0,01	3,41	0,036	1	0,62
	Ni (mg/l)	***0,002***	0,018	0,07	0,067	0,101	0,36	0,29	0,0031	0,019	0,068	1,92	0,33	0,33	0,072	0,42	1,66	0,159	0,26	***0,001***	0,084	0,004	***0,001***	***0,001***	0,006	0,121	***0,001***	0,027	***0,001***
	Al (mg/l)	0,002	0,004	0,004	0,006	0,048	0,006	3,55	0,008	0,003	0,45	68,51	9,23	10,1	0,035	6,44	39,8	0,99	1,83	0,013	0,044	0,096	0,025	0,025	0,018	0,072	0,022	0,04	0,031
Minéralisation Totale	*Extrait sec (mg/l)*	242								268																			
	∑ éléments (mg/l)	216	186	244	207	331	668	556	381	275	109	2237	1174	693	219	2505	2872	215	353	100	328	62	77	112	273	340	105	170	148
	Teneurs en mé/l	**BF1**	**BF2**	**BF3**	**BF4**	**BF5**	**BF6**	**BF7**	**BF8**	**BF9**	**BF10**	**BF11**	**BF12**	**BF13**	**BF14**	**BF15**	**BF16**	**BF17**	**BF18**	**BS1**	**BS2**	**BS3**	**BS4**	**BS5**	**BS6**	**BS7**	**BS8**	**BS9**	**BS10**
Milléquivalent	*Ca++*	1,58	1,36	1,71	1,47	2,61	4,55	4,47	2,87	1,82	0,50	9,70	10,85	5,66	1,36	19,42	19,93	1,56	2,16	0,49	2,44	0,28	0,47	0,67	1,32	2,53	0,53	1,13	0,92
	Mg++	0,98	0,78	1,52	0,91	2,20	4,72	3,70	2,45	1,88	0,44	16,32	7,80	4,75	1,06	22,37	17,93	1,47	2,49	0,23	2,00	0,11	0,23	0,20	0,81	2,04	0,42	0,91	1,00
	Na+	0,04	0,11	0,14	0,10	0,20	0,26	0,17	0,13	0,06	0,06	0,39	0,25	0,22	0,16	0,51	0,48	0,15	0,15	0,11	0,23	0,06	0,06	0,11	0,74	0,22	0,25	0,27	0,15
	K+	0,051	0,054	0,047	0,046	0,053	0,086	0,069	0,030	0,047	0,030	0,113	0,126	0,088	0,036	0,182	0,141	0,055	0,055	0,086	0,060	0,036	0,047	0,076	0,638	0,054	0,088	0,072	0,022
	Cl-	0,08	0,11	0,13	0,10	0,12	0,17	0,15	0,20	0,18	0,20	0,27	0,27	0,20	0,11	0,35	0,32	0,14	0,15	0,27	0,14	0,12	0,14	0,32	1,12	0,13	0,28	0,23	0,14
	SO4--	0,32	0,67	1,60	0,70	2,63	5,52	7,45	1,87	0,88	0,83	30,06	15,25	9,30	1,02	32,38	40,17	2,62	4,81	0,08	2,59	0,16	0,25	0,02	0,08	2,76	0,08	1,02	0,96
	HCO3-	2,08	1,40	1,40	1,64	1,44	3,40	0,00	2,76	2,34	0,22	0,20	0,94	0,22	1,60	3,28	0,46	0,18	0,24	0,54	1,50	0,48	0,52	0,34	0,62	1,54	0,50	0,68	0,82
	F-	0,02	0,11	0,11	0,09	0,18	0,13	0,48	0,09	0,03	0,03	3,35	0,76	0,59	0,10	1,08	2,87	0,20	0,29	0,00	0,14	0,06	0,07	0,00	0,00	0,14	0,00	0,05	0,08
	TH	2,56	2,14	3,23	2,37	4,81	9,27	8,18	5,32	3,70	0,94	26,02	18,65	10,41	2,43	41,79	37,86	3,03	4,65	0,72	4,45	0,39	0,71	0,87	2,12	4,58	0,95	2,03	1,92
	Li+	0,001	0,001	0,003	0,001	0,003	0,003	0,001	0,003	0,001	0,001	0,056	0,010	0,032	0,003	0,032	0,029	0,029	0,026	0,097	0,029	0,001	0,001	0,001	0,003	0,014	0,001	0,003	0,003
	Fe+++	0,099	0,000	0,000	0,147	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,063	0,043	0,000	0,000	0,000	0,000	4,603	0,031	0,000	0,001	0,000	0,001	0,053	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001	0,002
	Mn+++	0,037	0,077	0,070	0,090	0,187	0,002	0,281	0,008	0,000	0,057	3,009	0,394	0,483	0,120	0,003	3,779	0,245	0,320	0,001	0,141	0,018	0,023	0,000	0,001	0,186	0,002	0,055	0,034
	NO2-	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,004	0,001	0,000	0,000	0,022	0,011	0,002	0,000	0,043	0,043	0,001	0,001	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000
	NO3-	0,000	0,005	0,008	0,000	0,035	0,079	0,169	0,001	0,007	0,214	0,295	0,008	0,002	0,000	0,032	0,032	0,001	0,001	0,415	0,057	0,036	0,011	0,742	1,660	0,019	0,433	0,262	0,023
	Br-	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,003	0,000	0,000	0,000	0,013	0,006	0,001	0,000	0,025	0,025	0,001	0,001	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000
	∑ cations (mé/l)	2,79	2,38	3,50	2,76	5,26	9,62	8,70	5,49	3,81	1,15	29,63	19,43	11,23	2,74	42,51	46,90	3,54	5,20	1,01	4,91	0,50	0,89	1,05	3,51	5,05	1,29	2,43	2,14
	∑ anions (mé/l)	2,43	2,19	3,11	2,43	4,29	9,13	8,11	4,72	3,25	1,30	33,95	16,97	10,11	2,72	36,83	43,60	3,00	5,34	1,03	4,29	0,73	0,85	1,11	2,37	4,46	1,02	2,01	1,88
	balance	0,36	0,19	0,38	0,33	0,97	0,49	0,60	0,77	0,55	-0,14	-4,32	2,46	1,12	0,03	5,68	3,30	0,54	-0,14	-0,02	0,62	-0,23	0,04	-0,06	1,14	0,59	0,27	0,42	0,26
Faciès	*SO4/HCO3*	0,16	0,48	1,14	0,43	1,83	1,62	#DIV/0!	0,68	0,38	3,78	150,31	16,23	42,28	0,64	9,87	87,19	14,51	20,08	0,14	1,73	0,33	0,47	0,07	0,14	1,80	0,16	1,50	1,17
	Ca/Mg	1,60	1,74	1,13	1,61	1,18	0,97	1,21	1,17	0,97	1,14	0,59	1,39	1,19	1,28	0,87	1,11	1,06	0,87	2,17	1,22	2,60	2,04	3,42	1,63	1,24	1,27	1,24	0,92
	Ca+Mg/Na+K	27,22	13,31	17,17	16,49	18,92	26,85	33,57	32,53	34,93	9,99	51,42	49,07	34,28	12,58	60,50	60,62	14,70	23,22	3,69	15,11	4,23	6,74	4,77	1,54	16,70	2,81	6,01	11,02
	SO4/Cl	4,04	6,33	12,30	7,08	22,58	31,56	48,35	9,26	4,93	4,07	109,35	55,69	47,45	8,86	93,59	123,78	18,39	32,81	0,28	18,42	1,28	1,77	0,08	0,08	21,02	0,29	4,37	6,95
	Classification CESAME	3	3	4	3	4	4	5	3	3	4	5	5	5	3	5	5	5	5	1	4	1	1	1	2	4	1	4	4

En gras italique : valeur inférieure à...

1	**Famille physico-chimique 1**
2	**Famille physico-chimique 2**
3	**Famille physico-chimique 3**
4	**Famille physico-chimique 4**
5	**Famille physico-chimique 5**

Figure 14 : Campagne d'analyses - ENSMP - mai 2003 - Représentation de Schœller-Berkaloff et distinction en 5 grandes familles physico-chimiques



- **Famille 4 : Les eaux moyennement minéralisées sulfatées calciques**

Le faciès physico-chimique de cette famille est très proche de la précédente. Il diffère par le pôle sulfaté qui devient prédominant par rapport au pôle bicarbonaté. Les échantillons concernés sont BF3, BF5, BF6, BF10, BS2, BS7, BS9, BS10.

Le faciès physico-chimique de ces écoulements est influencé par le contexte géologique local et la présence de nombreuses minéralisations sulfurées au sein de l'encaissant rocheux.

- **Famille 5 : Les eaux très minéralisées sulfatées calco-magnésiennes**

Ces écoulements se caractérisent par une charge minérale importante liée à des teneurs élevées en sulfates, calcium et magnésium. La teneur maximale en sulfates mesurée atteint 1928 mg/l (prélèvement BF16). Les échantillons concernés sont BF7, BF11, BF12, BF13, BF14, BF15, BF16. La teneur en fluorures dans ces échantillons est généralement supérieure à 2 mg/l (valeur maximale de 54 mg/l au niveau de BF16). Tous ces écoulements présentent également des traces de manganèse et parfois de fer.

La minéralisation des eaux est principalement liée au lessivage des minéraux sulfurés présents au sein de l'exploitation. Trois de ces échantillons sont clairement identifiés comme étant des eaux d'égouttage d'anciens travaux remblayés.

Ce faciès physico-chimique est intéressant car **il s'agit du faciès qui se rapproche le plus de celui qui sera observé à terme après l'ennoyage de la mine, quand l'eau de remplissage aura entièrement lessivé les minéraux sulfurés solubles présents au sein de l'exploitation souterraine.**

3.3.4 Bilan en eau

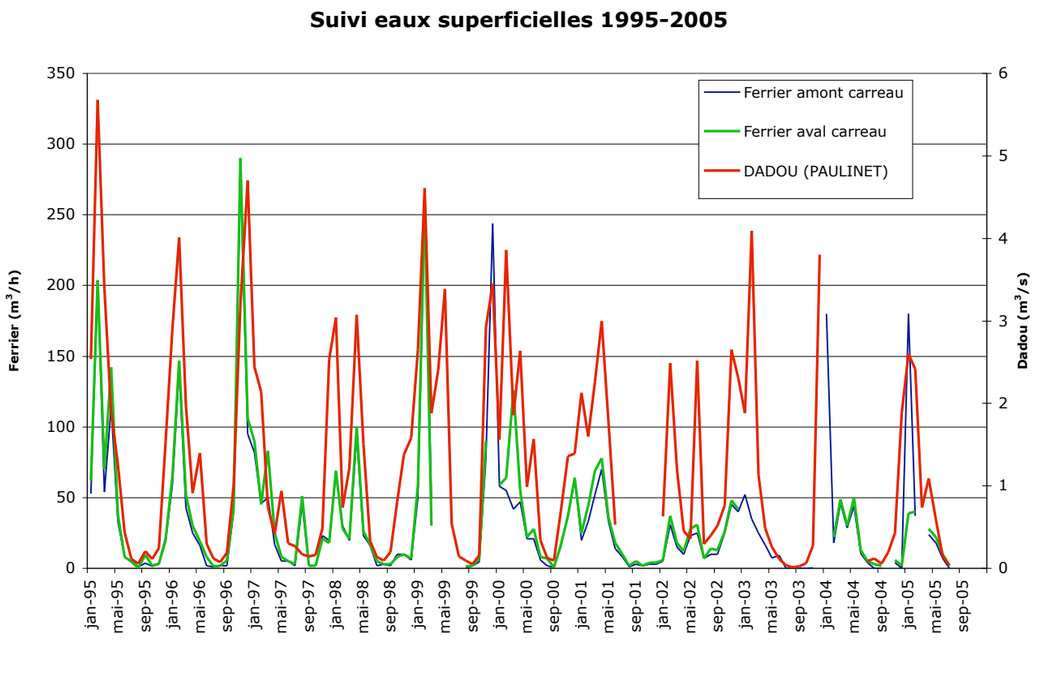
3.3.4.1 Suivi 1995 – 2005

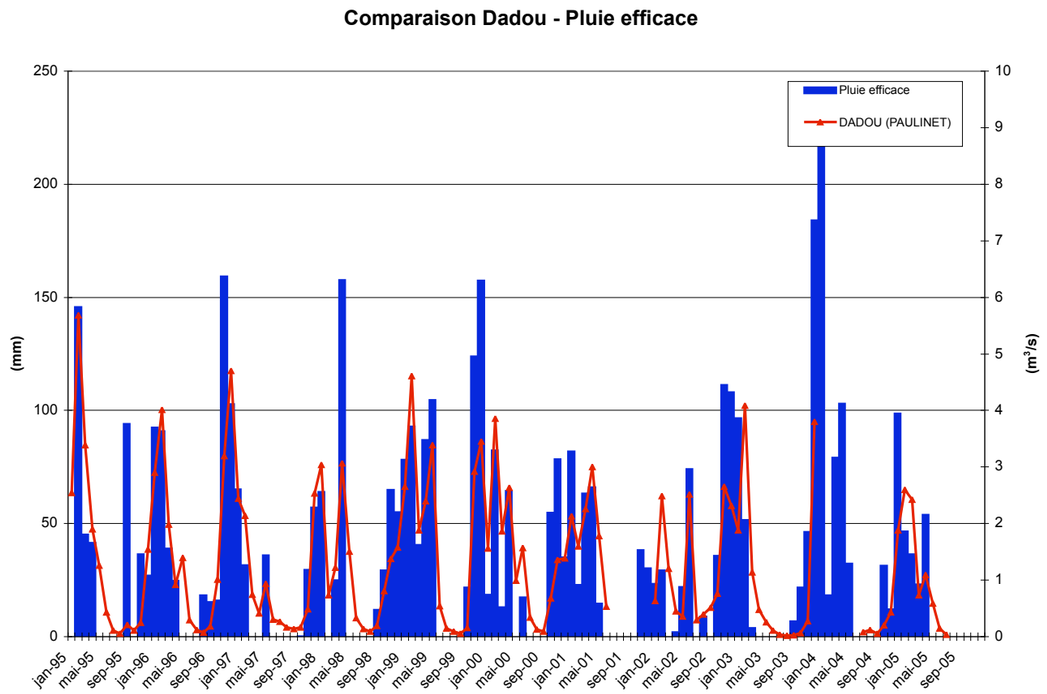
Entre 1995 et 2005, SOGEREM a réalisé un suivi mensuel des écoulements superficiels à proximité des installations minières. Les points de suivi sont :

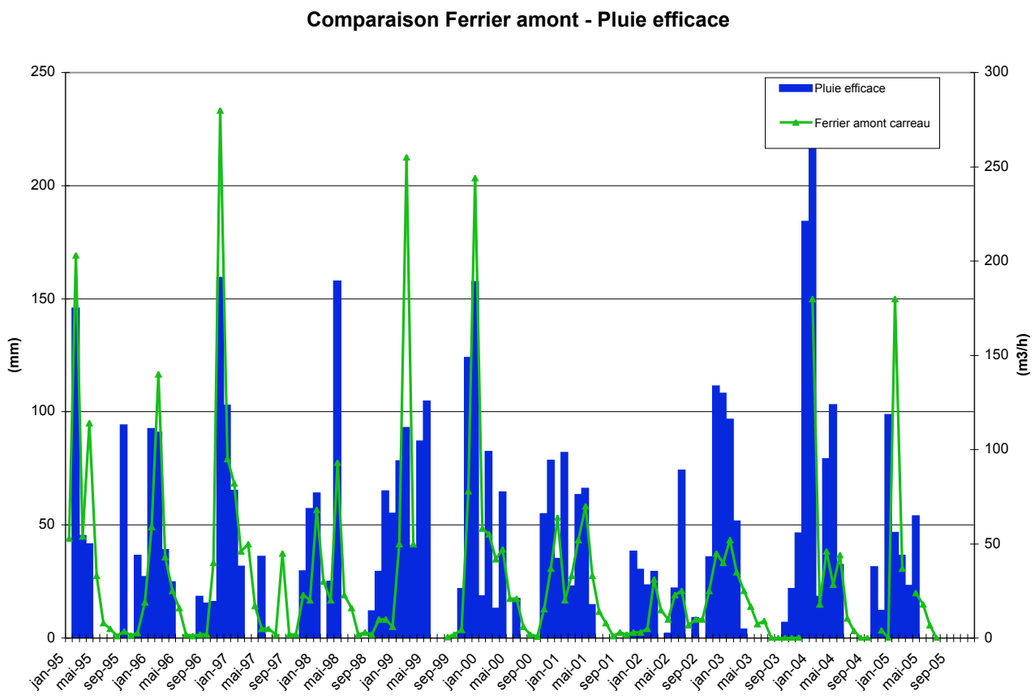
- le Ferrier à l'amont du carreau
- Le Ferrier à l'aval du carreau (sortie section busée),
- Le Ferrier à l'aval des installations minières (= aval rejet exhaure).

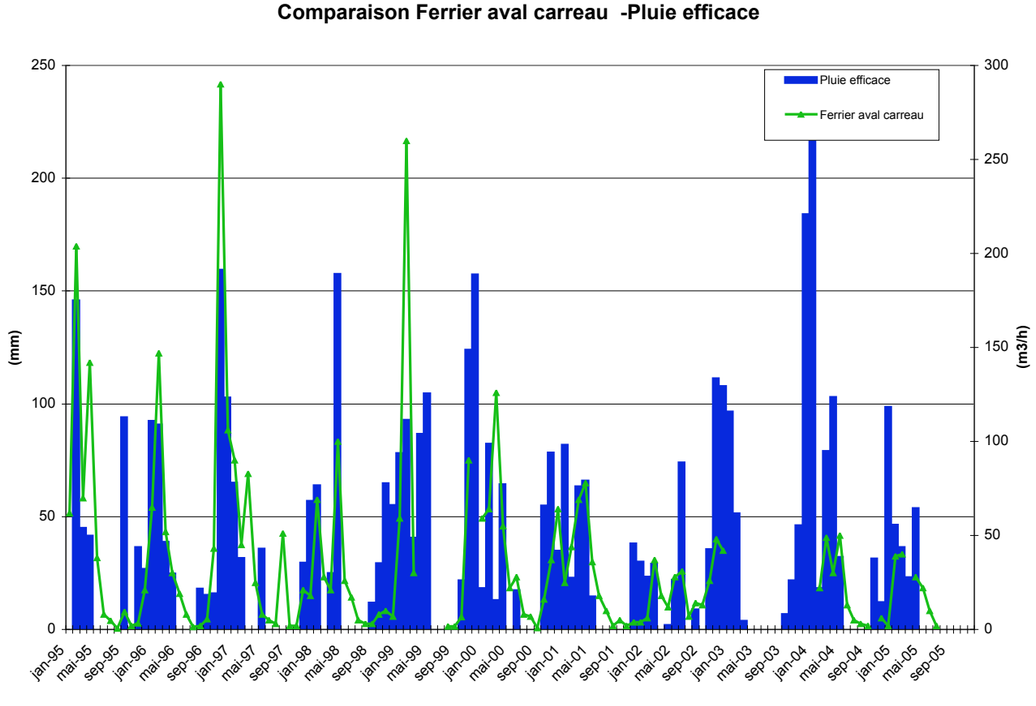
Sur la figure 15, on constate que les fluctuations de débit mesurées sur le Ferrier concordent bien avec les fluctuations de la pluie efficace calculée au niveau de Montroc. Il en est de même si l'on compare les mesures réalisées sur le Ferrier et celles réalisées sur la Dadou au niveau de Paulinet (réseau national de suivi du débit des cours d'eau, banque HYDRO).

Figure 15 : Suivi Eaux superficielles









La mesure ponctuelle mensuelle réalisée par SOGEREM peut être considérée comme représentative du débit moyen du ruisseau au cours de cette période.

Afin de comparer la productivité de divers bassins versants ou sous bassins versants, il est nécessaire de transformer la valeur de débit mesurée en débit spécifique (rapport du débit en l/s par la surface du bassin versant en km^2).

Sur les graphiques de la figure 16, nous avons représenté l'évolution du débit spécifique du Dadou, du Ferrier en différents points et de la pluie efficace, également exprimée sous forme de débit spécifique, au cours de la période 1995 – 2005.

On constate que la courbe d'évolution de la pluie efficace cale parfaitement avec le débit spécifique du Dadou mesuré à Paulinet. Entre 1995 et 2005 la pluie efficace moyenne calculée à Paulinet atteint 18,5 l/s/km^2 alors que le débit moyen du Dadou est de 18,15 l/s/km^2.

L'intégralité des eaux météoriques non reprise par la végétation (= pluie efficace) se retrouve donc en ruissellement dans le bassin versant du Dadou.

La même réflexion réalisée sur le Ferrier ne montre pas la même situation notamment au niveau des points de mesure amont et aval carreau. **Le déficit par rapport à la pluie efficace locale atteint 6 à 8 l/s pour les écoulements superficiels du Ferrier. Ce déficit ne peut être lié qu'à une infiltration des eaux superficielles vers le milieu souterrain et notamment vers l'exploitation minière.**

Si l'on prend en compte l'exhaure de la mine (= mesure Ferrier aval installations), le bilan en eau entre 1995 et 2005 du bassin versant se rééquilibre (débit spécifique de 15 l/s/km^2, pluie efficace de 13,6 l/s/km^2).

Le bilan en eau réalisée au niveau du Ferrier montre que les écoulements rencontrés dans la mine du Burc proviennent de l'infiltration d'une partie des eaux météoriques générées au droit du bassin versant du Ferrier. Cette infiltration est mise en évidence par un important déficit des écoulements superficiels du ruisseau à proximité des installations minières (6 à 8 l/s/km^2).

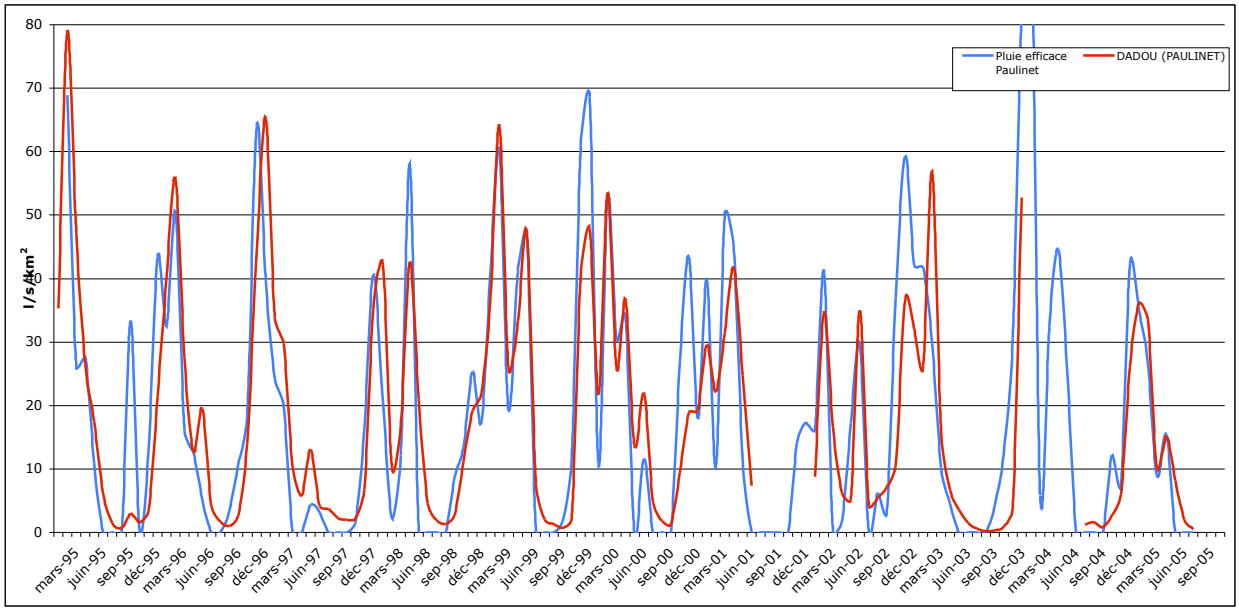
Ce phénomène a été également confirmé lors des investigations de terrain de septembre 2005 réalisées lors du lancement de l'étude.

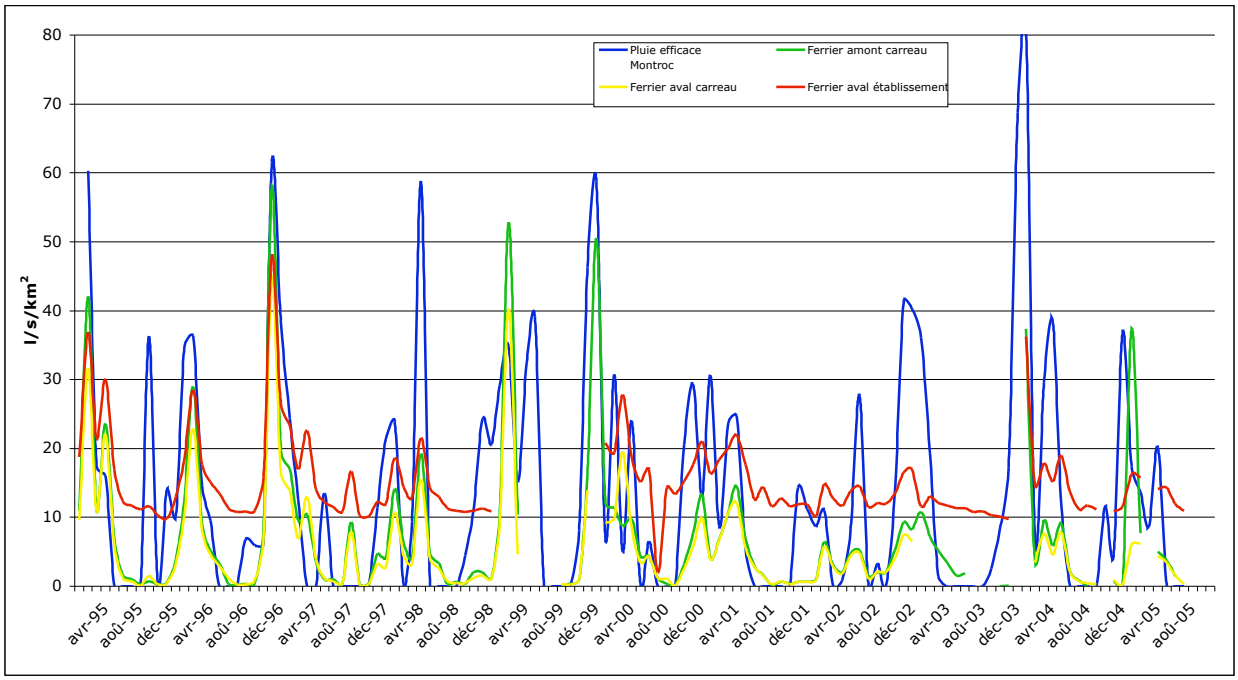
3.3.4.2 Campagne de mesures septembre 2005

Le 14 Septembre 2005, des mesures de débits ont été réalisées sur le Ferrier et sur plusieurs ruisseaux situés à proximité de la zone d'étude. Les résultats de ces jaugeages, réalisés par méthode capacitive ou par mesure au micromoulinet, sont synthétisés sur la figure 17.

On constate qu'il existe un important déficit en eau sur le Ferrier au niveau des installations de la mine. En effet le débit spécifique au niveau du carreau de la mine est 10 à 20 fois plus faible que celui mesuré sur les autres ruisseaux.

Figure 16 : Suivi eaux superficielles (débit spécifique)





Synthèse : Moyenne 1995-2005 des débits spécifiques

Pluie efficace à Paulinet	Le Dadou à Paulinet	Pluie efficace à Montroc	Le Ferrier Amont carreau	Le Ferrier Aval Carreau (avant rejet exhaure)	Le Ferrier Aval installation
18,5 l/s/km²	**18,15** l/s/km²	**13,59** l/s/km²	**7,34** l/s/km²	**5,5** l/s/km²	**15** l/s/km²

Figure 17 : Synthèse terrain, septembre 2005

Point N°		Bassin versant (km^2)	Débit (m^3/h)	Débit spécifique ($l/s/km^2$)
1	Le Ferrier amont retenue colinaire	0,345	1,9	**1,53**
2	Talweg le Bouyssounet	0,24	1,3	**1,50**
3	Le Ferrier (aval La Bourellié)	1,2 (0,855 *)	1,5	0,49
4	Le Ferrier amont carreau	1,34 (0,995 *)	0,33	0,09
5	Le Ferrier aval carreau	1,79 (1,415 *)	0,3	0,06
6	Ruisseau de Bazuéjouls	2,23	8,2	**1,02**
7	L'Oulas	44,74	206	**1,28**
8	Ruisseau de Besoubre	1,45	5,5	**1,05**
9	Ruisseau de Lacalm	2,35	23	**2,72**
10	Ruisseau de l'Assou	2,46	15	**1,69**

* Lors de la campagne de mesure, l'intégralité des écoulements à l'amont de la retenue colinaire du Ferrier était interceptée car son remplissage était en cours. A l'aval immédiat de cette retenue aucun écoulement n'était visible.

★ Point de mesure

Limite de bassin versant

Echelle (sur base A3) : 1/35 000e

Localement les débits spécifiques se situaient tous aux alentours de 1,5 l/s/km^2, alors que cette valeur n'atteint que 0,06 l/s/km^2 à l'aval du carreau.

Les mesures réalisées dans le haut bassin versant du Ferrier sont proches de celles des autres ruisseaux. La mine semble donc n'avoir aucune influence sur le mode d'écoulement des eaux superficielles dans cette partie du bassin versant. **Les pertes par infiltration doivent donc se faire plus en aval lorsque l'on se rapproche des travaux miniers souterrains.** Lors des investigations de terrain, nous avons pu constater de visu une diminution progressive des écoulements superficiels du Ferrier sur environ 150 m à l'amont du carreau SOGEREM.

Seule une campagne de mesure de débit, tous les 20 mètres par exemple, en période d'écoulement significatif (débit atteignant plusieurs m^3/h) permettrait de localiser plus précisément les zones de pertes dans le lit du ruisseau vers les travaux miniers.

Compte tenu du contexte géologique local, il est envisageable que l'alimentation en eau de la mine se fasse également par le réseau de fractures transversales au filon qui potentiellement peut drainer vers la mine les écoulements du bassin versant amont (rôle drainant des accidents tectoniques qui s'ajoute à la fracturation engendrée par l'exploitation).

Le débit élevé des venues d'eau à l'Est de la mine (≈ 40 m^3/h) milite en faveur de cette hypothèse : en effet, si l'on admet une perte de 7,5 l/s/km^2 par infiltration dans le bassin versant du Ferrier (voir tableau en bas de la figure 16), une venue d'eau de 40 m^3/h représente 1,6 km^2 de bassin versant or celui du Ferrier à son arrivée sur le carreau est de 1,2 km^2 seulement. On doit admettre que la faille transversale (≈ N330°) rejoignant le filon à son extrémité Est apporte de l'eau à la mine, il est d'ailleurs frappant de constater que les venues d'eau à l'étage 220 et 170 suivent l'alignement de cet accident (voir figure 18). La même remarque peut d'ailleurs être faite concernant l'existence de venues d'eau importantes en zone centrale de la mine alors que le talweg du Burc s'aligne également dans sa partie centrale sur une fracture N330°.

3.3.4.3 Synthèse

Le bilan en eau réalisé sur le bassin versant du Ferrier montre que les écoulements recoupés par l'exploitation souterraine proviennent de l'infiltration des eaux météoriques au droit du bassin versant et représentent près de 50% de la pluie efficace sur le bassin versant du Ferrier. Aucun déficit d'écoulement n'a été observé dans les bassins périphériques.

Cette alimentation en eau peut se faire selon deux modes :

- par pertes du réseau hydrographique à l'aplomb de la zone exploitée (vallée du Ferrier, talweg le Burc),

- par le réseau de fractures N330° qui recoupe le filon et qui potentiellement draine le massif rocheux dans le bassin versant en direction de l'exploitation minière.

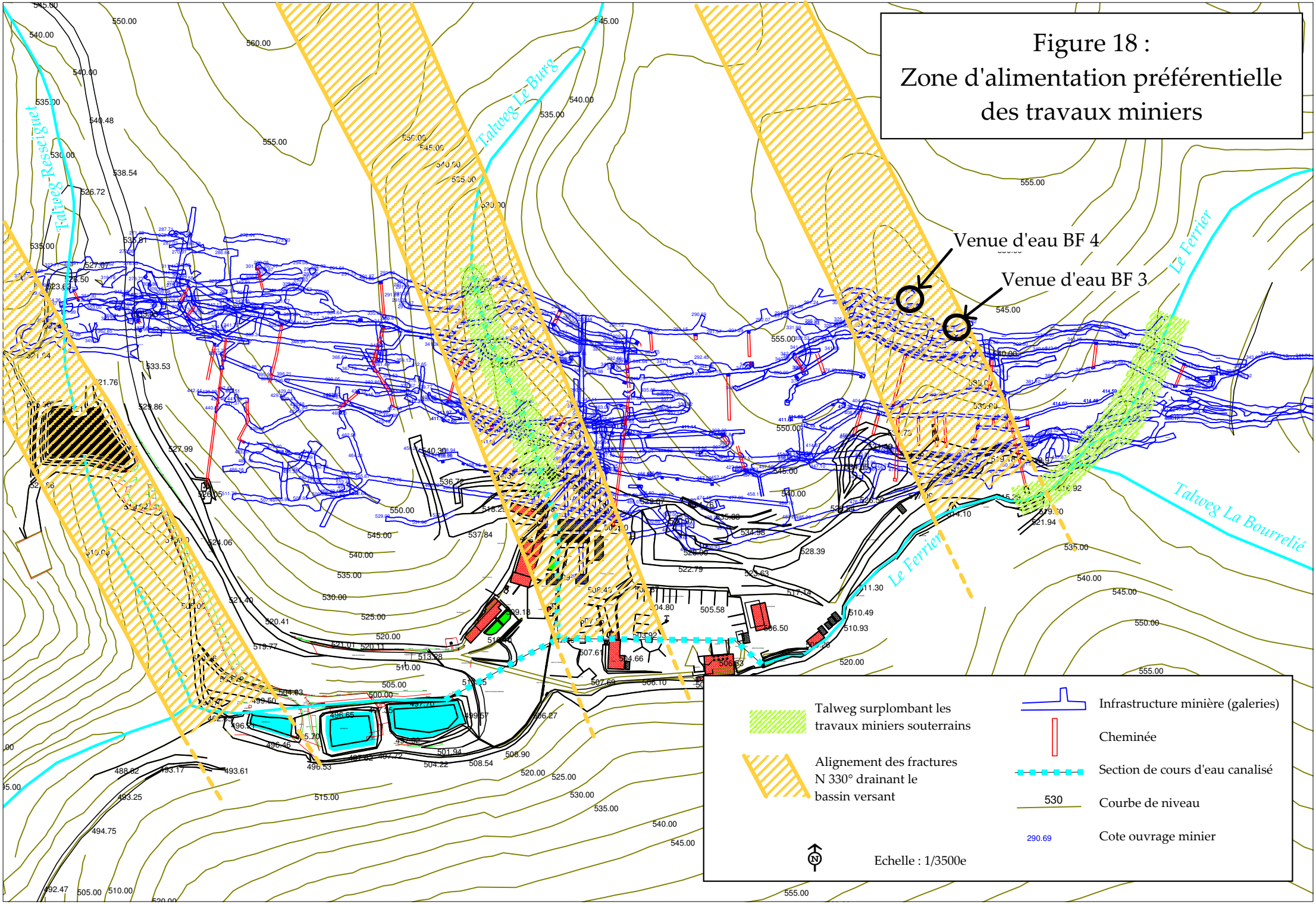


Figure 18 :
Zone d'alimentation préférentielle
des travaux miniers
Venue d'eau BF 4
Venue d'eau BF 3
Talweg Le Burg
Talweg Ressèguet
Le Ferrier
Talweg La Bourrelié
Talweg surplombant les travaux miniers souterrains
Alignement des fractures N 330° drainant le bassin versant
Infrastructure minière (galeries)
Cheminée
Section de cours d'eau canalisé
530
Courbe de niveau
290.69
Cote ouvrage minier
Echelle : 1/3500e

3.4 Conséquence de la fermeture de la mine

3.4.1 Remplissage des travaux miniers souterrain

L'arrêt de l'exploitation souterraine va également s'accompagner de l'arrêt de l'exhaure. L'eau va alors progressivement remplir les travaux miniers jusqu'à trouver un point de débordement.

3.4.1.1 Volume des vides résiduels

Pour estimer la vitesse de remplissage des travaux miniers, il faut quantifier les vides résiduels liés à l'exploitation présents dans le milieu souterrain. Ces vides peuvent être estimés simplement en considérant la surface de la zone de travaux ainsi que l'épaisseur du filon exploité. Toutefois ce volume doit être corrigé par un coefficient compris entre 0 et 1 qui prend en compte la méthode d'exploitation (chambres et piliers, foudroyage ou remblayage...). Il convient également de considérer l'ensemble de l'infrastructure minière qui selon les sites, peut générer un volume de vide important.

Dans le cadre de l'étude ENSMP, une estimation des vides résiduels a été réalisée avec l'exploitant. Au vu des éléments présentés dans cette étude, **la méthode de calcul du volume de vides résiduels semble cohérente.**

Nous retiendrons donc un volume de vides résiduels lié à l'exploitation souterraine de l'ordre de 195 000 m^3.

Le détail de la répartition des vides par niveaux d'exploitation est la suivante :

Tableau 2 : Répartition des vides résiduels *(source ENSPM)*

	Cote NGF	***Infrastructure (m^3)***	***Chantiers (m^3)***	***Total/étage (m^3)***	***Cumul (m^3)***
Etage 24	505-486	5 852	6 432	12 284	**194 183**
Etage 54	486-457	12 044	10 907	22 951	**181 899**
Etage 100	457-411	20 552	17 633	38 185	**158 948**
Etage 135	411-377	12 913	13 354	26 267	**120 763**
Etage 170	377-341	10 592	25 722	36 314	**94 496**
Etage 200	341-322	17 695	9 040	26 735	**58 182**
Etage 220	322-291	12 001	11 221	23 222	**31 447**
Etage 235	291-270	7 117	1 108	8 225	**8 225**

3.4.1.2 Vitesse de remplissage

La vitesse de remplissage des travaux miniers est fortement liée au volume de vides résiduels lié à l'exploitation ainsi qu'au débit d'apport dans la mine. Actuellement les débits entrant dans la mine sont connus (= suivi exhaure).

- **Estimation des débits d'apport dans la mine**

Suite à l'arrêt de l'exhaure, le débit transitant dans l'exploitation va progressivement diminuer avec la diminution de la charge hydrostatique entre l'encaissant rocheux (= réseau de fractures alimentant la mine) et la mine qui est maintenue hors d'eau.

Actuellement cette charge atteint 250 à 260 m. Elle correspond à la différence entre la base de l'exploitation maintenue hors et d'eau (≈ 290 m NGF soit l'exhaure du niveau 220) et le niveau piézométrique local du massif rocheux autour de l'exploitation qui lui se situe aux alentours de 550 m NGF.

Remarque : Ce niveau piézométrique du massif rocheux a été mesuré dans un puits privatif au niveau du hameau de La Bourrelié (≈ niveau d'eau situé une quinzaine de mètres sous le niveau du TN - mesures mai 2003 et septembre 2005). Localement ce niveau piézométrique est en étroite relation avec le système hydrographique et le petit système aquifère qui se développe dans la tranche d'altération superficielle des terrains. Le massif rocheux sur les flancs de l'exploitation dans la vallée du Ferrier présente donc une piézométrie située entre 520 et 550 m NGF.

En cas de remplissage total de l'exploitation souterraine, le gradient hydraulique entre la mine et l'encaissant rocheux va diminuer d'un facteur de l'ordre de 5,7 : passage d'un gradient de 260 m à 45 m (mine pleine jusqu'à environ 505 m NGF). Le débit dans la mine diminuera d'un même facteur si l'on considère les principes d'hydrogéologie de DARCY. Le débit résiduel du trop plein minier peut donc être estimé à environ 15 m^3/h (≈ 88 / 5,7). Pendant la phase de remplissage le débit moyen évoluera donc entre 88 et 15 m^3/h.

Cet ordre de grandeur du débit résiduel qui est également celui présenté dans l'étude de l'ENSPM correspond à notre sens à **une estimation minimale**. En effet le suivi du débit d'exhaure de l'exploitation montre qu'au delà d'un débit « bruit de fond » de l'ordre de 80 m^3/h à 90 m^3/h, correspondant en effet au drainage du massif rocheux et présentant une bonne régularité, on peut voir apparaître des pics relativement étroits dépassant rarement 10 à 15 m^3/h (débit d'exhaure maximum de 110 m^3/h) et pouvant être attribués à des infiltrations plus directes en provenance du réseau hydrographique superficiel. A priori ces pics seront peu susceptibles de diminuer avec le remplissage de la mine s'ils correspondent à des pertes dans le ruisseaux car le niveau d'eau dans la mine restera toujours inférieur à celui du ruisseaux recoupant le filon. On peut donc s'attendre à un débit résiduel d'émergence variant de 15 à 30 m^3/h (15 m^3/h de « bruit de fond » + 15 m^3/h de pics) suivant la pluviométrie.

En période d'étiage hydrologique le débit de l'émergence minière devrait se maintenir à environ une dizaine de m^3/h dans la mesure où les travaux miniers jouent un rôle tampon vis-à-vis des infiltrations. Un assèchement complet de l'émergence est peu envisageable vu le régime pluviométrique local. Dans ces conditions le niveau de remplissage dans les travaux miniers devrait toujours se maintenir à un niveau très proche du niveau de la surverse.

Remarque : La diminution du flux transitant dans l'exploitation souterraine suite à la diminution du gradient piézométrique se traduira également par une augmentation du débit moyen transitant dans le réseau hydrographique et dans la tranche d'altération superficielle des terrains dans le bassin versant du Ferrier. Cette augmentation devrait atteindre environ 50 m^3/h à l'échelle annuelle. Le régime hydrologique du Ferrier à proximité de la zone exploitée redeviendra beaucoup plus proche de celui des autres ruisseaux périphériques qu'il ne l'est actuellement.

- **Durée de remplissage**

En fonction du débit d'alimentation et de la répartition des vides dans la tranche des terrains, une simulation de la vitesse de remplissage peut être réalisée (voir figure 19). On constate que le remplissage de la mine du Burc sera rapide et durera moins d'une année.

Cette durée correspond toutefois à une hypothèse **optimiste** dans la mesure où la porosité naturelle de l'encaissant rocheux à proximité immédiate de l'exploitation n'a pas été prise en compte. En effet l'exploitation souterraine a entraîné une vidange du massif rocheux à sa périphérie. Lors de la phase de remplissage, ces fissures vont elles aussi se remettre en eau. Il est très difficile actuellement d'estimer les volumes en jeu en l'absence :

- d'un réseau de piézomètres permettant d'estimer l'influence de la mine dans son encaissant rocheux,
- de la valeur de porosité moyenne du massif rocheux.

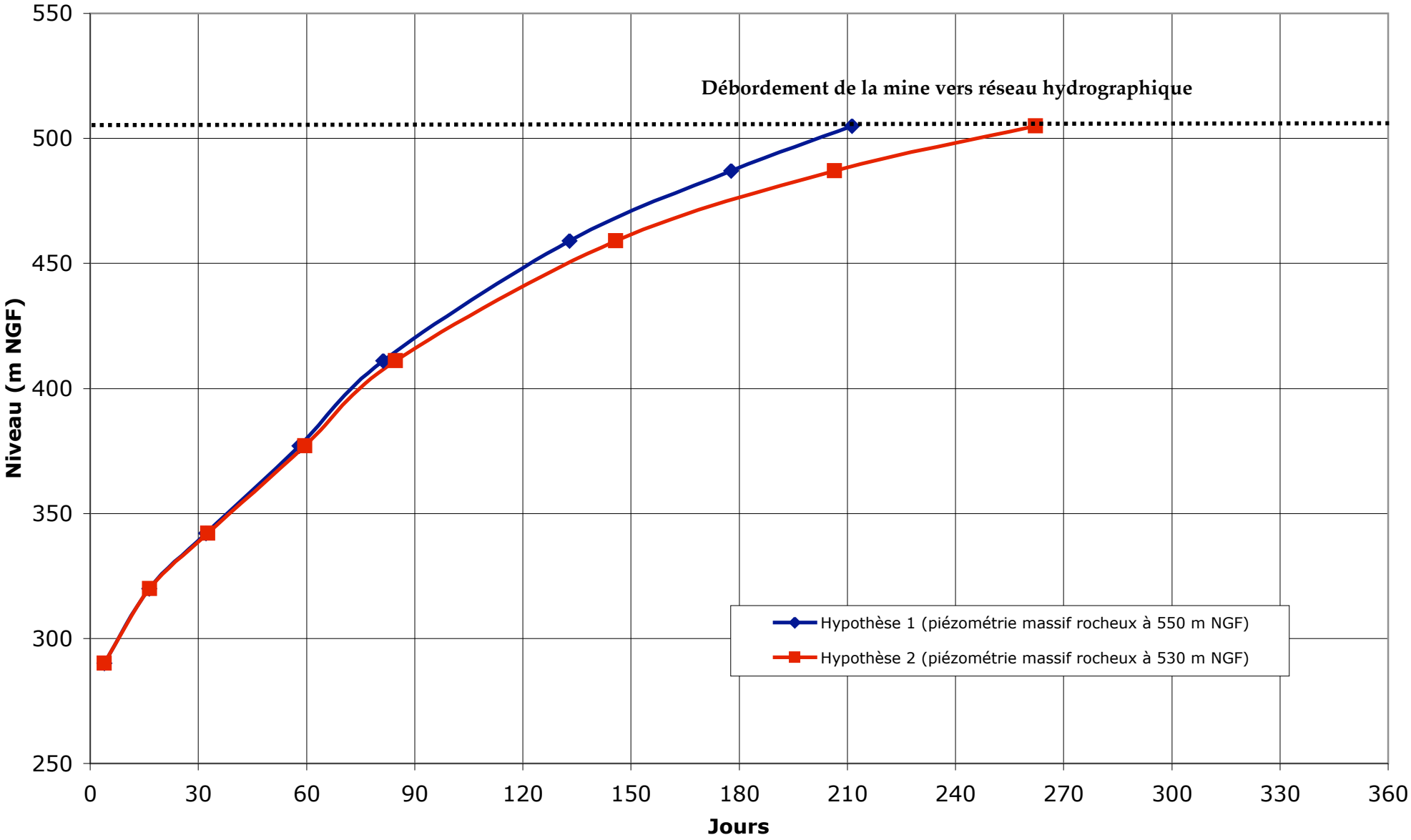
Les suivis de remplissage réalisés par CESAME sur d'autres sites miniers ont toujours montré que la part du vide résiduel lié à la porosité naturelle des terrains était très faible au regard de celle liée à l'exploitation souterraine. Toutefois il s'agissait de mines où les vides résiduels liés à l'exploitation atteignaient plusieurs millions de m^3, ce qui est très loin d'être le cas au niveau de la mine du Burc...

- **Tentative d'estimation du volume de vide lié à l'encaissant rocheux**

Le volume approximatif concerné par la fissuration peut être estimé à environ 31 millions de m^3. Cette estimation a été réalisée en considérant un filon présentant un pendage de 60° et exploité sur 230 m de profondeur, sur un linéaire de 1000 m environ et en considérant un angle d'influence par rapport à la verticale de 30°.

Si l'on admet que ce volume a une porosité efficace de 3%, on a un vide potentiel de 0,93 millions de m^3. Selon toute probabilité ce vide n'est pas

Figure 19 : Vitesse de remplissage des travaux miniers



complètement soutiré par la mine du fait de la faible perméabilité potentielle du milieu qui limite la zone d'influence potentielle du drain.

En admettant que le dénoyage porte essentiellement sur les zones de fractures N330° recoupant le drain, on peut estimer une vidange de 20 à 30% du vide potentiel dans la zone d'influence soit 186 à 279 milliers de m^3, **ce qui est du même ordre de grandeur que le volume exploité.**

Le temps de remplissage de la mine pourrait donc être environ 2 fois plus élevé que ne laisserait supposer le calcul du remplissage du volume minier strico sensu.

3.4.2 Point de débordement

L'arrêt de l'exhaure va entraîner le remplissage de l'exploitation souterraine, jusqu'à l'apparition d'un point de débordement au jour. Compte tenu de la structure de l'exploitation souterraine plusieurs cas de figure peuvent être envisagés.

Quel que soit le mode de débordement retenu, un rejet direct au Ferrier n'est pas envisagé compte tenu de la qualité prévisionnelle des écoulements. L'évacuation du trop plein minier se fera en direction de la cascade d'aération qui sera construite en amont des bassins de décantation (voir ci-après).

3.4.2.1 Cas 1 : Débordement sur le carreau inférieur par ouvrage minier – Point bas infrastructure minière

L'ouvrage minier le plus bas dans la topographie relié à l'exploitation souterraine correspond à deux anciennes galeries qui débouchent au jour dans la partie inférieure du carreau aux alentours de la cote 505 m NGF.

Aucun levé topographique précis de ces galeries n'est actuellement disponible. Le point de sortie au jour de la galerie située derrière les boxes *(accès n°7, ref sogerem)* n'est pas visible. Toutefois la descenderie principale recoupe cet ouvrage, une vingtaine de mètres après son entrée. Par contre pour la galerie située derrière le stock mine *(accès n°8, ref sogerem)*, c'est le contraire. Aucune trace de cette galerie n'a été mise en évidence lors de notre visite de la mine, seule sa sortie au jour est visible.

Si l'on retient ce mode de surverse, on privilégiera une **évacuation des eaux souterraines par l'ouvrage situé derrière les boxes** *(accès n°7)* car on est sûr qu'il est relié à l'infrastructure minière.

- **Les travaux de mise en sécurité**

Le phasage des travaux à mettre en œuvre serait alors le suivant :

- Recherche et dégagement de la tête de l'ouvrage à la pelle mécanique,
- Visite de la galerie afin de s'assurer que la galerie est ouverte sur la totalité de son tronçon, jusqu'au point de recoupe de la descenderie,
- Mise en sécurité de l'ouvrage avec réalisation d'un bouchon permettant le passage des écoulements (voir figure 20),
- Fermeture de la galerie située derrière le stock mine *(accès n°8)* et des autres ouvrages miniers débouchant au jour.

- **Evacuation du trop plein minier**

L'évacuation du trop plein minier se fera en direction de la cascade d'aération qui sera construite en amont des bassins de décantation :

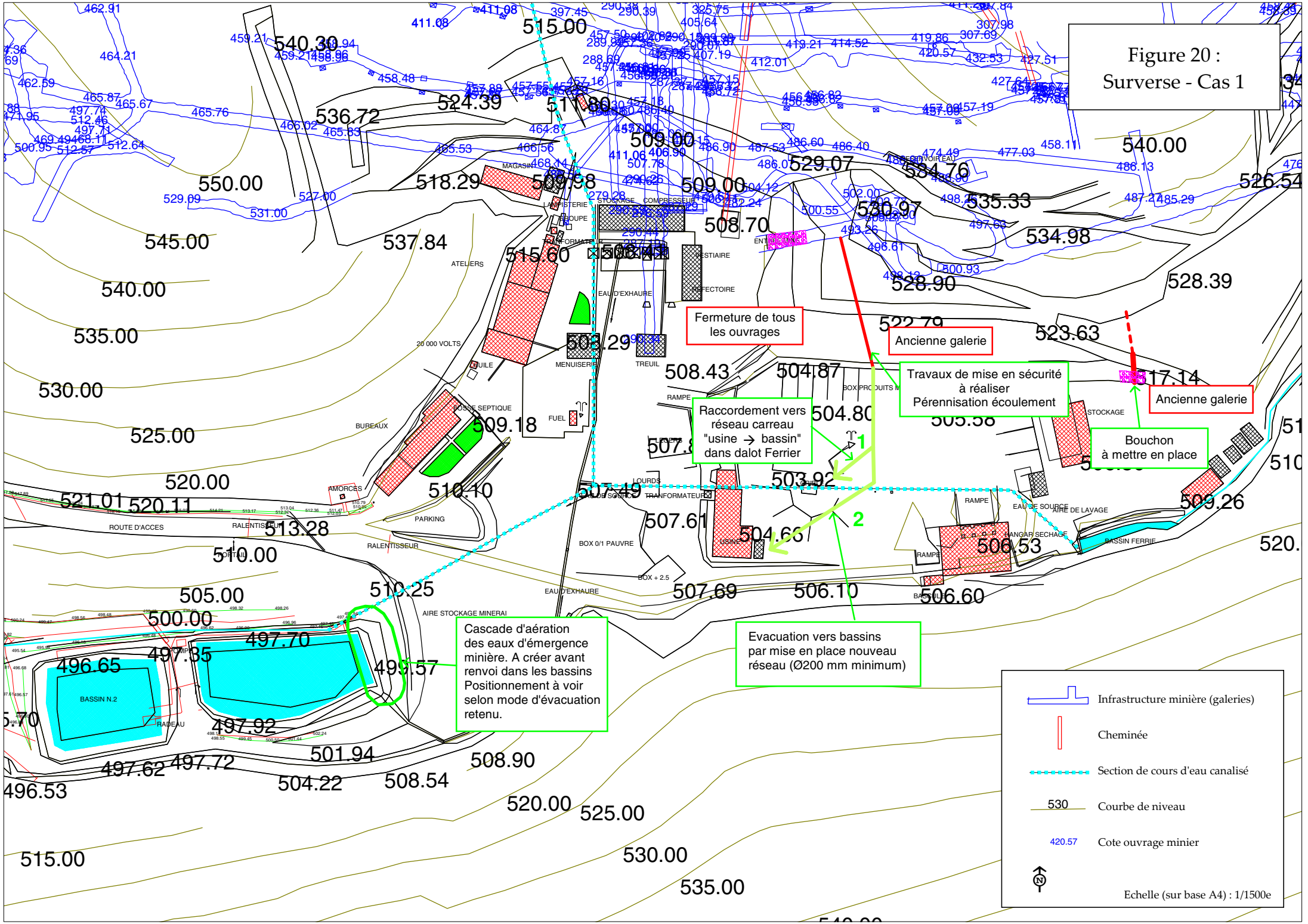


Figure 20 :
Surverse - Cas 1
Fermeture de tous les ouvrages
Ancienne galerie
Travaux de mise en sécurité à réaliser
Pérennisation écoulement
Ancienne galerie
Raccordement vers réseau carreau "usine → bassin" dans dalot Ferrier
Bouchon à mettre en place
Cascade d'aération des eaux d'émergence minière. A créer avant renvoi dans les bassins Positionnement à voir selon mode d'évacuation retenu.
Evacuation vers bassins par mise en place nouveau réseau (Ø200 mm minimum)
1
2
Infrastructure minière (galeries)
Cheminée
Section de cours d'eau canalisé
530
Courbe de niveau
420.57
Cote ouvrage minier
Echelle (sur base A4) : 1/1500e

- soit par raccordement au réseau permettant l'évacuation des effluents de l'usine de traitement et distant d'une cinquantaine de mètres seulement du point d'émergence. Ce réseau mis en place directement dans le dalot canalisant le Ferrier est constitué par une conduite PVC de diamètre ø150 mm présentant une pente moyenne de 1,5% *(source SOGEREM).*

- soit par la mise en place d'un nouveau réseau sur le carreau reliant le point de sortie des eaux issues des travaux miniers aux bassins.

Un levé topographique du fil d'eau des différents réseaux (cote fil d'eau, dimension) permettra de préciser si ces mesures sont techniquement réalisables.

Si l'évacuation vers l'aval se fait par l'intermédiaire du réseau de l'usine de traitement, les caractéristiques géométriques de ce réseau devraient permettre la bonne évacuation des écoulements compte tenu des débits à faire transiter (≈ 15 m^3/h à 30 m^3/h). En effet d'après la formule de Manning Strickler la capacité de ce réseau atteint 87 m^3/h (en considérant un coefficient de rugosité de 100 et une pente de 1,5%).

Si l'évacuation vers l'aval se fait par mise en place d'un nouveau réseau sur le carreau, le diamètre de cette nouvelle canalisation aura un **diamètre minimal ø200 mm**. En effet d'après la formule de Manning Strickler, ce diamètre de buse béton permet de faire transiter des débits supérieurs à 75 m^3/h dans la mesure où la pente de l'ouvrage est supérieure à 5‰. Pour des pentes inférieures, une augmentation du diamètre sera nécessaire.

- **Risque d'émergence diffuse**

Les risques de débordement par la galerie située derrière le stock mine seront très faibles voire nuls dans la mesure où celle ci ne semble pas communiquer avec l'exploitation souterraine et qu'elle sera à terme remblayée.

Les risques de débordement directement par les remblais du carreau à un niveau inférieur à celui de la galerie sont également très faibles dans la mesure où l'on se situe en dehors de l'influence minière (zone de décompression des terrains située au Nord). En effet, l'évacuation des eaux souterraines ne pourra se faire que par une fracture naturelle située à une cote inférieure à celle de la galerie puis au travers de remblais peu perméables car compactés. Compte tenu de ces conditions, cette éventualité semble faible.

Les risques de débordement dans la vallée du Ferrier à l'aval du carreau, au niveau de la confluence avec vallon de Resseguet (= point bas topographique local) sont faibles car cette zone est distante de plus de deux cents mètres de l'exploitation souterraine. De plus l'accident tectonique N330 situé au niveau du talweg de Resseguet (voir figure 18) ne semble pas être drainant et jouer un rôle hydrologique majeur. En effet peu de venues d'eau sont recensées dans ce secteur : le débit total des venues d'eau recoupées à l'Ouest de l'exploitation n'atteint que 1,4 m^3/h soit moins de 2% de l'exhaure total(voir tableau figure 10). Les communications entre le fond et le jour par l'intermédiaire de cet accident sont donc peu marquées et ne devraient pas permettre l'évacuation du trop plein minier compte tenu des débit en jeu (15 à

30 m^3/h). Dans ces conditions les risques de débordement du réservoir minier dans ce secteur sont également très faibles.

Toutefois pour ce prévenir d'un débordement (peu probable) de l'aquifère minier par un autre point que la galerie située sur le carreau inférieur derrière les boxes, des mesures seront prises au niveau du puits (voir § 3.4.4) afin de permettre, si nécessaire, la réalisation de travaux de captage des écoulements et assurer leur bonne évacuation vers l'aval.

3.4.2.2 Cas 1 bis : Création d'un forage de décharge vers le carreau inférieur

Si les travaux d'aménagement du trop plein minier au niveau de l'ancienne galerie du carreau inférieur *(accès n°7)* remettent en cause les travaux de fermeture de la descenderie vu la proximité avec la sortie, il est envisageable de mettre en œuvre une solution alternative. Cette solution consiste à réaliser un ouvrage de décharge (voir schéma de principe sur figure 21).

L'ouvrage de décharge serait constitué au minimum de deux sondages d'une cinquantaine de mètres reliant la descenderie au carreau. Compte tenu du débit à évacuer le **diamètre minimal d'équipement** des forages sera de 90 mm.

Dans la mesure du possible l'équipement suivant sera mis en œuvre :
- Diamètre minimal de foration : 8,5'' (216 mm),
- Equipement : tubage acier 7''5/8 (173 mm intérieur),
- Cimentation de l'annuaire par injection béton.

Au niveau du point de départ dans la mine, un petit aménagement sera réalisé afin d'éviter les risques de colmatage (voir principe d'aménagement sur la figure 21). Ce risque de colmatage est toutefois très faible dans la mesure où le niveau de remplissage des travaux miniers se situera quelques mètres au-dessus du départ des forages permettant ainsi aux éventuels matériaux flottants (bois par exemple) de rester piégés dans l'exploitation au dessus des têtes de forages.

Tous les autres ouvrages débouchant au jour feront l'objet d'une mise en sécurité et la galerie située derrière les boxes *(accès n°7)* sera fermée de façon étanche (bouchon béton).

- **Evacuation du trop plein minier**

L'évacuation vers l'aval des écoulements issus des travaux miniers se fera selon les deux modes proposés dans le cas précédent (raccordement sur réseau usine de traitement ou nouveau réseau).

- **Risque d'émergence diffuse**

voir § 3.4.2.1.

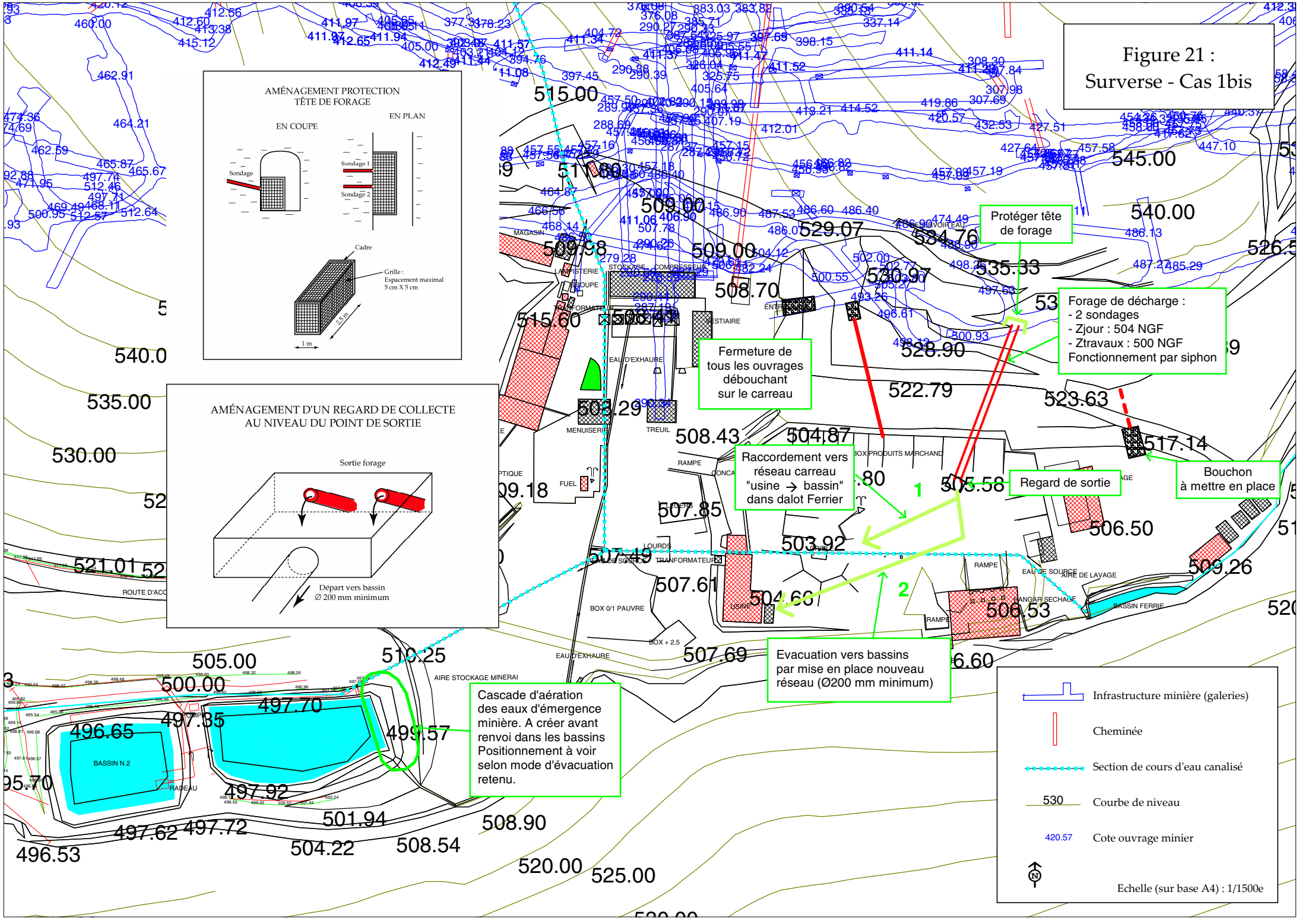


Figure 21 :
Surverse - Cas 1bis
AMÉNAGEMENT PROTECTION
TÊTE DE FORAGE
EN COUPE
EN PLAN
Sondage
Sondage 1
Sondage 2
Cadre
Grille :
Espacement maximal
5 cm X 5 cm
2,5 m
1 m
AMÉNAGEMENT D'UN REGARD DE COLLECTE
AU NIVEAU DU POINT DE SORTIE
Sortie forage
Départ vers bassin
Ø 200 mm minimum
Protéger tête
de forage
Forage de décharge :
- 2 sondages
- Zjour : 504 NGF
- Ztravaux : 500 NGF
Fonctionnement par siphon
Fermeture de
tous les ouvrages
débouchant
sur le carreau
Raccordement vers
réseau carreau
"usine → bassin"
dans dalot Ferrier
Regard de sortie
Bouchon
à mettre en place
Evacuation vers bassins
par mise en place nouveau
réseau (Ø200 mm minimum)
Cascade d'aération
des eaux d'émergence
minière. A créer avant
renvoi dans les bassins
Positionnement à voir
selon mode d'évacuation
retenu.
1
2
BASSIN N.2
BASSIN FERRIE
AIRE STOCKAGE MINERAI
EAU D'EXHAURE
MAGASIN
LAMPISTERIE
STOCKAGE COMPRESSEUR
TRANSFORMATEUR
MENUISERIE
TREUIL
RAMPE
FUEL
USINE
BOX 0/1 PAUVRE
BOX + 2.5
BOX PRODUITS MARCHAND
HANGAR SECHAGE
AIRE DE LAVAGE
EAU DE SOURCE
ROUTE D'ACC
Infrastructure minière (galeries)
Cheminée
Section de cours d'eau canalisé
530 Courbe de niveau
420.57 Cote ouvrage minier
Echelle (sur base A4) : 1/1500e

3.4.2.3 Cas 2 : Débordement par ouvrage minier sur le carreau supérieur

Pour permettre un débordement des eaux par un ouvrage débouchant sur la partie haute du carreau, les deux anciennes galeries *(accès n°7 et n°8, ref sogerem)* doivent être traitées de manière à les rendre imperméables et permettre une mise en charge de l'ordre de 3 à 4 m des travaux miniers.

Parmi les ouvrages débouchant au jour sur le carreau, les deux principaux actuellement ouverts sont : la descenderie et le puits.

D'après les plans topographiques mis à notre disposition par SOGEREM la sole de la descenderie au niveau du point de sortie au jour se situe à la cote 508,7 NGF. Le puits débouche quant à lui au jour à la cote 508,5 NGF.

Compte tenu des travaux de mise en sécurité envisagés sur le puits (mise en place d'un bouchon béton autoportant), c'est la descenderie qu'il faudrait aménager pour permettre un débordement des eaux sur le carreau principal de la mine.

Remarque : Sur le carreau il existe d'autres ouvrages débouchant au jour ceux-ci sont soit déjà remblayés (ancien puits et cheminée) soit devront être bouchés de manière étanche. Pour les ouvrages toujours ouverts (2 cheminées), il apparaît difficile de les utiliser comme trop plein dans la mesure où ces ouvrages communiquent avec l'infrastructure minière de manière très localisée (connexion avec un seul niveau d'exploitation).

- **Les travaux de mise en sécurité**

Pour s'assurer qu'aucune évacuation d'eau ne se fasse de manière diffuse vers l'extérieur par l'intermédiaire de la fracturation des terrains, notamment vers le carreau inférieur, un traitement des parois de la galerie devra être réalisé (parement, sole et couronne). Les parois de la galerie doivent être rendues étanches au moins jusqu'à la cote 502 NGF. Ce traitement concerne une centaine de mètres de galerie et se limitera à la projection d'un lait de ciment (gunitage).

En tête d'ouvrage un bouchon sera réalisé afin d'interdire l'accès. Ce bouchon sera traversé par deux conduites de diamètre ø200 mm afin de permettre l'évacuation des eaux souterraines.

- **Evacuation du trop plein minier**

Les écoulements issus des travaux miniers pourront être évacués vers les bassins avals en utilisant le caniveau de l'exhaure, situé à seulement 60 m de l'entrée de la descenderie. Une canalisation ou un fossé sera mis en place pour permettre ce raccordement. Un levé topographique du fil d'eau de ce caniveau permettra de préciser le point de raccordement potentiel.

- **Risque d'émergence diffuse sur le carreau de mine**

Il est à noter que l'exploitation du filon s'est faite jusqu'au niveau de la surface du carreau soit à une altimétrie très proche du point de débordement de la descenderie (voir coupe et plan figures 7 et 8). Bien que ces travaux soient remblayés, il n'est pas exclu qu'une émergence diffuse puisse se faire au travers des remblais, le

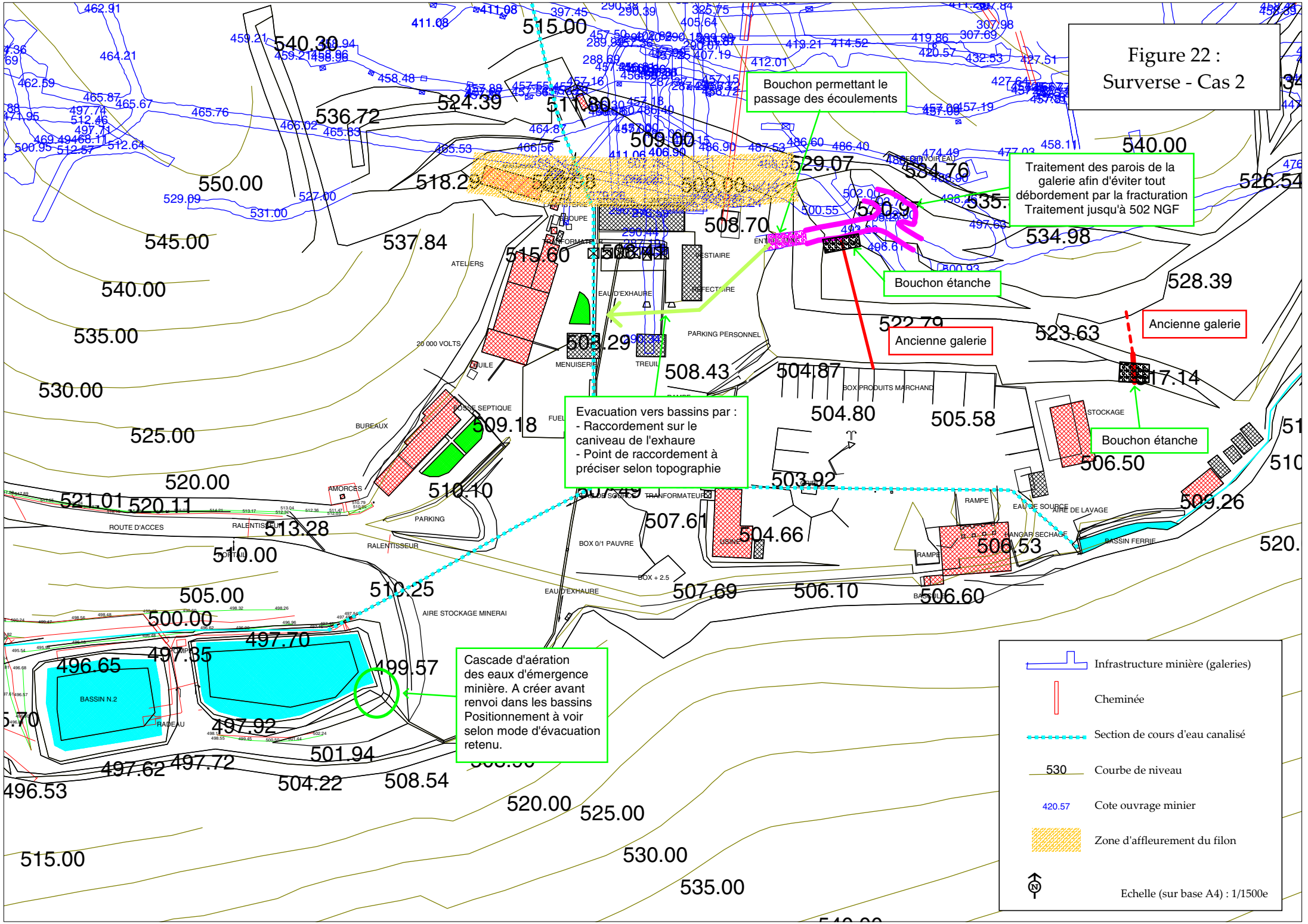


Figure 22 :
Surverse - Cas 2
Bouchon permettant le passage des écoulements
Traitement des parois de la galerie afin d'éviter tout débordement par la fracturation Traitement jusqu'à 502 NGF
Bouchon étanche
Ancienne galerie
Ancienne galerie
Bouchon étanche
Evacuation vers bassins par :
- Raccordement sur le caniveau de l'exhaure
- Point de raccordement à préciser selon topographie
Cascade d'aération des eaux d'émergence minière. A créer avant renvoi dans les bassins Positionnement à voir selon mode d'évacuation retenu.
Infrastructure minière (galeries)
Cheminée
Section de cours d'eau canalisé
530
Courbe de niveau
420.57
Cote ouvrage minier
Zone d'affleurement du filon
Echelle (sur base A4) : 1/1500e

long d'une bande de terrain d'une dizaine de mètres entre la lampisterie et le compresseur (voir figure 22) : ces écoulements étant ensuite drainés par l'ouvrage canalisant le talweg du Burc sous le carreau.

Ce risque de débordement de la mine de manière diffuse sur le carreau existe mais reste somme toute relativement faible dans la mesure où les remblais du carreau sont fortement tassés dans ce secteur suite au roulage des engins. Aucune investigation de terrain ne permet toutefois d'exclure complètement ce risque.

Voir également § 3.4.2.1.

3.4.2.4 Cas 3 : Aménagement d'un forage de décharge à environ 500 m NGF

Pour éviter que le trop plein de la mine ne se fasse sur le carreau, il est possible d'aménager un point de surverse à une cote topographique inférieure à celle des deux carreaux. Pour cela un ouvrage de décharge débouchant à la cote 500 m NGF dans la vallée du Ferrier en aval de l'exploitation peut être réalisé (voir figure 23).

Cet ouvrage relié au niveau 54 de l'infrastructure minière aux alentours de la cote 465,5 NGF permettrait le déversement des eaux vers les bassins de traitement (cote plan d'eau aux alentours de 498 NGF) sous réserve de l'aménagement d'une traversée du lit du Ferrier.

L'ouvrage de décharge sera constitué au minimum de deux sondages, chacun présentant un linéaire de 150 m environ. L'équipement de ces sondages serait le suivant :

- Diamètre minimal de foration : 8,5'' (216 mm),
- Equipement : tubage acier 7''5/8 (173 mm intérieur),
- Cimentation de l'annuaire par injection béton.

Au niveau du point départ dans la mine, un petit aménagement sera réalisé afin d'éviter les risques de colmatage (voir principe d'aménagement sur la figure 23). Ces risques de colmatage sont toutefois très faibles dans la mesure où le niveau de remplissage des travaux miniers se situera quelques mètres au-dessus du départ des forages permettant ainsi aux éventuels matériaux flottants (bois par exemple) de rester piégés dans l'exploitation.

Une piste d'accès et une plate-forme devront être aménagées au niveau du point de sortie au jour. Cet accès se fera soit depuis les bassins, soit depuis la route située quelques mètres au dessus.

- **Risque d'émergence diffuse**

Il n'existe aucun risque de débordement sur le carreau compte tenu de l'altimétrie de cet ouvrage. Concernant les risques au niveau du vallon de Resseguet voir §3.4.2.1.

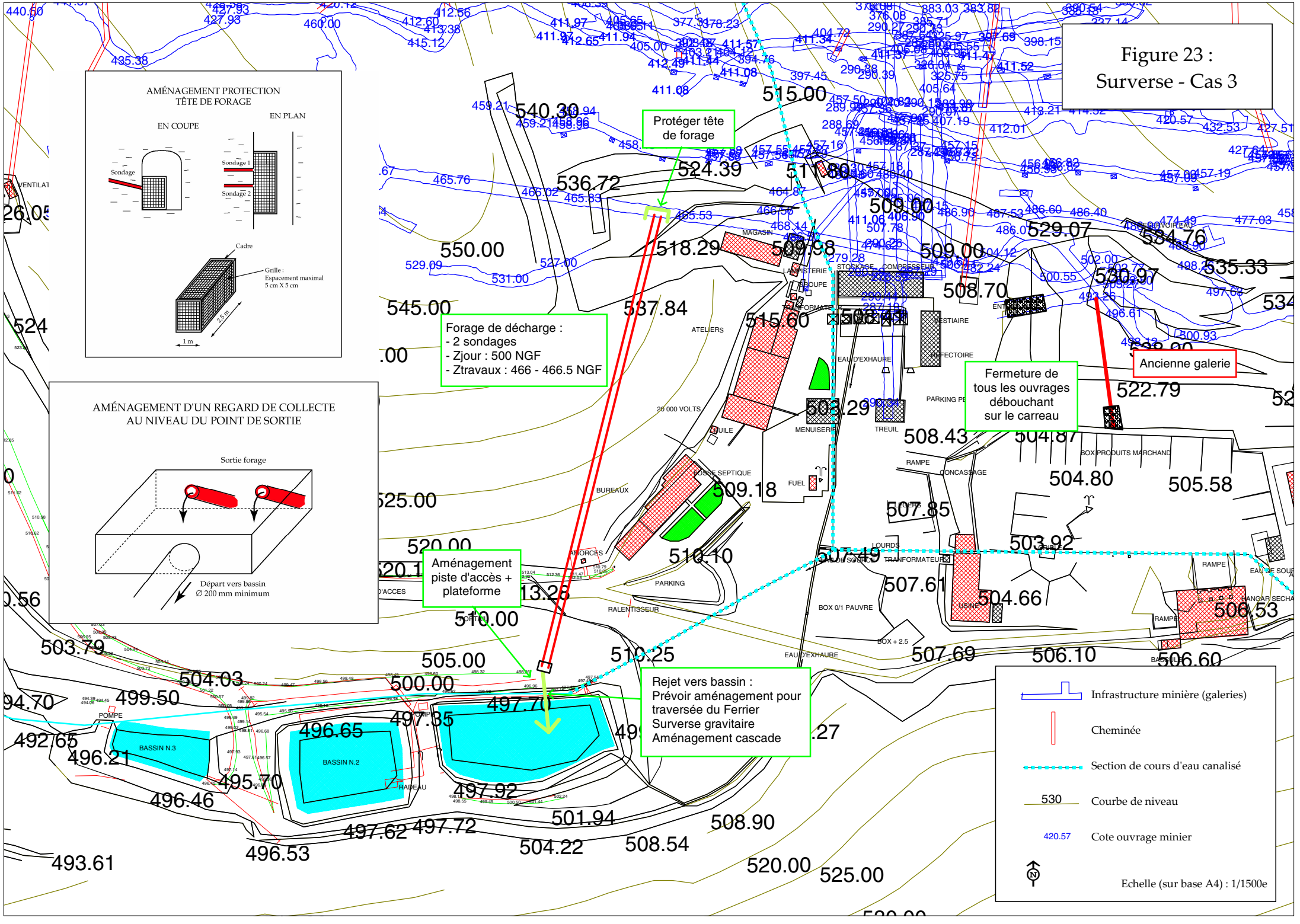


Figure 23 :
Surverse - Cas 3
AMÉNAGEMENT PROTECTION
TÊTE DE FORAGE
EN COUPE
EN PLAN
Sondage
Sondage 1
Sondage 2
Cadre
Grille :
Espacement maximal
5 cm X 5 cm
1 m
2,5 m
AMÉNAGEMENT D'UN REGARD DE COLLECTE
AU NIVEAU DU POINT DE SORTIE
Sortie forage
Départ vers bassin
∅ 200 mm minimum
Protéger tête
de forage
Forage de décharge :
- 2 sondages
- Zjour : 500 NGF
- Ztravaux : 466 - 466.5 NGF
Aménagement
piste d'accès +
plateforme
Rejet vers bassin :
Prévoir aménagement pour
traversée du Ferrier
Surverse gravitaire
Aménagement cascade
Fermeture de
tous les ouvrages
débouchant
sur le carreau
Ancienne galerie
BASSIN N.3
BASSIN N.2
POMPE
RADEAU
PARKING
BUREAUX
ATELIERS
MAGASIN
MENUISERIE
FUEL
EAU D'EXHAURE
RESTAURANT
RESTAURANT
RESTAURANT

3.4.2.5 Synthèse

Sur la figure 24 sont présentés les avantages et les inconvénients de chacune des solutions proposées.

L'évacuation par forage dans la vallée du Ferrier (cas 3) serait la solution la plus fiable d'un point de vue hydrogéologique qui permet à la fois de garantir un niveau de remplissage bas dans la mine et la pérennité de la surverse.

La décision finale qui sera retenue concernant le mode d'évacuation du trop plein devra toutefois prendre en compte les choix qui seront pris dans le cadre de la cession du carreau de la mine (conservation ou démantèlement total des installations de surface et des réseaux...).

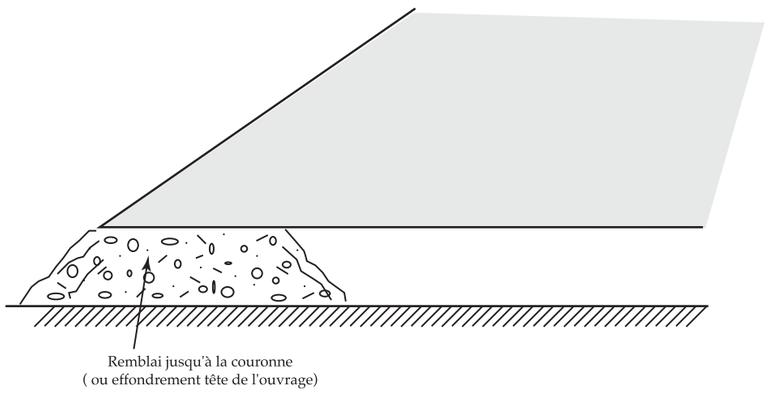
Tous les matériaux utilisés dans le cadre de l'aménagement du trop plein minier doivent être susceptibles de résister à des eaux séléniteuses (= riches en sulfates) et éventuellement acides (eaux de premier remplissage pouvant présenter des pH < 6).

Figure 24 : Les différentes possibilités de surverse de la mine du Burc

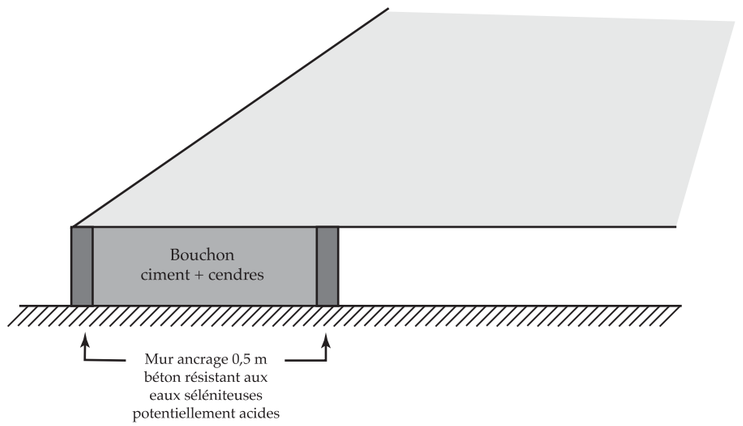
	Cas 1 : ***Débordement sur carreau inférieur par ancienne galerie***	***Cas 1 bis :*** ***Débordement sur carreau inférieur par forage***	***Cas 2 :*** ***Débordement sur carreau supérieur par descenderie***	***Cas 3 :*** ***Débordement dans vallée du Ferrier par forage***
Niveau remplissage des travaux miniers	≈ 505 NGF	≈ 505- 504	≈ 508 NGF	500 NGF
Travaux d'aménagement du trop plein et de fermeture des ouvrages	Travaux de pérennisation de le galerie de débordement. Mise en sécurité des autres ouvrages.	Travaux de foration (≈ 50 m) à réaliser. Mise en sécurité des autres ouvrages et fermeture étanche galerie Ouest.	Travaux de pérennisation de l'ouvrage de débordement. Imperméabilisation des parois de la galerie pour éviter un débordement dans la partie inférieure du carreau (par fracturation et/ou anciennes galeries).	Travaux de foration (≈ 150 m) à réaliser. Fermeture étanche des autres ouvrages.
Travaux de raccordement du trop plein vers les bassins de traitement	Travaux importants à modérés. (remise en service du réseau souterrain usine).	Travaux importants à modérés. (remise en service du réseau souterrain usine).	Travaux modérés. Utilisation réseau existant.	Travaux modérés compte tenu de la proximité des bassins.
Risque de débordement à une cote inférieure	Faible. Risque uniquement lié à la fracturation des terrains.	Faible à nul. car point bas topographique.	Modéré. (affleurement d'anciens travaux remblayés)	Nul. Exutoire potentiel le plus bas.

Figure 25 : Principe de fermeture des galeries

Principe de fermeture classique galerie subhorizontale

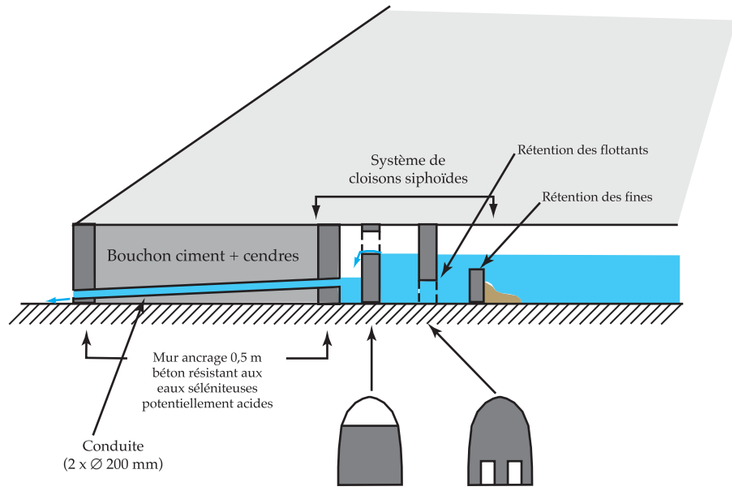


Principe de fermeture étanche galerie subhorizontale

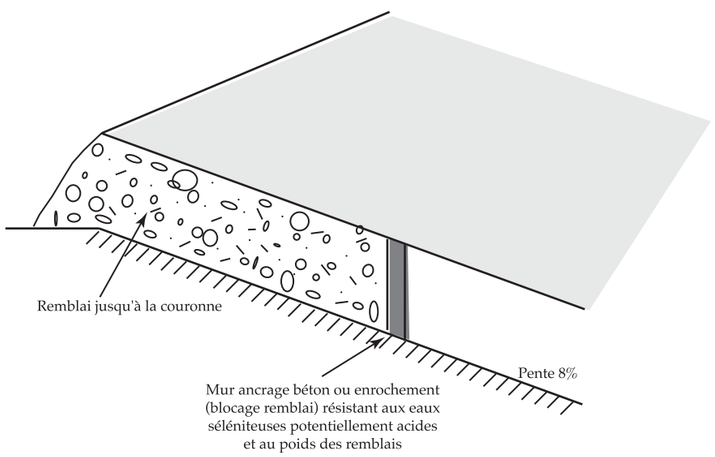


Embouage ciment + cendres volantes de centrale :
1 m^3 de mélange = 50 kg de ciment
+ 350 à 400 l d'eau
+ cendres

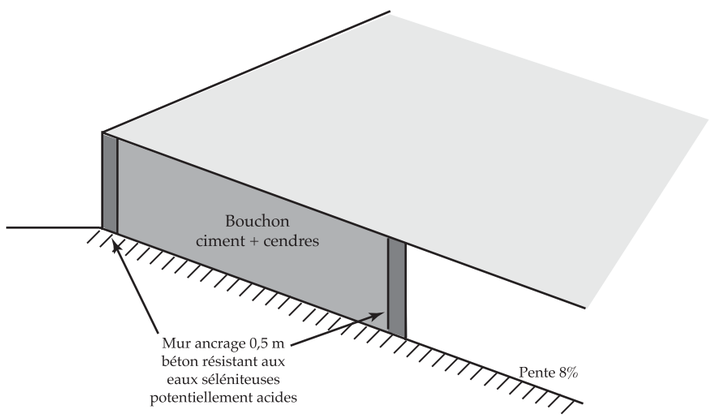
Principe de fermeture étanche d'une galerie subhorizontale avec pérennisation de l'écoulement



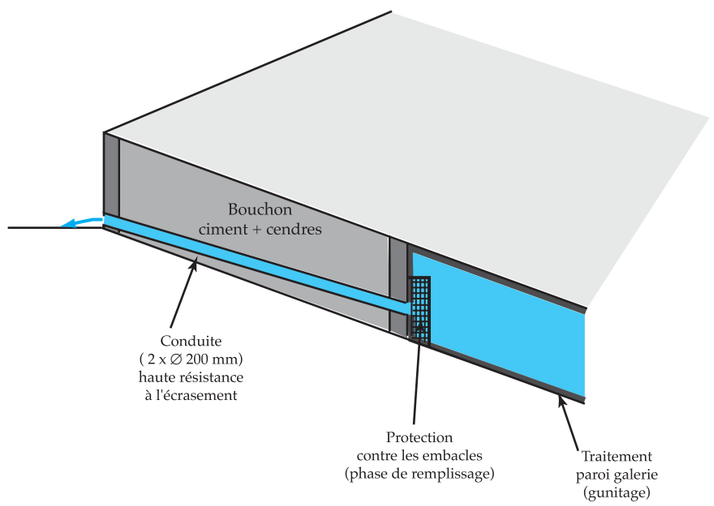
Principe de fermeture classique de la descenderie



Principe de fermeture étanche de la descenderie



Principe de fermeture de la descenderie avec pérennisation de l'écoulement



Dans tous les cas : fermetures des ouvrages sur 10 m minimum ou tant que le recouvrement n'atteint pas 10 fois l'ouverture de la galerie

3.4.3 Influence de l'ennoyage sur la qualité des eaux

3.4.3.1 Qualité prévisionnelle du trop plein minier

Actuellement le temps de séjour des eaux dans les travaux miniers est faible car les différentes venues d'eau sont canalisées par le système d'exhaure et sont rapidement évacuées vers la surface.

Après l'arrêt des pompages, les conditions seront modifiées et de nombreux échanges deviendront possibles entre l'eau et les terrains en cours de saturation. Ces échanges altéreront la qualité physico-chimique de l'eau (augmentation des teneurs en sels dissous et notamment des teneurs en sulfates, fer, manganèse, cuivre et fluor) car la mine contient de nombreux minéraux sulfurés qui ont eu le temps de s'oxyder au contact de l'air pendant la période d'exploitation et qui seront lessivés par les eaux de remplissage.

Le processus d'oxydation partielle des minéraux se produit pendant toute la phase d'exploitation de la mine et les produits oxydés généralement solubles restent en dépôts sur les parois et dans les multiples fissures qui affectent le massif dans toute la zone exploitée. Au moment de l'ennoyage des travaux, le processus d'oxydation s'arrête (plus d'oxygène disponible sous l'eau à l'exception de l'oxygène naturellement dissous dans l'eau mais qui représente une très faible quantité disponible au regard de celle disponible lors de l'exploitation (aérage par ventilation mécanique).

La situation la plus défavorable se situera lors de l'apparition du trop plein. En effet, les premiers écoulements qui surverseront auront eu un temps de séjour dans le milieu souterrain long (proche d'une année, voir § 3.4.1.2) et constitueront la première eau de lavage des minéraux oxydés. Au fil du temps cette minéralisation diminuera suite au renouvellement des eaux dans le réservoir minier et à l'arrêt du processus d'oxydation. Ce phénomène n'existera alors plus que dans la zone de battement de la nappe minière suite à l'alternance de phases d'aération et de phases en eau dans cette partie de l'exploitation.

Les simulations réalisées à partir de modèles géochimiques développés par l'ENSMP ont permis d'estimer la qualité des eaux du trop plein minier lors de son apparition ainsi qu'à plus long terme. Plusieurs hypothèses ont été étudiées selon les conditions d'oxygénation du milieu et les caractéristiques géochimiques de l'eau participant au renouvellement du réservoir minier.

Le tableau ci-après précise les teneurs prévisionnelles du trop plein minier lors de son apparition et à plus long terme en régime stabilisé.

Remarque : Dans cette étude, aucune approche qualitative n'est prévue dans le cahier des charges. Nous nous contenterons donc de présenter les principales conclusions de l'étude de l'ENSPM avec toutefois quelques commentaires, notamment sur les mesures pouvant être mises en œuvre pour améliorer la qualité des eaux issues des travaux miniers.

- **Qualité court terme**

Tableau 3 : Qualité prévisionnelle du trop plein minier lors de son apparition
(source Etude ENSMP)

	Hypothèse 1 forte oxygénation du milieu	***Hypothèse 2 Oxygénation moyenne du milieu***	***Synthèse***
pH	5,87	6,47	≈ 6
Minéralisation totale (mg/l)	763	200	Plusieurs centaines mg/l
Fluorure (mg/l)	40	13,6	15 à quelques dizaines de mg/l
Sulfates (mg/l)	402	88	100 à 500 mg/l
Fer (mg/l)	0,005	0,002	0,005 mg/l
Manganèse (mg/l)	63,2	12,64	10 à 100 mg/l
Cuivre (mg/l)	33,1	27,5	25 à 30 mg/l
Aluminium (mg/l)	14,1	1,14	1,5 à 20 mg/l

Cette modélisation de la qualité du trop plein minier lors de son apparition, réalisée par l'ENSPM, à l'aide de modèle utilisant les lois d'équilibre géochimique entre l'eau et l'encaissant rocheux ainsi que ses minéralisations associées, donne des ordres de grandeur conformes avec ce qui est localement déjà localement observé dans certaine partie des travaux miniers (famille rouge, voir §3.3.3).

En l'état actuel des connaissances il n'existe aucune méthode déterministe pouvant prédire la qualité des eaux du trop plein minier avec exactitude. Cette modélisation a toutefois le grand mérite de fournir des ordres de grandeur concernant la minéralisation future des eaux issues des travaux miniers souterrains.

Concernant les ordres de grandeur, mis en avant dans cette modélisation, **nous alertons l'exploitant que les teneurs en fer prévisionnelles sont relativement faibles par rapport aux autres éléments. A notre sens des teneurs beaucoup plus importantes que celles présentées ci-dessus pourront être observées.** En effet lors de notre visite de la mine nous avons pu constater la présence de sulfures de fer (pyrite et chalcopyrite) et de sidérite sur les parois des galeries.

De plus les faibles teneurs en fer mesurées lors de la campagne de prélèvements dans la mine en 2003 sont probablement liées au fait que le fer soluble reprécipite très rapidement lorsque le milieu est aéré comme c'est le cas actuellement dans l'exploitation. Ce qui n'est pas le cas par exemple du manganèse qui nécessite des processus de reprécipitation beaucoup plus lents, d'où les importantes teneurs parfois mesurées dans certains écoulements de la mine (famille rouge, voir §3.3.3).

Des teneurs de plusieurs mg/l de fer peuvent donc également être observées sur les premiers écoulements issus des travaux miniers. La présence de cet élément entraînera un impact visuel suite à la précipitation des hydroxydes de fer au contact avec l'air (dépôts ferrugineux orangés). Il en est de même pour le cuivre mais dans une moindre mesure (dépôts cuivrés bleu-vert). Dans ces conditions il convient dès à présent d'envisager un éventuel traitement des eaux et l'utilisation des 3 bassins déjà présents à l'aval des installations minières, avec mise en place a minima d'une cascade d'aération en tête de dispositif (cascade réalisable en tête de bassin 1 sur le remblai existant) afin d'assurer l'oxydation du fer et sa précipitation/décantation dans les bassins.

Suivant la qualité de l'eau en sortie de bassins avec ce dispositif minimal, on pourra éventuellement envisager de le compléter par du lagunage.

- **Qualité long terme**

La simulation de la qualité du trop plein minier à plus long terme, en régime stabilisé a également été réalisée par l'ENSPM. Deux situations ont été envisagées :

- un renouvellement du réservoir minier par des eaux pauvres en oxygène (eaux profondes),
- un renouvellement par des eaux riches en oxygène (eaux superficielles).

Ces deux simulations ont été réalisées pour chacune des deux hypothèses concernant la qualité des eaux lors de l'apparition du trop plein. On constate que la qualité initiale ne joue aucun rôle sur celle à long terme. Seul le mode de renouvellement des eaux influe sur la qualité finale des écoulements : un renouvellement par des eaux oxygénées génère une minéralisation résiduelle plus importante que dans le cas d'eaux faiblement oxygénées.

Tableau 4 : Qualité prévisionnelle du trop plein minier à long terme
(source Etude ENSMP)

	Hypothèse 1 : forte oxygénation initiale du milieu + renouvellement par eaux peu oxygénées	*Hypothèse 2 : forte oxygénation initiale du milieu + renouvellement par eaux oxygénées*	*Hypothèse 3 : Oxygénation moyenne du milieu + renouvellement par eaux peu oxygénées*	*Hypothèse 4 : Oxygénation moyenne du milieu + renouvellement par eaux oxygénées*	***Synthèse***
pH	7,13	7,27	7,71	7,27	7 à 8
Minéralisation totale (mg/l)	193	95	68	78	<100 mg/l
Fluorure (mg/l)	6,7	9,1	6,5	9,1	6 à 10 mg/l
Sulfates (mg/l)	15,5	27,6	15,5	29,4	< 30 mg/l
Fer (mg/l)	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	<0,005 mg/l
Manganèse (mg/l)	0,68	0,02	0,68	<0,01	0,01 à 0,68 mg/l
Cu (mg/l)	0,06	0,4	0,01	0,14	0,14 à moins de 0,01 mg/l
Al (mg/l)	0,002	0,002	<0,001	0	<0,005 mg/l

A long terme la minéralisation des eaux issues des travaux miniers sera faible. Les éléments métalliques seront présents sous forme de traces (concentration de quelques microgrammes par litre). Par contre les simulations réalisées par l'ENSPM montrent que les teneurs en fluorures seront toujours de l'ordre de quelques mg/l.

L'étude menée par l'ENSMP montre que le facteur dominant dans la qualité future des eaux est la teneur en oxygène de l'eau. La mine du Burc étant une mine peu profonde, il est fort probable que l'essentiel des apports d'eau à la mine soit constitué d'eau à forte oxygénation : **c'est la raison pour laquelle nous pensons qu'il est raisonnable de retenir les hypothèses les plus pessimistes concernant la qualité prévisionnelle des eaux aussi bien à court terme qu'à long terme.**

- **Phase transitoire**

La décroissance entre la concentration lors de l'apparition du trop plein et la phase stabilisée peut être assimilée à un renouvellement progressif de l'eau dans le réservoir minier par les infiltrations qui répond à l'équation de dilution suivante :

$$C_n = (C_{n-1} \times V + C_{résiduelle} \times Q \times \partial t - C_{n-1} \times Q \times \partial t) / V \qquad \text{avec}$$

V : volume du réservoir minier
C_n et C_{n-1} : concentration du trop plein minier entre la période ∂t
∂t : pas de temps
$C_{résiduelle}$: Concentration résiduelle du trop plein minier
Q : débit du trop plein minier

C'est ce type d'équation qui a été utilisé dans l'étude ENSMP pour estimer les vitesses de décroissance (voir figure 26), en considérant que l'intégralité du réservoir minier était renouvelée avec un débit de renouvellement de l'ordre de 15 m^3/h. Ces simulations montrent une décroissance très rapide de la minéralisation des eaux au cours des deux premières années. Pour atteindre les conditions stables correspondant à la qualité long terme il faut attendre une dizaine d'années.

Ces simulations de décroissance correspondent toutefois à l'hypothèse la plus pessimiste prenant en compte le renouvellement de l'intégralité du réservoir minier. De nombreux suivis réalisés par Cesame sur plusieurs sites miniers montrent que dans certains cas, cette décroissance et l'apparition des conditions stables sont beaucoup plus rapides que les modélisations théoriques. Ces cas particuliers s'expliquent par :

- des phénomènes chimiques d'adsorption et de précipitation dans les conditions anoxiques du milieu souterrain profond. Ce phénomène, s'observe dans les mines présentant un volume de vide résiduel très important et un faible taux de renouvellement ce qui n'est pas le cas au niveau de la mine du Burc.
- des phénomènes physiques correspondant à l'existence de volumes non renouvelés (« court circuit hydraulique » constitué par certains quartiers d'exploitation).

A titre d'exemple ce dernier phénomène a été modélisé au niveau de la mine du Burc au niveau des sulfates en considérant une teneur initiale de 400 mg/l et une teneur résiduelle de 20 mg/l et pour différents taux de renouvellement des travaux miniers (voir figure 27).

L'allure de la décroissance dans le cas d'un renouvellement total du réservoir minier correspond bien avec celle présentée dans l'étude ENSPM confirmant la validité des équations de dilution retenues. On constate que l'apparition de conditions stables peut être deux fois plus rapide si seulement la moitié du réservoir minier participe à l'alimentation du trop plein.

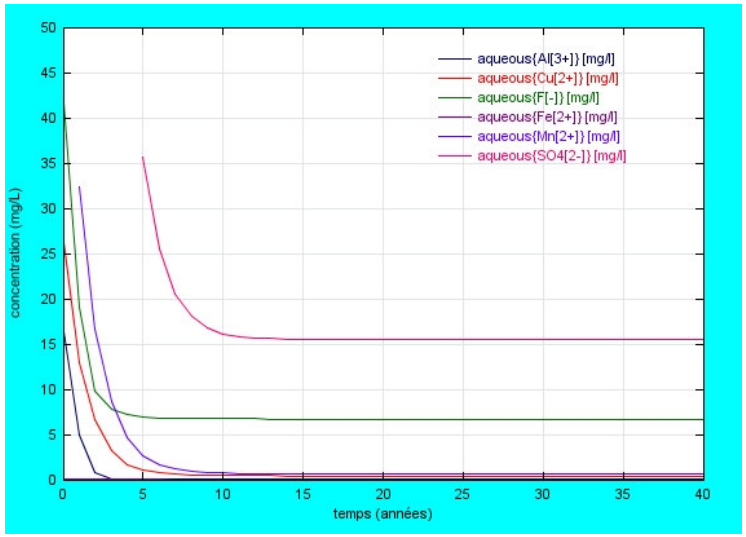
Le mode de fermeture de la mine peut donc influencer l'évolution de la qualité des eaux du trop plein minier, en particulier en réduisant la durée de la période de forte minéralisation (donc de nécessité de traitement de l'eau). Il convient donc de voir si l'infrastructure minière au niveau de la mine du Burc peut permettre des aménagements autorisant ce phénomène.

3.4.3.2 Aménagement pouvant être mis en œuvre pour l'amélioration de la qualité des eaux

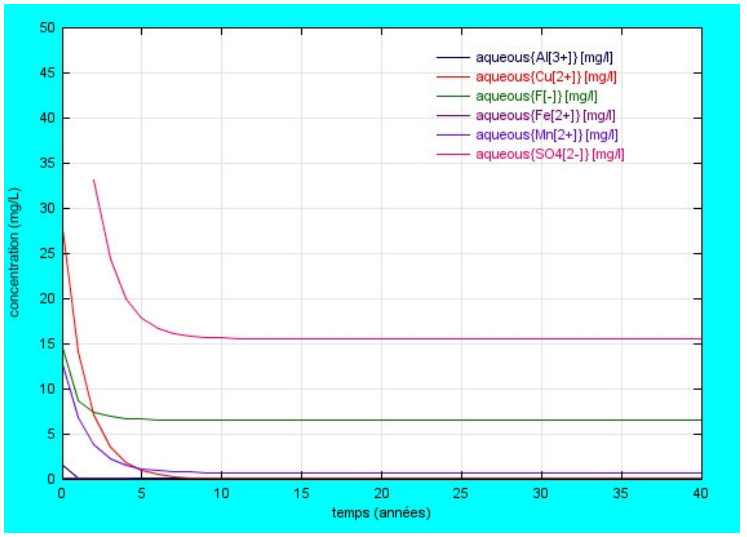
- **Aménagements dans la mine avant fermeture**

Aucun aménagement particulier ne peut être mis en œuvre pour améliorer la qualité des premiers écoulements lors de la surverse de la mine. Par contre, compte tenu de la localisation de certaines venues d'eau dans l'exploitation, il est envisageable d'essayer de faire en sorte que celles-ci ne transitent pas dans les chantiers remblayés mais plutôt dans les galeries ouvertes. De façon à faire transiter

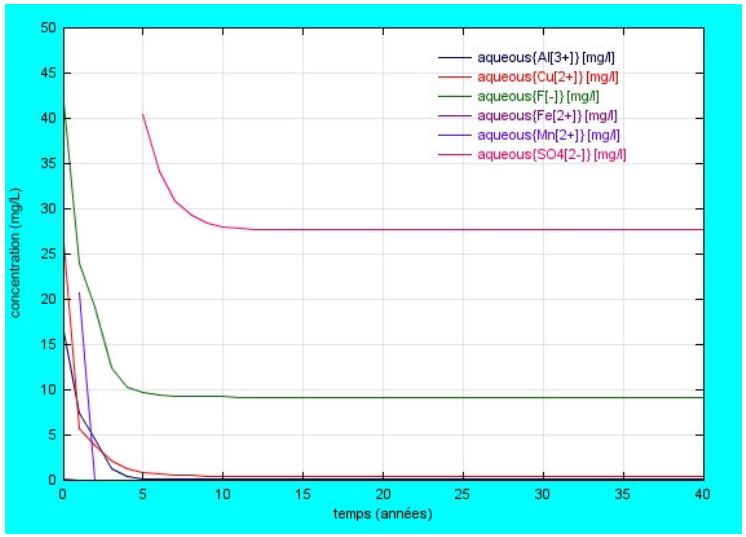
Hypothèse 1 : Oxydation maximale initiale –
Alimentation eaux profondes



Hypothèse 3 : Oxydation initiale réduite –
Alimentation eaux profondes



Hypothèse 2 : Oxydation maximale initiale –
Alimentation eaux superficielles



Hypothèse 4 : Oxydation initiale réduite–
Alimentation eaux superficielles

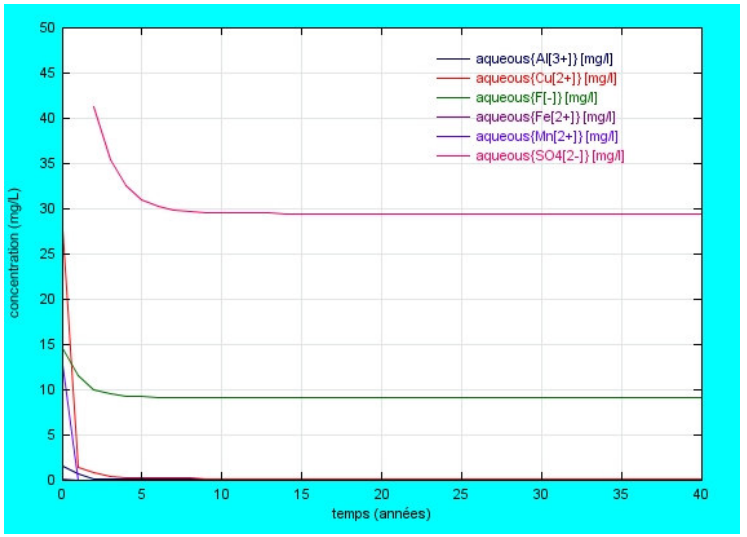
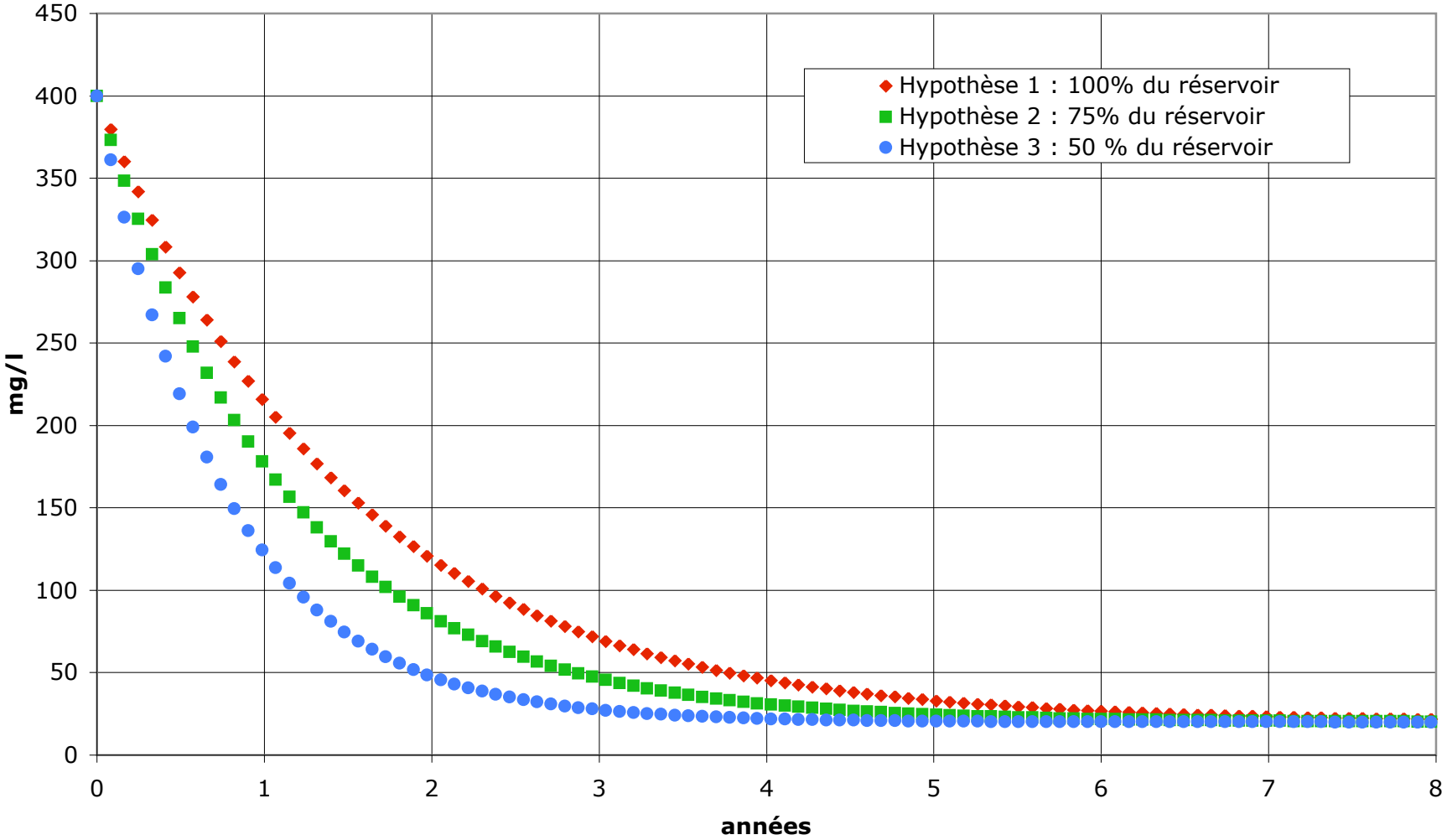


Figure 26 : Evolution de la qualité prévisionnelle du trop plein minier (source ENSMP)

Figure 27 : Evolution de la qualité du trop plein minier selon le volume de réservoir renouvelé
- Cas des sulfates -



un maximum d'eau directement vers l'extérieur et à limiter le flux de renouvellement des zones exploitées.

Le principe global de ces aménagements est de créer un drain préférentiel de capture des eaux d'infiltration dans les étages supérieurs et de favoriser l'évacuation des eaux vers l'extérieur via les galeries au rocher (essentiellement par la grande descenderie). En effet, l'analyse de l'exhaure et du bilan en eau de la mine montre que l'eau actuellement exhaurée provient pour l'essentiel du drainage du bassin versant du Ferrier (drainage par fractures + pertes du ruisseau) et non de venues d'eau « profondes » circulant au sein du filon. Ainsi le remplissage de lamine fera progressivement cesser les débits profonds (voir figure 28) et en fin de remplissage les deux sources d'alimentation de la mine (infiltration cours d'eau + drainage massif rocheux) produiront l'essentiel des débits dans les étages supérieurs.

Les mesures à mettre en œuvre concernent principalement les venues d'eau situées à l'extrémité Est de l'exploitation. Actuellement un peu moins de la moitié de l'exhaure provient de venues d'eau issues d'une fracture recoupée à l'extrémité Est du gisement (niveaux 200 et 220, BF3 et BF4, voir figure 11). **Avec le remplissage de la mine, le débit de ces venues d'eau profondes va diminuer et les transits dans les niveaux supérieurs de l'exploitation vont être réamorcés** (= phénomène inverse à celui observé sur le suivi de l'exhaure 170 et 220, voir figure 11 et § 3.3.2). **Ainsi le renouvellement en eau de la partie basse de l'exploitation sera plus faible.**

A partir du niveau 54, il serait donc intéressant de faire en sorte que les venues d'eau provenant de cette fracture à l'extrémité Est du gisement soient dirigées vers le trop plein par l'intermédiaire de la grande descenderie : **cet ouvrage devenant une zone d'écoulement préférentiel.**

Pour cela il convient d'essayer d'empêcher tout écoulement vers les zones exploitées en condamnant les accès à ces secteurs. La solution technique la plus facile à mettre en œuvre serait la mise en place de remblais de nature argileuse et tassés sur toute la hauteur de galerie. L'objectif de ces mesures n'est pas de réaliser des serrements étanches au sens strict mais plutôt d'essayer d'orienter le flux dans les sections restant ouvertes.

La mise en œuvre de mesures plus lourdes (pose de canalisation, imperméabilisation, barrage étanche...) ne nous paraît pas justifiée d'un point de vue technico-économique dans la mesure où ces aménagements ne permettent pas de garantir avec certitude le mode d'écoulement souterrain compte tenu de l'hétérogénéité du milieu. En effet il apparaît très utopiste de vouloir maîtriser complètement le mode de circulation des eaux au sein de l'exploitation vu l'état de fracturation du milieu et le faible flux en jeu (15 m^3/h à 30 m^3/h en résiduel). Les mesures proposées restent donc simples et ont pour unique objectif d'essayer d'orienter le flux général au sein de l'exploitation en favorisant un écoulement par la grande descenderie.

L'analyse de la structure de l'exploitation souterraine et les visites réalisées avec l'exploitant permettent de localiser les différentes galeries devant faire l'objet d'un tel traitement (voir figure 29). Ces différents points devront toutefois être validés voire complétés par l'exploitant compte tenu de sa connaissance du milieu.

Figure 28 : Évolution du mode d'alimentation de la mine

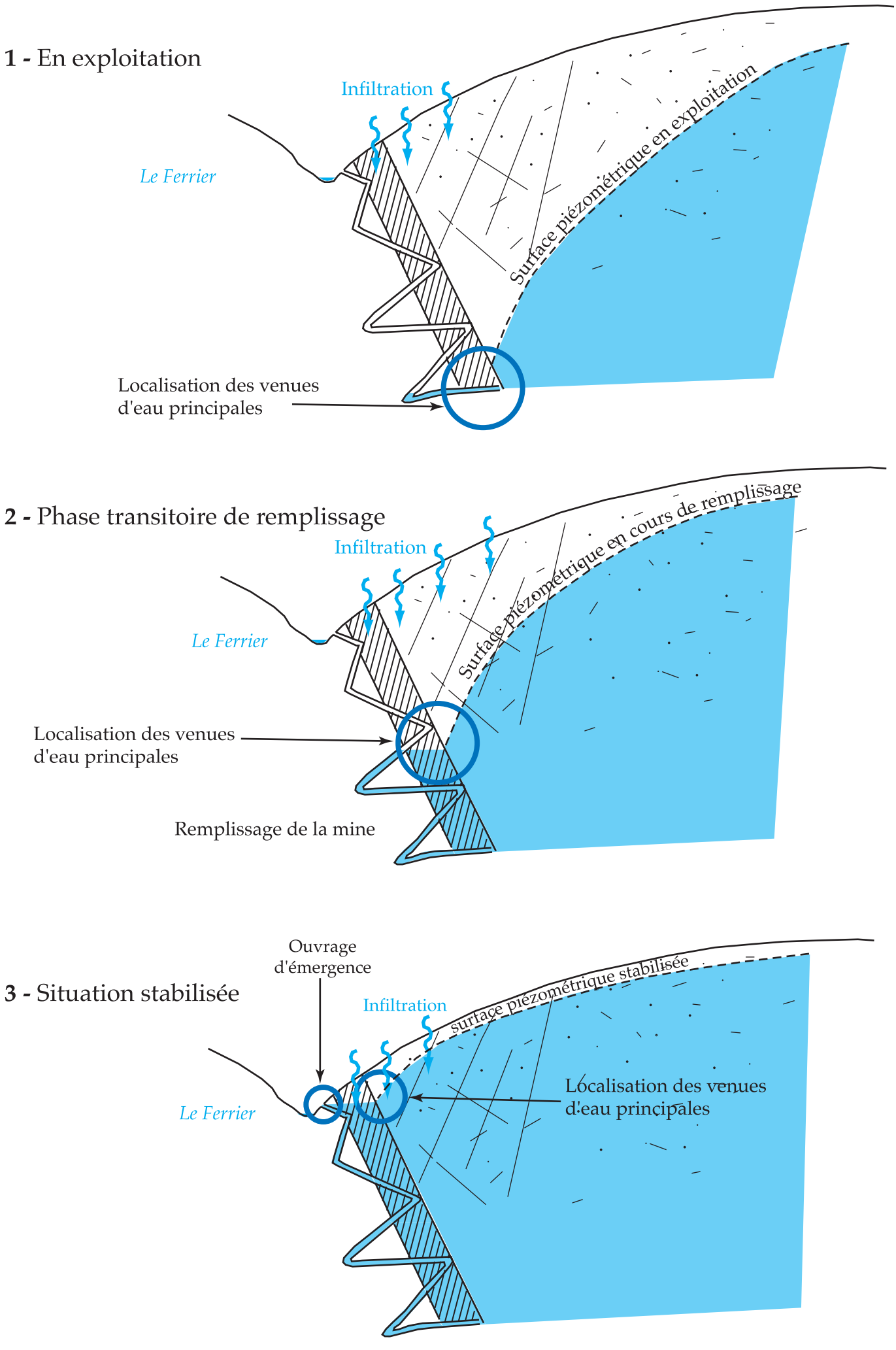
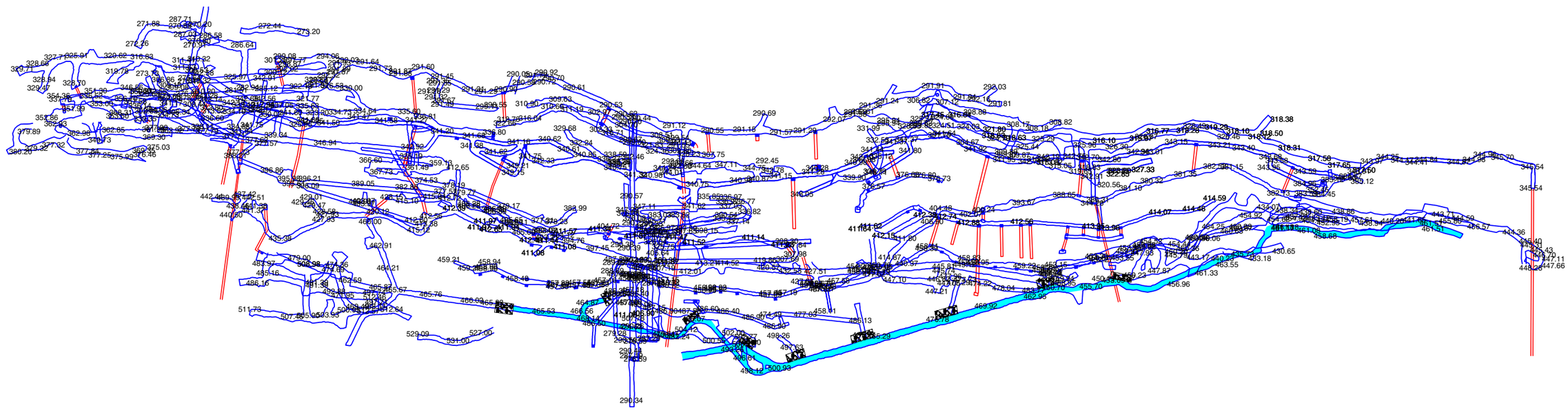


Figure 29 : Aménagements "Eaux souterraines"

Objectif : Privilégier un flux par la descenderie à partir de l'étage 54

EN PLAN



● **Aménagements dans la mine après fermeture**

Pour préserver la qualité des eaux du trop plein minier notamment lorsque des teneurs stables seront apparues **il sera nécessaire d'éviter toute déstabilisation du milieu notamment interdire tout pompage dans l'exploitation.**

En effet, les fluctuations de niveau d'eau dans l'exploitation liées à un pompage entraînent des variations de niveaux d'eau s'accompagnant de phénomènes d'ennoyage/aération à l'origine de l'oxydation puis du lessivage de certains minéraux sulfatés et donc une dégradation de la qualité des eaux (voir exemple figure 30).

Si l'on souhaite utiliser l'eau transitant dans les travaux miniers, seul les écoulements gravitaires en sortie de mine pourront être utilisés sous réserve bien entendu que la qualité des eaux soit conforme avec l'usage envisagé (irrigation, abreuvage...).

De même pour éviter les variations de niveau d'eau liées aux périodes pluvieuses on peut envisager d'intervenir sur les zones de pertes potentielles des ruisseaux.

● **Aménagements en surface**

Une manière détournée d'améliorer la qualité des eaux de l'émergence minière peut également consister à limiter le flux entrant dans les travaux miniers et ainsi limiter le volume d'eau susceptible de se minéraliser au contact de l'encaissant rocheux.

L'imperméabilisation du réseau hydrographique au droit de la zone exploitée est une mesure allant dans ce sens. Elle aurait également pour effet de limiter les fortes intrusions d'eau pendant les périodes pluvieuses et donc de limiter les phénomènes de variation du niveau d'eau au sein de l'exploitation (voir § précédent)

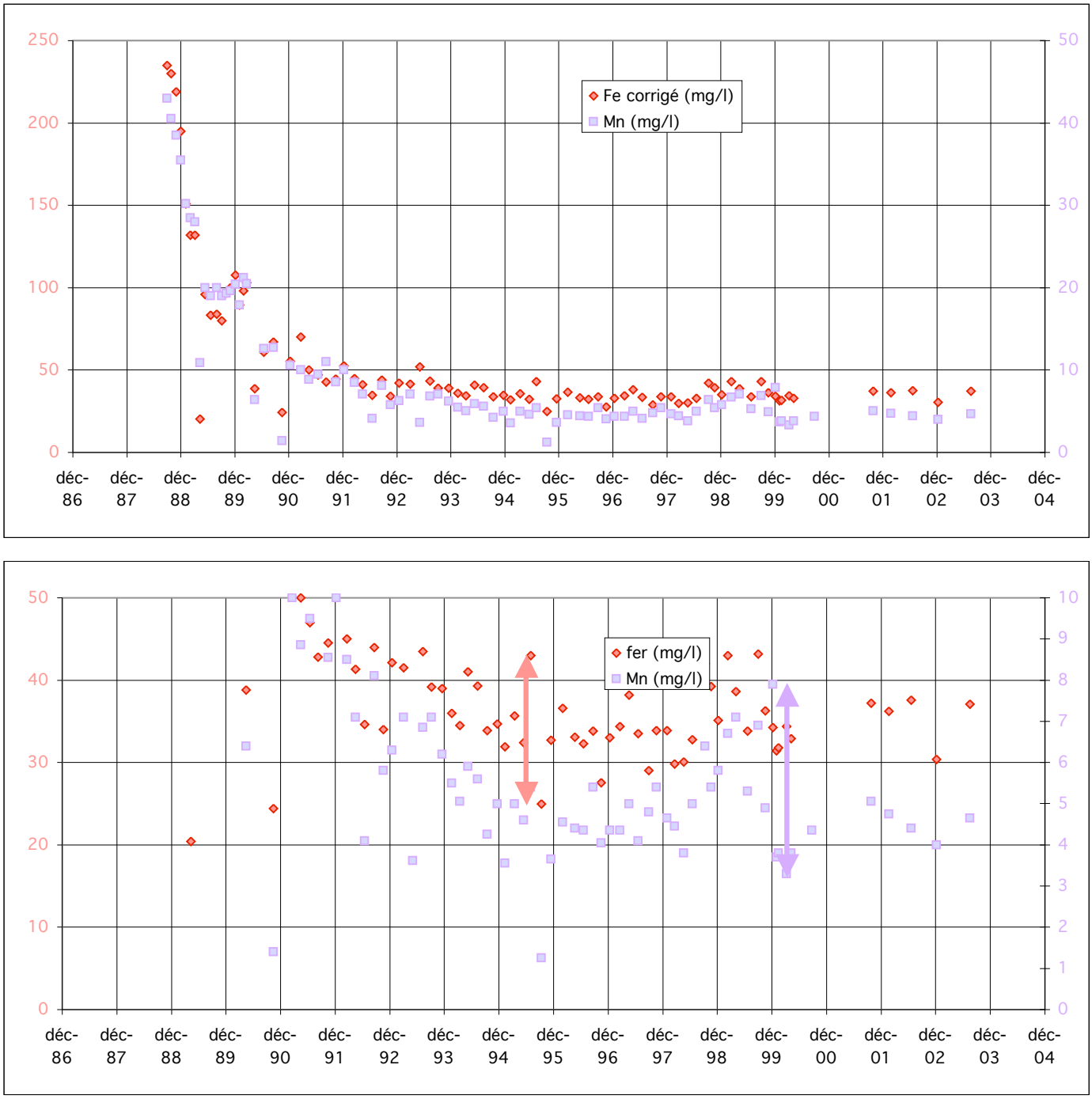
Cette imperméabilisation existe déjà au niveau du talweg du Burc. En effet le talweg est busé bien au-delà de l'emprise du carreau SOGEREM. Ce busage semble avoir été mis en place jusqu'à la bordure septentrionale de l'exploitation (voir figure 31).

Au niveau du Ferrier, ce type d'aménagement n'existe pas. Or lorsque l'on regarde la localisation des principales venues d'eau dans la mine dans le secteur Est, on constate que celles-ci se situent pour la plupart proche de l'aplomb du Ferrier confirmant le rôle probable du ruisseau dans le mode d'alimentation[2].

Un linéaire d'environ 200 m de cours d'eau est concerné (voir figure 31). Techniquement plusieurs types d'aménagement sont envisageables.

[2] Seules des mesures de débits sériées et/ou un traçage permettraient de confirmer cette analyse.

Figure n° 30 :
Exemple d'influence des battements de nappe sur la minéralisation de l'eau (mine de charbon - Loire)



Les variations de concentration liées aux incidents climatiques peuvent atteindre un ordre de grandeur de 2

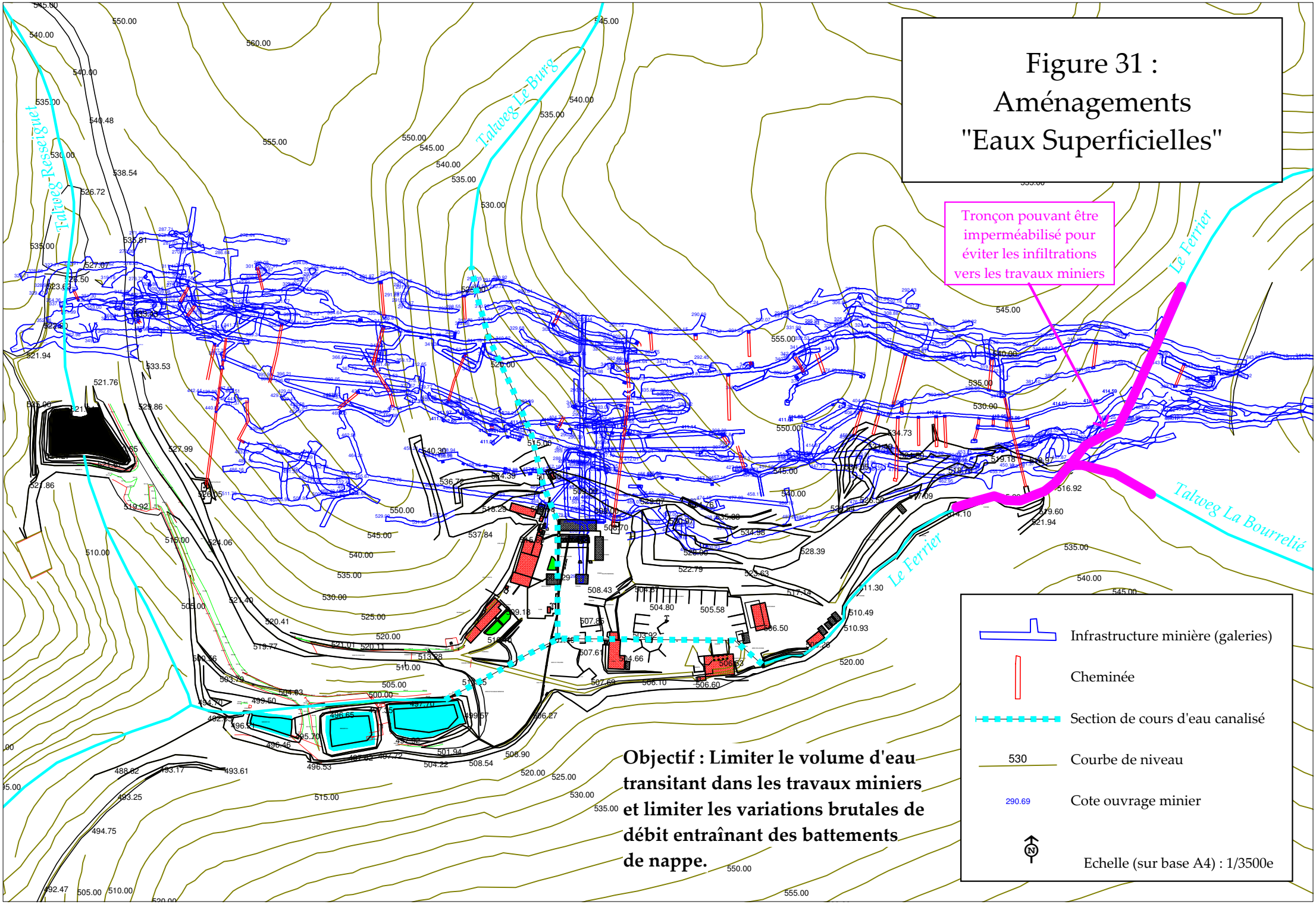


Figure 31 :
Aménagements
"Eaux Superficielles"
Tronçon pouvant être imperméabilisé pour éviter les infiltrations vers les travaux miniers
Talweg Le Burg
Talweg Ressiguet
Le Ferrier
Talweg La Bourrelié
Infrastructure minière (galeries)
Cheminée
Section de cours d'eau canalisé
530
Courbe de niveau
290.69
Cote ouvrage minier
Echelle (sur base A4) : 1/3500e
Objectif : Limiter le volume d'eau transitant dans les travaux miniers et limiter les variations brutales de débit entraînant des battements de nappe.

1 - Le busage

Une canalisation de diamètre (ø500 mm) pourrait être posée dans le lit du ruisseau ou à côté afin de canaliser un maximum d'écoulement superficiel au droit de l'exploitation. Cet ouvrage permettrait de canaliser une grande partie de l'année les écoulements en provenance du bassin versant amont. Lors de forts orages, lorsque le débit du ruisseau dépassera la capacité de la buse, l'excédent non évacué par l'ouvrage surverserait alors dans le lit naturel du ruisseau. Cet écoulement superficiel n'aurait alors que très peu d'influence sur le fonctionnement hydrogéologique de l'aquifère minier dans la mesure où le débordement serait limité dans le temps (quelques heures voire quelques jours seulement).

Pour s'assurer de la pérennité du dispositif de lutte contre les embâcles et un piège à MES devra être mis en place au départ de la canalisation (ce qui nécessitera un entretien régulier).

Fréquence de saturation de l'ouvrage

La capacité d'une buse béton ø500 mm peut être estimée 735 l/s en utilisant la formule de Manning Strickler et en considérant un coefficient de rugosité de 80 et une pente de l'ouvrage de 3,5% (cette valeur est légèrement inférieure à la pente moyenne du Ferrier amont (5,8 %), afin de prendre en compte les éventuelles zones de replat).

Le débit de **pointe décennale (Q_{10})** du Ferrier à l'amont du carreau peut quant à lui être estimé à **770 l/s** (utilisation de la méthode de l'hydrogramme qui est la mieux adaptée pour les bassins versants ruraux, voir figure 32). Cette valeur est tout à fait conforme avec les débits spécifiques de crue mesurés sur le Dadou au niveau de la station hydrologique de Paulinet. En effet le débit spécifique de crue décennale mesurée sur cette station atteint 513 l/s/km^2, (voir § 3.2.4) ce qui rapporté au niveau du Ferrier donnerait un débit de crue décennale de 687 l/s (= 513 l/s/km^2 x 1,34 km^2).

On constate donc que la saturation de la canalisation interviendrait pour des épisodes de crue supérieurs à la crue décennale.

Ce type d'aménagement devra être réalisé uniquement si les autres solutions ne peuvent pas être mises œuvre, dans la mesure où sa pérennité ne peut être garantie (risque de colmatage) et où il présente un impact sur le milieu naturel (busage de cours d'eau).

HYDROUTI

Boite à Outils Hydrologie , Hydraulique et Assainissement

FIGURE 32

FICHE HYDRAULIQUE BASSIN VERSANT rural
Crue décennale Ferrier amont

Caractéristiques

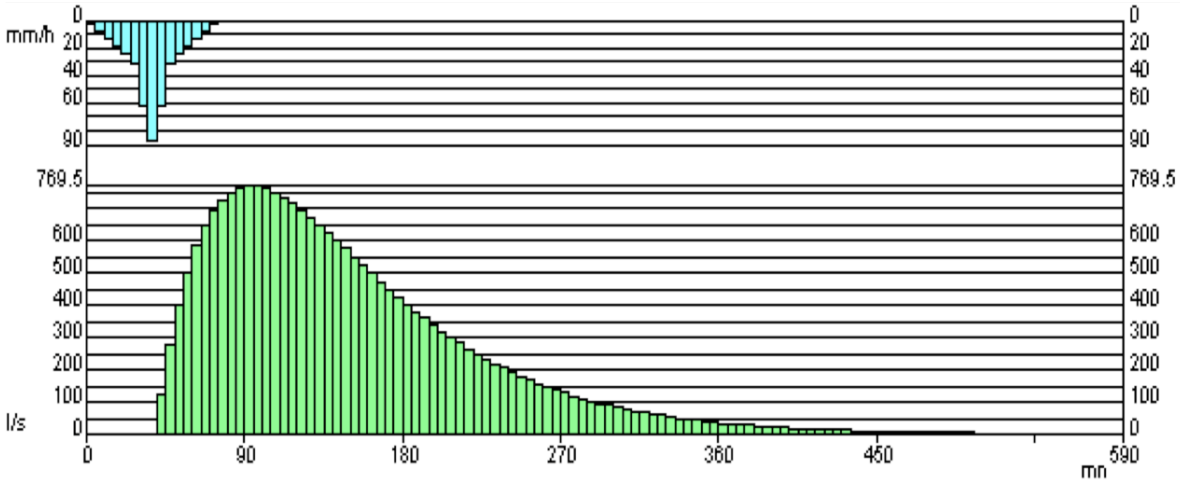
Surface	134	Ha	Pertes initiales	10	mm
Longueur	1800	m	Vitesse limite d'infiltration	15	mm/h
Pente	580	1/10000	Loi de HORTON a	2	
Coef. de ruissellement	5	%	Loi de HORTON b	200	
			Temps de réponse	110	mn

Paramètres

Eau pluviale			Durée totale	75	mn
Coefficient Montana a	6.5		Durée intense	19	mn
Coefficient Montana b	0.62		Hauteur totale	34	mm
			Hauteur intense	20	mm
			Décalage de la pointe	0.50	
			Pas de calcul	5	mn

Débit de pluie d'orage			Débit d'orage	1182.1	l/s
Méthode de Caquot	918.2	l/s	Volume total ruisselé	6903.6	m3
Méthode Rationnelle	1182.1	l/s	Coef. de ruissellement	15.15	%
Méthode Hydrogramme	769.5	l/s			

HYETOGRAMME DE LA PLUIE



HYDROGRAMME DE RUISSELLEMENT

2 – Pose d'un enrochement béton

Un enrochement et bétonnage du lit du ruisseau pourraient également être réalisé. Les caractéristiques géométriques de cet ouvrage devront permettre de l'évacuation de la crue centennale (Q_{100}) afin d'éviter tout débordement sur les berges risquant de provoquer des affouillements autour de l'ouvrage. Ce débit de crue centennale peut être estimé à partir de la relation suivante : $Q_{100} = 2,5 \times Q_{10}$ soit $Q_{100} = 1925$ l/s.

Dans ces conditions les caractéristiques géométriques pourraient être les suivantes :

- Section trapézoïdale
- Largeur en tête : ≈ 1,6 m
- Largeur à la base : ≈1 m
- Profondeur : 0,8 m

☞ Capacité de 3050 l/s en considérant un coefficient de rugosité de 30 et une pente moyenne de l'ouvrage de 3,5 %.

3 – Pose d'un fossé béton préfabriqué

Compte tenu du débit de crue à évacuer, il faudra mettre en œuvre un modèle de fossé béton « grand débit ». Parmi la gamme de fossés préfabriqués disponible celle qui est la plus adaptée dans le cas présent est la suivante :

- largeur en tête : 1,6 m.
- largeur à la base : 0,5 m.
- hauteur : 0,8 m.

La mise en œuvre de ce type de dispositif nécessitera l'aménagement de seuil le long du trajet afin de casser les vitesses d'écoulement qui risquent d'être élevées compte tenu de la pente naturelle du lit du ruisseau.

Quel que soit le type d'aménagement retenu, une autorisation des propriétaires fonciers devra être obtenue dans la mesure où le tronçon de ruisseau concerné se situe en dehors de l'emprise foncière de SOGEREM. De plus une autorisation de la part des services en charge de la police de l'eau devra être également obtenue (loi sur l'eau du 3/01/92 et article L214 du code de l'environnement). **Il est à noter qu'il n'existe sur cette partie du ruisseau aucun enjeu piscicole et faunistique et que ces mesures s'inscrivent dans le cadre d'une amélioration de la qualité générale du ruisseau à l'aval des installations minières.**

3.4.4 Préconisations de suivi de l'ennoyage

L'évolution du niveau de remplissage de la mine devra être suivie à partir d'un ouvrage vertical relié à l'exploitation. Ce dispositif pourra être mis en place au niveau du puits, dans la mesure où il s'agit du seul ouvrage vertical relié à l'exploitation souterraine à différents niveaux (= recettes).

De plus le mode de fermeture actuellement envisagé pour cet ouvrage (= bouchon autoportant) ne remet pas en cause la bonne connexion hydraulique avec l'exploitation.

Un tubage sera laissé au travers du bouchon béton. Il sera mis en place directement lors des travaux de fermeture ou par forage une fois le bouchon en place. Ce tubage sera positionné de manière à ce qu'une sonde piézométrique puisse être glissée jusqu'au fond du puits sans risque de blocage.

De plus l'ouverture qui sera laissée en place au travers du bouchon constitue une **sécurité qui permettra éventuellement la mise en place d'une pompe** si un rabattement du niveau d'ennoyage des travaux miniers était nécessaire suite à l'apparition d'une émergence à un autre endroit que celui initialement prévu (débordement par les remblais du carreau par exemple). Ce pompage serait temporaire et limité à la durée des travaux d'aménagement du point de surverse. Le diamètre minimal à prévoir traversant le bouchon est 300 mm.

Si le mode de surverse retenu est une surverse par la descenderie, on prendra toutes les mesures nécessaires pour que cet ouvrage ne devienne pas également un point de débordement des eaux souterraines. **Un nivellement précis de la tête de l'ouvrage devra être réalisé afin de le comparer avec le niveau du point de déversement de la descenderie.** Une surélévation étanche de quelques décimètres sera réalisée si nécessaire.

3.4.5 Les installations de surface

- Tous les ouvrages débouchant au jour seront fermés définitivement de manière à interdire l'accès à l'exploitation souterraine. Le trop plein minier constituera le seul ouvrage débouchant au jour connecté aux travaux souterrains. Toutefois les mesures prises au niveau de ce point doivent interdire tout accès physique à l'exploitation souterraine.

- **Sur le carreau, une réflexion devra être menée quand aux installations devant être démantelées ou conservées selon les projets de reprise du site.**

- Actuellement le Ferrier est canalisé sous le carreau. En période de crue, les risques de saturation de l'ouvrage sont très faibles voire nuls compte tenu de ses

caractéristiques géométriques (ovoïde T180, dalot (≈ 1 m x 1,5 m)) et du faible débit de pointe du ruisseau (bassin versant amont rural).

Actuellement la présence d'un exploitant permet de maintenir ce réseau en bon état. Avec sa disparition, la surveillance de cet ouvrage n'existera plus. Il convient donc de prévoir une surveillance régulière de cet ouvrage avec les éventuels repreneurs du carreau et/ou la commune, afin que d'éventuels embâcles ne viennent pas remettre en cause le bon fonctionnement de ce réseau.

La remise en section aérienne du ruisseau au droit du carreau nécessiterait d'importants travaux de terrassement et l'aménagement d'une descente d'eau sur le flanc des remblais du carreau, à l'aval du site : elle peut être envisagée si aucun repreneur ne se manifeste pour le site ou si elle est compatible avec l'activité envisagée.

● Les différents mode de surverse proposés permettent tous de faire transiter les eaux issues du trop plein minier vers les trois bassins actuellement utilisés pour le traitement de l'exhaure. **Ces bassins devront donc être conservés de manière à permettre la mise en œuvre d'un traitement des eaux** (dispositif de traitement passif ou station de traitement physico-chimique) si la qualité n'est pas satisfaisante pour permettre un renvoi direct vers le milieu hydraulique superficiel.

De plus a terme ces retenues pourront toujours être utilisées comme réserve si quelqu'un souhaite utiliser cette ressource en eau (arrosage, abreuvage...).

4 CONCLUSIONS

La mine du Burc exploite depuis une cinquantaine d'années un filon de fluorine situé sur la commune de Paulinet (81). Ce filon, de direction générale Est-Ouest, présente une épaisseur comprise entre 2 et 4 m a été reconnu et exploité sur une longueur de 1100 m et sur 235 m de profondeur environ.

A la demande de SOGEREM la présente étude fait le point sur les conséquences de l'arrêt de l'exploitation et de l'exhaure concomitante.

- ***Origine de l'eau dans les travaux miniers***

Actuellement les travaux miniers sont maintenus hors d'eau de manière à permettre l'exploitation. **L'eau qui transite dans la mine a une origine superficielle et provient de l'infiltration d'une partie des eaux météoriques générées sur le bassin versant à l'amont topographique de la zone exploitée** (= bassin versant du Ferrier).

L'analyse des précipitations locales (pluie efficace) et du débit du Ferrier en différents points montre que les volumes d'eau pompés dans la mine correspondent bien au déficit en eau observé au niveau des écoulements superficiels dans la vallée du Ferrier. Actuellement le débit moyen pompé dans la mine s'établit aux alentours de 88 m^3/h (moyenne 1995 – 2005).

Qualitativement ces eaux sont actuellement de bonne qualité car les temps de séjour dans les travaux miniers sont faibles et que le milieu est très majoritairement hors d'eau (eaux rapidement captées par le système d'exhaure de la mine). Le seul traitement mis en œuvre avant le renvoi vers le milieu naturel des eaux d'exhaure est une floculation et une décantation dans trois bassins installés à l'aval du carreau.

Comme démontré ci-dessus, il n'existe pas d'arrivée d'eau profonde d'origine lointaine dans cette mine. Par conséquent, après ennoyage, les écoulements se feront principalement dans la partie superficielle de la mine, sans qu'il ne soit actuellement possible de localiser précisément et avec certitude les écoulements d'eau qui prévaudront. Il apparaît donc illusoire de chercher à réaliser un captage particulier. Une telle partition de la mine en deux réservoirs distincts apparaît par ailleurs difficile à réaliser de façon pratique, tant en raison de l'architecture de la mine que des caractéristiques des épontes, friables et fissurées.

- ***Le réservoir minier***

Les vides artificiels créés par l'extraction du minerai ont été estimés à environ 195 000 m^3. Ce volume prend en compte le vide lié à l'infrastructure minière (galeries – puits) ainsi que les vides contenus dans les remblais occupant les chantiers remblayés.

Pour estimer le volume total du réservoir minier, il convient également de prendre en compte la porosité liée à la fissuration naturelle des terrains au droit de l'exploitation minière. Un estimation très sommaire mais conservatrice du volume potentiel, lié à cette porosité, a montré qu'il pouvait être du même ordre de grandeur que celui lié à l'activité industrielle.

Dans ces conditions, le volume du réservoir minier peut être estimé entre 200 000 et 400 000 m^3.

- ***La phase transitoire de remplissage***

Le remplissage progressif va entraîner une diminution des débits transitant dans l'exploitation souterraine suite à la diminution du gradient hydraulique avec le massif rocheux périphérique. Les apports au réservoir minier passeront suivant le niveau d'ennoyage à de valeurs allant de 88 m^3/h à 15 m^3/h environ.

Le remplissage de la mine sera rapide, et se fera sur une période d'une à deux années environ (si l'on prend en compte la porosité du massif rocheux). Le remplissage se fera jusqu'à ce que le niveau d'eau dans l'exploitation atteigne un point de débordement au jour.

- ***Les possibilités de surverse***

Les possibilités de surverse ont été inventoriées et parmi elles quatre solutions ont été étudiées dans la présente étude. Toutes ces solutions permettent de garantir la bonne évacuation du trop plein minier et de maintenir le réservoir minier à un niveau stable, entre 500 et 508 m NGF environ selon la solution retenue.

Ces surverses se font toutes par l'intermédiaire d'ouvrages préalablement aménagés. Les risques de débordement par un autre point que l'ouvrage finalement retenu sont très faibles. Toutefois si contre toute attente un tel débordement apparaissait, **les mesures préconisées au niveau de la fermeture du puits pourront toujours permettre la réalisation de travaux nécessaires au bon captage des eaux et à leur évacuation vers l'aval** (= possibilité de préserver un pompage temporaire dans le puits).

- ***Caractéristiques du trop plein minier (débit – qualité)***

D'un point de vue **quantitatif**, le débit résiduel du trop plein minier sera de l'ordre de 15 m^3/h environ (avec des valeurs pouvant atteindre 30 m^3/h en période de hautes eaux). En période d'étiage, un tarissement du trop plein minier ne semble pas envisageable compte tenu du rôle tampon joué par les travaux souterrains vis-à-vis de la restitution des eaux d'infiltrations et du régime pluviométrique local généralement régulier.

Une conséquence notable de cette réduction des quantités d'eaux d'exhaure par rapport à la situation actuelle, est que la différence (≈ 70 m^3/h) ne sera plus prélevée et augmentera d'autant le débit du Ferrier dans son bassin versant.

D'un point de vue **qualitatif**, on assistera à une augmentation de la minéralisation totale des écoulements issus des travaux miniers suite au lessivage des minéraux de type sulfures rencontrés dans l'encaissant rocheux. Ce phénomène se traduira par l'augmentation de la teneur en sulfates et en éléments métalliques (Mn, Fe, Cu...) et fluorés. **La qualité prévisionnelle du trop plein minier a fait l'objet d'une modélisation géochimique dans le cadre de l'étude de l'école des mines de paris réalisée en 2003**. Cette étude montre également que cette qualité va progressivement s'améliorer suite au renouvellement du réservoir minier et à l'évacuation du premier flux de lessivage des minéraux. L'installation de conditions stables au niveau de la minéralisation du trop plein minier se fera au bout d'une dizaine d'années.

Au regard du contexte hydrogéologique de la mine du Burc, qui est une mine peu profonde, nous pensons que l'essentiel des apports d'eau à la mine sera constitué d'eaux à forte oxygénation. Aussi, parmi les scénarios envisagés par l'école des Mine sde paris, il convient à notre avis de considérer comme hypothèses les plus probables les compositions suivantes :

	Eau du remplissage initial	***Eau après stabilisation***
pH	≈ 6	7 à 8
Minéralisation totale (mg/l)	Plus. centaines	< 100
Fluorures (mg/l)	40	≈ 10
Sulfates (mg/l)	400 à 500	< 30
Fer (mg/l)	0,005 (*)	< 0,005
Manganèse (mg/l)	60	≈ 0,02
Cuivre (mg/l)	30	≈ 0,4
Aluminium (mg/l)	20	≈ 0,02

(*) Avis CESAME : plusieurs mg/l (les conclusion de l'ENSPM nous paraissent optimistes en ce qui concerne le fer).

Ces prévisions correspondent aux hypothèses les plus pessimistes de l'ENSPM en termes de qualité des rejets.

- *Aménagements possibles visant à l'amélioration de la qualité des eaux*

Les mesures proposées dans le présent rapport ont pour objectif d'essayer d'accélérer l'amélioration générale de la qualité des eaux. Pour cela quelques aménagements au sein de l'exploitation souterraine pourront être réalisées avant la fermeture afin d'essayer de faire en sorte que certaines venues d'eau dans la mine ne transitent pas dans des zones de chantiers où les possibilités d'échangent avec l'encaissant rocheux sont nombreuses compte tenu du mode d'exploitation (tranches montantes remblayées).

L'éventuelle imperméabilisation du lit du Ferrier au droit des travaux miniers, permettrait de limiter le volume d'eau susceptible de se minéraliser en s'infiltrant et

en transitant dans l'exploitation souterraine et de limiter les variations de niveau dans la nappe minière en instaurant un régime aussi stable que possible.

Pour limiter les variations de niveau d'eau dans la mine et préserver la qualité physico-chimique des eaux, il faut également proscrire toute mesure remettant en cause l'évacuation gravitaire du trop plein minier.

Afin de permettre le traitement des eaux si la qualité n'est pas jugée satisfaisante au regard des usages en aval, notamment lors de l'apparition du trop plein minier (période la plus critique d'un point de vue qualitatif), **il sera nécessaire de conserver les trois bassins actuellement utilisés pour le traitement des eaux d'exhaure.** On leur adjoindra en tête un dispositif d'oxygénation rustique de l'eau (type cascade) qui assurera l'oxydation des métaux (avec en priorité le fer) afin de permettre leur piégeage par décantation dans les bassins. Si les teneurs résiduelles restent élevées un dispositif plus complet (avec lagunage par exemple) pourra être envisagé mais ne semble pas nécessaire en première approche.

ANNEXES

Annexe 1 : Calculs ETP
Annexe 2 : Fiche banque hydro – Le Dadou à Paulinet

ETP MONTROC

Calcul par la méthode de Tornthwaite

	MOIS	PLUIE (mm)	TEMP. (°C)	indice i (mm)	ETP (mm)	ETR (mm)	RFU (mm)	Pluie efficace (mm)	Moyenne PE / 3mois (mm)	Q spéc. (l/s/km2)
	JANVIER	97	3,3	0,53	8,40		50,00			
	FEVRIER	166	6,8	1,59	20,13	20,13	50,00	145,87		
	MARS	67	6,1	1,35	21,79	21,79	50,00	45,21	71,23	27,48
	AVRIL	86	9,9	2,81	44,44	44,44	50,00	41,56	60,16	23,21
	MAI	64	13,8	4,65	76,44	76,44	37,56	0,00	21,39	7,99
1995	JUIN	46	15,8	5,71	92,33	83,56	0,00	0,00	6,93	2,67
	JUILLET	13	21,1	8,85	134,68	13,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	AOUT	7	19,7	7,97	114,76	7,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	SEPTEMBRE	205	13,4	4,45	60,77	60,77	50,00	94,23	47,12	18,18
	OCTOBRE	19	15,3	5,44	65,76	65,76	3,24	0,00	31,41	11,73
	NOVEMBRE	98	8,1	2,08	24,87	24,87	39,80	36,57	33,99	13,11
	DECEMBRE	53	5,9	1,28	15,77	15,77	50,00	27,04	25,71	9,60
	JANVIER	115	7,4	1,81	22,44	22,44	50,00	92,56	61,39	22,92
	FEVRIER	97	2,5	0,35	6,01	6,01	50,00	90,99	80,86	32,27
	MARS	64	6,6	1,52	25,01	25,01	50,00	38,99	65,25	24,36
	AVRIL	72	10,2	2,94	47,24	47,24	50,00	24,76	40,54	15,64
	MAI	71	13	4,25	72,32	72,32	48,68	0,00	14,75	5,51
1996	JUIN	64	18	6,95	109,51	109,51	3,17	0,00	4,13	1,59
	JUILLET	41	19,3	7,73	121,10	44,17	0,00	0,00	0,00	0,00
	AOUT	141	18,1	7,01	104,48	104,48	18,26	18,26	9,13	3,41
	SEPTEMBRE	96	13,8	4,65	64,68	64,68	33,67	15,41	13,79	5,32
	OCTOBRE	78	11	3,30	45,88	45,88	49,73	16,06	16,21	6,05
	NOVEMBRE	180	6,3	1,42	20,30	20,30	50,00	159,43	87,63	33,81
	DECEMBRE	119	5,4	1,12	16,12	16,12	50,00	102,88	107,26	40,05
	JANVIER	82	5,3	1,09	16,88	16,88	50,00	65,12	93,42	34,88
	FEVRIER	59	8,1	2,08	27,32	27,32	50,00	31,68	54,69	21,83
	MARS	42	10	2,86	42,98	42,98	49,02	0,00	21,41	7,99
	AVRIL	49	11,1	3,34	53,37	53,37	44,65	0,00	5,28	2,04
	MAI	129	15,2	5,38	87,68	87,68	50,00	35,97	17,99	6,72
1997	JUIN	84	16,5	6,10	99,25	99,25	34,75	0,00	11,99	4,63
	JUILLET	68	18,2	7,07	113,29	102,75	0,00	0,00	6,00	2,24
	AOUT	72	21,5	9,10	128,68	72,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	SEPTEMBRE	25	17,4	6,61	84,45	25,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	OCTOBRE	58	13,9	4,70	56,94	56,94	0,28	0,28	0,14	0,05
	NOVEMBRE	85	8,7	2,31	25,83	25,83	29,86	29,59	14,89	5,74
	DECEMBRE	90	5,3	1,09	12,72	12,72	50,00	57,14	38,48	14,37
	JANVIER	79	5,8	1,25	15,03	15,03	50,00	63,97	55,96	20,89
	FEVRIER	22	8	2,04	23,35	23,35	48,65	0,00	30,85	11,52
	MARS	55	7,8	1,96	28,57	28,57	50,00	25,08	23,20	8,66
	AVRIL	195	8,8	2,35	37,39	37,39	50,00	157,61	87,17	32,54
	MAI	59	14,6	5,07	81,44	81,44	27,56	0,00	56,72	21,18
	JUIN	44	16,8	6,26	99,10	71,56	0,00	0,00	26,27	9,81
1998	JUILLET	71	19,3	7,73	119,22	71,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	AOUT	34	19,8	8,03	115,16	34,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	SEPTEMBRE	100	16	5,82	76,25	76,25	11,88	11,88	5,94	2,22
	OCTOBRE	102	10,8	3,21	43,00	43,00	41,38	29,50	18,71	6,98
	NOVEMBRE	87	4,7	0,91	13,41	13,41	50,00	64,97	44,30	16,54
	DECEMBRE	67	4,4	0,82	11,84	11,84	50,00	55,16	54,15	20,22
	JANVIER	93	4,9	0,97	14,31	14,31	50,00	78,19	68,31	25,50
	FEVRIER	100	2,4	0,33	6,45	6,45	50,00	93,05	81,78	30,53
	MARS	73	7,7	1,92	32,35	32,35	50,00	40,65	64,37	24,03
	AVRIL	134	9,8	2,77	47,10	47,10	50,00	86,90	72,51	27,07
1999	MAI	197	15,6	5,60	92,28	92,28	50,00	104,72	88,10	32,89
	JUIN	23	16,7	6,21	101,84	73,00	0,00	0,00	49,39	18,44
	JUILLET	30	20,5	8,47	131,24	30,00	0,00	0,00	17,45	6,52
	AOUT	56	20,7	8,59	123,35	56,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	SEPTEMBRE	79	17,8	6,84	88,32	79,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	OCTOBRE	96	12,7	4,10	52,46	52,46	21,77	21,77	10,88	4,06
	NOVEMBRE	166	5	1,00	13,78	13,78	50,00	123,99	69,25	25,85
	DECEMBRE	167	3,9	0,69	9,61	9,61	50,00	157,39	123,65	46,17
	JANVIER	25	2,7	0,39	6,50	6,50	50,00	18,50	82,38	30,76
	FEVRIER	101	6,3	1,42	18,52	18,52	50,00	82,48	73,64	27,49
	MARS	41	7,3	1,77	27,85	27,85	50,00	13,15	37,15	13,87
	AVRIL	110	10	2,86	45,49	45,49	50,00	64,51	50,38	18,81
2000	MAI	54	14,9	5,22	85,09	85,09	18,41	0,00	23,69	8,85
	JUIN	142	17,7	6,78	107,06	107,06	35,88	17,47	19,49	7,28
	JUILLET	76	18,2	7,07	112,57	111,88	0,00	0,00	5,82	2,17
	AOUT	44	20,5	8,47	121,53	44,00	0,00	0,00	2,91	1,09
	SEPTEMBRE	51	16,9	6,32	83,06	51,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	OCTOBRE	150	11	3,30	45,06	45,06	50,00	54,94	27,47	10,26
	NOVEMBRE	103	7,7	1,92	24,40	24,40	50,00	78,60	57,61	21,51
	DECEMBRE	57	7,5	1,85	21,96	21,96	50,00	35,04	52,88	19,74
	JANVIER	96	5,1	1,03	13,99	13,99	50,00	82,01	65,78	24,56
	FEVRIER	36	4,7	0,91	12,95	12,95	50,00	23,05	44,70	16,69
	MARS	107	10,5	3,07	43,54	43,54	50,00	63,46	53,08	19,82
	AVRIL	103	8,5	2,23	36,87	36,87	50,00	66,13	58,06	21,68
2001	MAI	94	14,1	4,80	79,22	79,22	50,00	14,78	40,01	14,94
	JUIN	68	17,5	6,66	105,82	105,82	12,18	0,00	15,95	5,95
	JUILLET	42	19,7	7,97	123,41	53,68	0,00	0,00	2,46	0,92
	AOUT	86	20,4	8,41	120,06	86,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	SEPTEMBRE	34	13,8	4,65	64,20	34,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	OCTOBRE	30	16	5,82	69,29	30,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	NOVEMBRE	89	4,7	0,91	12,51	12,51	38,24	38,24	19,12	7,14
	DECEMBRE	44	1,1	0,10	2,04	2,04	50,00	30,20	27,85	10,40
	JANVIER	40	5,7	1,22	16,59	16,59	50,00	23,41	28,15	10,51
	FEVRIER	46	5,7	1,22	16,68	16,68	50,00	29,32	27,50	10,27
	MARS	28	9,1	2,48	37,64	37,64	39,86	0,00	13,68	5,11
	AVRIL	52	10,2	2,94	47,15	47,15	42,04	2,17	5,97	2,23
2002	MAI	101	12,8	4,15	71,03	71,03	50,00	22,01	11,73	4,38
	JUIN	188	18,5	7,25	113,80	113,80	50,00	74,20	44,80	16,73
	JUILLET	64	18,1	7,01	112,12	112,12	1,88	0,00	28,40	10,60
	AOUT	123	18,1	7,01	105,01	105,01	10,87	8,99	16,86	6,30
	SEPTEMBRE	70	15,5	5,55	74,88	74,88	5,99	0,00	3,00	1,12
	OCTOBRE	126	12,7	4,10	54,50	54,50	41,75	35,75	19,37	7,23
	NOVEMBRE	148	8,6	2,27	28,42	28,42	50,00	111,33	67,58	25,23
	DECEMBRE	127	6,6	1,52	18,96	18,96	50,00	108,04	97,09	36,25
	JANVIER	102	2,2	0,29	5,25	5,25	50,00	96,75	102,94	38,44
	FEVRIER	59	2,8	0,42	7,36	7,36	50,00	51,64	76,08	28,40
	MARS	46	9,8	2,77	42,00	42,00	50,00	4,00	35,34	13,19
	AVRIL	37	11,2	3,39	54,01	54,01	32,49	0,00	9,94	3,71
2003	MAI	51	15	5,28	86,30	82,99	0,00	0,00	0,67	0,25
	JUIN	15	22,7	9,88	146,52	14,50	0,00	0,00	0,00	0,00
	JUILLET	5	22,5	9,75	145,17	5,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	AOUT	35	25	11,44	154,90	35,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	SEPTEMBRE	95	17,6	6,72	81,30	81,30	6,85	6,85	3,42	1,28
	OCTOBRE	83	11,2	3,39	39,39	39,39	28,66	21,81	13,19	4,92
	NOVEMBRE	93	9,2	2,52	25,32	25,32	50,00	46,33	31,58	11,79
	DECEMBRE	195	5,2	1,06	10,85	10,85	50,00	184,15	111,15	41,50
	JANVIER	225	3,8	0,66	7,25	7,25	50,00	217,75	177,98	66,45
	FEVRIER	30	5,3	1,09	11,55	11,55	50,00	18,45	112,50	42,00
	MARS	99	6,5	1,49	19,80	19,80	50,00	79,20	82,04	30,63
	AVRIL	137	8,8	2,35	33,90	33,90	50,00	103,10	81,02	30,25
2004	MAI	98	12,9	4,20	65,71	65,71	50,00	32,29	63,71	23,79
	JUIN	19	18,9	7,49	114,16	69,00	0,00	0,00	27,95	10,43
	JUILLET	32	20,3	8,34	127,24	32,00	0,00	0,00	5,38	2,01
	AOUT	97	20,3	8,34	119,64	97,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	SEPTEMBRE	41	17,4	6,61	85,41	41,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	OCTOBRE	123	14,3	4,91	60,10	60,10	31,45	31,45	15,73	5,87
	NOVEMBRE	41	5,8	1,25	16,55	16,55	43,67	12,22	16,60	6,20
	DECEMBRE	116	4,3	0,80	10,86	10,86	50,00	98,81	58,72	21,92
	JANVIER	***53***	***2,8***	0,42	6,71	6,71	50,00	***46,49***	58,22	21,74
	FEVRIER	***38***	***0,6***	0,04	1,04	1,04	50,00	***36,56***	50,24	18,76
	MARS	***50***	***6,9***	1,63	26,73	26,73	50,00	***23,17***	31,52	11,77
	AVRIL	***102***	***10,4***	3,03	48,41	48,41	50,00	***53,89***	40,76	15,22
2005	MAI	***49***	***14,8***	5,17	84,04	84,04	14,96	***0,00***	21,83	8,15
	JUIN	***48***	***20,4***	8,41	127,87	62,96	0,00	***0,00***	8,98	3,35
	JUILLET	***11***	***20,3***	8,34	128,06	10,90	0,00	***0,00***	0,00	0,00
	AOUT	***59***	***18,2***	7,07	104,23	59,00	0,00	***0,00***	0,00	0,00
	SEPTEMBRE			0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	OCTOBRE			0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	NOVEMBRE			0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	DECEMBRE			0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

ETP Paulinet

Calcul par la méthode de Tornthwaite

	MOIS	PLUIE (mm)	TEMP. (°C)	indice i (mm)	ETP (mm)	ETR (mm)	RFU (mm)	Pluie efficace (mm)	Moyenne PE / 3mois (mm)	Q spéc. (l/s/km2)
	JANVIER	110	3,3	0,53	8,40		50,00			
	FEVRIER	187	6,8	1,59	20,13	20,13	50,00	166,57		
	MARS	89	6,1	1,35	21,79	21,79	50,00	67,51	89,28	34,44
	AVRIL	116	9,9	2,81	44,44	44,44	50,00	71,86	86,19	33,25
	MAI	106	13,8	4,65	76,44	76,44	50,00	29,26	49,83	18,61
1995	JUIN	60	15,8	5,71	92,33	92,33	17,67	0,00	21,73	8,38
	JUILLET	33	21,1	8,85	134,68	50,67	0,00	0,00	4,88	1,82
	AOUT	47	19,7	7,97	114,76	47,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	SEPTEMBRE	197	13,4	4,45	60,77	60,77	50,00	86,63	43,32	16,71
	OCTOBRE	25	15,3	5,44	65,76	65,76	9,54	0,00	28,88	10,78
	NOVEMBRE	93	8,1	2,08	24,87	24,87	43,50	33,97	31,42	12,12
	DECEMBRE	139	5,9	1,28	15,77	15,77	50,00	116,44	69,54	25,96
	JANVIER	110	7,4	1,81	22,44	22,44	50,00	87,26	88,10	32,89
	FEVRIER	132	2,5	0,35	6,01	6,01	50,00	126,19	111,59	44,54
	MARS	68	6,6	1,52	25,01	25,01	50,00	43,09	78,15	29,18
	AVRIL	80	10,2	2,94	47,24	47,24	50,00	32,56	51,68	19,94
	MAI	86	13	4,25	72,32	72,32	50,00	13,68	24,87	9,29
1996	JUIN	57	18	6,95	109,51	106,80	0,00	0,00	9,99	3,85
	JUILLET	63	19,3	7,73	121,10	62,90	0,00	0,00	2,28	0,85
	AOUT	123	18,1	7,01	104,48	104,48	9,31	9,31	4,66	1,74
	SEPTEMBRE	120	13,8	4,65	64,68	64,68	37,17	27,86	17,03	6,57
	OCTOBRE	108	11	3,30	45,88	45,88	50,00	49,09	35,38	13,21
	NOVEMBRE	187	6,3	1,42	20,30	20,30	50,00	166,30	104,15	40,18
	DECEMBRE	122	5,4	1,12	16,12	16,12	50,00	106,18	116,70	43,57
	JANVIER	82	5,3	1,09	16,88	16,88	50,00	65,12	95,67	35,72
	FEVRIER	77	8,1	2,08	27,32	27,32	50,00	49,48	64,14	25,60
	MARS	34	10	2,86	42,98	42,98	40,72	0,00	27,35	10,21
	AVRIL	53	11,1	3,34	53,37	53,37	40,65	0,00	8,25	3,18
	MAI	109	15,2	5,38	87,68	87,68	50,00	11,57	5,79	2,16
1997	JUIN	107	16,5	6,10	99,25	99,25	50,00	8,05	7,88	3,04
	JUILLET	62	18,2	7,07	113,29	111,70	0,00	0,00	4,61	1,72
	AOUT	91	21,5	9,10	128,68	90,70	0,00	0,00	1,34	0,50
	SEPTEMBRE	31	17,4	6,61	84,45	31,30	0,00	0,00	0,00	0,00
	OCTOBRE	65	13,9	4,70	56,94	56,94	3,93	3,93	1,96	0,73
	NOVEMBRE	111	8,7	2,31	25,83	25,83	46,31	42,39	22,50	8,68
	DECEMBRE	125	5,3	1,09	12,72	12,72	50,00	108,79	69,18	25,83
	JANVIER	71	5,8	1,25	15,03	15,03	50,00	55,47	71,06	26,53
	FEVRIER	29	8	2,04	23,35	23,35	50,00	5,85	39,55	14,77
	MARS	61	7,8	1,96	28,57	28,57	50,00	32,43	27,41	10,23
	AVRIL	193	8,8	2,35	37,39	37,39	50,00	155,31	89,44	33,39
	MAI	72	14,6	5,07	81,44	81,44	40,06	0,00	57,18	21,35
	JUIN	67	16,8	6,26	99,10	99,10	7,56	0,00	25,89	9,66
1998	JUILLET	72	19,3	7,73	119,22	79,26	0,00	0,00	0,00	0,00
	AOUT	63	19,8	8,03	115,16	62,90	0,00	0,00	0,00	0,00
	SEPTEMBRE	123	16	5,82	76,25	76,25	23,18	23,18	11,59	4,33
	OCTOBRE	106	10,8	3,21	43,00	43,00	50,00	36,07	25,76	9,62
	NOVEMBRE	81	4,7	0,91	13,41	13,41	50,00	67,69	49,73	18,57
	DECEMBRE	59	4,4	0,82	11,84	11,84	50,00	46,76	51,96	19,40
	JANVIER	124	4,9	0,97	14,31	14,31	50,00	109,89	81,81	30,55
	FEVRIER	168	2,4	0,33	6,45	6,45	50,00	161,15	125,00	46,67
	MARS	84	7,7	1,92	32,35	32,35	50,00	52,05	98,05	36,61
	AVRIL	158	9,8	2,77	47,10	47,10	50,00	110,70	99,56	37,17
1999	MAI	218	15,6	5,60	92,28	92,28	50,00	125,62	108,38	40,47
	JUIN	29	16,7	6,21	101,84	78,90	0,00	0,00	60,32	22,52
	JUILLET	34	20,5	8,47	131,24	33,90	0,00	0,00	20,94	7,82
	AOUT	52	20,7	8,59	123,35	51,90	0,00	0,00	0,00	0,00
	SEPTEMBRE	98	17,8	6,84	88,32	88,32	4,89	4,89	2,45	0,91
	OCTOBRE	115	12,7	4,10	52,46	52,46	36,36	31,47	17,36	6,48
	NOVEMBRE	191	5	1,00	13,78	13,78	50,00	163,18	92,89	34,68
	DECEMBRE	194	3,9	0,69	9,61	9,61	50,00	183,89	151,58	56,59
	JANVIER	35	2,7	0,39	6,50	6,50	50,00	28,20	102,59	38,30
	FEVRIER	161	6,3	1,42	18,52	18,52	50,00	142,48	111,29	41,55
	MARS	109	7,3	1,77	27,85	27,85	50,00	81,05	92,72	34,62
	AVRIL	137	10	2,86	45,49	45,49	50,00	91,31	96,42	36,00
2000	MAI	55	14,9	5,22	85,09	85,09	20,11	0,00	43,94	16,41
	JUIN	168	17,7	6,78	107,06	107,06	50,00	30,95	30,69	11,46
	JUILLET	103	18,2	7,07	112,57	112,57	40,33	0,00	10,32	3,85
	AOUT	44	20,5	8,47	121,53	84,63	0,00	0,00	5,16	1,93
	SEPTEMBRE	79	16,9	6,32	83,06	79,40	0,00	0,00	0,00	0,00
	OCTOBRE	167	11	3,30	45,06	45,06	50,00	72,04	36,02	13,45
	NOVEMBRE	141	7,7	1,92	24,40	24,40	50,00	116,50	82,26	30,71
	DECEMBRE	70	7,5	1,85	21,96	21,96	50,00	47,84	74,76	27,91
	JANVIER	121	5,1	1,03	13,99	13,99	50,00	107,01	88,87	33,18
	FEVRIER	41	4,7	0,91	12,95	12,95	50,00	27,65	57,47	21,46
	MARS	178	10,5	3,07	43,54	43,54	50,00	134,06	94,08	35,13
	AVRIL	157	8,5	2,23	36,87	36,87	50,00	120,43	109,51	40,89
2001	MAI	110	14,1	4,80	79,22	79,22	50,00	30,98	77,98	29,11
	JUIN	84	17,5	6,66	105,82	105,82	28,08	0,00	30,40	11,35
	JUILLET	55	19,7	7,97	123,41	82,78	0,00	0,00	5,16	1,93
	AOUT	96	20,4	8,41	120,06	95,60	0,00	0,00	0,00	0,00
	SEPTEMBRE	58	13,8	4,65	64,20	57,70	0,00	0,00	0,00	0,00
	OCTOBRE	35	16	5,82	69,29	35,10	0,00	0,00	0,00	0,00
	NOVEMBRE	89	4,7	0,91	12,51	12,51	38,04	38,04	19,02	7,10
	DECEMBRE	61	1,1	0,10	2,04	2,04	50,00	46,50	35,93	13,42
	JANVIER	60	5,7	1,22	16,59	16,59	50,00	43,31	43,50	16,24
	FEVRIER	127	5,7	1,22	16,68	16,68	50,00	109,92	77,15	28,80
	MARS	26	9,1	2,48	37,64	37,64	38,66	0,00	43,86	16,38
	AVRIL	56	10,2	2,94	47,15	47,15	42,94	4,27	20,46	7,64
2002	MAI	124	12,8	4,15	71,03	71,03	50,00	45,81	24,33	9,08
	JUIN	193	18,5	7,25	113,80	113,80	50,00	79,50	55,73	20,81
	JUILLET	98	18,1	7,01	112,12	112,12	35,78	0,00	34,14	12,75
	AOUT	136	18,1	7,01	105,01	105,01	50,00	16,86	21,68	8,10
	SEPTEMBRE	83	15,5	5,55	74,88	74,88	50,00	8,02	9,63	3,60
	OCTOBRE	153	12,7	4,10	54,50	54,50	50,00	98,60	54,79	20,45
	NOVEMBRE	187	8,6	2,27	28,42	28,42	50,00	158,78	113,60	42,41
	DECEMBRE	132	6,6	1,52	18,96	18,96	50,00	112,54	125,63	46,91
	JANVIER	117	2,2	0,29	5,25	5,25	50,00	111,95	119,95	44,79
	FEVRIER	87	2,8	0,42	7,36	7,36	50,00	79,64	95,90	35,80
	MARS	69	9,8	2,77	42,00	42,00	50,00	27,40	58,90	21,99
	AVRIL	66	11,2	3,39	54,01	54,01	50,00	12,29	28,55	10,66
2003	MAI	66	15	5,28	86,30	86,30	29,90	0,00	8,66	3,23
	JUIN	16	22,7	9,88	146,52	45,80	0,00	0,00	2,05	0,76
	JUILLET	8	22,5	9,75	145,17	8,40	0,00	0,00	0,00	0,00
	AOUT	44	25	11,44	154,90	44,30	0,00	0,00	0,00	0,00
	SEPTEMBRE	105	17,6	6,72	81,30	81,30	11,60	11,60	5,80	2,17
	OCTOBRE	106	11,2	3,39	39,39	39,39	45,11	33,51	20,62	7,70
	NOVEMBRE	112	9,2	2,52	25,32	25,32	50,00	81,88	54,04	20,18
	DECEMBRE	232	5,2	1,06	10,85	10,85	50,00	220,75	143,25	53,48
	JANVIER	258	3,8	0,66	7,25	7,25	50,00	250,95	212,71	79,42
	FEVRIER	27	5,3	1,09	11,55	11,55	50,00	15,45	128,17	47,85
	MARS	107	6,5	1,49	19,80	19,80	50,00	86,90	90,43	33,76
	AVRIL	153	8,8	2,35	33,90	33,90	50,00	119,50	91,29	34,08
2004	MAI	134	12,9	4,20	65,71	65,71	50,00	68,19	88,41	33,01
	JUIN	15	18,9	7,49	114,16	64,50	0,00	0,00	42,65	15,92
	JUILLET	35	20,3	8,34	127,24	34,50	0,00	0,00	11,36	4,24
	AOUT	102	20,3	8,34	119,64	101,90	0,00	0,00	0,00	0,00
	SEPTEMBRE	63	17,4	6,61	85,41	63,40	0,00	0,00	0,00	0,00
	OCTOBRE	126	14,3	4,91	60,10	60,10	32,75	32,75	16,38	6,11
	NOVEMBRE	54	5,8	1,25	16,55	16,55	50,00	19,80	20,82	7,77
	DECEMBRE	124	4,3	0,80	10,86	10,86	50,00	113,54	68,83	25,70
	JANVIER	101	2,8	0,42	6,71	6,71	50,00	94,09	88,19	32,93
	FEVRIER	72	0,6	0,04	1,04	1,04	50,00	71,36	85,97	32,10
	MARS	51	6,9	1,63	26,73	26,73	50,00	24,17	51,55	19,25
	AVRIL	90	10,4	3,03	48,41	48,41	50,00	41,19	40,55	15,14
2005	MAI	66	14,8	5,17	84,04	84,04	32,06	0,00	17,76	6,63
	JUIN	57	20,4	8,41	127,87	88,56	0,00	0,00	6,87	2,56
	JUILLET	21	20,3	8,34	128,06	20,60	0,00	0,00	0,00	0,00
	AOUT	84	18,2	7,07	104,23	84,30	0,00	0,00	0,00	0,00
	SEPTEMBRE			0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	OCTOBRE			0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	NOVEMBRE			0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	DECEMBRE			0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

ETP BASTIDES SOLAGES

Calcul par la méthode de Tornthwaite

	MOIS	PLUIE (mm)	TEMP. (°C)	indice i (mm)	ETP (mm)	ETR (mm)	RFU (mm)	Pluie efficace (mm)	Moyenne PE / 3mois (mm)	Q spéc. (l/s/km2)
	JANVIER	90	5,1	1,03	11,30		50,00			
	FEVRIER	163	8,6	2,27	27,18	27,18	50,00	135,32		
	MARS	78	7,5	1,85	28,38	28,38	50,00	49,82	70,02	27,01
	AVRIL	93	11,5	3,53	53,82	53,82	50,00	39,28	58,80	22,68
	MAI	55	15,1	5,33	85,77	85,77	19,43	0,00	21,40	7,99
1995	JUIN	63	17,7	6,78	106,75	82,03	0,00	0,00	6,55	2,53
	JUILLET	31	22,8	9,95	148,71	31,40	0,00	0,00	0,00	0,00
	AOUT	27	21,3	8,97	126,80	27,20	0,00	0,00	0,00	0,00
	SEPTEMBRE	168	15,6	5,60	73,80	73,80	47,00	47,00	23,50	9,07
	OCTOBRE	23	17,3	6,55	76,95	69,50	0,00	0,00	15,67	5,85
	NOVEMBRE	93	9,5	2,64	30,49	30,49	31,15	31,15	23,41	9,03
	DECEMBRE	124	7,2	1,74	20,34	20,34	50,00	85,02	52,89	19,75
	JANVIER	107	9,4	2,60	25,91	25,91	50,00	80,99	74,03	27,64
	FEVRIER	131	4,8	0,94	10,44	10,44	50,00	120,36	101,34	40,45
	MARS	55	8,7	2,31	29,68	29,68	50,00	25,72	66,48	24,82
	AVRIL	82	12	3,76	51,15	51,15	50,00	30,85	44,06	17,00
	MAI	73	15,2	5,38	80,36	80,36	42,54	0,00	14,57	5,44
1996	JUIN	46	19,9	8,10	118,78	88,64	0,00	0,00	5,14	1,98
	JUILLET	58	21,1	8,85	130,79	57,90	0,00	0,00	0,00	0,00
	AOUT	127	20	8,16	113,19	113,19	6,90	6,90	3,45	1,29
	SEPTEMBRE	83	15,4	5,49	68,00	68,00	14,41	7,50	6,05	2,33
	OCTOBRE	79	13,2	4,35	51,26	51,26	28,32	13,92	10,61	3,96
	NOVEMBRE	185	8,5	2,23	24,10	24,10	50,00	139,02	75,40	29,09
	DECEMBRE	126	7,5	1,85	19,28	19,28	50,00	106,72	102,02	38,09
	JANVIER	79	7,1	1,70	19,17	19,17	50,00	59,33	88,41	33,01
	FEVRIER	80	9,2	2,52	26,82	26,82	50,00	53,08	64,10	25,58
	MARS	8	11,1	3,34	42,58	42,58	15,72	0,00	27,58	10,30
	AVRIL	37	12,5	4,00	55,00	52,32	0,00	0,00	8,85	3,41
	MAI	91	17,1	6,43	95,09	91,10	0,00	0,00	0,00	0,00
1997	JUIN	106	18,7	7,37	110,06	106,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	JUILLET	46	20,3	8,34	124,71	45,90	0,00	0,00	0,00	0,00
	AOUT	99	23,2	10,21	139,06	98,50	0,00	0,00	0,00	0,00
	SEPTEMBRE	30	19,2	7,67	90,91	30,20	0,00	0,00	0,00	0,00
	OCTOBRE	64	15,5	5,55	60,08	60,08	1,91	1,91	0,95	0,36
	NOVEMBRE	95	10,7	3,16	29,19	29,19	34,56	32,66	16,96	6,54
	DECEMBRE	139	7	1,66	14,78	14,78	50,00	108,79	65,60	24,49
	JANVIER	82	7,3	1,77	16,52	16,52	50,00	65,28	74,34	27,76
	FEVRIER	34	9,3	2,56	23,99	23,99	50,00	10,11	44,94	16,78
	MARS	53	9,5	2,64	31,18	31,18	50,00	21,52	25,01	9,34
	AVRIL	207	11,1	3,34	43,54	43,54	50,00	163,26	90,49	33,78
	MAI	43	17	6,38	91,76	91,76	1,04	0,00	58,01	21,66
	JUIN	61	19,2	7,67	111,28	62,24	0,00	0,00	27,21	10,16
1998	JUILLET	45	21,6	9,16	133,00	44,70	0,00	0,00	0,00	0,00
	AOUT	62	21,5	9,10	123,43	62,30	0,00	0,00	0,00	0,00
	SEPTEMBRE	115	18,3	7,13	84,69	84,69	14,90	14,90	7,45	2,78
	OCTOBRE	105	13,4	4,45	49,67	49,67	42,67	27,77	18,85	7,04
	NOVEMBRE	85	6,4	1,45	15,15	15,15	50,00	62,42	42,95	16,04
	DECEMBRE	48	5,3	1,09	11,19	11,19	50,00	36,81	43,84	16,37
	JANVIER	110	6,7	1,56	16,45	16,45	50,00	93,85	69,60	25,99
	FEVRIER	100	5,1	1,03	11,82	11,82	50,00	88,58	81,71	30,51
	MARS	66	9,5	2,64	34,69	34,69	50,00	31,61	60,97	22,77
	AVRIL	114	12,1	3,81	52,88	52,88	50,00	60,82	55,71	20,80
1999	MAI	154	17,6	6,72	99,83	99,83	50,00	54,57	52,83	19,72
	JUIN	23	18,6	7,31	109,76	73,30	0,00	0,00	28,33	10,58
	JUILLET	32	21,7	9,23	136,96	32,20	0,00	0,00	9,09	3,40
	AOUT	77	21,9	9,36	128,94	77,20	0,00	0,00	0,00	0,00
	SEPTEMBRE	104	19,6	7,91	95,38	95,38	4,06	4,06	2,03	0,76
	OCTOBRE	90	14,6	5,07	57,26	57,26	20,38	16,32	9,51	3,55
	NOVEMBRE	205	7,2	1,74	17,85	17,85	50,00	157,23	84,73	31,64
	DECEMBRE	125	5,4	1,12	11,27	11,27	50,00	113,63	111,94	41,80
	JANVIER	25	4,2	0,77	8,49	8,49	50,00	16,11	72,13	26,93
	FEVRIER	105	8,1	2,08	21,24	21,24	50,00	83,66	66,14	24,69
	MARS	89	9,2	2,52	31,74	31,74	50,00	57,66	59,40	22,18
	AVRIL	124	12,3	3,91	52,61	52,61	50,00	71,59	68,96	25,75
2000	MAI	62	17	6,38	94,06	94,06	17,94	0,00	33,47	12,50
	JUIN	145	19,7	7,97	117,37	117,37	31,81	13,86	18,86	7,04
	JUILLET	85	19,4	7,79	116,59	116,59	0,51	0,00	4,62	1,73
	AOUT	36	22	9,42	129,41	36,81	0,00	0,00	2,31	0,86
	SEPTEMBRE	75	18,6	7,31	88,87	74,50	0,00	0,00	0,00	0,00
	OCTOBRE	122	13,3	4,40	51,19	51,19	35,26	35,26	17,63	6,58
	NOVEMBRE	105	9,8	2,77	28,11	28,11	50,00	62,24	42,87	16,01
	DECEMBRE	54	9,1	2,48	23,53	23,53	50,00	29,97	41,61	15,54
	JANVIER	93	7,1	1,70	17,04	17,04	50,00	75,76	58,25	21,75
	FEVRIER	35	6,6	1,52	15,72	15,72	50,00	19,18	39,84	14,87
	MARS	112	12,3	3,91	46,81	46,81	50,00	65,49	51,76	19,33
	AVRIL	127	10,7	3,16	42,45	42,45	50,00	84,75	67,40	25,16
2001	MAI	84	16,1	5,87	86,41	86,41	47,39	0,00	39,16	14,62
	JUIN	87	19	7,55	111,56	111,56	22,73	0,00	14,12	5,27
	JUILLET	72	21,1	8,85	130,01	95,03	0,00	0,00	0,00	0,00
	AOUT	49	21,6	9,16	125,22	48,60	0,00	0,00	0,00	0,00
	SEPTEMBRE	42	15,8	5,71	70,16	42,40	0,00	0,00	0,00	0,00
	OCTOBRE	40	17,2	6,49	71,17	40,20	0,00	0,00	0,00	0,00
	NOVEMBRE	54	6,6	1,52	15,61	15,61	18,94	18,94	9,47	3,54
	DECEMBRE	32	2,5	0,35	4,03	4,03	32,93	13,99	13,31	4,97
	JANVIER	41	6,2	1,38	15,12	15,12	45,62	12,69	14,16	5,29
	FEVRIER	109	8	2,04	21,59	21,59	50,00	83,13	48,13	17,97
	MARS	23	10,8	3,21	41,24	41,24	31,86	0,00	29,83	11,14
	AVRIL	37	11,7	3,62	50,28	50,28	18,98	0,00	13,86	5,17
2002	MAI	68	14,7	5,12	78,29	78,29	9,09	0,00	0,00	0,00
	JUIN	139	20,1	8,22	122,11	122,11	17,59	8,49	4,25	1,59
	JUILLET	66	20,2	8,28	124,22	83,99	0,00	0,00	2,83	1,06
	AOUT	96	20,1	8,22	115,23	96,00	0,00	0,00	1,42	0,53
	SEPTEMBRE	96	17,1	6,43	79,68	79,68	7,96	7,96	3,98	1,49
	OCTOBRE	138	14,6	5,07	59,32	59,32	47,35	39,39	22,35	8,34
	NOVEMBRE	111	10,6	3,12	32,02	32,02	50,00	76,43	52,67	19,67
	DECEMBRE	78	8,3	2,15	21,00	21,00	50,00	57,20	60,64	22,64
	JANVIER	91	3,9	0,69	7,78	7,78	50,00	83,22	73,41	27,41
	FEVRIER	75	4,8	0,94	10,85	10,85	50,00	63,65	69,10	25,80
	MARS	31	10,9	3,25	41,88	41,88	38,62	0,00	35,09	13,10
	AVRIL	43	12,6	4,05	55,89	55,89	25,53	0,00	10,61	3,96
2003	MAI	51	16,3	5,98	89,30	76,63	0,00	0,00	0,00	0,00
	JUIN	8	24,3	10,95	158,10	7,80	0,00	0,00	0,00	0,00
	JUILLET	10	23,2	10,21	148,23	10,10	0,00	0,00	0,00	0,00
	AOUT	28	25,5	11,78	157,68	27,90	0,00	0,00	0,00	0,00
	SEPTEMBRE	101	18,7	7,37	84,37	84,37	8,21	8,21	4,11	1,53
	OCTOBRE	91	12,9	4,20	43,84	43,84	31,99	23,78	14,63	5,46
	NOVEMBRE	84	10,7	3,16	28,03	28,03	50,00	38,36	28,48	10,63
	DECEMBRE	149	6,8	1,59	13,45	13,45	50,00	135,65	84,57	31,58
	JANVIER	205	5,8	1,25	10,94	10,94	50,00	194,46	148,84	55,57
	FEVRIER	18	6,1	1,35	11,85	11,85	50,00	6,25	90,55	33,81
	MARS	96	8	2,04	22,95	22,95	50,00	73,05	71,02	26,51
	AVRIL	128	10,9	3,25	40,87	40,87	50,00	87,33	69,06	25,78
2004	MAI	89	14,7	5,12	72,88	72,88	50,00	16,22	49,40	18,44
	JUIN	26	20,2	8,28	120,74	75,50	0,00	0,00	19,96	7,45
	JUILLET	24	21,4	9,04	132,94	24,10	0,00	0,00	2,70	1,01
	AOUT	83	21,4	9,04	124,90	82,90	0,00	0,00	0,00	0,00
	SEPTEMBRE	26	18,8	7,43	90,37	26,30	0,00	0,00	0,00	0,00
	OCTOBRE	96	16,2	5,93	66,18	66,18	15,11	15,11	7,56	2,82
	NOVEMBRE	30	7,5	1,85	19,42	19,42	20,20	5,09	7,58	2,83
	DECEMBRE	107	6,1	1,35	13,91	13,91	50,00	62,89	35,66	13,31
	JANVIER	53	4,9	0,97	10,86	10,86	50,00	42,34	42,98	16,05
	FEVRIER	38	3	0,46	5,73	5,73	50,00	31,87	40,53	15,13
	MARS	50	8,3	2,15	28,87	28,87	50,00	21,03	28,19	10,53
	AVRIL	102	12,1	3,81	52,92	52,92	50,00	49,38	37,01	13,82
2005	MAI	49	16,1	5,87	87,93	87,93	11,07	0,00	19,97	7,45
	JUIN	48	21,6	9,16	134,33	59,07	0,00	0,00	8,23	3,07
	JUILLET	11	21,7	9,23	136,18	10,90	0,00	0,00	0,00	0,00
	AOUT	59	19,9	8,10	112,56	59,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	SEPTEMBRE			0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	OCTOBRE			0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	NOVEMBRE			0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	DECEMBRE			0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

LE DADOU A PAULINET [ST-JEAN-DE-JEANNE]

Zone hydrographique : O4704030 Bassin versant : 72 km²

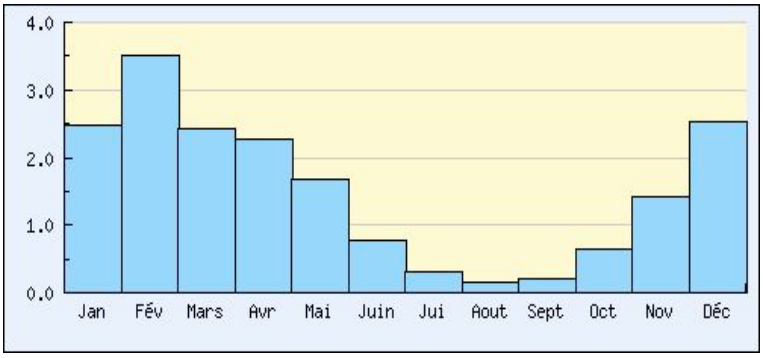
Producteur : DIREN Midi-Pyrenees E-mail : jean-luc.le-rohellec@midi-pyrenees.ecologie.gouv.fr

SYNTHESE	donnees hydrologiques de synthese (1968 - 2005) Calculees le 02/12/2005; Intervalle de confiance : 95 %; utilisation des stations anterieures

écoulements mensuels (naturels)

donnees calculees sur 38 ans

	janv.	fév.	mars	avr.	mai	juin	juil.	août	sept.	oct.	nov.	déc.	Année
Débits (m3/s)	2.470 #	3.500 #	2.420 #	2.280	1.670 !	0.776 !	0.300	0.162 #	0.213 #	0.648	1.430 #	2.520 #	1.520
Qsp (l/s/km2)	34.3 #	48.6 #	33.5 #	31.6	23.3 !	10.8 !	4.2	2.3 #	3.0 #	9.0	19.8 #	35.0 #	21.1
Lame d'eau (mm)	91 #	121 #	89 #	82	62 !	27 !	11	6 #	7 #	24	51 #	93 #	669



modules interannuels (loi de Gauss - septembre a aout)

donnees calculees sur 38 ans

module (moyenne)
1.520 [1.390;1.650]

fréquence	quinquennale sèche	médiane	quinquennale humide
debits (m3/s)	1.200 [1.000;1.300]	1.500 [1.200;1.900]	1.900 [1.800;2.100]

basses eaux (loi de Galton - janvier a decembre)

donnees calculees sur 38 ans

fréquence	VCN3 (m3/s)	VCN10 (m3/s)	QMNA (m3/s)
biennale	0.054 [0.044;0.066]	0.061 [0.050;0.075]	0.100 [0.083;0.130]
quinquennale sèche	0.032 [0.025;0.039]	0.036 [0.028;0.044]	0.056 [0.043;0.071]

crues (loi de Gumbel - septembre a aout)

donnees calculees sur 35 ans

fréquence	QJ (m3/s)	QIX (m3/s)
biennale	21.00 [19.00;24.00]	32.00 [28.00;37.00]
quinquennale	31.00 [27.00;36.00]	49.00 [43.00;59.00]
décennale	37.00 [33.00;44.00]	60.00 [53.00;74.00]
vicennale	43.00 [38.00;52.00]	71.00 [62.00;88.00]
cinquantennale	50.00 [44.00;62.00]	85.00 [74.00;110.0]
centennale	non calculé	non calculé

maximums connus (par la banque HYDRO)

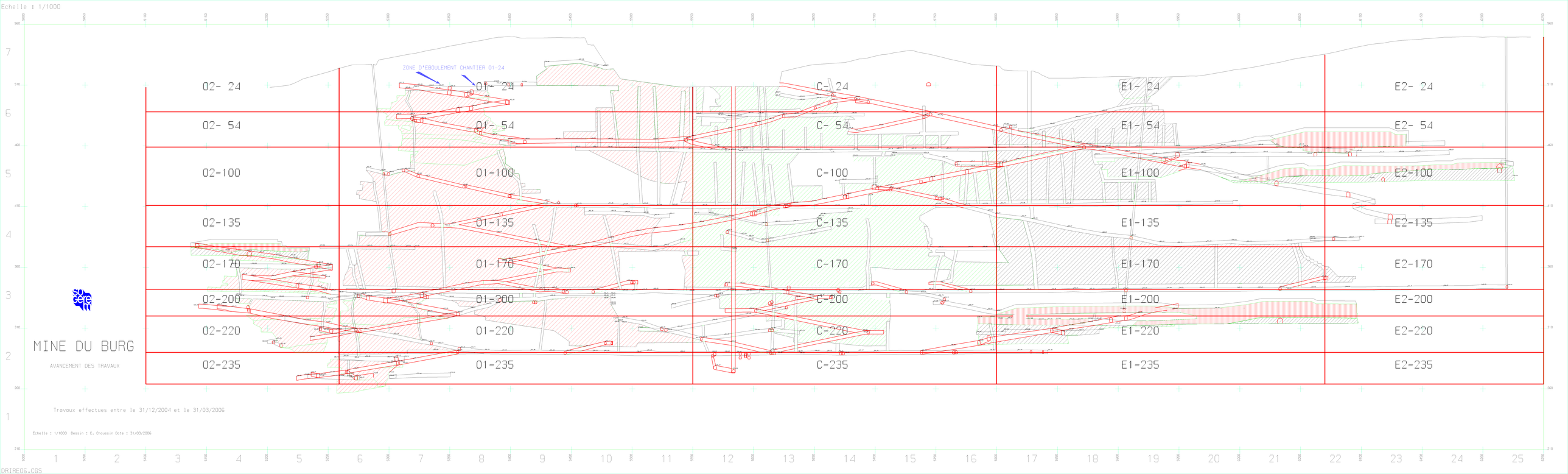
hauteur maximale instantanee (cm)	305	14 decembre 1981 01:50
debit instantane maximal (m3/s)	81.90 #	14 decembre 1981 01:50
debit journalier maximal (m3/s)	44.70 #	17 decembre 1979

débits classés

donnees calculees sur 13045 jours

fréquence	0.99	0.98	0.95	0.90	0.80	0.70	0.60	0.50	0.40	0.30	0.20	0.10	0.05	0.02	0.01
debit (m3/s)	10.80	7.770	5.060	3.560	2.300	1.610	1.120	0.759	0.483	0.268	0.152	0.080	0.051	0.037	0.028

Echelle : 1/1000



MINE DU BURG

AVANCEMENT DES TRAVAUX

Travaux effectues entre le 31/12/2004 et le 31/03/2006

Echelle : 1/1000 Dessin : C. Chaussin Date : 31/03/2006

ORIREO6.CGS

605500 605600 605700 605800

174900 174800

Nord

O E

S

540.00 530.00 525.00 520.00 515.00 540.00 548.00 545.00 535.00 530.00 545.00 540.00 530.00 535.00 539.00 533.24 534.00 513.85 505.59 516.20 520.00 523.95 520.41 517.00 510.98 527.29

HANGAR
COMPRESSEUR
GROUPE
TRANFORMATEUR
ATELIERS
20 000 VOLTS
HUILE
MENUISERIE
TREUIL
ANCIEN REFECTOIRE
EAU D'EXHAURE
ENTREE MINE
RESERVOIR EAU
BOX PRODUITS MARCHAND
RAMPE
CONCASSAGE
FOSSE SEPTIQUE
FUEL
BUREAUX
AMORCES
PARKING
RALENTISSEUR
EAU DE SOURCE
CRIBLE
USINE
RAMPE
HANGAR SECHAGE
BASCULE
AIRE DE LAVAGE
BASSIN FERRIE
HANGAR
FERRIE
HANGARS
HANGAR

605250 605500 605750 606000

175250 175000 174750

Nord

BASSIN D

POUDRIERE

VENTILATEUR

ROUTE D'ACCES

PORTAIL

BASSIN N.3

BASSIN N.2

BUREAUX

PARKING

FUEL

COMPRESSEUR

STOCKAGE

TREUIL

RAMPE

USINE

BASSIN FERRIE

FERRIE

STOCK FERRAILLE

MINE DU BURG

PLAN DE SITUATION DES RESEAUX AU 31/03/2006

ECHELLE : 1/2500 DESSIN : CHAUSSIN C. DATE : 31/03/2006

i2500jf1.CGS DATE : 14/02/06 Echelle=1/2500

605250 605500 605750 606000

175250 175000 174750

Nord

O E

S

MINE DU BURG

PLAN DE PROJET DES RESEAUX HYDRAULIQUES au 31/12/2006

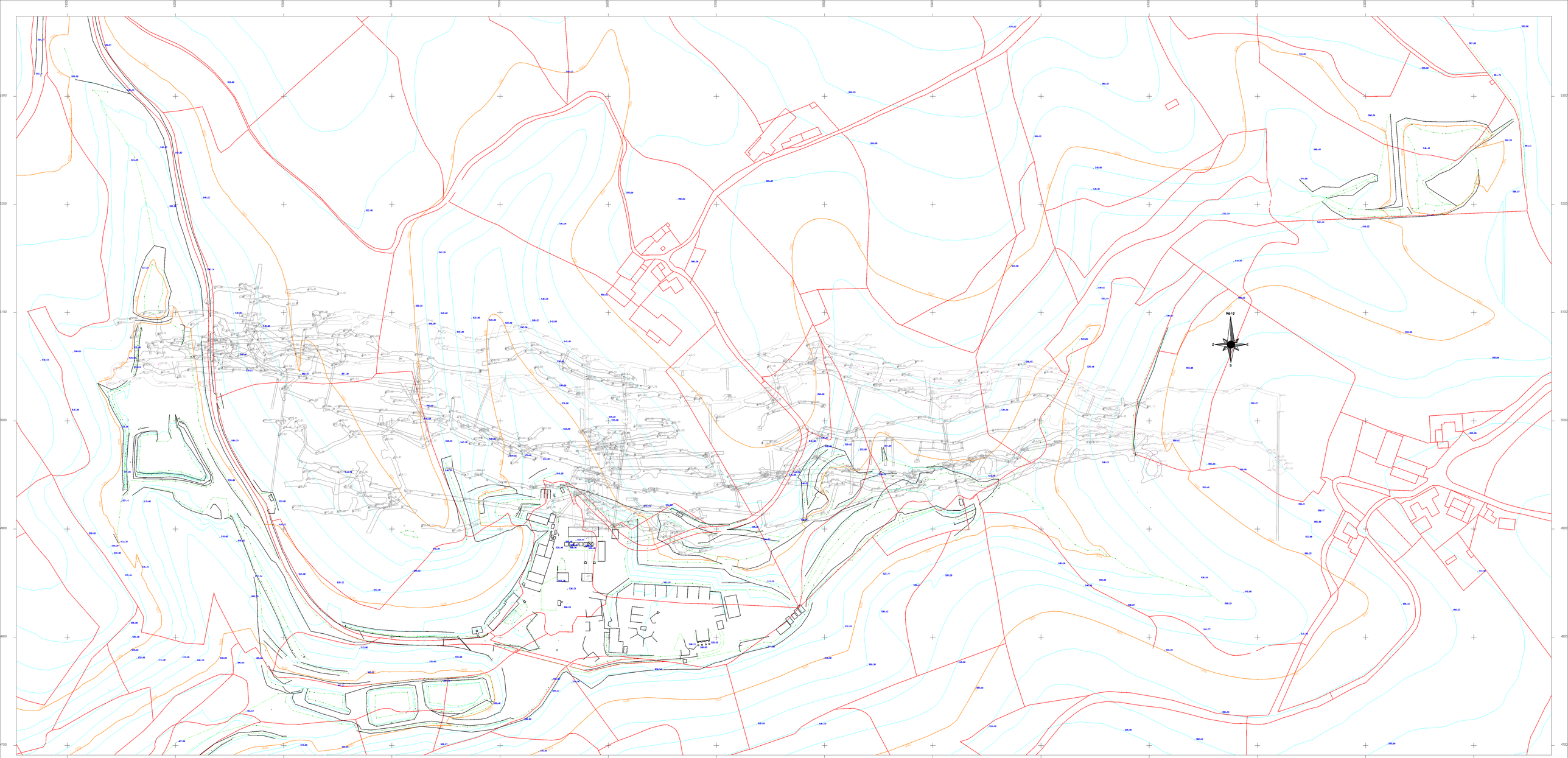
ECHELLE : 1/2500 DESSIN : CHAUSSIN C. DATE : 31/03/2006

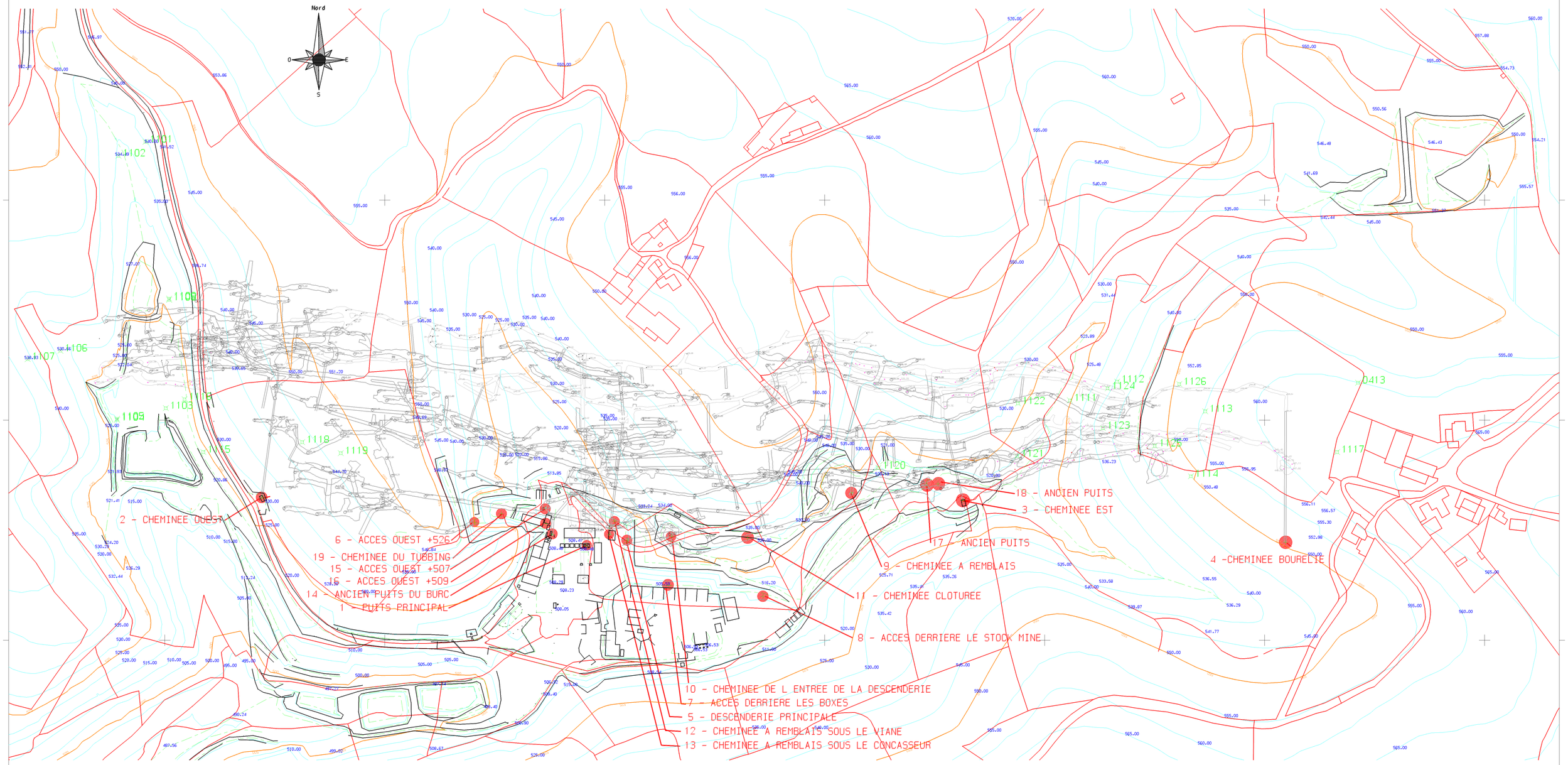
I2500JF4.CGS DATE : 16/02/06 Echelle=1/2500

605000
605500
606000
606500
175500
175000
174500

AM31
AM32
AM33
AM25
AM26
AM37
AM36
AM30
AM34
AM27
AM35
AM29
AM28
AS50
AS51
AS52
AS107
AS47
AS48
AS53
AS105
AS55
AS37
AS38
AS45
AS106
AS103
AS36
AS35
AS33
AS42
AS41
AS104
AS101
AS102
AS32
AS31
AS57
AS60
AS58
AS30
AS59
AS26
AS62
AN49
AN53
AN50
AN47
AN52
AN54
AN51
AN55
AN60
AN48
AN46
AN37
AN45
AN38
AN39
AN36
AN43
AN44
AN97
AN42
AN99
AN96
AN40
AN41
AN35
AN95
AN94
AN106
AN56
AN57
AN58
AN59
AN116
AN118
AN119
AN120
AN67
AN68
AN69
AN111
AN66
AN70
AN71
AN65
AN72
AN73
AN63

¡5000jf3.CGS DATE : 06/12/05 Echelle=1/5000


Nord
O
E
S


Nord
O
E
S
2 - CHEMINEE OUEST
6 - ACCES OUEST +526
19 - CHEMINEE DU TUBBING
15 - ACCES OUEST +507
16 - ACCES OUEST +509
14 - ANCIEN PUITS DU BURC
1 - PUITS PRINCIPAL
18 - ANCIEN PUITS
3 - CHEMINEE EST
17 - ANCIEN PUITS
9 - CHEMINEE A REMBLAIS
11 - CHEMINEE CLOTUREE
8 - ACCES DERRIERE LE STOCK MINE
4 -CHEMINEE BOURELIE
10 - CHEMINEE DE L ENTREE DE LA DESCENDERIE
7 - ACCES DERRIERE LES BOXES
5 - DESCENDERIE PRINCIPALE
12 - CHEMINEE A REMBLAIS SOUS LE VIANE
13 - CHEMINEE A REMBLAIS SOUS LE CONCASSEUR
1101
1102
1103
1104
1105
1106
1107
1108
1109
1110
1111
1112
1113
1114
1115
1116
1117
1118
1119
1120
1121
1122
1123
1124
1125
1126
0413

Déclaration d'arrêt définitif de Travaux Miniers
Mine du Burc, Paulinet, Tarn

SOGEREM

Annexe 7.1

Plan de masse du carreau **1/2500**

Situation à l'arrêt des travaux miniers.
Etat des réseaux hydrauliques de surface à l'arrêt des travaux,
Etat de la verse à stériles à l'arrêt des travaux

Déclaration d'arrêt définitif de Travaux Miniers
Mine du Burc, Paulinet, Tarn

SOGEREM

Annexe 7.2

Plan de masse du carreau **1/1000**

Situation à l'arrêt des travaux miniers.
Dénomination des bâtiments

Déclaration d'arrêt définitif de Travaux Miniers
Mine du Burc, Paulinet, Tarn

SOGEREM

Annexe 7.3

Plan de masse du carreau **1/2500**

Avant-projet de réaménagement des réseaux hydrauliques
Avant-projet de réaménagement de la verse à stériles

Déclaration d'arrêt définitif de Travaux Miniers
Mine du Burc, Paulinet, Tarn

SOGEREM

Annexe 7.4

Parcellaire cadastral **1/5000**

Déclaration d'arrêt définitif de Travaux Miniers
Mine du Burc, Paulinet, Tarn

SOGEREM

Annexe 7.5

Plan des Travaux Souterrains **1/1000**
Situation à l'arrêt des travaux miniers.

Déclaration d'arrêt définitif de Travaux Miniers
Mine du Burc, Paulinet, Tarn

SOGEREM

Annexe 7.6

Coupe E-W des Travaux Souterrains **1/1000**
Situation à l'arrêt des travaux miniers.
Zones remblayées

Déclaration d'arrêt définitif de Travaux Miniers
Mine du Burc, Paulinet, Tarn

SOGEREM

Annexe 7.7

Plan de superposition fond et surface **1/2000**
Situation à l'arrêt des travaux miniers.
Implantation des sondages
Implantation des accès au fond

7.1 Légende

. courbe de niveau (équidist. = 5 m)
. limite de parcelle cadastrale
. linéament singulier ; haut de talus ; élément de bâti
. fossé ; thalweg ; pied de talus
. Le Ferrier (ruisseau)
. buse enterrée (Ferrier ; collecte ruissellement carreau)
. eaux d'exhaure (enterrée)
. poteau électrique, ligne aérienne ou enterrée
. réverbère d'éclairage
. bâtiments

Echelle : 1/2500 dessiné par : C CHAUSSIN
vérifié par : JF DURAND-SMET

7.2 Légende

. courbe de niveau (équidist. = 5 m)
. limite de parcelle cadastrale
. linéament singulier ; haut de talus ; élément de bâti
. fossé ; thalweg ; pied de talus
. haut de talus
. eaux d'exhaure (enterrée)
. poteau électrique, ligne aérienne ou enterrée
. réverbère d'éclairage
. bâtiments
. espace engazonné

Echelle : 1/1000 dessiné par : C CHAUSSIN
vérifié par : JF DURAND-SMET

7.3 Légende

. courbe de niveau (équidist. = 5 m)
. limite de parcelle cadastrale
. linéament singulier ; haut de talus ; élément de bâti
. fossé ; thalweg ; pied de talus
. Le Ferrier (ruisseau)
. buse enterrée (Ferrier ; collecte ruissellement carreau)
. eaux d'exhaure (enterrée)
. poteau électrique, ligne aérienne ou enterrée
. réverbère d'éclairage
. bâtiments

Echelle : 1/2500 dessiné par : C CHAUSSIN
vérifié par : JF DURAND-SMET

7.4 Légende

. courbe de niveau (équidist. = 5 m)
. linéament singulier ; haut de talus ; élément de bâti
. limite de parcelle cadastrale
. référence de parcelle

Echelle : 1/5000 dessiné par : C CHAUSSIN
vérifié par : JF DURAND-SMET

7.5 Légende

. galerie : infrastructure ; voie de niveau ; travers-banc

-342,33 cote en couronne de galerie (NGF)

. cheminée ou couloir

. puits

Echelle : 1/1000 dessiné par : C CHAUSSIN
vérifié par : JF DURAND-SMET

7.6 Légende

E1-220 dénomination du chantier

. . infrastructure d'accès

. . voie de niveau (=voie de tête)
. zone remblayée
. cheminée
. stot
. voie de niveau (= voie de base)

Echelle : 1/1000 dessiné par : C CHAUSSIN
vérifié par : JF DURAND-SMET

7.7 Légende

. courbe de niveau (équidist. = 5 m)
. courbe de niveau principale (équidist. =25m)
. limite de parcelle cadastrale
. linéament singulier ; haut de talus ; élément de bâti
. fossé ; thalweg ; pied de talus

. ouvrage souterrain . .
. accès souterrain. .
. sondage de reconnaissance géologique .
. . . .
. . . .

Echelle : 1/2000 dessiné par : C CHAUSSIN
vérifié par : JF DURAND-SMET

7.5 Légende (suite)

Chantiers récemment exploités et leurs recoupes d'accès :

. O2-170 , E1-135

. E2-100 , E1-220 (et niveau 220et travers-banc 220)

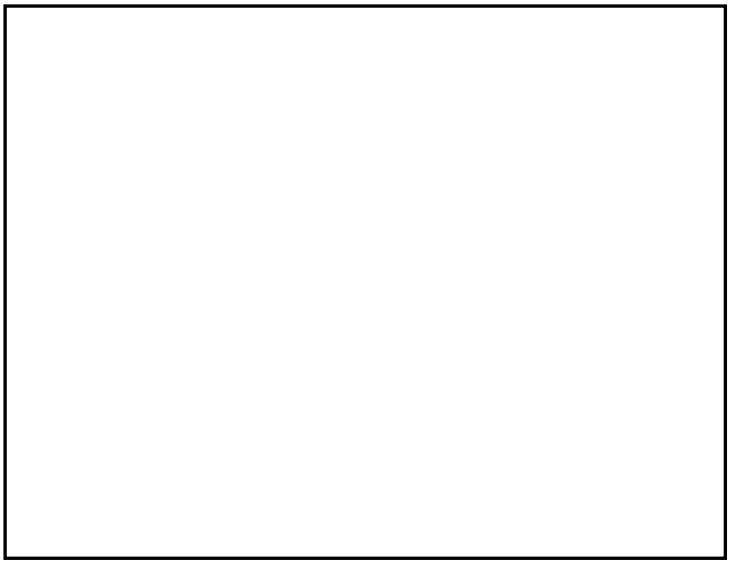
. E1-54 (exploité en 2004 – 2006)

. E1-54 (exploitation antérieure à 1980)

Entrée de la descenderie principale

Entrée de la descenderie principale

Entrée de la descenderie principale



Dossier de déclaration d'arrêt définitif de Travaux Miniers

Concession du Burc, Paulinet, Tarn

(art 91 du Code Minier)

SOGEREM

version V3 du 28 04 2006 (Avril 2006)

Références réglementaires et méthodologiques

Le présent dossier est établi conformément aux réquisitions :

- de l'art. 91 du Code Minier qui réglemente l'arrêt des travaux miniers et notamment soumet l'exploitant à la présente déclaration (voir ci-dessous « lettre de déclaration au Préfet »)
- de l'art. 44 du décret n°95-696 du 09 Mai 1995 modifié, qui précise les informations, documents ou études à joindre à ladite déclaration,
- de l'arrêté du 8 septembre 2004 définissant les modalités techniques d'application de l'article 44 du décret n°95-696 du 09 Mai 1995 modifié, relatif à l'ouverture des travaux miniers et à la police des Mines.

Nota :

Certains documents, et notamment les décrets d'attribution et de transferts successifs de la concession minière, font état de l'orthographe « Burc » en ce qui concerne cette mine. Bien que les deux orthographes coexistent et soient utilisées indifféremment, le parti pris du présent document est l'orthographe « Burc ».

Photographie de couverture : *Direction Régionale des Affaires Culturelles de Midi-Pyrénées* – Jean-François PEIRE

1 Lettre de déclaration au Préfet

Préfecture du Tarn
81 000 Albi

Recommandé avec AR

Objet : Concession du Burc (81)
Déclaration d'arrêt définitif de Travaux Miniers (art. 91 du Code Minier)

Monsieur le Préfet,

Je soussigné, Monsieur Didier BEGUIN, Directeur Général de la Société « SOGEREM », ai l'honneur de déclarer, au titre de l'article 91 du Code Minier, l'arrêt définitif des travaux de la mine citée en objet.

Vous trouverez ci-joint un dossier constitué conformément à la législation en vigueur et notamment au décret n°95-696 du 09 Mai 1995 modifié, et à son article 44.

Nous transmettons également 11 exemplaires de ce dossier à la DRIRE.

Veuillez agréer, Monsieur le Préfet, l'expression de mes salutations distinguées.

Au Burc, le 28 Avril 2006

Pour la Société « SOGEREM »,
Le Directeur Général,
Didier BEGUIN

2 Sommaire du dossier

Références réglementaires et méthodologiques 2

1 Lettre de déclaration au Préfet 3

2 Sommaire du dossier 4

3 Motivations de l'arrêt définitif des travaux 10

3.1 Epuisement des mines à ciel ouvert de Sogerem et calendrier de fermeture 10

3.2 Etude de scénarios alternatifs à la fermeture de la Mine du Burc 10

4 Pouvoirs du signataire 13

5 Présentation de la Société 14

6 Historique de la Concession et copie des actes 16

6.1 Copie des actes 17

6.2 Situation géographique du site 19

6.3 Géologie et géomorphologie sommaires 21

6.4 Historique minier du site d'exploitation du Burc 27

6.5 Chronologie détaillée des travaux miniers 28

6.6 La méthode d'exploitation utilisée 31

6.6.1 Description de la méthode des tranches montantes remblayées 31

6.6.2 Mise en application de la méthode au Burc et principales évolutions 32

6.7 Etat des réserves géologiques lors de l'arrêt des travaux 38

7 Non-inscription hypothécaire 40

8 Dossier de Déclaration d'arrêt définitif des Travaux 41

8.1. Plans d'ensemble des travaux et installations, et autres documents cartographiques joints 42

8.1.1 Travaux et installations concernées par le présent dossier 42

8.1.2 Rattachement du géoréférencement au système Lambert 3 42

8.1.3 Liste des documents cartographiques joints 43

8.2. Mémoire des mesures prises ou à prendre pour protéger les intérêts fondamentaux (art.79 du Code Minier) 45

8.2.1 Revue des intérêts fondamentaux 45

8.2.1.1 Intérêts vis à vis de la sécurité et de la salubrité publiques 45

8.2.1.2 Intérêts relatifs à la protection de la nature et du milieu environnant, et intérêts relatifs à l'eau 45

8.2.1.3 Solidité des édifices privés et publics 47

8.2.1.4 Conservation des voies de communication. 48

8.2.1.5 Intérêts relatifs aux monuments historiques, sites d'intérêt artistique, historique, scientifique, légendaire, archéologique ou pittoresque 49

8.2.1.6 Préservation des possibilités de reprise de l'exploitation (art.91 du Code Minier) 50

8.2.1.7 Intérêts agricoles 51

8.2.2 Inventaire des risques potentiels vis-à-vis de la sécurité et salubrité publiques 52

8.2.2.1 Risque radiologique 52

8.2.2.2 Risque de feux, d'incendie ou d'explosion 52

8.2.2.3 Existence de sols pollués 53

8.2.2.4 Stabilité du dépôt de stériles 54
8.2.2.5 Stabilité des talus du carreau de la mine 57
8.2.3 Risques d'intrusion : évaluation, mesures prises ou à prendre vis-à-vis du risque d'intrusion dans les travaux souterrains arrêtés 58
8.2.3.1 Revue des accès existants ou ayant existé 59
8.2.3.2 Récapitulation des travaux d'obturation restant à faire 100
8.2.4 Désordres de surface : évaluation, mesures prises ou à prendre vis à vis des risques de désordres de surface . 101
8.2.4.1 Collecte de données disponibles utiles à l'évaluation des risques de désordres en surface 101
8.2.4.2 Evaluation des risques de désordres en surface 106
8.2.4.3 Mesures à prendre pour l'élimination du risque 108
8.3. Bilan relatif aux effets sur l'eau des travaux miniers et de leur arrêt 109
8.3.1 Synthèse des conclusions des études hydrauliques 110
8.3.2 Dispositions à prendre au fond avant la montée des eaux 114
8.3.3 Dispositions concernant les ouvrages d'obturation des accès jour-fond 114
8.3.4 Choix de l'exutoire et aménagement du captage 115
8.3.5 Traitement des eaux d'exhaure avant leur rejet dans le Ferrier 116
8.3.6 Les réseaux d'eau de surface après démontage de la station de traitement. 123
8.4. Etude des risques importants après le 1er donné acte 124
8.4.1 Risques de débourrage des accès pendant la remontée des eaux 124
8.4.2 Risques de déversement accidentel d'eaux polluées dans le Ferrier. 125
8.4.3 Risques d'apparition de fontis en surface 127
8.4.4 Risques d'affaissements de surface 128
8.4.5 Risques de dommages sur les bâtiments existants 128
8.5. Mesures prises pour la surveillance et la prévention des risques pouvant éventuellement subsister après le 1er donné acte 129
8.6. Récapitulatif des installations dont l'exploitation minière a cessé 130
8.7. Eventuelles lettres d'information sur les équipements hydrauliques 131
8.8. Utilisation des installations existantes pour des activités non couvertes par le Code Minier. 135
8.8.1 Activités demeurant sur site après arrêt des travaux miniers 135
8.8.2 Utilisation des installations existantes pour des activités non minières 136
Annexe 01 141
Annexe 02 142
Annexe 03 143
Annexe 04 144
Annexe 05 145
Annexe 06 146
Annexe 07 148
Annexe 08 150
Annexe 09 151
Annexe 10 152
Annexe 11 153
Annexe 12 154

Annexe 13 155
Annexe 14 156
Annexe 15 182

Liste des annexes

Annexe 01

Information en vue d'une consultation des Représentants du Personnel qui constituent la Délégation Unique de la société SOGEREM, agissant dans le cadre de sa mission de Comité d'Entreprise au titre des dispositions de l'article L.432-1du Code du Travail, sur un projet de fermeture de la Société SOGEREM. *Document interne SOGEREM*

Annexe 02

« SOGEREM Company general presentation » (dossier de presse). Déc 2005. *Document interne SOGEREM*.

« SOGEREM – Extraction de spath fluor, Montroc, Tarn » Document de présentation technque – Août 2005. *Document interne SOGEREM*

Annexe 03

Tranches montantes remblayées avec rampe au filon dans la Mine de Fluorine de Burc. Camille SICARD. *Publications de l'Industrie Minérale, série « Les Techniques » , Février 1983.*

Annexe 04

Copies des actes de concession minière et de leurs transferts successifs

Annexe 05

Délégation de pouvoirs et de responsabilités

Annexe 06

Certificats de non-hypothèque

Annexe 07

Documents cartographiques :

- **7.1**	1/2500°	Plan de masse du carreau. *Situation à l'arrêt des travaux miniers.* *Etat des réseaux hydrauliques de surface à l'arrêt des travaux,* *Etat de la verse à stériles à l'arrêt des travaux* *(fichier : i2500jf1.cgs)*	format A3
- **7.2**	1/1000°	Plan de masse du carreau. *Situation à l'arrêt des travaux miniers.* *Dénomination des bâtiments* *(fichier : i1000jf1.cgs)*	format A3
- **7.3**	1/2500°	Plan de masse du carreau. *Avant-projet de réaménagement des réseaux hydrauliques,* *Avant-projet de réaménagement de la verse à stériles.* *(fichier : i2500jf4.cgs)*	format A3
- **7.4**	1/5000°	Parcellaire cadastral *(fichier : i5000jf3.cgs)*	format A3
- **7.5**	1/1000°	Plan des travaux souterrains à l'arrêt des travaux miniers *(fichier : cci0206.cgs)*	format 1170 x 410
- **7.6**	1/1000°	Coupe E-W des travaux souterrains à l'arrêt des travaux miniers *Zones remblayées* *(fichier : drire06.cgs)*	format 1170 x 410
- **7.7**	1/2000°	Plan de superposition fond et surface *Situation à l'arrêt des travaux miniers.* *Implantation des sondages* *Implantation des accès au fond* *(fichier : iantea2.cgs)*	format 730 x 380

Annexe 08

Etat actuel et évolution prévisionnelle du régime et de la qualité des eaux issues de l'exploitation de fluorine du Burc. E LEDOUX, J-M SCHMITT. *CIG / ARMINES LHM/RD/03/29*

Annexe 09

Mine du Burc (81) Bilan relatif aux effets sur l'eau des travaux et de leur arrêt. A BLACHERE, S MOREL*, CESAME*

Annexe 10

Mesures de l'activité volumique du radon 222 et de l'énergie alpha potentielle due à ses descendants à vie courte sur les retours d'air généraux et dans les zones d'activité de l'exploitation souterraine du Burc – Yves VAUZELLE, *ALGADE* réf SOGM 60-0 2-06 04 V1-SB

Annexe 11

Mine du Burc (81) - Conception et dimensionnement des traitements de mise en sécurité du puits et des cheminées d'aérage – Nicolas POIROT, Xavier DAUPLEY, Mehdi GHOREYCHI, *INERIS*, ref DRS – 05 – 72908/R01

Annexe 12

Mine souterraine du Burc – Paulinet (81) – Evaluation géotechnique des désordres en surface suite à l'arrêt de l'exploitation. JM BONNART, *ANTEA*, ref. A 39 809/A

Annexe 13

Types de béton pour bouchon autoportant. Note INERIS ref. DRS – 06 – 72908 / L03 Nicolas POIROT, Xavier DAUPLEY

Annexe 14

Anciens travaux d'exploitation ou de recherche localisés dans l'emprise de la concession du Burc

Annexe 15

Inventaire descriptif des installations hydrauliques à l'arrêt des Travaux (art. 49 et 49-1 du décret n°95-696 du 9 Mai 1995 modifié, pris en application de l'art.92 du Code Minier).

3 Motivations de l'arrêt définitif des travaux

L'arrêt définitif des Travaux Miniers de la Mine du Burc résulte de la cessation d'activités de la SOGEREM, pour les raisons explicitées et motivées dans le document d'information et de consultation du Comité d'Entreprise (art . L-432-1 du Code du Travail), ci-joint en Annexe 01.

3.1 Epuisement des mines à ciel ouvert de Sogerem et calendrier de fermeture

Les mines à ciel ouvert ont cessé leur activité à l'épuisement de leurs réserves.
Pour le Moulinal cet épuisement correspond à la disparition de la minéralisation du filon.
Pour Montroc l'épuisement correspond à la terminaison verticale du filon et au fond de la fosse dont la géométrie est limitée par le stot imposé par la présence de la rivière. L'extraction minière sur ces deux sites a cessé courant troisième trimestre 2005. Compte tenu de la géométrie du fond de fosse, les volumes à mobiliser pour extraire les tonnes restantes sont réduits. Pendant les derniers mois l'extraction s'est donc fait à un rythme supérieur à la consommation de l'usine. Un stock de minerai a été constitué.

L'épuisement de ce stock est estimé pour juin 2006. A cette date, la mine du Burc et l'usine de Montroc auront cessé simultanément leur activité, la mine du Burc ne pouvant alimenter à elle seule l'usine de Montroc (Cf. ci-dessous).

Compte tenu de l'affaiblissement des teneurs du minerai, le rythme de production de l'usine n'a plus permis de maintenir un niveau de ventes suffisant pour faire face aux ventes de spath-fluor standard et de spath-fluor technique. La priorité a été donnée au spath-fluor standard à destination d'Arkema. Les ventes de spath-fluor techniques ont été arrêtées à partir de janvier 2006.

Les dernières expéditions de spath-fluor standard à destination d'Arkema se feront au cours de l'été 2006 en fonction des demandes et des stocks du client.

3.2 Etude de scénarios alternatifs à la fermeture de la Mine du Burc

Une fois les minerais issus des mines à ciel ouvert épuisés, l'usine de Montroc aurait pu n'être alimentée que par la production de la mine du Burc.
Cette hypothèse n'a pas pu être retenue pour les raisons technico-économiques suivantes.

Régime de production de la mine du Burc

Le changement des équipements miniers effectué au début des années 2000 a permis d'établir un rythme d'exploitation supérieur à 50 000 tonnes par an.
Cependant le rythme d'extraction a été de plus en plus difficile à tenir pour deux raisons:

- L'affaiblissement des puissances du filon principal qui a réduit la productivité et la teneur finale du minerai extrait.
- L'éloignement de plus en plus important des zones de travail par rapport aux infrastructures de sortie du minerai ce qui a augmenté la durée de remontée du minerai et par ailleurs a demandé un temps de plus en plus long pour créer et entretenir ces infrastructures d'accès.

Pour pallier cet effet, un changement d'organisation a été fait en mettant en place un roulement du personnel de fond en trois postes. Malgré cela, il est apparu que le gain restait inférieur aux attentes.
Dans le même temps, la chute des teneurs neutralisait tous les efforts faits.
Malgré un roulement en trois postes il n'est pas possible aujourd'hui de produire plus de 60 000 tonnes de minerai, ce qui compte tenu des teneurs correspondrait après traitement à environ 20 000 tonnes de concentré.

Alternative pour augmenter la production de la mine du Burc

Une alternative aurait consisté à augmenter la productivité. Cela aurait pu être fait par augmentation de la taille des engins. Cependant, les engins sont déjà aujourd'hui les plus grands utilisables compte tenu de la section des galeries qui est limitée par la tenue des terrains et par la puissance du filon. La largeur des chargeuses est en adéquation avec la puissance du filon, au-delà la chargeuse chargerait autant de stérile que de minerai ce qui conduirait à une dilution du minerai.

Une option mettant en œuvre de plus gros équipements ne peut donc pas être retenue pour la mine du Burc.

Evolution attendue

La connaissance du gisement permet d'anticiper l'évolution de l'exploitation des réserves résiduelles.
Les panneaux encore exploitables (niveaux 135, 220 et 235) sont situés dans les zones les plus profondes et les plus excentrées à une distance moyenne de 1200 m du carreau alors qu'elle n'est encore que de 750 m aujourd'hui (niveaux 100, 54 et 220). Plus la distance augmente plus la productivité diminue du fait du temps nécessaire à la remontée au jour du minerai mais aussi du temps perdu à l'entretien des infrastructures.

La puissance des panneaux exploitables est plus faible que par le passé ce qui aura pour conséquence de diluer le minerai et limitera la teneur au niveau de 38 % au mieux.

Les performances actuelles de la mine du Burc soit, ~60 000t / an de minerai produisant 20 000 t de concentré, iront en diminuant compte tenu de la localisation des panneaux exploitables dans le futur.

Marche de l'usine du Burc (gravimétrie) alimentée uniquement par la mine du Burc

Les qualités des minerais du Burc ont évolué au cours de dernières années d'exploitation de la gravimétrie. Leur minéralisation n'était que pour partie compatible avec le traitement gravimétrique utilisée dans l'usine. La sélection faite en sortie de mine dirigeait une partie de plus en plus importante du minerai vers la flottation de Montroc.
La gravimétrie seule ne pourrait donc valoriser qu'une partie du minerai extrait conduisant à un rendement global de valorisation de 20 à 25% de la fluorine extraite.

La remise en service de la gravimétrie alimentée par la mine du Burc n'est pas envisageable en raison d'un rendement global de traitement qui ne dépasserait pas 25%, sans possibilité de récupération secondaire des sous produits par la flottation.

Marche de l'usine de Montroc alimentée uniquement par la mine du Burc

En trois mois de marche, l'usine de Montroc qui opère à raison de 20 500 t/mois, consommerait la production annuelle de la mine du Burc.

Première hypothèse: l'usine tourne par séquence, soit au rythme d'une fois par an, une fois par mois ou une fois par semaine.
Cette option n'aurait pu être retenue en raison:

- d'une dégradation inévitable de l'usine pendant sa période d'inactivité,
- d'une perte de productivité à la mise en route et à la mise en régime (réglage du procédé)
- de la perte de compétence du personnel entre deux campagnes de production.

Deuxième hypothèse: l'usine tourne à marche réduite de 12 t / heure dans les conditions actuelles et ne produit plus qu'environ 4 t/h de concentré.

Tous les scénarios ont été étudiés dans cette dernière hypothèse, avec différents scénarios de prix de vente : abandon des flottés spéciaux, des lignes de production et des effectifs correspondants, abandon des produits standards …

Aucun scénario n'a permis la poursuite de l'activité de la mine du Burc seule.

4 Pouvoirs du signataire

Didier BEGUIN en tant que Directeur Général de SOGEREM dispose, comme attesté dans l'Annexe 05, de la délégation du pouvoir de signature en ce qui concerne la présente déclaration et le dossier attaché.

5 Présentation de la Société

Voir également les documents de présentation synthétique, l'un général et l'autre plus technique, regroupés dans l'Annexe 02.

SOGEREM (Société Générale de Recherches et d'Exploitation Minière)

Les mines de fluorine[1] du Tarn sont exploitées depuis 1943, au départ par Ugine (puis Ugine Kuhlman), puis par SOGEREM à la création de PUK (Péchiney Ugine Kuhlman).

Depuis fin 2003, SOGEREM est une filiale à 100% du groupe Alcan. Elle est rattachée au Groupe d'affaire Bauxite & Alumine.

L'exploitation des mines du Tarn

Les gisements du Tarn sont de type filonien de puissance de 2 à 10 mètres pour une extension horizontale de 1000 à 1500 m et plus de 200 m de profondeur.

Une quinzaine d'exploitations de fluorine a existé dans la région.

En 2005, il reste 3 mines encore en exploitation, dont plus de 7 Mt de minerai a environ 44 % de CaF2 ont été extraits :

- Le Burc, mine souterraine, depuis 1954 a produit 1.4 Mt de minerai.
- Le Moulinal, exploité en souterrain de 1946 à1972 puis à ciel ouvert à partir de1984, a produit 2.55 Mt de minerai
- Montroc exploité en souterrain de 1964 à1969 puis à ciel ouvert à partir de1970, a produit 3.18 Mt de minerai.

La mine souterraine du Burc –objet du présent dossier d'arrêt définitif des travaux miniers) est exploitée par la méthode de tranches montantes remblayées ne laissant, en final, que peu d'espaces vides. Le personnel utilise des matériels miniers de petits gabarits adaptés au gisement.

Les mines à ciel ouvert sont exploitées avec des matériels de type travaux publics, tous les matériaux sont abattus à l'explosif. La proportion stérile/minerai est de 16 pour la mine de Montroc et de 9 pour la mine du Moulinal. Ces proportions conduisent à des volumes de terrains déplacés de 21.5 M de m3 pour Montroc et de 10.3 M de m3 pour le Moulinal.
Les mines à ciel ouvert s'étendent sur de grandes surfaces 95 ha pour Montroc dont 50 de verses à stérile et 50 ha pour le Moulinal dont 15 de verses à stérile.

[1] Appelée aussi fluorite ou spath-fluor, c'est le fluorure de calcium de formule chimique CaF2.

Les usines

En 1970 l'usine d'enrichissement par flottation de Montroc a été construite pour alimenter l'usine Ugine Kulhman de Pierre Bénite (production d'acide fluorhydrique). Au départ de 12 t/h, la capacité de l'usine est passée à 17 t/h en 1980 et 42 t/h en 1986. Depuis le démarrage de cette usine 5.1Mt de minerai ont été traitées, et ont produit 2 Mt de concentré enrichi à plus de 98 % de CaF_2.

L'enrichissement du minerai à l'usine de Montroc utilise le principe de la flottation (rendre hydrophobe le minerai de valeur que l'on veut récupérer et hydrophile la gangue) pour enrichir le minerai.
Les principales étapes du traitement sont : concassage, broyage, séparation par flottation, filtration, séchage, stockage.

En 1978 une usine d'enrichissement par gravimétrie a été construite au Burc pour produire des qualités pour la métallurgie. La baisse de la qualité des minerais disponibles sur les mines a conduit à son arrêt fin 2003.

Le concentré produit est expédié principalement en vrac par des camions citernes directement chez les clients ou par train complet au départ d'Albi pour l'usine de Pierre Bénite près de Lyon (Arkema).

Impact socio-économique

L'effectif de la SOGEREM a évolué au cours du temps, allant jusqu'à environ 110 personnes, principalement domiciliées dans les cantons d'Alban et de Montredon-Labessonnié. Outre ces emplois directs la Sogerem emploie 3 entreprises sous-traitantes de façon continue, représentant une vingtaine d'emplois supplémentaires. L'impact socio-économique de la SOGEREM dans l'économie locale est donc important.

6 Historique de la Concession et copie des actes

Dans ce chapitre, dont l'objet principal est de retracer l'historique administratif de la concession, sont également regroupés des informations générales (situation, géologie), ainsi que tous les éléments disponibles concernant l'historique minier du site, et, notamment, les principales caractéristiques de la méthode d'exploitation et de son évolution au fil des décennies. La prise de connaissance de cette dernière est indispensable à une bonne appréhension des problématiques analysées au cours du chapitre 8.

6.1 Copie des actes

Concession minière (art. 21 du Code Minier)

Le classement de l'espèce minérale « spath fluor » ou fluorine en matière concessible ne date que du décret du 04 Octobre 1960, applicable au 1er Janvier 1961, lorsqu'il a été estimé que l'approvisionnement national pouvait revêtir un caractère stratégique, notamment en raison de l'utilisation de dérivés du fluor dans l'industrie nucléaire.

Le démarrage de l'exploitation, daté de 1954 (voir historique détaillé supra), s'est donc fait en tant qu'exploitation de carrière souterraine. Le premier document officiel connu est l'acte de 1964 concédant le Burc (voir ci-dessous).

Voir en Annexe 04 les copies des documents suivants :

- **Décret du 27 Janvier 1964** (Journal officiel du 04 Février 1964) accordant une concession de mines de fluorine et substances connexes, dite « concession du Burc », à la Société d'Electro-chimie, d'électro-métallurgie et des aciéries d'Ugine,
- **Décret du 08 Octobre 1971** autorisant la mutation de la concession du Burc au profit de la Société l'Aluminium Pechiney.
- **Décret du 08 Novembre 1972** (Journal officiel du 17 Novembre 1972) autorisant la mutation de la concession du Burc au profit de la Société Générale de Recherches et d'Exploitation Minières (SOGEREM),
- **Acte de cession de la Concession du Burc,** daté du 05 Avril 1972, par l'Aluminium Péchiney au profit de la Société Générale de Recherches et d'Exploitations Minières « SOGEREM ».

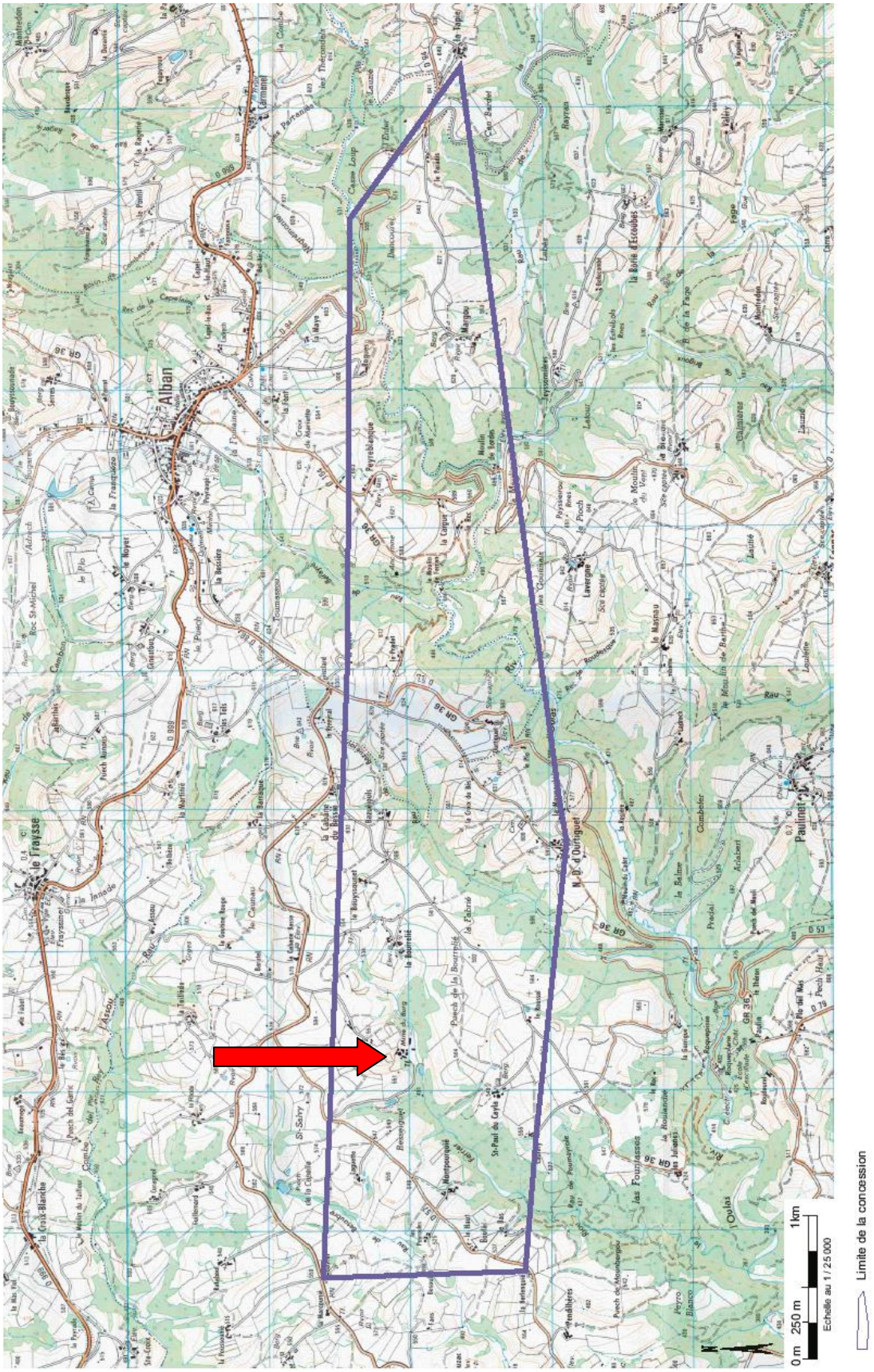
Pour mémoire, la déclaration d'ouverture de carrière auprès du Maire de Paulinet, datée du 18 Mai 1954 est également jointe en annexe 04.

Permis d'exploitation (art 50 du Code Minier) : sans objet, SOGEREM disposant d'une concession minière (art. 21 du Code Minier)

Autorisation d'ouverture des travaux miniers (art. 3 du décret n° 95-696 du 09 Mai 1995 relatif à l'ouverture des travaux miniers et à la police des mines, modifié par décret 2001-205 du 03 06 2001 (JO du 07 Mars 2001)).
Il n'a pas été établi d'autorisation d'ouverture de travaux miniers en faveur de la SOGEREM au sens de l'art. 3 précité, en raison de l'antériorité de l'exploitation par rapport à la mise en application de ce décret.

De même en a-t-il été au moment de la parution du décret 80-330 du 07 Mai 1980 instaurant l'autorisation d'exploiter soumise à enquête publique (décret abrogé depuis) : l'exploitation de la Mine du Burc était déjà démarrée.

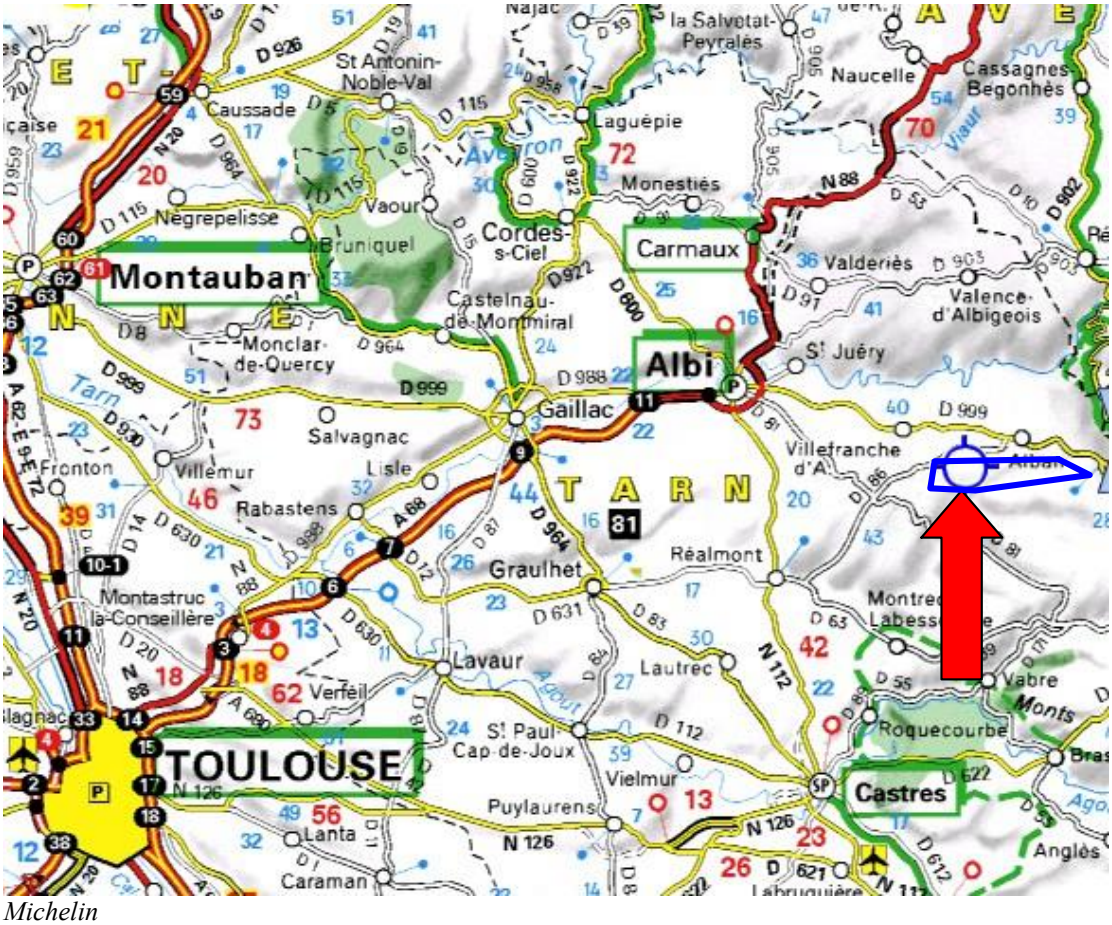
La concession minière du Burc est intégralement incluse sur le territoire de la commune de Paulinet. Ses points de définition sont listés dans l'acte officiel joint en Annexe 04. La concession est figurée sur le plan ci-après (la flèche rouge permet de situer la mine) :


Alban
le Fraysse
Paulinet
Limite de la concession
1km
0 m 250 m
Echelle au 1/25 000

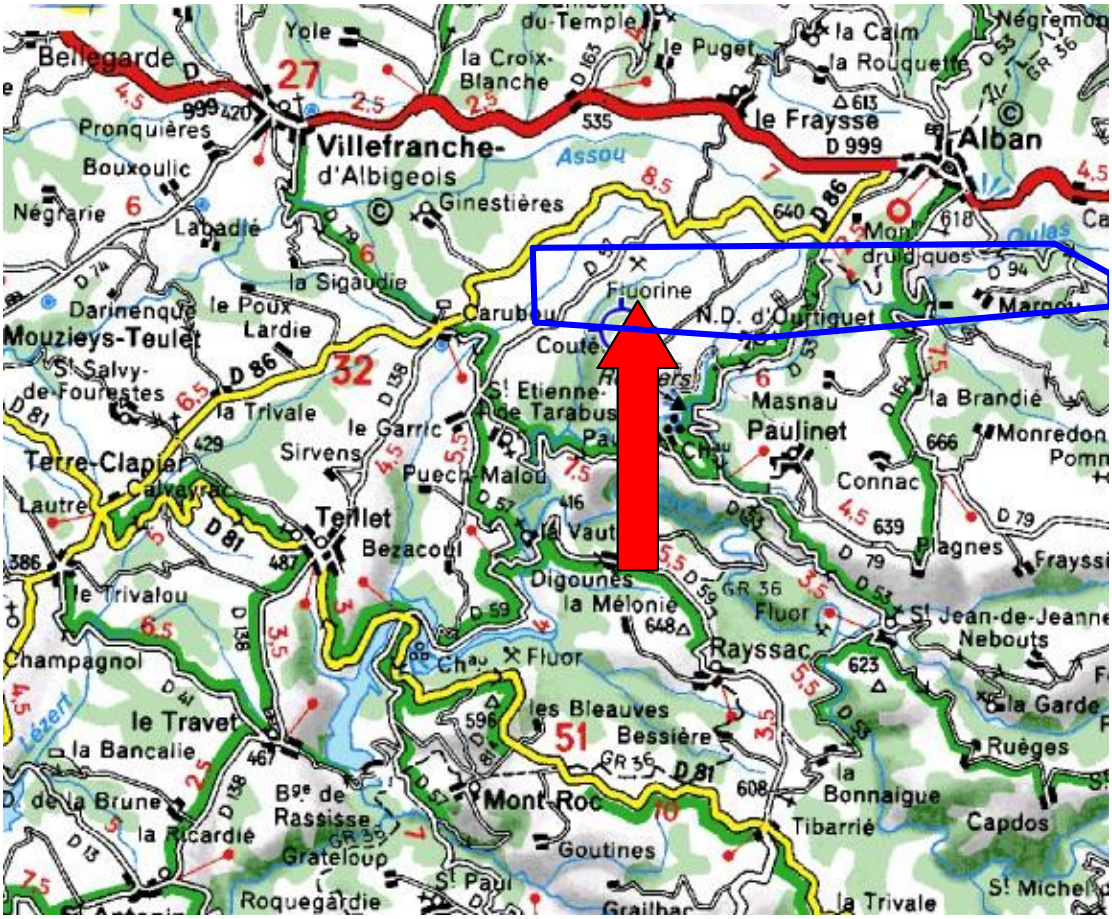
6.2 Situation géographique du site

Le site se situe dans la région de Midi-Pyrénées, département du Tarn, canton d'Alban, commune de Paulinet (81 250).
Le secteur est couvert par la carte topographique IGN Alban (2342E) au 1/25 000.

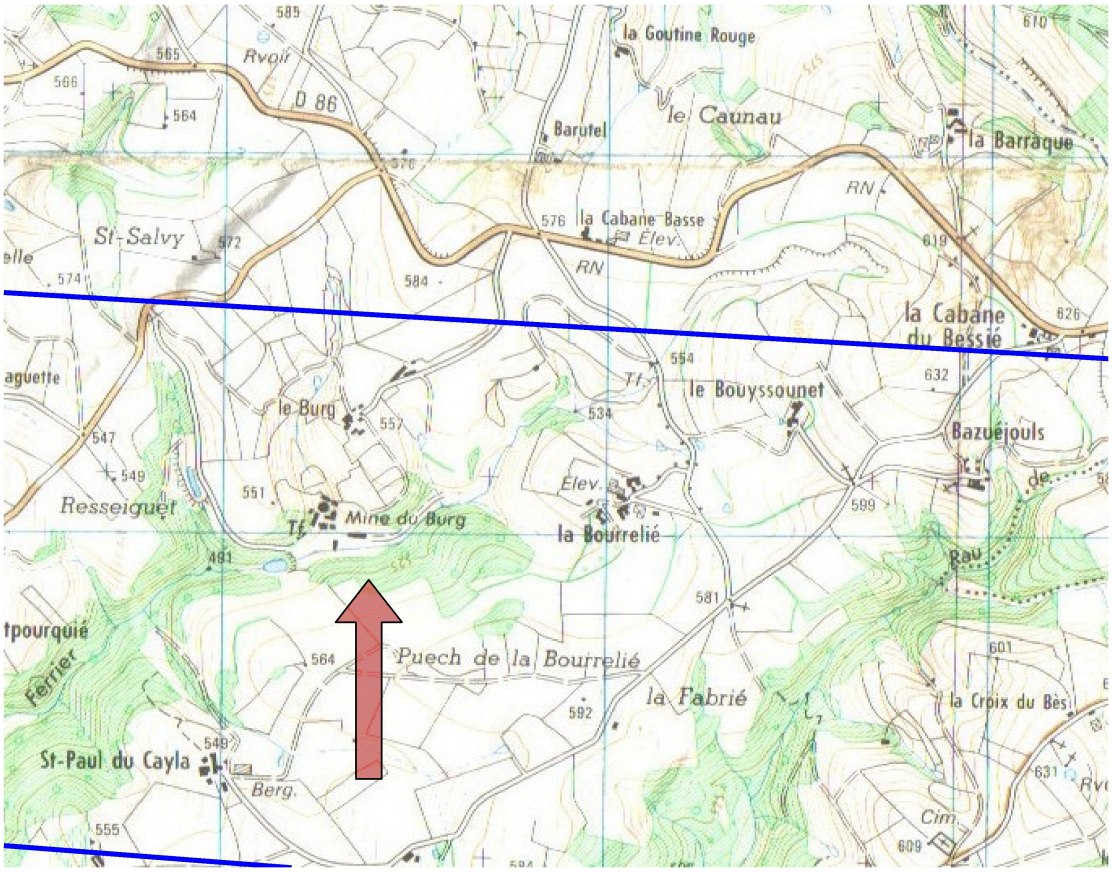
Les documents ci-dessous (extraits de cartes Michelin ou du fond topographique de l'IGN) permettent de localiser le site, pointé d'une flèche rouge. En outre les contours de la concession sont figurés d'un trait bleu.



Michelin



Michelin

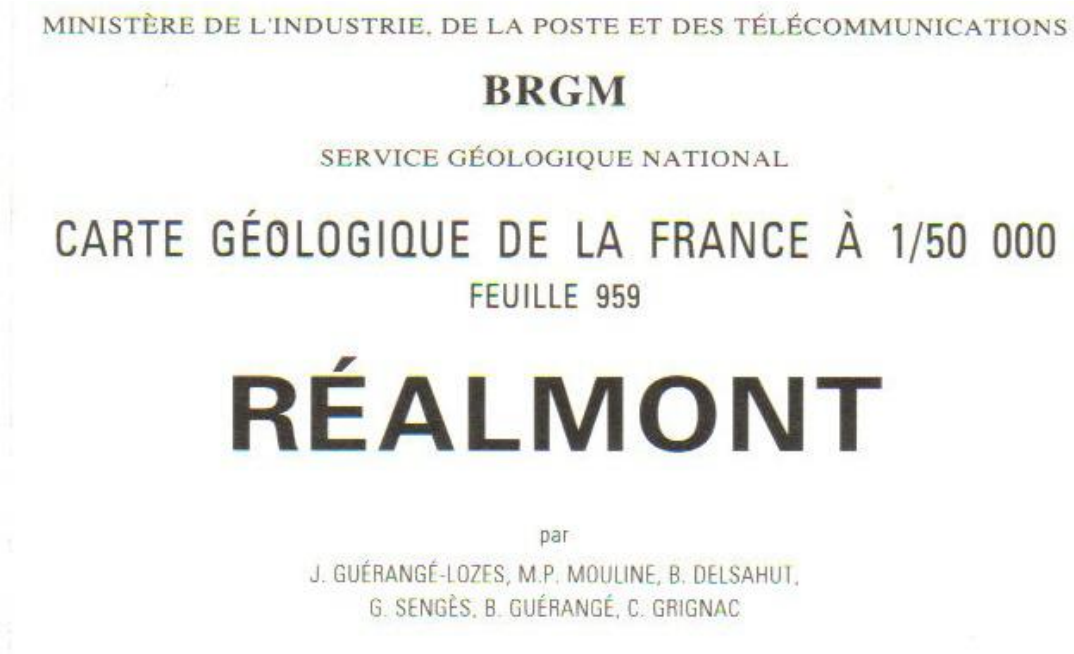


fond IGN, feuille Alban 2342E au 1/25 000

6.3 Géologie et géomorphologie sommaires

Le secteur est couvert par la carte géologique au 1/50 000e Réalmont (n°959), dont sont extraits la carte et la coupe suivantes.

Sur la carte le gîte minier est indiqué d'une flèche rouge, et les limites de la concession figurent en bleu.


MINISTÈRE DE L'INDUSTRIE, DE LA POSTE ET DES TÉLÉCOMMUNICATIONS

BRGM

SERVICE GÉOLOGIQUE NATIONAL

CARTE GÉOLOGIQUE DE LA FRANCE À 1/50 000

FEUILLE 959

RÉALMONT

par

J. GUÉRANGÉ-LOZES, M.P. MOULINE, B. DELSAHUT,
G. SENGÈS, B. GUÉRANGÉ, C. GRIGNAC

Le gisement de spath-fluor du Burc appartient avec les gisements de Mont-Roc et du Moulinal au sud, et les anciens gisements de Trébas et Padiès au nord, à la province à fluorine de l'Albigeois. Ils correspondent à des faisceaux filoniens encaissés dans les formations très déformées de l'albigeois cristallin, les « schistes de l'Albigeois ».

Les schistes de l'Albigeois

Ce substratum géologique, qui constitue l'encaissant des filons minéralisés, est une série complexe de schistes, grès et quartzites paléozoïques épimétamorphiques, d'âge cambro-ordovicien probable[2]. Cette série a été structurée sous la forme d'un mégapli antiforme couché vers le Sud et d'axe Est-Ouest, provocant un doublement de la série[3]. On trouve ainsi les formations gréso-pélitiques (shales, grès et quartzites) du Sud et Centre albigeois en flanc normal et les formations du Nord albigeois (shales à jaspes et grès) en flanc inverse.

Dans ces formations schisteuses, cinq phases de déformation ont été reconnues, dont seule la dernière, D5, est associée aux minéralisations filoniennes. Les failles de direction N 80 à 120° ont d'abord joué en décrochement dextre durant la phase D4 puis se sont ouvertes durant la phase D5 permettant le dépôt successif de brèches

[2] Guérangé-Lozes J. (1987) – Les nappes varisques de l'Albigeois cristallin. Lithostratigraphie, volcanisme et déformations (thèse État, univ. Paul-Sabatier, Toulouse). *Documents BRGM*, n°135, 259 p.

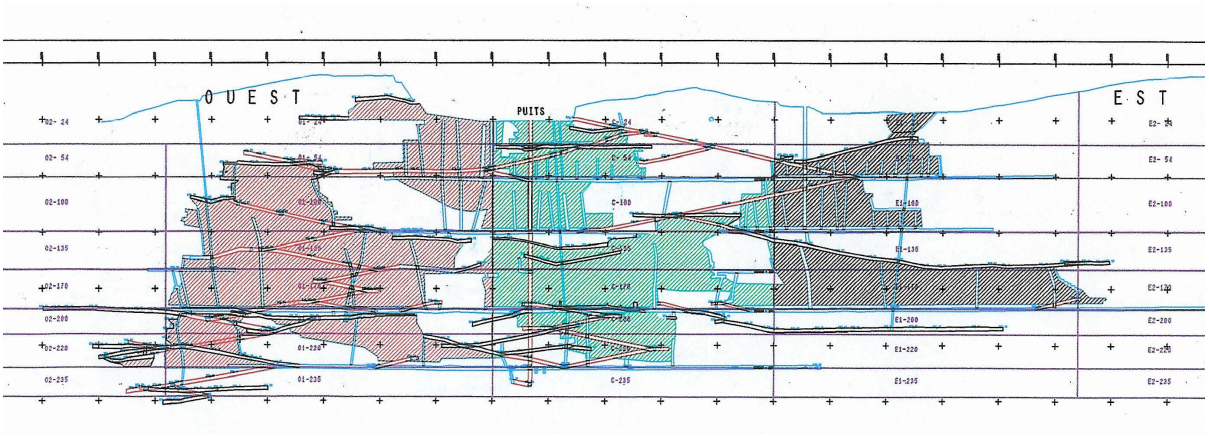
[3] Marini F. (1992) Introduction à la géologie régionale de l'albigeois cristallin

siliceuses (Brèche Tectonique Hypersilicifiée, BTH) puis des minéralisations fluorées sous forme de plusieurs faisceaux filoniens (Padiès, Trébas, Fraysse, Burc, Montroc, Le Moulinal).

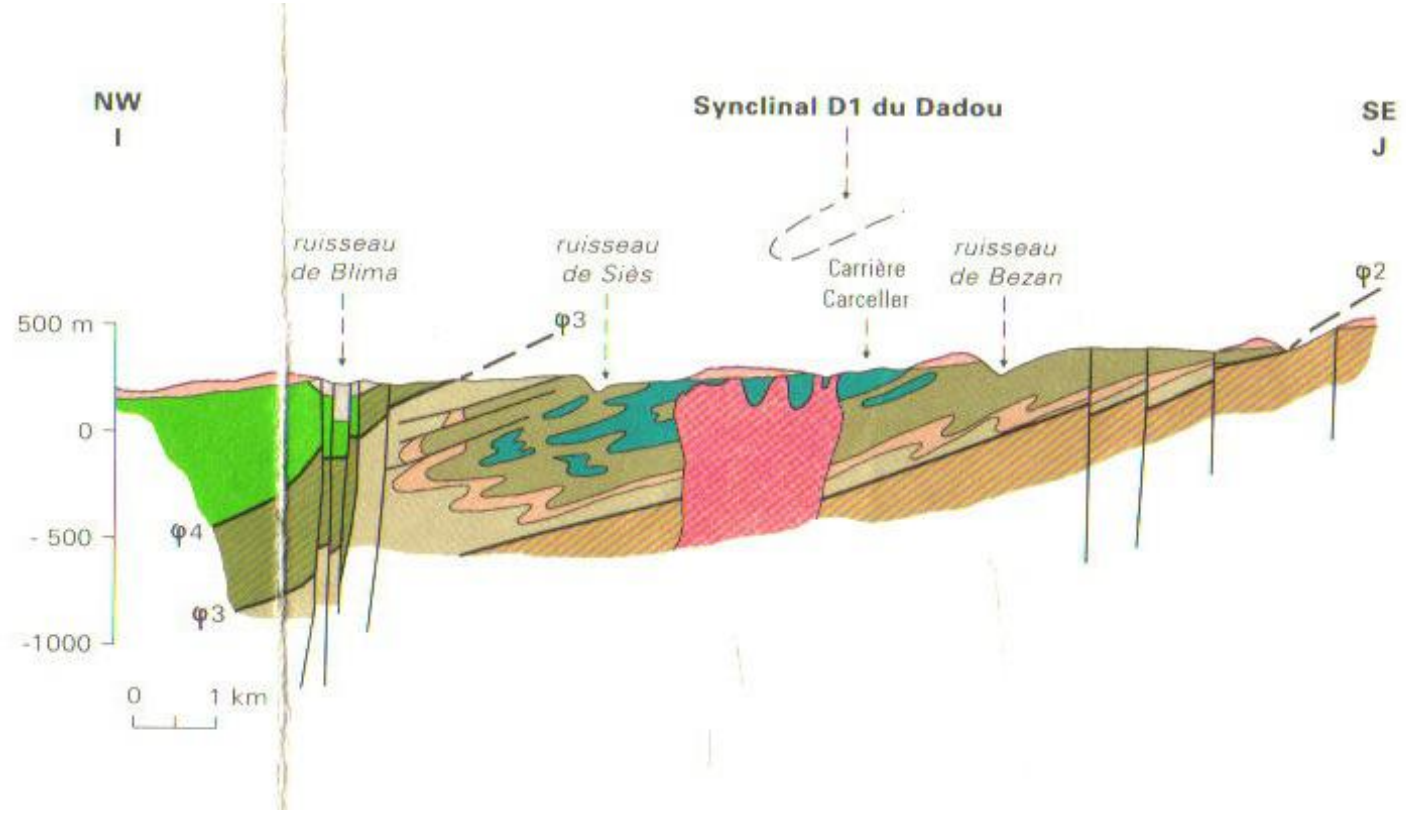
Ce substratum paléozoïque est recouvert, essentiellement sur les surfaces hautes et les interfluves, par d'anciennes alluvions sablo-argileuses et des formations superficielles résiduelles attribuées au Pliocène.

Le filon du Burc

Conformément à ce modèle, le filon du Burc est porté par une fracturation de direction générale N110° avec un pendage moyen vers le nord de 60° environ. La puissance de la caisse filonienne varie de 0 à 10 mètres avec une valeur moyenne de 3,5 mètres. Son extension reconnue est d'environ 1 km dans le sens latéral, et de 240 m dans le sens vertical. Les travaux ont mis en évidence une extension ouest du filon, décalée de 30 m vers le sud par un accident sub-méridien (faille ouest). Comme le montre la vue frontale du gisement du Burc ci-dessous, le plan du filon est inégalement minéralisé et est constitué d'une alternance de passages minéralisés de forme lenticulaire, délimités par des passages stériles.



Vue frontale du gisement – Les surfaces colorées correspondent aux zones minéralisées exploitées



LÉGENDE DES COUPES GÉOLOGIQUES

Tertiaire (e6a-b)

Bassin stéphano-permien de Réalmont

Granite tardi-hercynien (γ)

Monts de l'Ouest de Lacaune

Alternances grès fins micacés - schistes noirs (k2b2)

" Formation schisteuse noire " à nodules phosphatés (k2b1)

Calcaires dolomitiques

Formation schisto-gréseuse du Cambrien inférieur

Orthogneiss de Montredon-Labessonnié (ζγ)

Nappe de Saint-Salvi-de-Carcavès

1 Série schisteuse noire (o1c-2)
1) Volcanisme basique (εθ)

Formation du Moulin - Mont-Roc (o1b)

Tufs rhyolitiques (ρλ)

Formation du Masnau-Massuguiès - Rayssac (k6-o1a)

Formation de Mandegourc (k3-5)

Nappe de Saint-Sernin-sur-Rance

Formation de Saint-Sernin-sur-Rance - Condamines (k1)

Complexe leptyno-amphibolique de Réalmont - Najac

Gneiss à amphiboles et grenats et amphibolites (δ)

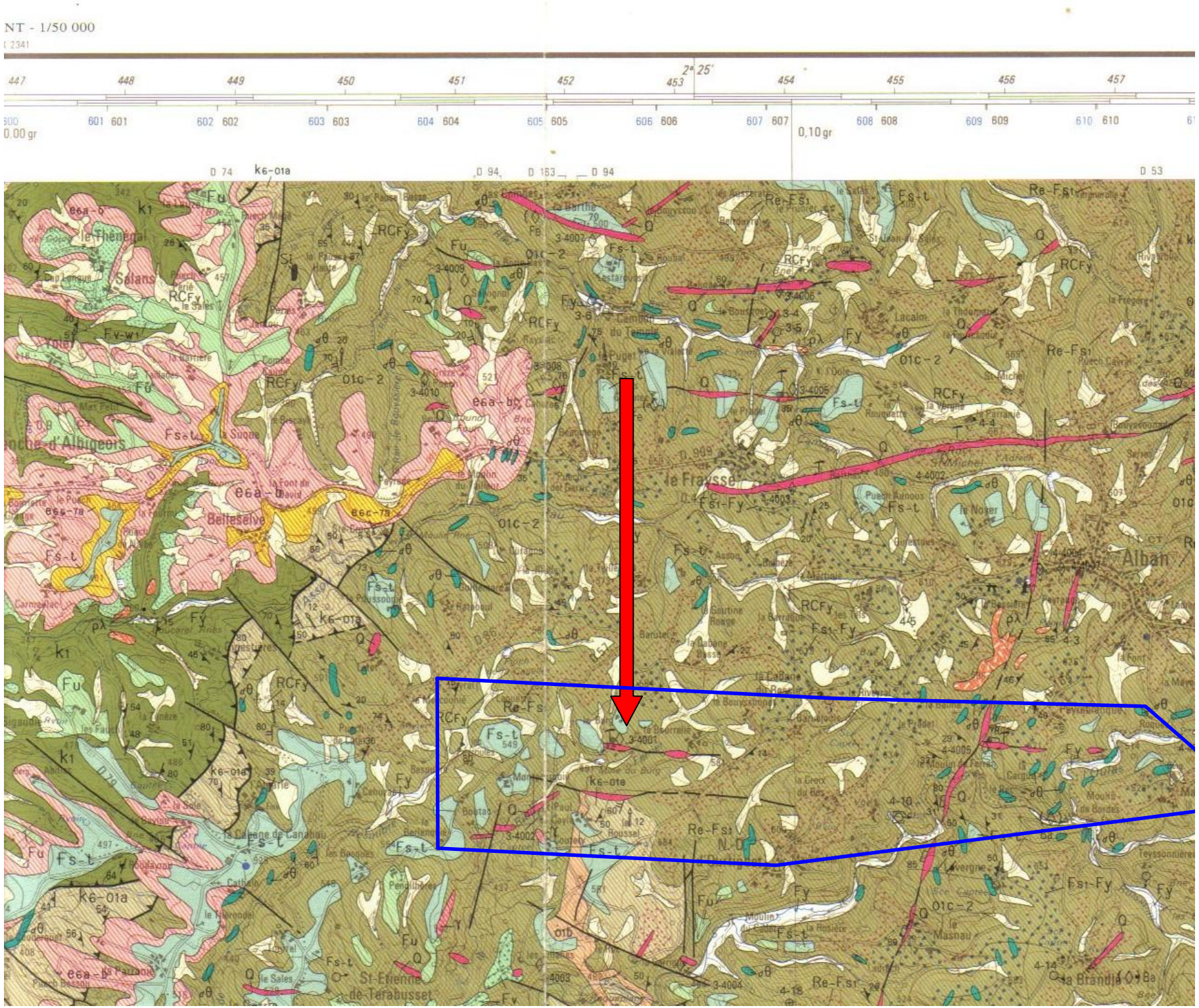
φ Base de nappe

φ1 Base des écailles des monts de Lacaune

φ2 Base de la nappe de Saint-Salvi-de-Carcavès

φ3 Base de la nappe de Saint-Sernin-sur-Rance

φ4 Base du complexe leptyno-amphibolique de Réalmont - Najac


NT - 1/50 000
2° 25'
0,00 gr
0,10 gr
D 74
k6-01a
D 94
D 53
Salans
le Thénenal
Belleselve
le Fraysse
Alban
St-Etienne-de-Tarabusset
la Brandie

CÉNOZOÏQUE

NÉOGÈNE - QUATERNAIRE

Dépôts anthropiques

X — Remblais

Formations colluviales

RCFy — Holocène
Colluvions des talwegs et des fonds des vallées secondaires

Glacis d'érosion et d'accumulation - Formations alluviales

Holocène

Fy — Alluvions de la basse plaine

Pléistocène supérieur

Fw4 — Formations alluviales inférieures

Fw3 — Formations alluviales moyennes

Fw2 — Formations alluviales supérieures à gros galets patinés

FwC — Glacis de Cunac : gravelles et cailloux quartzeux

Pléistocène moyen à supérieur basal

Fv-w1 / Fv-w1G — Glacis se raccordant à la partie supérieure de la basse plaine

Fv-w1 / Fv — Alluvions des terrasses moyennes les plus élevées (Tarn et Dadou)
Fv-w1 - palier inférieur
Fv - palier supérieur

Pliocène supérieur terminal - Pléistocène inférieur

Fu / Fs-t — Glacis d'accumulation et matériaux des paléovallées les plus anciennes
Fu - palier inférieur
Fs-t - palier supérieur

Formations résiduelles polygéniques, épandages

Fs1-Fy / Re-Fs1 — Pliocène supérieur à actuel
Débris schisteux et quartzeux

PALÉOGÈNE

Faciès à dominante fluvio-lacustre

g1P — Rupélien inférieur
Grès et conglomérats à cyanophycées de Puygouzon

e6c-7a — Bartonien supérieur - Priabonien inférieur
Argiles rutilantes de Lamillarié

e6b / G / e6a-b
- e6b - Bartonien moyen
  Argiles rougeâtres et grès de Puech-Auriol et de Venès
- G - Grandes lentilles de grès massifs
- e6a-b - Bartonien inférieur-moyen
  Argiles à graviers de Saint-Jean-de-Vals, du Carmausin et de l'Albigeois

Faciès à dominante palustre et lacustre

e7-g1c / e7-g1b / e7d-g1a
- e7-g1c - Priabonien - Rupélien inférieur
  Calcaires à *Brotia albigensis*
- e7-g1b - Priabonien - Rupélien inférieur
  Argiles pédogénétisées de l'Albigeois
- e7d-g1a - Priabonien supérieur - Rupélien inférieur
  Calcaires de Marssac

PALÉOZOÏQUE

FORMATIONS POST-OROGÉNIQUES VARISQUES :
CARBONIFÈRE SUPÉRIEUR - PERMIEN

Permien

r2-3 — Formation de Réalmont : pélites et grès rouges

r1b — Grès micacés et pélites grises à noires

r1a — Conglomérats gris, roses et rouges

Stéphanien

h5b-c — Conglomérats, grès, pélites

ROCHES MAGMATIQUES ET FILONIENNES TARDI-VARISQUES

γ 1 / ρ — Granite de Peyrebrune
1 - Filons granitiques ρ - Filons rhyolitiques

Q 60 1 — Filons de quartz "BTH" (brèche tectonique hypersilicifiée), plus ou moins minéralisés
1 - avec pendage

Qt — Filons à tourmaline

FORMATIONS ANTÉ- ET SYN-OROGÉNIQUES VARISQUES :
PRÉCAMBRIEN (?) - CAMBRO-ORDOVICIEN

Écailles des monts de l'Ouest de Lacaune

k2b2 — Alternances grès fins micacés - schistes noirs

k2b1 — "Formation schisteuse noire" à nodules phosphatés

k1ξ — Micaschistes homogènes

εγ — Orthogneiss de Montredon-Labessonnié

Nappe de Saint-Salvi-de-Carcavès

C / dθ / Si / o1c-2 / ρλ / o1b / k6-o1a / k3-5

Série schisteuse noire
- C - Formation de St-Paul-de-Massuguiès - Rouquairol : calcaires blancs et calcschistes noirs
- o1c-2 - Grès sombres ; schistes noirs homogènes à intercalations gréseuses ("schistes de l'Albigeois")
- dθ - Sills et coulées de métadolérites et métabasaltes
- ρλ - Tufs rhyolitiques
- Si - Silexites noires

Série schisto-gréseuse verte
- o1b - Formation du Moulin - Mont-Roc : grès quartzitiques blancs *(niveau repère en Albigeois)*
- k6-o1a - Formation du Masnau-Massuguiès - Rayssac : schistes homogènes gris à verts
- k3-5 - Formation de Mandegourc : alternances grès verts micacés - schistes verts

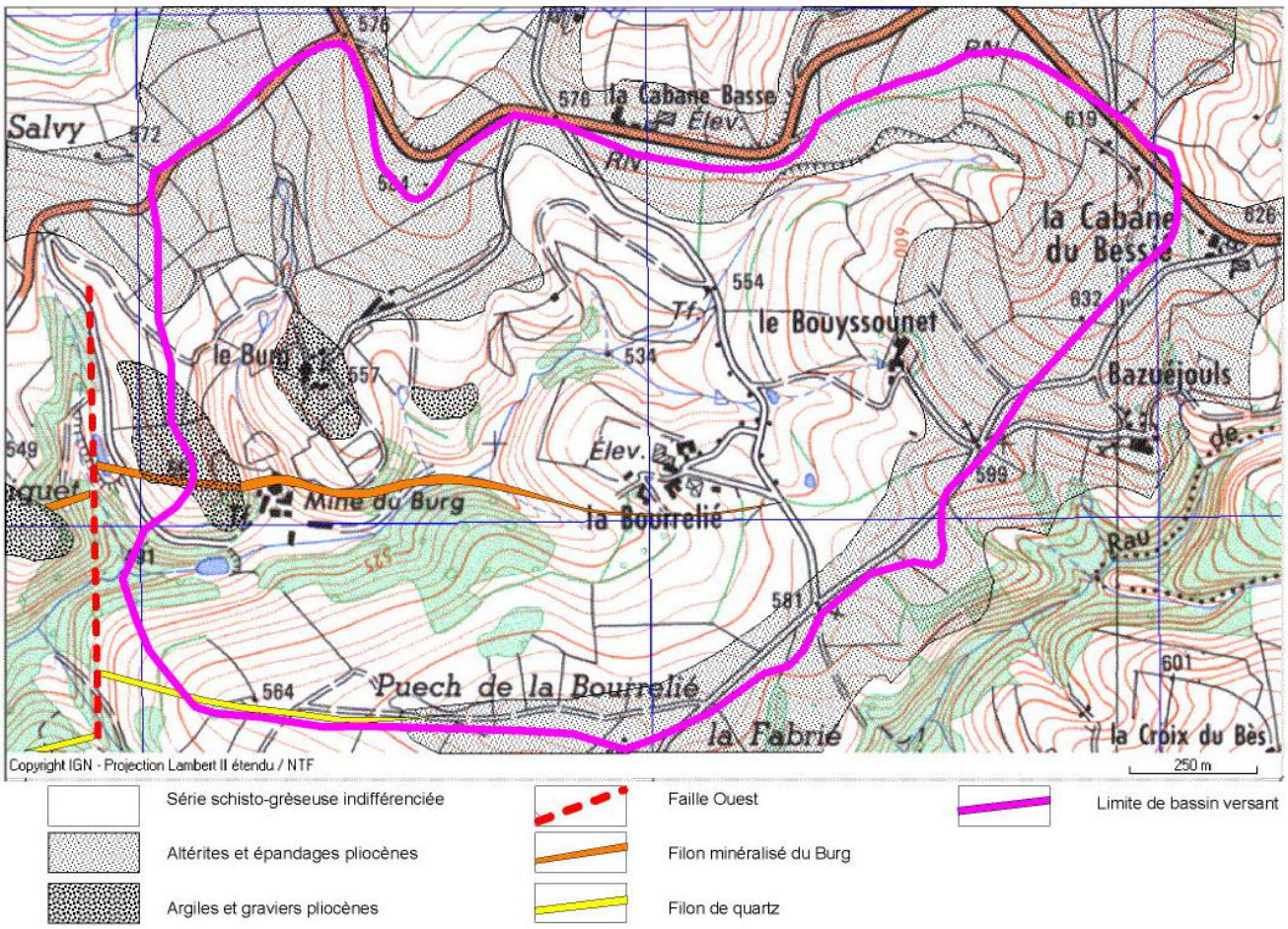
Nappe de Saint-Sernin-sur-Rance

ρλ — Formation de Larroque : tufs rhyolitiques

k1 — Formation de Saint-Sernin-sur-Rance - Condamines : alternances grès gris, fins à grossiers - schistes noirs ou gris

Géomorphologie sommaire

Ce contexte géologique et lithologique a structuré le relief du site, qui est constitué d'une surface haute d'altitude voisine de 600 m et faiblement inclinée vers le SW, entaillée de plus de 100 m par des vallées NE-SW.
Le site est drainé par le ruisseau du Riou Ferrier, également orienté NE SW, affluent de l'Oulas, lui-même affluent du Dadou en amont de la retenue de Rasisse.



Géologie simplifiée et limite du bassin versant de la mine du Burc
(fond IGN, feuille Alban *2342E* au 1/25 000, contours géologiques d'après documents SOGEREM et feuille Réalmont au 1/50 000)

6.4 Historique minier du site d'exploitation du Burc

Des travaux miniers superficiels anciens ont été signalés. Ils correspondent très probablement à des recherches de cuivre.

La société Electrochimique d'Ugine qui exploitait du spath-fluor dans la région depuis 1943 ouvrit la mine du Burc en 1953. Un puits de 100 m de profondeur fut foncé entre 1960 et 1963, des travers-bancs creusés ainsi que des étages traçés à 24 m et 46 m sous la surface.

Les infrastructures de la mine se développèrent jusqu'en 1978 avec l'approfondissement du puits jusqu'au niveau 170 et le traçage des niveaux 54 – 100 – 135 et 170.

De 1981 à 1982 une descenderie relia le niveau 170 au niveau 220 jusqu'à la recette, le puits fut encore approfondi à la même période. Les travaux de traçage du niveau 220 suivirent. La configuration actuelle de la mine date de la fin des années 1980.

6.5 Chronologie détaillée des travaux miniers

Cette chronologie existe dans les archives de SOGEREM mais son origine n'est pas connue et ses sources, qui sont vraisemblablement multiples, ne sont pas répertoriées. Par conséquent, son contenu ne peut être garanti. La chronologie ci-dessous est néanmoins délivrée telle quelle.

FIN 1953 Premiers coups de pioche

MAI 1954 DEMARRAGE REEL
Production 5 tonnes de Spath pour Mr COMBES Joseph et Mr GOURC.

1954 Déclaration d'ouverture de carrière le 18 mai
La production totale expédiée du Burc en 1954 était de 392.67 tonnes de Spath.

1955 Cette production passe à 1029.26 tonnes.

1956 à 1957 Pas de production déclarée. Par contre, on note à fin Septembre 1957 que 200 mètres de galeries ont été tracés à flanc de coteau et qu'un petit puits est en cours de fonçage sur une trentaine de mètres.

1958 1343 tonnes de Spath sont expédiées à partir du Burc.

1959 1577.47 tonnes sont produites, elles proviennent des traçages réalisés à partir du petit puits.

1960 1711.31 tonnes sont extraites toujours par traçage.

1961 Janvier et Juin, 1384 tonnes seront abattues avant l'arrêt de la production pour se consacrer au fonçage du puits actuel.

Mai 1954 à Juin 1961
7437.71 tonnes de Spath ont été produites.

Le personnel est resté limité à 2 à 6 ouvriers sans surveillance permanente.
Le Burc restant une recherche, la mine chargée d'assurer la production était St Jean de Jeannes.

La DEMANDE DE CONCESSION du Burc à été faite le 27 Novembre 1961 à la Préfecture du Tarn.

A fin 1961 Un agent de maîtrise est affecté à temps plein sur le site du Burc (arrivée de M. Vincent le 12 Décembre 1961).

Le fonçage du puits principal atteint 35 mètres, il se fait à 2 postes de 4 ouvriers (Maurel, Viguier, Bary Paul, Frayssinhes, Tenedos, Canac, Valat et Comette).

La première Pelle Eimco (air comprimé) arrive au Burc.

Conjointement au fonçage du puits, on trace les galeries 0, Est et Ouest au niveau –24.

Aucune production de Spath.

1962 Est consacrée au fonçage du puits et des galeries d'accès.

100 tonnes de Spath sont produites pour les Ets Bories à Carmaux sur commande spéciale.

1963 Voit la mise en service du puits entièrement équipé jusqu'au niveau –100.

L'inauguration des installations, y compris la machine d'extraction, eut lieu le 03 Juillet 1963.

1964 La perforation se fait au marteau Montabert L37, le déblayage à la pelle à main.

Cette année verra l'installation de scrapers (dont 1 électrique).

1965 Démarrage de la production au Burc : 1200 tonnes produites par mois.

Le personnel est de 12 ouvriers environ.

1968 La production passe à 1800 tonnes par mois avec augmentation du personnel.

1972/73 Arrêt de la production.
Fonçage du puits à 2 postes de entre les niveaux -100 à - 170.

1974 Reprise de la production :
- abattages au niveau –100,
- traçages au niveau –170.

1975 Arrivée d'un scoop 911. Démarrage de la descenderie par le fond ; le scoop à été descendu au fond en pièces détachées.

1978 Mécanisation de la mine. Modernisation de la méthode d'exploitation.

Démarrage de l'usine de concentration construite sur le site.

1988 Montage du train suspendu au niveau –220.

1989 Mise au point du train suspendu au niveau –220.

Introduction des tubbings pour les cheminées de jet.

Utilisation de plaques d'envol au boulonnage.

1990 Mécanisation de la perforation à air comprimé (jumbo n°8 à 3 marteaux perforateurs).

1991 Fabrication d'un 2éme jumbo.

1993 Extraction par tombereaux par la descenderie (30 % de la production).

1994 La SOGEREM obtient la certification ISO-9002, Qualité certification AFAQ, et la certification ISO 14 001, certification vis-à-vis de l'environnement.

1996 Campagne de sondages diamants à l'extrême Ouest du gisement, tous les sondages sont positifs.

1997 Mécanisation de la mine, premier Jumbo de foration hydraulique . Traçage des quartiers Ouest qui confirment les résultats des sondages

1998 Automatisation complète de l'usine de gravimétrie.

Développement des sondages de reconnaissance à l'avancement et refonte du modèle géologique, informatisation des données géologiques et topographiques.

1999 Achat d'un boulonneur hydraulique. Achat d'un jumbo d'abattage hydraulique.

1999 – 2001 Recarrage de la descenderie principale en grande section (3.50 m) et acquisition d'engins modernes de roulage (Eimco 985-T15 et scooptram Wagner ST-2)

2004 Campagne de reconnaissance géologiques par sondages depuis la surface. Fermeture du gisement dans le sens latéral, à l'Est et à l'Ouest.

SOGEREM a été évaluée et jugée conforme aux exigences de la norme OHSAS 18 001

6.6 La méthode d'exploitation utilisée

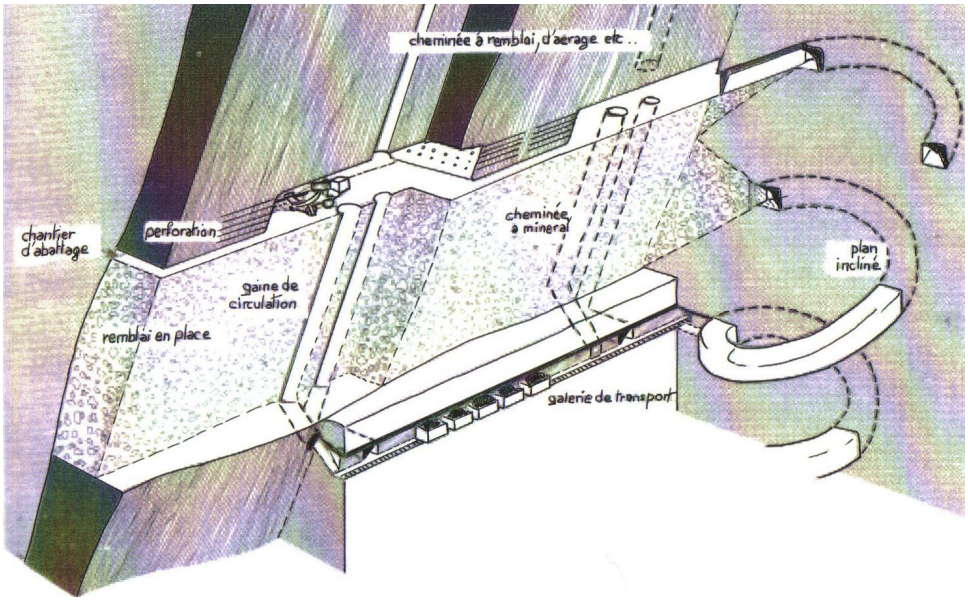
La méthode d'exploitation utilisée au Burc a toujours été celle des tranches montantes remblayées, même si cette dernière a subi les évolutions liées à la modernisation du matériel.
Cette méthode nécessite le remblayage intégral des quartiers en cours d'exploitation A l'issue de l'abandon d'un chantier aucun vide ne subsiste si ce n'est les infrastructures d'accès ainsi que les cheminées, pour celles qui auront été conservées jusqu'à la fin du chantier. Cette méthode est imposée par les conditions minières, assez médiocres (tenue des épontes), qui interdisent l'usage de méthodes plus productives.

6.6.1 Description de la méthode des tranches montantes remblayées

Une voie de niveau (dans le filon, à l'horizontale) est tracée dans la partie inférieure de la zone dont l'exploitation est envisagée. Cette voie de niveau est accessible aux engins de production ainsi qu'au personnel, par une rampe d'accès montante ou descendante en général tracée au mur du filon.
Cette voie de niveau est prolongée selon une longueur variable en fonction de la géométrie du gisement, de l'architecture de la mine telle qu'elle existe au moment du découpage du quartier, ou des performances des équipements utilisés (engins de roulage). En général, cette longueur dépasse rarement 200 mètres.

A l'extrémité distale de cet accès, est ménagé un percement sur un ouvrage d'infrastructure de façon à permettre un bouclage d'aérage (existence d'une entrée d'air et d'un retour d'air).

La couronne de la voie de niveau est abattue, soit par gradins renversés (c'est le cas dans le schéma ci-contre), soit par la foration de mines verticales.



d'après document Atlas Copco, reprises Rolland ROUSTIT

Après chaque tir d'abattage le minerai doit être évacué.
Ce marinage se fait, selon les cas, par un engin de chargement transport, ou par scraper manœuvré par un treuil.

Le minerai peut être évacué via la rampe d'accès, ou jeté « au couloir » d'où il est ensuite repris pour transport jusqu'en surface.

A cet effet, des cheminées de jet ou couloirs sont ménagés de façon à permettre la collecte du minerai dans une galerie tracée au mur (cas du schéma ci-dessus), ou, comme ce fut le cas au Burc, dans une galerie dans le filon à un niveau inférieur (donc, sous une dalle ménagée dans l'épaisseur du filon, appelée « stot »).

Lorsque l'abattage d'une tranche a été réalisé, le chantier est remblayé dans sa partie inférieure, et l'abattage d'une nouvelle tranche est initié .
Ce remblai permet :

- d'assurer un confinement des épontes (toit et mur) suffisant à maintenir des conditions minières compatibles avec une exploitation du chantier dans des conditions de sécurité correctes,
- de remettre à niveau le chantier pour le rendre accessible aux différentes opérations nécessaire à l'exploitation (foration, chargement des trous de mine, purge des fronts et couronne,) afin de permettre sa progression montante.

En général le choix de l'épaisseur de tranche à abattre (qui correspond à la hauteur de remblai mis en place) est fonction de la plus ou moins bonne tenue des épontes. Une fois le choix d'une hauteur de tranche définie, intervient celui des équipements. Les équipements une fois définis déterminent, eux, les dimensions des voies de niveau et d'infrastructure ainsi que les performances d'ensemble et la productivité des chantiers.

6.6.2 Mise en application de la méthode au Burc et principales évolutions

A la mine du Burc, la tenue médiocre des épontes n'aurait pas permis d'envisager de méthode alternative à la méthode des tranches montantes remblayées , comme ce fut le cas à Montroc par exemple (chambres magasins).

Au Burc, la méthode des tranches montantes remblayées a été utilisée dans ses différentes variantes, avec une mécanisation progressive des équipements utilisés, et corollairement des architectures associées : creusement de rampes d'accès avec l'introduction des engins sur pneus, abandon du scrapage en taille et désuétude des couloirs.

Provenance des remblais mis en place

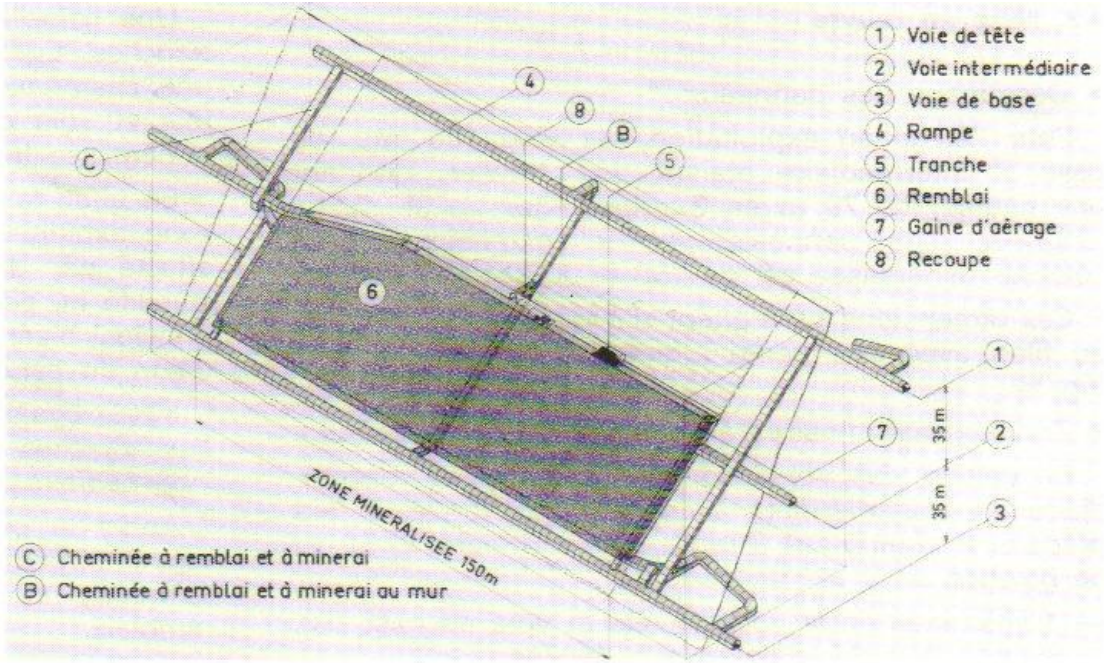
Les matériaux utilisés en tant que remblais dans les chantiers exploités ont pour la plupart été produits sur place, les compléments nécessaires ayant pu être acheminés depuis le site de Montroc.

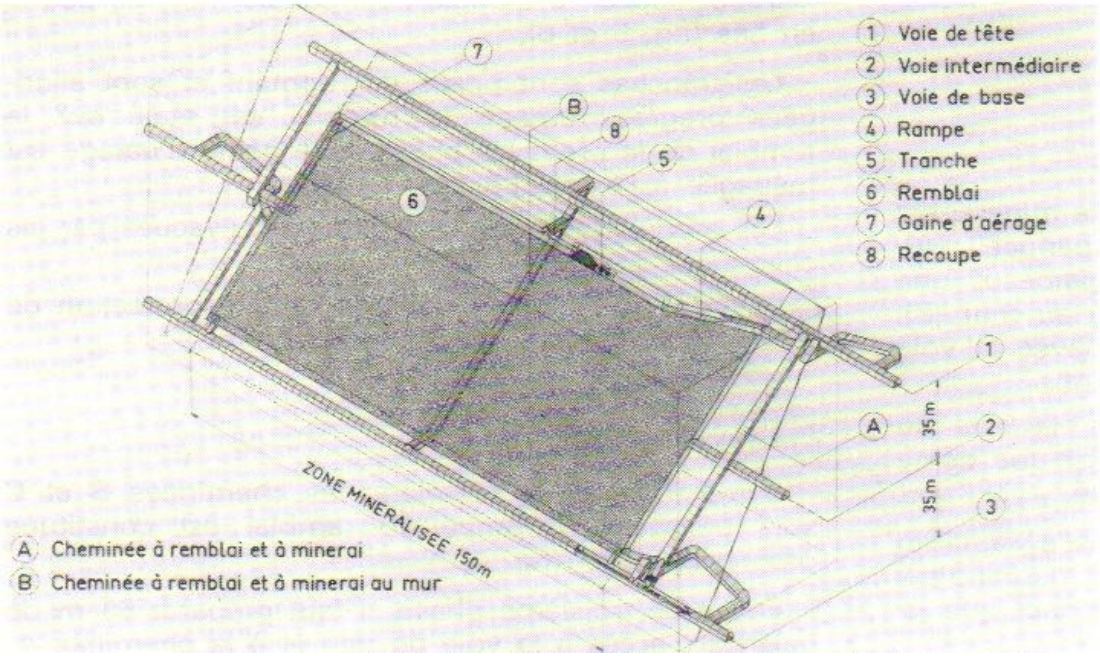
Les matériaux produits sur place sont issus :

- des stériles d'exploitation, pour la plupart laissés sur place à l'endroit où ils ont été abattus,

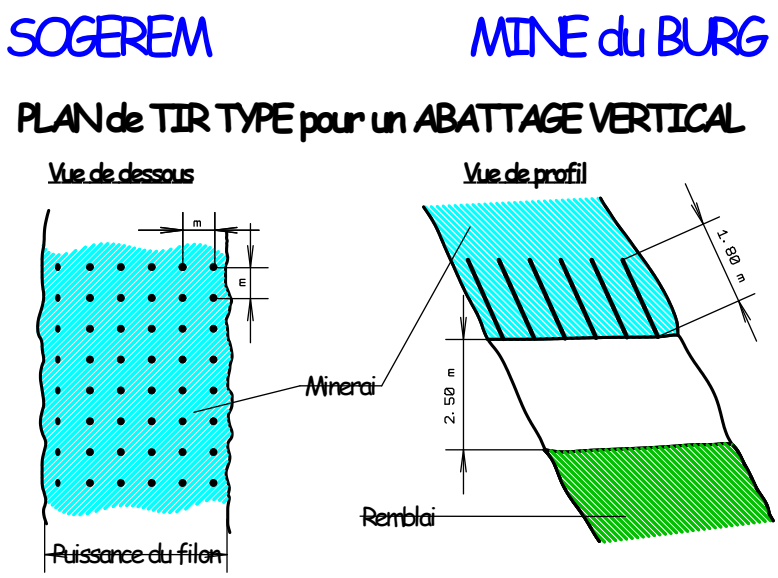
- des creusements des galeries souterraines : traçages au filon et voies de niveau dans les parties stériles, travers bancs de liaison entre niveaux,
- des aménagements du carreau (la plupart de ces aménagements ont été réalisés en déblais, et datent d'avant les années 1980),
- des résidus de traitement de l'usine de gravimétrie (à partir de 1978, date de sa mise en service). Ces résidus étaient constitués principalement de sables grossiers et de graviers.
- des infrastructures d'accès en souterrain (descenderies et recoupes d'accès), à partir des années 1980 lorsque le roulage sur pneu a été introduit.

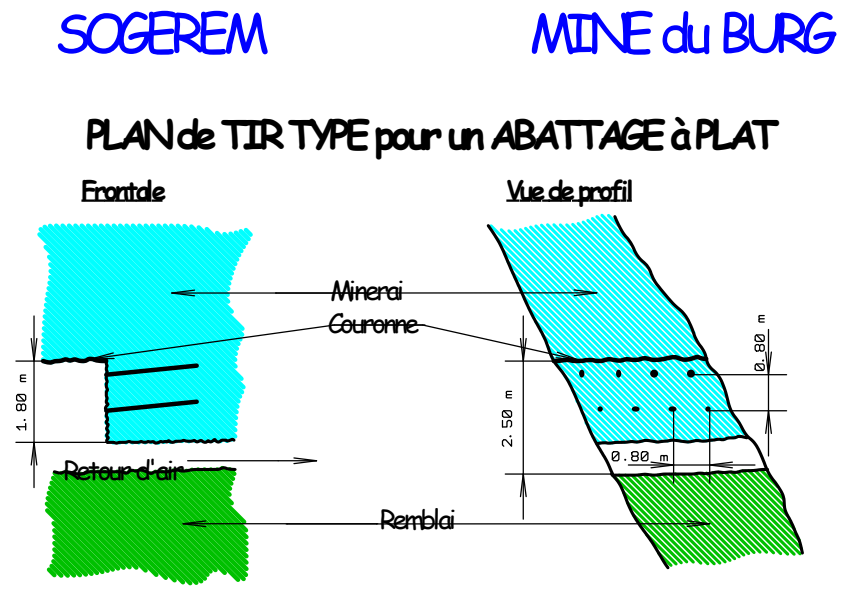
Les 2 schémas ci-dessous , tirés de la monographie jointe en Annexe 03, illustrent bien la méthode d'exploitation telle qu'elle est pratiquée au Burc depuis les années 1980. Elles montrent bien un chantier avec ses accès à différents stades de l'évolution de son exploitation :





Les deux schémas ci-dessous sont les plans de tir d'abattage standard, en chantier d'exploitation, en vigueur au moment de l'arrêt des travaux :





Ci-dessous sont résumées les principales étapes de l'évolution de la méthode par tranches montantes remblayées mise en œuvre au Burc. On peut également se référer à la monographie ci-jointe en annexe 4 pour une description plus complète.

De 1953 à 1978

La mine du Burc à été exploitée par tranches montantes remblayées par les méthodes traditionnelles (foration pneumatique manuelle, déblocage des chantiers par scrapage, marinage de berlines et extraction par cage puis par skip) . La production était comprise entre 5 et 15 000 tonnes par an.

De 1978 à 1991

Une méthode originale par tranches montantes remblayées avec plan incliné sur les remblais à permis d'augmenter peu à peu la production aux alentours de 40 000 tonnes par an.

De 1991 à 1997

L'introduction à partir de 1991 de petits camions pour le roulage en remplacement des roulages de niveau jusqu'aux recettes, et en accommodant la méthode par tranches montantes remblayées et une méthode par remontes et recoupes ont permis d'augmenter la production jusqu'à 50 000 tonnes par an.

De 1997 à 2005

La mine moderne

- Acquisition à partir de 1997 de jumbos de foration hydraulique (modèle SECOMA Helios); passage progressif de la foration manuelle pneumatique à une foration mécanisé hydraulique.

- recarrage de la descenderie d'accès depuis la surface jusqu'au niveau –220, pour permettre l'introduction de charge et roule plus productif,

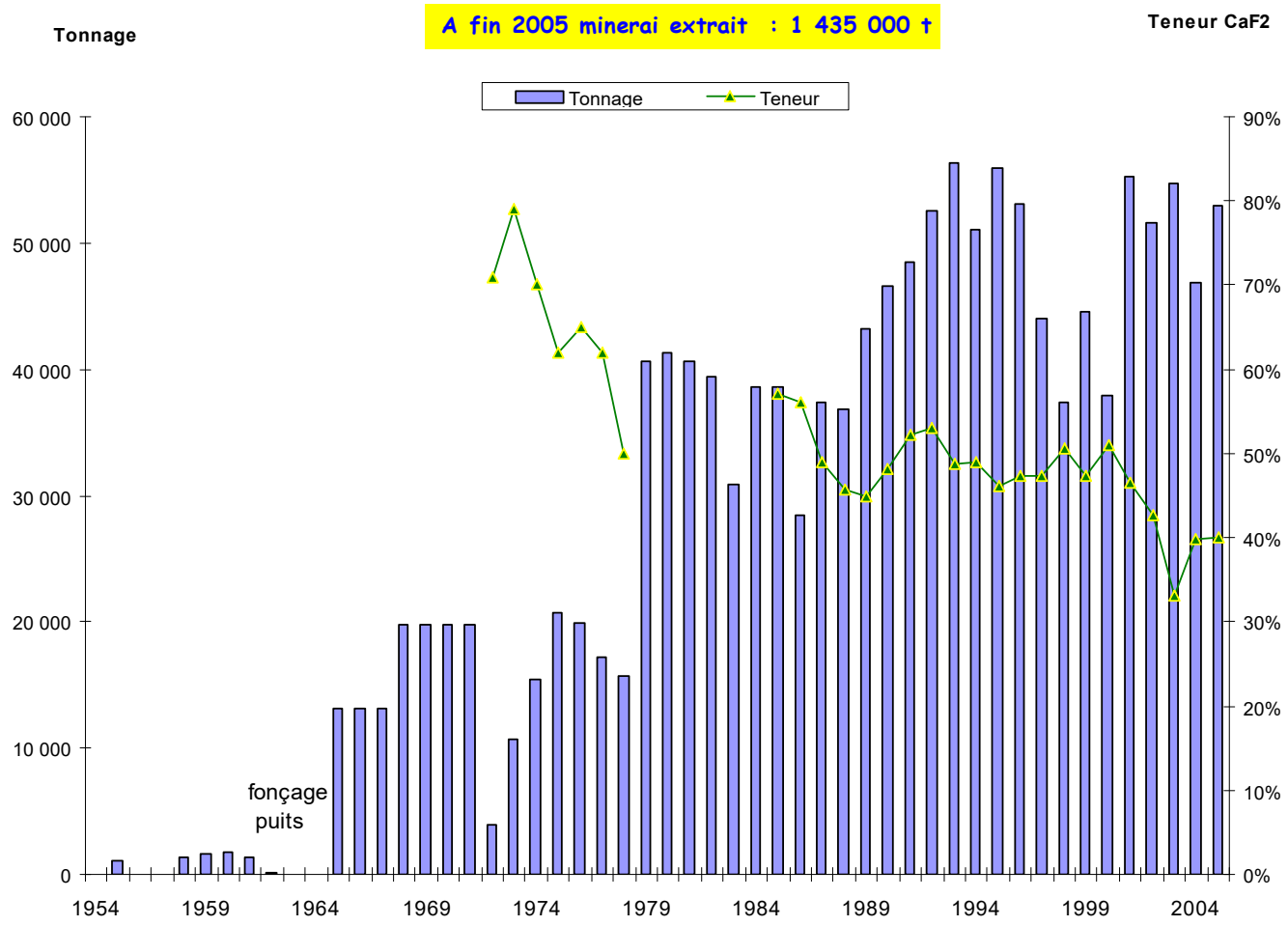
- modernisation du parc diesel : introduction d'engins de plus grande capacité, avec charge et roule de 3 tonnes de charge utile (Wagner ST2), et tombereaux de 15 t de charge utile (Eimco 985 T15).

- acquisition et utilisation routinière de moyens de reconnaissance à l'avancement (sondage percutant) de façon à rationaliser le développement de l'exploitation

L'ensemble de ces moyens technique a permis de monter la production au-dessus de 50 000 tonnes à partir de 2000.

Le graphique ci-dessous récapitule les tonnages extraits depuis le démarrage des travaux :

Exploitation Mine du Burg



6.7 Etat des réserves géologiques lors de l'arrêt des travaux

L'état des réserves de minerai de fluorine résiduelles au Burc indique à fin 2005 450000 tonnes brutes de fluorine à 40% de teneur en Ca F2.
Ces réserves sont intégralement localisées dans les quartiers suivants :

- E2-170 et E2-135,
- Panneau aval du E1-220,
- Panneau amont du O2-170.

Ces réserves résultent d'un traitement géostatistique par kriegeage réalisé sur la somme des données accumulées par SOGEREM depuis le démarrage de l'exploitation, données :

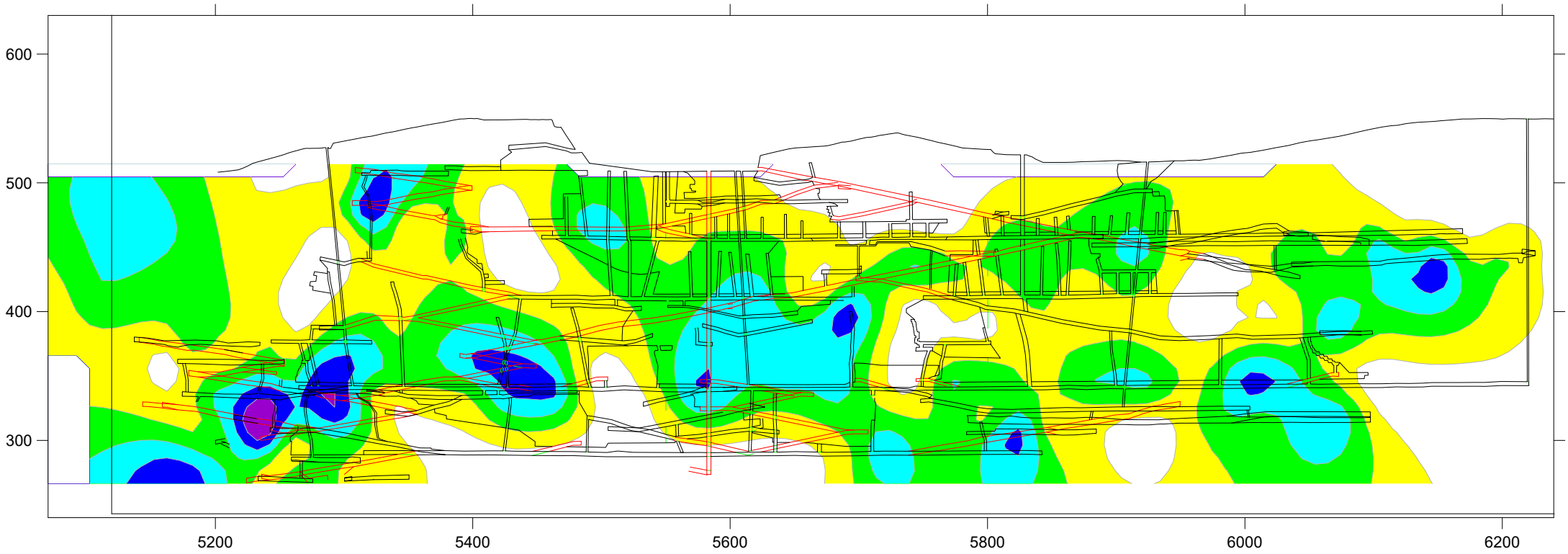
- de sondage depuis la surface,
- de sondage depuis le fond,
- de levés de couronnes des voies de niveau tracées dans le filon ou dans la caisse filonienne.

Il convient donc de garder à l'esprit le fait que l'estimation des réserves résiduelles ne soit pas exempte d'**incertitudes** : elle découle d'une **interprétation** géologique (le modèle) d'observations ponctuelles de terrain. Les dernières années d'exploitation ont mis en évidence localement des erreurs importantes.

En outre les limites du modèles sont définies de la façon suivante :

- le modèle a été fermé dans ses extensions latérales Est et Ouest par la campagne de sondages réalisée en 2004,
- bien que peu de données de sondage existent en dessous du niveau –220, les faciès rencontrées dans la caisse filonienne à ce niveau (principalement quartzeux) laissent supposer peu d'espoir de réserves importantes sous ce niveau.

Le modèle disponible est intégralement représenté et récapitulé dans le plan frontal des iso- épaisseurs suivant :



Mine du Burc

Modèle géostatistique
au 1er Janvier 2005

Plan frontal au 31 Aout 2005

Epaisseur du filon en m

4.5
3.5
2.5
1.5
0.5

7 Non-inscription hypothécaire

L'emprise du site de la mine du Burc concerne les parcelles référencées au Cadastre sous les numéros suivants, et propriété des personnes suivantes (Voir le parcellaire cadastral complet en annexe 7-4):

AN	48	Mme FABAS Raymonde, épouse FABRE André	81250 Paulinet
AN	51	Mme FABAS Raymonde, épouse FABRE André	81250 Paulinet
AN	52	Mme FABAS Raymonde, épouse FABRE André	81250 Paulinet
AN	56	Mme FABAS Raymonde, épouse FABRE André	81250 Paulinet
AN	57	Mme FABAS Raymonde, épouse FABRE André	81250 Paulinet
AN	58	Mme FABAS Raymonde, épouse FABRE André	81250 Paulinet
AN	59	Mme FABAS Raymonde, épouse FABRE André	81250 Paulinet
AN	66	Mme BOULENC Maria, épouse FARNIERE Pierre	81250 Paulinet
AN	67	Mme FABAS Raymonde, épouse FABRE André	81250 Paulinet
AN	68	Mme FABAS Raymonde, épouse FABRE André	81250 Paulinet
AN	69	Mme FABAS Raymonde, épouse FABRE André	81250 Paulinet
AN	70	M. GOULESQUE Guy époux BLAVIT Monique	81250 Paulinet
AN	106	Mme FABAS Raymonde, épouse FABRE André	81250 Paulinet
AN	111	Mme FABAS Raymonde, épouse FABRE André	81250 Paulinet
AN	116	Mme FABAS Raymonde, épouse FABRE André	81250 Paulinet
AN	118	M. BOYER Aimé, époux JOULIE	81250 Paulinet
AN	119	Mme RESSEGUIER Maryse, épouse CABAL Christian	81250 Alban
AN	120	Mme RESSEGUIER Josiane, épouse NOUVEL Robert	81120 Fauch
AS	30	M. ANGLES Honoré, époux DELMAS	81250 Paulinet
AS	102	Mme RESSEGUIER Josiane, épouse NOUVEL Robert	81120 Fauch

SOGEREM n'est propriétaire d'aucune des parcelles concernées.

En annexe 06 est joint un certificat du Conservateur des Hypothèques d'Albi.

Ce certificat produit l'ensemble des formalités inscrites au fichier immobilier concernant la Société SOGEREM sur la commune de Paulinet.

Il atteste de l'absence d'hypothèque, charge ou privilège quelconque sur l'ensemble des parcelles référencées ci-dessus.

8 Dossier de Déclaration d'arrêt définitif des Travaux

8.1. Plans d'ensemble des travaux et installations, et autres documents cartographiques joints

8.1.1 Travaux et installations concernées par le présent dossier

Le présent dossier concerne les travaux miniers, d'exploitation et de reconnaissance, et installations de surface du site industriel du Burc, telles que définies à l'art . 2 du Titre RG du RGIE, à savoir ceux qui existent sur l'extrait de plan cadastral ci-attaché en Annexe 7-4.

Le dossier d 'arrêt définitif de l'usine de gravimétrie, ainsi que ceux concernant les dépôts de détonateurs et d'explosifs, seront établis conformément aux prescriptions du décret n° 77-1133 du 21 Septembre 1977, pris en application de la loi 76-663 du 19 Juillet 1976 relative aux ICPE.

8.1.2 Rattachement du géoréférencement au système Lambert 3

Les différents plans topographiques ainsi que les coupes fournies sont référencées dans un système de coordonnées locales pour des raisons pratiques.
La cote en altimétrie est celle du système NGF.
Les coordonnées locales en X et Y sont transformées de celles du système Lambert 3 par translation simple des valeurs suivantes :

	Translation	**exemple**	
		Système local	**Système Lambert 3**
X (Nord)	600 000	5 200	605 200
Y (Ouest)	170 000	4 975	174 975
Z (altitude)	0	508,00	508,00

Dans le texte du présent rapport, ainsi que dans certains documents joints, il est fait référence aux différents niveaux ou aux différents chantiers qui ont existé, sous la forme suivante :

- Niveaux –24, –54, -100, -135, -170, -220 : Ces dénominations se rattachent à une cote en élévation théorique (= le niveau sole de la recette du puits principal), et relative à la surface du carreau pris comme référence.
- De la même manière, les chantiers sont dénommés en fonction du niveau de base (exemple –100), et du quartier dans lequel il se situe : O2 (extrême Ouest), O1 (Ouest), C (Centre), E1 (Est), E2 (extrême Est). Ainsi, par exemple, le chantier E2-100 est celui de quartier extrême Est dont le niveau de base est –100.

8.1.3 Liste des documents cartographiques joints

Les plans des travaux et installations dont l'échelle pertinente n'a pas permis une insertion dans le corps du texte du présent document ont été insérés en Annexe 07.

Les documents cartographiques joints sont également fournis sous forme électronique, sous différents formats, dans le souci de prévenir autant que possible toute obsolescence des données informatiques transmises.

La liste et le contenu des documents joints en annexe 07 est la suivante :

- **7.1** 1/2500° Plan de masse du carreau. format A3
Situation à l'arrêt des travaux miniers.
Etat des réseaux hydrauliques de surface à l'arrêt des travaux,
Etat de la verse à stériles à l'arrêt des travaux
(fichier : i2500jf1.cgs)

- **7.2** 1/1000° Plan de masse du carreau. format A3
Situation à l'arrêt des travaux miniers.
Dénomination des bâtiments
(fichier : i1000jf1.cgs)

- **7.3** 1/2500° Plan de masse du carreau. format A3
Avant-projet de réaménagement des réseaux hydrauliques,
Avant-projet de réaménagement de la verse à stériles.
(fichier : i2500jf4.cgs)

- **7.4** 1/5000° Parcellaire cadastral format A3
(fichier : i5000jf3.cgs)

- **7.5** 1/1000° Plan des travaux souterrains à l'arrêt des travaux miniers format 1170 x 410
(fichier : cci0206.cgs)

- **7.6** 1/1000° Coupe E-W des travaux souterrains à l'arrêt des travaux miniers format 1170 x 410
Zones remblayées
(fichier : drire06.cgs)

- **7.7** 1/2000° Plan de superposition fond et surface format 730 x 380
Situation à l'arrêt des travaux miniers.
Implantation des sondages
Implantation des accès au fond
(fichier : iantea2.cgs)

Ces documents cartographiques sont également complétés par les documents suivants, intégrés à l'Annexe 12 (étude ANTEA) :

-	1/1000°	coupe verticale N/S *modèle géologique* *zones remblayées* *vides résiduels*	format A3

(14 coupes au total)

-	1/2000°	Plan de superposition fond et jour carte des aléas de fontis	format A3

8.2. Mémoire des mesures prises ou à prendre pour protéger les intérêts fondamentaux (art.79 du Code Minier)

Les « intérêts fondamentaux » sont décrits de la façon suivante dans l'art.79 du Code Minier :

- sécurité et salubrité publiques,
- caractéristiques essentielles du milieu environnant,
- solidité des édifices privés et publics,
- conservation des voies de communication,
- et, plus généralement, aux intérêts relatifs aux monuments historiques, sites d'intérêt artistique, historique, scientifique, légendaire, archéologique ou pittoresque, intérêts relatifs à la protection de la nature, intérêts relatifs à l'eau, intérêts agricoles.

En outre, l'art.91 du Code Minier prévoit que le cas échéant les possibilités de reprises de l'exploitation soient ménagées.

Le présent mémoire expose comment lesdits intérêts fondamentaux sont préservés, après l'arrêt de l'exploitation, ainsi que les travaux déjà effectués ou prévus.

8.2.1 Revue des intérêts fondamentaux

8.2.1.1 Intérêts vis à vis de la sécurité et de la salubrité publiques

Les éventuels risques touchant à la sécurité et à la salubrité publiques concernent :

- le risque radiologique,
- les risques de feux, d'incendie ou d'explosion,
- l'existence éventuelle de sols pollués,
- la stabilité du dépôt de stériles,
- la stabilité des talus existants sur l'emprise du site,
- l'intrusion dans les accès souterrains,
- le traitement des risques d'affaissements miniers

Ces risques sont évalués et les mesures prises ou à prendre décrites dans les paragraphes ci-dessous 8.2.2 à 8.2.5.

8.2.1.2 Intérêts relatifs à la protection de la nature et du milieu environnant, et intérêts relatifs à l'eau

Les mesures prises vis-à-vis de la protection de la nature et du milieu environnant concernent l'eau et les émissions de gaz nuisible dans l'atmosphère.

1 L'eau

- la préservation du réseau hydrographique naturel, de la qualité des eaux de surface,
- la qualité des émissions d'eau.

Les mesures prises vis-à-vis de l'eau lors de l'arrêt des travaux sont décrites dans les chapitres ci-dessous 8.3 et 8.7.

2 Les sondages d'exploration existant

Pour mémoire, il convient également de citer l'existence de nombreux sondages d'exploration géologique existant sur le site. La structure du sous-sol du site est bien connue, et les études sur l'hydrodynamique souterraine locale, qui a été analysée et modélisée (voir les études en annexes 08 et 09), n'a pas mis en évidence l'existence de différents aquifères, mais d'un seul et unique aquifère. Tous ces sondage ont fait l'objet de déclarations en temps utile auprès de l'administration. A la demande de l'administration, leur abandon a été à chaque fois précédée d'une cimentation de la colonne complète du sondage.

Pour mémoire, ces sondages sont localisés sur un plan au 1/2000° joint en annexe 7-7.
Pour mémoire, également, les coordonnées de ces sondages sont les suivantes :

Numéro	X départ	Y départ	Z départ	Azimuth sondage	Profondeur impact (pied)	Pendage sondage	Campagne
1101	5183	5253	538	180	303	60	1995-1996
1102	5158	5240	534	180	292	60	1995-1996
1103	5201	5011	522	180	80	60	1995-1996
1104	5157	5000	520	180	65	60	1995-1996
1105	5157	5001	520	180	81	80	1995-1996
1106	5105	5063	531	180	130	60	1995-1996
1107	5075	5056	539	180	145	60	1995-1996
1108	5204	5110	527	180	169	60	1996
1109	5204	5110	527	180	211	75	1996
1111	6023	5018	525	163	86	60	1967
1112	6066	5035	534	166	111	60	1967
1113	6146	5008	553	165	96	60	1967
1114	6133	4949	540	175	56	75	1967
1115	5235	4971	526	175	33	60	1967
1116	5218	5019	528	175	84	60	1967
1117	6266	4971	559	176	97	60	1967
1118	5325	4980	543	180	43	50	1999
1119	5360	4970	547	180	42	50	1999
1120	5849	4956	521	180	26	50	2002
1121	5975	4957	521	180	40	60	2002
1122	5976	5015	526	180	89	62	2002
1123	6053	4993	537	180	61	60	2002
1124	6057	5029	534	180	83	60	2002
1125	6100	4977	547	180	48	60	2002
1126	6122	5033	551	180	91	60	2002
1320	5105	5063	531	180	148	60	1995-1996
1321	6057	5029	534	180	94	60	2002
1402	4952	5047	548	180	210	55	2004
1403	4997	4979	549	180	88	55	2004
1404	6285	5034	559	180	150	55	2004

3 Les émissions de gaz nuisibles dans l'atmosphère

La mine souterraine du Burc n'est ni grisouteuse, ni radifère (voir en Annexe 10 une analyse récente du radon dans les travaux du fond).

En ce qui concerne le CO2 :

- sa production n'est pas susceptible d'être produite en grande quantité, en raison des espèces minérales en présence (voir étude jointe en Annexe 08), et du peu de matières organiques (bois de mines) introduites par l'exploitation,
- en tous cas, après les toutes premières années consécutives à l'ennoyage, en raison du retour du milieu à des conditions anoxiques, cette production est exclue,
- de plus, le CO2 qui aurait pu être produit ne pourrait pas être piégé en raison de l'architecture minière (pas de cloche étanche), il s'écoulerait au fur et à mesure de sa production sans accumulation notable,
- enfin, pour conclure, le milieu (prairies et taillis, habitat éloigné > 100 m du carreau) n'est pas qualifié de sensible.

Par conséquent la mine souterraine ne sera pas le siège d'émissions de gaz nocifs.

8.2.1.3 Solidité des édifices privés et publics

Les baraques et installations objet de la présente déclaration d'arrêt de travaux seront toutes démantelées (voir en 8.8 ci-après).

Les bâtiments dont il convient de s'assurer de l'absence de toute potentialité de dommages sont :

- Les bureaux du site du Burc, qui seront conservés par le propriétaire des terrains,
- Le cas échéant, les autres bâtiments du site minier du Burc, dont la conservation pourrait être décidée (voir en 8.8)
- Les bâtiments et installations des fermes situées au voisinage : la ferme du Burc et la ferme de la Bourrelier.

Il est vérifié (voir le § 8.2.4 ci-après, ainsi que l'étude jointe en Annexe 12) :

- l'absence de risques d'affaissements miniers dans tout l'environnement des travaux miniers, y compris à leur proximité immédiate,
- l'existence d'une zone d'aléa d'apparition de fontis en surface, sur une superficie délimitée et clairement identifiée, qui n'intéresse aucune zone bâtie. Cette zone d'aléa ne concerne qu'une frange d'une parcelle cadastrale (AN 51), comme délimité sur le plan joint à l'Annexe 12.

L'absence de toute potentialité de dommages sur les bâtiments existants est donc assurée. Il est suggéré, en ce qui concerne les zones délimitées sur le plan joint à l'Annexe 12, incluses dans la parcelle AN 51, que la mémoire de ces zones soient conservées par la municipalité et qu'en outre elles soient mentionnées au plan d'occupation des sols comme inconstructibles

8.2.1.4 Conservation des voies de communication.

Voie privative d'accès

Chemin champêtre reliant la ferme du Burc

Le site est accessible à partir du CD 57, par une voie privative. Cette voie privative donne accès :

- au site en question, et en particulier aux actuels bassins de décantation,
- à la ferme du Burc via un chemin champêtre,
- à des parcelles agricoles ou forestières exploitées par la ferme du Burc

L'ensemble des accès mentionnés ci-dessus sont dans un état de viabilité suffisant à un usage privatif et agricole.

Ces voies de communication seront donc conservées en l'état.

8.2.1.5 Intérêts relatifs aux monuments historiques, sites d'intérêt artistique, historique, scientifique, légendaire, archéologique ou pittoresque

Au cours du mois de Mars 2006 les services de la Direction Régionale des Affaires Culturelles (DRAC) ont procédé à des travaux de photographie, de relevé et d'inventaire sur le site, à des fins d'étude et de conservation.
Ces relevés ont principalement porté sur les infrastructures minières souterraines, mais également sur le matériel minier ainsi que les bâtiments existants.

Le site du Burc est un site industriel récent, il ne comporte donc aucun bâtiment ou installation anciens d'intérêt quelconque.

Chevalement en tête du puits principal

Le chevalement érigé sur site est en construction métallique. Ce chevalement de petite taille et de capacité réduite apparaît quelconque, sans intérêt technique ou pittoresque, et d'aucune valeur patrimoniale. La conservation d'un tel ouvrage, dans un état suffisant à garantir la sécurité des personnes, engendrerait des coûts d'entretien rhédibitoires.

Le chevalement sera par conséquent entièrement démantelé.

8.2.1.6 Préservation des possibilités de reprise de l'exploitation (art.91 du Code Minier)

L'arrêt de l'exploitation s'impose en raison des conditions technico-économiques dégradées non viables pour l'exploitant compte tenu de l'épuisement des gisements du Moulinal et de Montroc exploités à ciel ouvert.
Il est impensable, même en supposant une révolution des conditions du marché de la fluorine, dans un futur hypothétique, d'envisager la reprise de l'exploitation des réserves résiduelles de la mine du Burc. Cependant le Code Minier (art. 91) demande à l'exploitant d'exposer les mesures prises pour préserver les possibilités de reprises de l'exploitation, ou de justifier leur impossibilité.

Après arrêt de l'exploitation il est prévu :

- l'ennoyage total de la mine (voir § 8.3 ci-après) et l'écoulement naturel (gravitaire) de ses eaux d'exhaure,
- l'obturation complète et le retour à un aspect naturel de ses accès (voir § 8.2.3 ci-après).

Ces mesures sont indispensables pour garantir la sécurité et la salubrité publiques à long terme, compte tenu de la topographie.

Compte tenu de ces mesures, une reprise de l'exploitation nécessiterait :

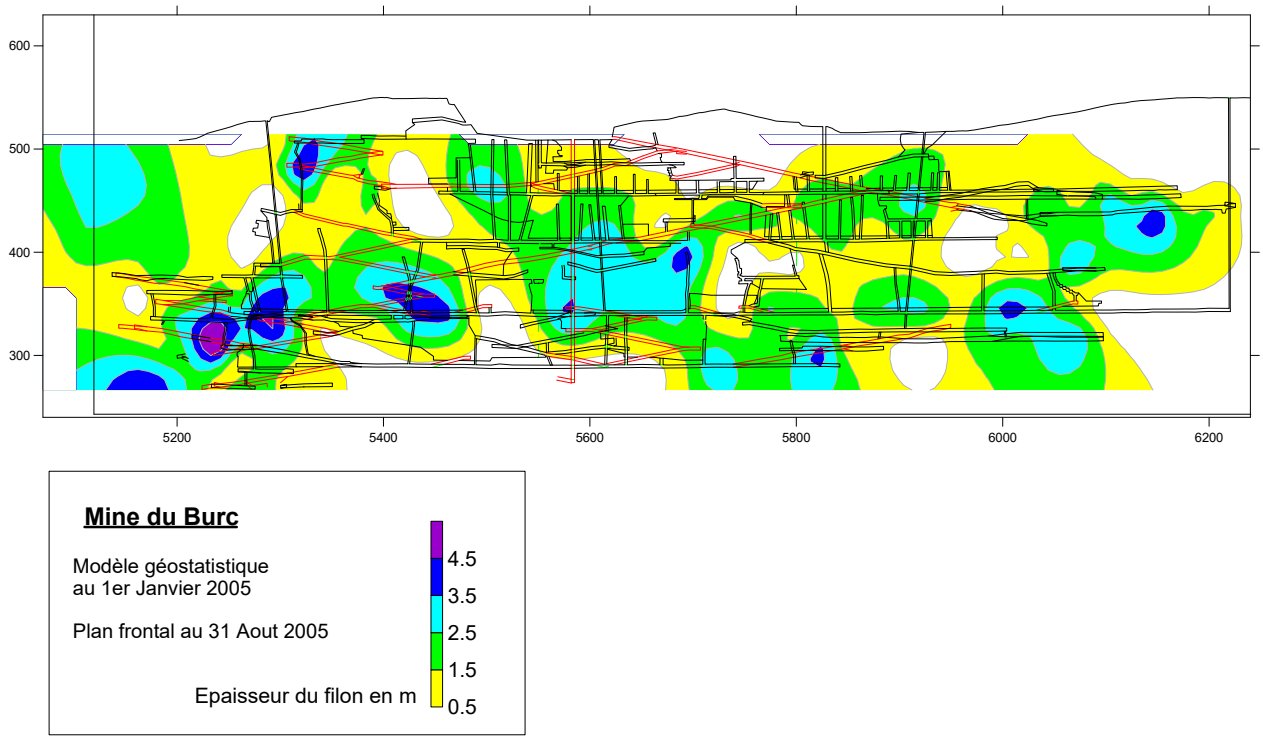
- le creusement de nouvelles infrastructures d'accès,
- un dénoyage préalable complet des vieux travaux, compte tenu du risque élevé de percement aux eaux.

Remettre en question l'ennoyage de la mine et l'obturation des accès nécessiterait de prévoir :

- le maintien hors d'eau des ouvrages par un pompage abondant et permanent,
- le maintien d'un gardiennage permanent des accès,
- le maintien d'un minimum d'entretien minier de toute ou partie des ouvrages.

Au stade actuel, aucune hypothèse réaliste de reprise de l'exploitation ne permet d'envisager l'engagement de telles dépenses, sur une durée indéfinie (voire même en permanence) tant en raison des coûts opératoires de l'exploitation, trop élevés dans les conditions actuelles, que de l'ampleur modeste des réserves résiduelles.

Toutefois, de façon à permettre la réévaluation ultérieure de l'intérêt économique d'une remise en exploitation du Burc, ou du moins de ce qu'il en reste, l'ensemble des **connaissances géologiques** accumulées par SOGEREM au cours de l'exploitation est jointe au présent dossier, et rendue disponible aux services techniques de l'Etat. Ces données sont présentées au § 6.7 du présent dossier, et également disponibles sous forme électronique sous différents formats (de façon à prévenir autant que possible tout risque d'obsolescence du support).



8.2.1.7 Intérêts agricoles

SOGEREM n'est propriétaire d'aucune parcelle du site.

Les terrains loués seront rendus à leurs propriétaires conformément aux clauses prévues par les contrats de location.

8.2.2 Inventaire des risques potentiels vis-à-vis de la sécurité et salubrité publiques

8.2.2.1 Risque radiologique

Le risque radiologique est susceptible de concerner les sites miniers uranifères ou certains sites de mines métalliques susceptibles de receler ou d'émettre des gaz radioactifs (radon).

Les dernières mesures de radon faites dans la mine en 2004, conformément à la réglementation en vigueur (RGIE titre RI et Code du travail (décret n° 2003-296)) indiquaient l'absence de gaz radioactifs (voir document joint en Annexe 10).

Par conséquent, la mine du Burc ne présente pas de risque radiologique.

8.2.2.2 Risque de feux, d'incendie ou d'explosion

Après obturation et ennoyage, les travaux souterrains ne contiendront d'autres matières combustibles solides ou liquides que les résidus des bois de soutènement, et des pneus usagés (ces derniers en quantités insignifiantes et uniquement dans les garnissages des soutènements les plus récents).

De même, par construction (= absence de cloches ou de points hauts borgnes), aucun vide souterrain n'est susceptible de piéger des accumulations gazeuses significatives issues de la fermentation de ces bois de soutènement.

Ainsi, les risques de feux, d'incendie ou d'explosion des travaux miniers souterrains sont nuls.

Il en est de même des installations de surface et notamment de la verse à stérile, sur laquelle aucun bois n'a été déposé.

8.2.2.3 Existence de sols pollués

A l'arrêt des travaux, il n'existe pas de stockage de résidus de traitement sur le site.

Le carreau, ainsi que les abords des installations qui seront détruites par la suite (notamment les abords des boxes de stockage), seront au préalable débarrassés des graviers susceptibles de contenir de la fluorine.

Le site industriel existant depuis les années 1950, l'absence totale de sols pollués (notamment de pollution aux hydrocarbures) ne peut être certifiée en raison de la possibilité d'existence de pollutions historiques.

Néanmoins, étant donné la nature de l'activité et l'histoire récente, les éléments suivants peuvent être affirmés :

- aucune pollution (ne serait-ce que d'ampleur limitée) n'est connue à ce jour sur le site, ni n'a été reportée dans le passé,
- les seules pollutions des sols susceptibles d'exister sont des pollutions aux hydrocarbures,
- les analyses des eaux d'exhaure n'ont jamais mis en évidence de pollution aux hydrocarbures,
- les lieux actuels de stockage (2 cuves à fuel d'une capacité de 10 000 et 8500 litres) sont équipées de cuves de rétention, et les lieux de transvasement sont sur aire étanche . Les procédures opératoires en vigueur à SOGEREM sont de nature à éviter tout déversement accidentel d'hydrocarbure et, en cas de déversement accidentel, prévoient leur récupération, afin d'éviter ou limiter toute pollution du sol.
- SOGEREM est certifiée ISO 14001 depuis 1996 et applique de longue date les procédures propres à éviter la pollution des sols.

En conséquence il n'y a pas lieu de prévoir à priori de dépollution de sol.

Le carreau sera démantelé et à cette occasion les cuves à fuel seront démontées et leurs cuves de rétention démolies conformément à la réglementation en vigueur et aux procédures ALCAN.

8.2.2.4 Stabilité du dépôt de stériles

Etat de la verse à stériles lors de l'arrêt des travaux

Il existe sur le site un dépôt de stériles, à l'ouest de la route d'accès, sur la parcelle cadastrale AN 48. Il figure sur le plan joint en annexe 7.1.

Différentes vues du dépôt de stériles

Il a été constitué avec des stériles miniers, et non avec des résidus de traitement de l'usine de gravimétrie ou avec des boues de lavage.

Ce dépôt a été constitué pour deux raisons :

- pour stocker les matériaux stériles issus des creusements des infrastructures, matériaux qui devaient temporairement être mis en stock en attendant leur évacuation dans les chantiers d'exploitation en cours de remblayage,
- Pour servir d'aire d'essorage des boues issues du curage des bassins de décantation, avant leur transport à Montroc et leur recyclage dans l'usine de flottation (en raison de leur teneur intéressante # 30% CaF2)

En raison de ce dernier usage, la surface du dépôt de stérile a été aménagée et rendue accessible aux engins de chargement et transport par une piste. L'égouttage des boues a été possible en raison de la perméabilité des matériaux, suffisant à assurer l'écoulement des eaux provenant de l'égouttage au travers des remblais.

Pour permettre l'écoulement des eaux de ruissellement de surface, un fossé avait été aménagé à l'ouest de cette verse à stérile, le long du talus naturel. Une buse permettait aux eaux collectées de passer sous la piste d'accès à la poudrière.

Au total, le volume de stériles miniers accumulés ne dépasse pas 40 000 m3, sur une hauteur maximale de 15 mètres environ.

Avant-projet de réaménagement

La verse à stérile sera réaménagée. Le plan joint en annexe 7.3 montre le principe retenu pour ce réaménagement, et présente un avant-projet de la topographie finale.

La remise en état prévoit :

- l'enlèvement des volumes de remblais nécessaires au calage des talus du carreau qui le nécessitent (voir paragraphe 8.2.2.5 ci-après),
- un remodelage de la surface de façon à adoucir le talus de la verse,
- la préservation des parties déjà revégétalisées, tout en régalant au mieux le peu de terre végétale disponible à proximité.

Remodelage de la surface
Une fois les matériaux nécessaires récupérés les stériles restant sur place seront remodelés.
La géométrie finale prévoit :

- une pente unique, vers l'ouest (voir plan en annexe 7.3), comprise entre 2% et 5%, de façon à permettre l'écoulement des eaux sur la surface de la verse avant leur infiltration, selon des chemins d'écoulement les plus rapides possibles. Une pente limitée à 5 % est de nature à éviter les ravinements susceptibles de se créer sur des pentes trop fortes,
- l'aménagement d'un fossé de collecte et d'écoulement des eaux le long de la bordure ouest de la verse
- l'adoucissement de la pente sud à une pente inférieure ou égale à 37°. Cet angle correspond à l'angle de talus naturel de ces remblais.

Stabilité à long terme
La stabilité à long terme de cette verse à stérile est démontrée pour les raisons suivantes :

- D'une part cette verse est draînante et aucune pression hydrostatique ne peut s'y développer : pour preuve, les eaux superficielles s'y infiltrent à plus ou moins brève échéance. En outre cette verse a été utilisée pour le dépôt provisoire et l'égouttage des boues.
- D'autre part les matériaux constitutifs sont favorables à la stabilité du dépôt, en raison de leur granulométrie grossière et de leur forme anguleuse (il s'agit de stériles de mine et non pas résidus de traitement de minerai).
- Enfin, l'ancienneté de la mise en place du dépôt (plus de 20 ans) sans qu'ait été mis en évidence la moindre instabilité, témoigne de sa parfaite stabilité à long terme.

En outre, lorsque la géométrie définitive de la verse à stérile pourra être finalisée, celle-ci sera analysée par un spécialiste en géotechnique qui statuera sur sa stabilité à long terme.

Gestion des ruissellements de surface

La pollution des eaux de ruissellement sera évitée par :

- L'aménagement d'un fossé latéral,
- La pente unique donnée à la surface de la verse (2 à 5%) permettant l'écoulement direct des eaux vers le fossé,
- L' étanchéité de la surface d 'écoulement procurée par la terre végétale qui sera disponible.

Intégration paysagère

L'intégration paysagère de cette verse est satisfaisante à l'heure actuelle, compte tenu :

- de sa situation en fond de thalweg,
- d'une reconquête végétale partielle déjà bien entamée.

Les réaménagements se feront en préservant les parties déjà revégétalisées, Le peu de terre végétale disponible à proximité sera régalée au mieux pour permettre une reconquête rapide par la végétation environnante.

8.2.2.5 Stabilité des talus du carreau de la mine

Des talus subverticaux ont été taillés au rocher pour les besoins des installations de l'exploitation :

- le long de la voie d'accès au site, ainsi que le long des chemins de liaison à la ferme du Burc,
- sur tout le flanc Nord du carreau de Mine.

Ces talus présentent des dénivelées très variables , pour la plupart inférieurs à 10 mètres. Ils peuvent atteindre 30 mètres dans la partie ouest du carreau.

Leur stabilité à long terme est démontrée par

- une géométrie d'origine adaptée à la lithologie,
- la tenue sans aucun incidents démontrée depuis déjà plusieurs dizaines d'années,
- une recolonisation végétale déjà bien fournie.

Il est donc prévu de laisser en l'état les talus existants.

Pour les zones pour lesquelles un doute pourrait subsister, il est prévu :

- un adoucissement des pentes des talus par la mise en place et le modelage d'un remblai à une pente moyenne de 35°,
- très localement, un reprofilage des talus les plus raides par des tirs en tête de talus.

8.2.3 Risques d'intrusion : évaluation, mesures prises ou à prendre vis-à-vis du risque d'intrusion dans les travaux souterrains arrêtés

La mine souterraine du Burc a permis tout au long de son exploitation l'extraction de pièces minéralogiques de bonne qualité et rareté, qui ont fait – et feront vraisemblablement toujours – la renommée du site dans les milieux spécialisés.

Le site demeure donc susceptible d'attiser la convoitise de chercheurs de minéraux. *Le risque d'intrusion volontaire dans les travaux souterrains apparaît donc sensible.*

Outre ce risque d'intrusion humaine volontaire, il y a lieu de signaler les risques d'intrusion, humaine ou non, involontaire (= chute involontaire de personne(s) ou de bétail dans une cavité accessible ou non signalée).

Il convient ainsi :

1) de s'assurer que tous les accès soient obturés, de façon stable à long terme, de façon à éviter :
    a. les possibilités de pénétrations, même par un humain de la taille d'un enfant,
    b. les instabilités à long terme,
    c. les possibilités de pénétration par des méthodes destructives rapides (« habituellement à la disposition du public »).

Le présent chapitre fait le bilan exhaustif des accès existant, des travaux d'obturation déjà réalisés, et des garanties que ces derniers offrent en matière de sécurité. Les cas particuliers du puits et des cheminées actuellement exploitées ont fait l'objet d'études détaillées spécifiques jointes en annexe 11. Le cas de l'accès sélectionné pour servir d'exutoire aux eaux d'exhaure a également fait l'objet d'une étude spécifique, jointe en Annexe 09.

2) de s'assurer que ces accès soient correctement dissimulés dans le paysage après obturation par un aspect le plus proche possible de l'état naturel, de façon à éviter toute trace d'accès souterrain, afin de rendre plus difficile encore toute velléité de pénétration.

8.2.3.1 Revue des accès existants ou ayant existé

Le tableau ci-dessous récapitule, de façon exhaustive, les accès existant ou ayant existé, sur le site de l'exploitation du Burc, et précise :

- les coordonnées du débouché de l'ouvrage en surface,
- la nature de l'ouvrage (ainsi que la fiabilité de l'information en question).

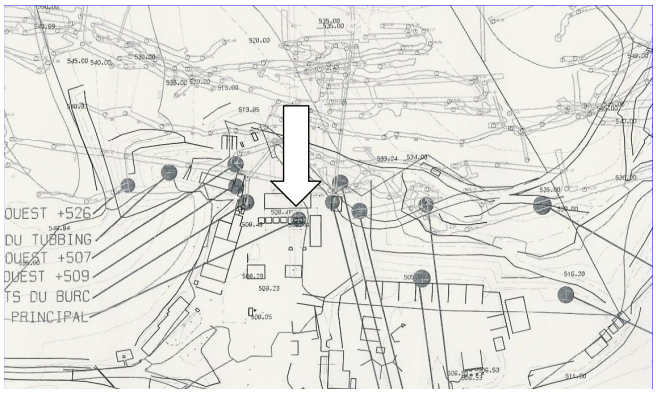
Ce tableau est établi à partir de la compilation des données cartographiques disponibles dans les archives de SOGEREM, complétés par plusieurs témoignages de mineurs ayant connu ou participé au remblayage des ouvrages dont il est question. M CAVAILLES, délégué mineur du site jusqu'en 2003, par conséquent concerné par les travaux de mise en sécurité déjà réalisés, a également été consulté.

En outre, les accès sont reportés sur un plan légendé joint en Annexe 7-7.

accès n°	type d'accès	dénomination	X	Y	Z	(Lambert)
1	puits rectangulaire muraillé	puits principal	605 583	174 887	508,41	
2	cheminée forée	cheminée Ouest	605 286	174 930	530,00	
3	cheminée forée	Cheminée Est	605 922	174 938	515,24	
4	cheminée forée	Cheminée Bourelié	606 219	174 889	549,30	
5	travers-banc	descenderie principale	605 616	174 890	508,87	(sole)
6	voie de niveau (de tête)	accès ouest + 526 (niv. Zéro)	605 482	174 907	526,16	(couronne)
7	travers banc	accès derrière les boxes	605 658	174 850	505,79	(couronne)
8	travers banc	accès derrière le stock mine	605 744	174 840	510,00	(sole)
9	cheminée traditionnelle	cheminée à remblais	605 825	174 932	521,84	
10	cheminée traditionnelle	cheminée de l'entrée de la descenderie	605 663	174 890	528,30	
11	puits ou cheminée	cheminée clôturée	605 730	174 893	532,00	
12	cheminée traditionnelle	cheminée à remblais sous le Viane	605 609	174 908	509,00	
13	cheminée forée	cheminée à remblais sous le concasseur	605 605	174 896	508,70	
14	puits boisé	ancien puits du Burc	605 552	174 895	508,50	
15	voie de niveau	accès ouest à + 507 (ancien niveau zéro)	605 546	174 920	507,00	(sole)
16	travers-banc ou voie au mur	accès ouest à + 509	605 546	174 906	508,85	(sole)
17	puits ou cheminée	ancien puits	605 893	174 941	516,00	
18	puits ou cheminée	ancien puits	605 903	174 942	516,00	
19	cheminée traditionnelle	cheminée "du tubbing"	605 506	174 915	510,10	

Accès n° 1 **Le puits principal**

Chevalement en tête du puits principal



Localisation. Extrait du plan au1/2000° joint en annexe 07

Ce puits a servi d'accès principal (personnel, entrée d'air, extraction) pendant la plus grande partie de la durée de vie de la mine. Son état actuel résulte de plusieurs phases de fonçage, approfondissement, rénovation, équipement. Il est profond de 235 m et accessible par toutes ses recettes (-54, -100, -135, -170, -220), ainsi qu'à son bouniou.

Caractéristiques du puits principal

Fonçage	méthode traditionnelle, de 1960 à 1963 entre la surface et le niveau –100, approfondi en 1972-1973 jusqu'à –170, puis en 1984-1985 jusqu'à sa profondeur actuelle –235. Rénovation et mise en place du muraillement entre la recette –115 et la surface en 1984-1985.
Hydrogéologie	Les terrains sont secs dans la partie supérieure du puits (jusqu'à la recette –135), et ruissellent en dessous. Après ennoyage il faudra s'attendre à une resaturation complète de la colonne du puits.

Caractéristiques des épontes

Le puits a été foncé dans le faciès localement dit « schistes noirs ». Il s'agit d'une formation à la schistosité marquée, le plan de schistosité le plus marqué étant parallèle à la stratification. La formation est subhorizontale (pendage 10 à 15° vers le Nord).

Ses caractéristiques mécaniques principales sont les suivantes :

Caractéristiques de la matrice rocheuse :	c (kPa)	20 à 550
	Phi	13° à 28°
	E (Mpa)	10 000
	Nu	0.3
Discontinuités	c (kPa)	0 à 130
	Phi	14° à 22°

(d'après références ANTEA)

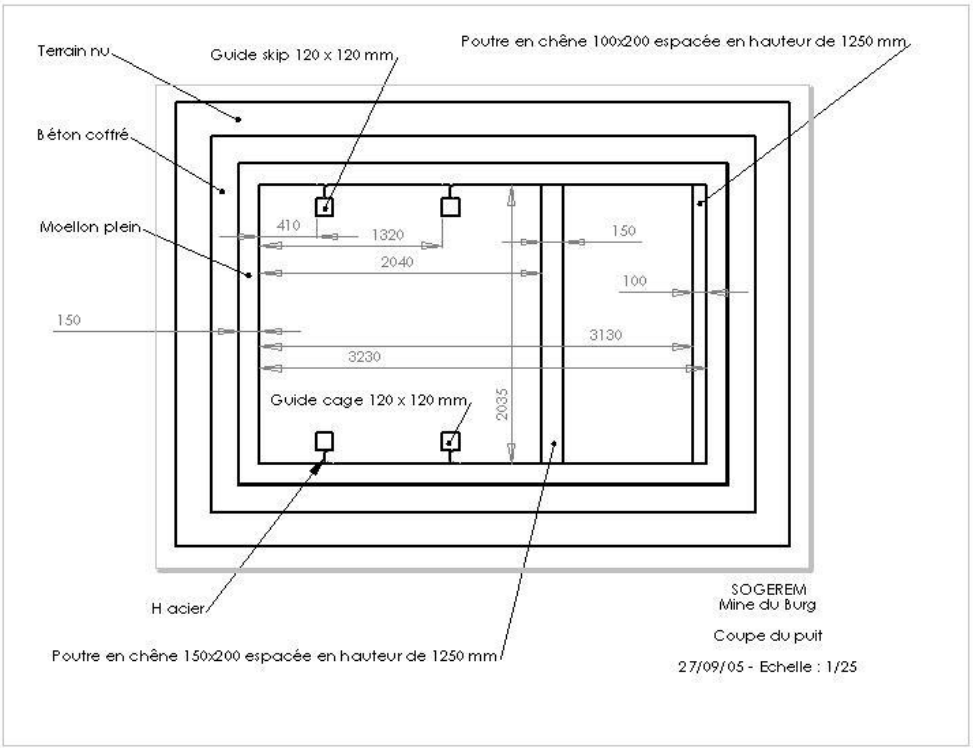
En outre, il convient de noter qu'en ce qui concerne la partie supérieure du puits (100 premiers mètres), les épontes sont saines et ne sont pas affectées d'accident tectonique important.

Caractéristiques géométriques et équipements

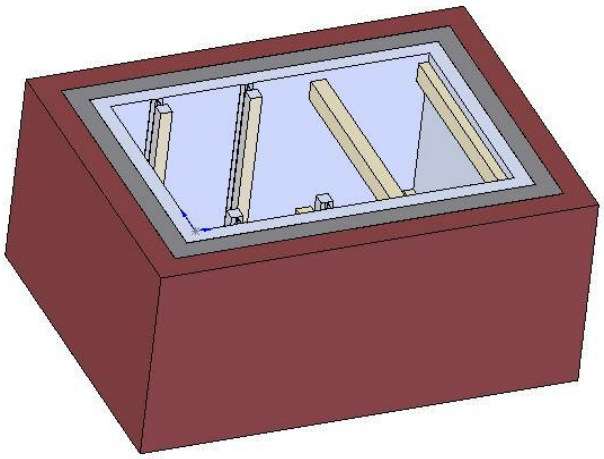
Le puits est compartimenté avec un compartiment échelles / réseaux et un compartiment extraction (cage et skip en balance, machine d'extraction à double tambours). Le compartiment extraction est équipé de guides en bois d'iroko.

Le puits est revêtu dans sa partie supérieure d'un muraillement en moëllons pleins sur sa partie supérieure (surface à –135), en excellent état, et d'un muraillement en bois dans sa partie inférieure jusqu'à la recette –220. Ce muraillement en bois est en mauvais état en raison des ruissellements d'eau.

Les caractéristiques dimensionnelles du puits sont les suivantes :



vue en coupe entre les recettes jour et -135



vue 3D de la structure

légende		
	rouge	schistes noirs
	gris	béton coffré
	bleu	moêllons pleins

Le compartiment cage et contrepoids vu depuis la surface

Caractéristiques du muraillement de la surface à la recette -135
Le muraillement a été érigé par la base en moëllons de béton pleins d'épaisseur 150 mm. A l'extrados du muraillement un remplissage de béton a été mis en place à chaque rangée.
A signaler, les poutres horizontales en chêne servant de supports aux planchers du compartiment échelles.

Etat du muraillement du puits de la surface à la recette -135
Le puits a été muraillé à partir de la recette du niveau –135. Ce muraillement a été érigé à partir de poutrelles (U + IPN) et de coffrages qui ont été démontés après la construction.

Ce muraillement est donc suspendu, et sa stabilité est due à la force de friction exercée à son extrados.

Aucun armement particulier n'a été mis en place en base de construction.

Les seuls ancrages à signaler sont ceux concernant les 4 guides : chaque ancrage est constitué de 2 boulons (longueur = 0.8m minimum et diamètre 16 mm). Les ancrages sont en place chaque 1.25 mètre (environ).

Mode d'obturation envisagé pour le puits principal

Le mode d'obturation envisagé est un bouchon autoportant (préconisé par l'INERIS, voir étude jointe en annexe 11). La partie inférieure de la colonne du puits demeurera non remblayée.

Les justificatifs de ce choix sont :

- l'existence d'une zone saine de longueur suffisant à la mise en place d'un tel bouchon, à proximité de la surface,
- l'absence d'indications vis-à vis de l'hydrogéologie souterraine (pas de nappes à étancher),
- la fiabilité de ce concept d'obturation,
- la simplicité de mise en place

Les alternatives possibles telles que le remblayage complet ne présente pas la même garantie de sécurité d'exécution (désarmement difficile et dangereux), ni les mêmes garanties de stabilité à long terme (risque de débourrage de la colonne, risques de tassements).

Voir en Annexe 11 la justification technique de ce mode d'obturation, son calcul de dimensionnement ainsi que sa spécification technique détaillée et le plan guide pour sa confection.

Caractéristiques principales du bouchon et mode de mise en place

- démontage des échelles et planchers entre –26 m et la surface préalablement à la mise en place. Les guides et moises sont laissés en place.

- Réalisation d'un plancher de coffrage au moyen d'une dalle de béton armé de 25 cm d'épaisseur sur profilé métallique collaborant (« COFRAPLUS »Arcelor) .

  Ce plancher a été conçu pour tenir le pré-bouchon au cours de sa prise en masse (45 à 50 tonnes) avec un coefficient de sécurité supérieur à 3.

- Mise en place d'un **prébouchon** de 2.80 m de longueur (cotes pied = -26,00 cote tête =-23.20),

  - béton mis en place en 1 seule coulée,
  - avec aiguille vibrante,
  - qualité selon NF EN 206-1 :
    - XA3,
    - C40/C50,
    - Dmax 20 mm
    - Consistance S3,
    - Cl 0,4

        - Qualité CEM | PMES
        - Dosage 385
        - Adjuvants / ajouts : aucun.
    - séchage : 10 jours avant la mise en place du bouchon,

- Mise en place d'un **bouchon** de 8.10 m de longueur (cotes pied = -23,20 cote tête =-15,10),

    - béton mis en place en 1 seule coulée,
    - avec aiguille vibrante,
    - qualité selon NF EN 206-1 :
        - XA3,
        - C40/C50,
        - Dmax 20 mm
        - Consistance S3,
        - Cl 0,4
        - Qualité CEM | PMES
        - Dosage 385
        - Adjuvants / ajouts : aucun.
    - séchage : 10 jours avant le remblayage.

Ces caractéristiques sont conformes aux réquisitions de l'INERIS ayant dimensionné pré-bouchon et bouchon (voir Annexe 11 et Annexe 13).

Traitement de la partie supérieure du puits

- Après désarmement du chevalement la partie sus-jacente au bouchon sera remblayée au moyen de **gravier concassé lavé de 13/20 mm** (provenant de l'usine de traitement de Montroc), afin de prévenir tout risque de tassement ultérieur, et d'empêcher le développement de fronts de charge hydraulique au sein de ce remblai.

- Une dalle de béton sera coulée. Cette dalle sera coulée après bonne vérification de son assise sur les terrains sains. Cette dalle aura des dimensions de 4,00 m x 4,00 m.et une épaisseur minimale de 25 cm. Elle sera armée d'une treille de maille 0.2 m de fers à béton de diamètre 20 mm, de façon à résister au roulage d'un engin agricole ou de gabarit routier.

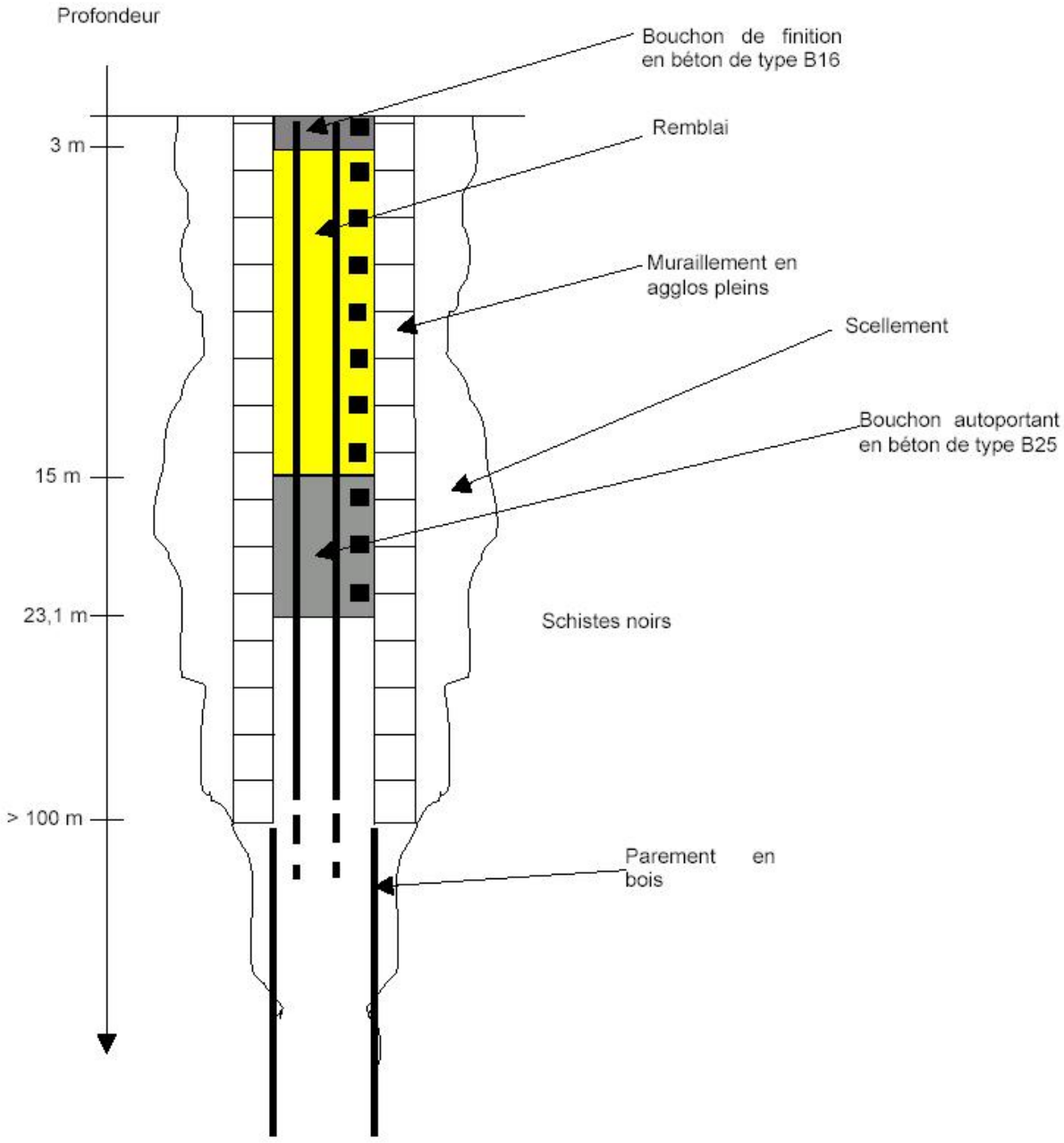


Schéma de principe du bouchon autoportant

Autres réquisitions concernant le puits

- Un piézomètre sera mis en place de façon à permettre le suivi de l'évolution de la remontée des eaux dans le puits (tuyau PEHD d'un diamètre inférieur à 40 mm). Ce piézomètre servira également d'évent de dégazage de façon à éviter toute accumulation de pression au cours de la remontée des eaux. Ce piézomètre sera conservé pendant une durée suffisant à vérifier la stabilité du niveau de l'eau dans la mine, soit 2 ans au maximum.
- Ce piézomètre sera installé dans un regard ménagé à cet effet dans la dalle de couverture.

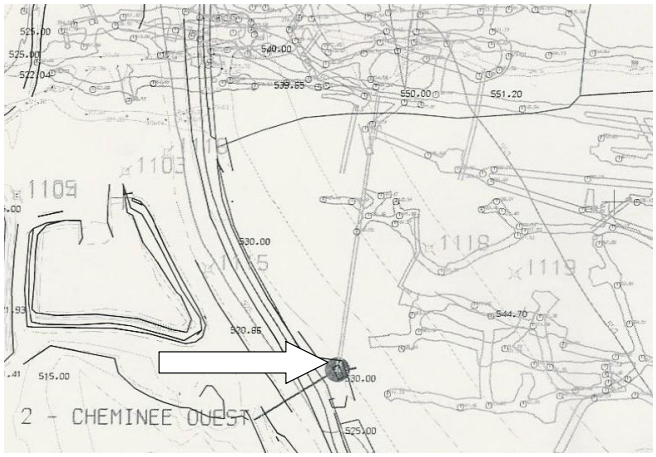
Le choix d'un diamètre inférieur à 40 mm permet de garantir l'impossibilité de pompage au travers de ce piézomètre.

Traitement paysager

Enfin, un remblai sera mis en place sur la dalle de surface et sera intégré au traitement paysager du carreau de façon à ce qu'aucune trace apparente du puits ne subsiste, hormis regard mentionné ci-dessus tant que le suivi de la remontée des eaux restera nécessaire (soit 2 ans au maximum).

Accès n° 2 La Cheminée Ouest

Cheminée Ouest, en bordure du chemin d'accès



Localisation. Extrait du plan au1/2000° joint en annexe 07

Cette cheminée a été forée au raise boring en diamètre 1,50 mètres à partir du niveau –135 jusqu'à la surface. Elle a ensuite été prolongée entre –170 et –135 en méthode traditionnelle (foration-tir, en montant), en section #1,50 m sur 2,00 m.

La totalité de ses accès est aujourd'hui visitable aux niveaux –100, -135, et –170.

La foration date de 1977, date à partir de laquelle cette cheminée figure sur les plans de récolement des archives de SOGEREM. (Le plan de projet est également daté de 1977)

Mode d'obturation envisagé pour cette cheminée

Selon les conseils de l'INERIS, il est prévu une obturation de surface par la mise en place d'un bouchon perché autoportant en béton. Voir en Annexe 11 la justification technique de ce mode d'obturation ainsi que le calcul de dimensionnement.

Le béton utilisé pour la constitution du bouchon sera conforme aux réquisitions émises par l'INERIS dans sa note jointe en Annexe 13.

Mode opératoire :

1) repérage (visuel) de la zone altérée de surface,
2) mise en place d'un remblai jusqu'à une profondeur de 25 mètres (soit à la cote –29 m, compte tenu de l'inclinaison de la cheminée),

Nota : ce remblai n'a aucun rôle de soutènement ou de remblayage à long terme. Sa seule fonction est de servir de sous-bassement provisoire au bouchon. Aucune réquisition technique n'est définie en ce qui concerne les caractéristiques de ces remblais.

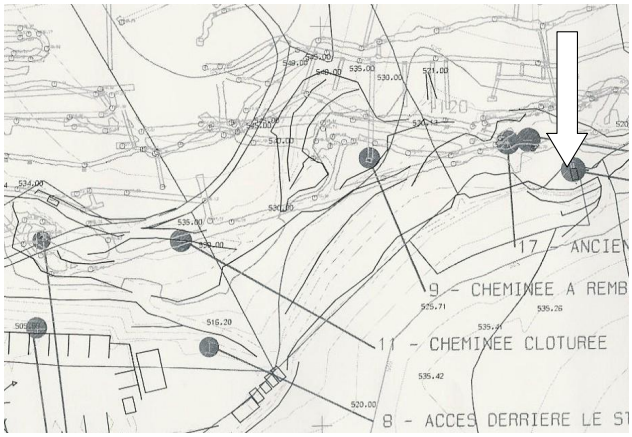
3) coulage du bouchon (sur 7 mètres de hauteur) .
4) remblayage de la partie supérieure de la cheminée.

Event de dégazage : Un tuyau PEHD de 2 pouces sera mis en place au travers du bouchon de façon à éviter tout développement de pression au cours de la remontée des eaux.

Traitement paysager des installations en surface
Les installations de surface seront détruites et l'emplacement sera intégré au traitement paysager du carreau de façon à ce qu'aucune trace apparente de la cheminée ne subsiste.

Accès n° 3 La Cheminée Est

Vues de la Cheminée Est



Localisation. Extrait du plan au1/2000° joint en annexe 07

Cette cheminée a été forée au raise boring en diamètre 1,80 mètres à partir du niveau –170 jusqu'à la surface

Elle dispose d'accès aux niveaux –170 (342), -135 (386) et –54 (454).

La foration date de 1977, date à partir de laquelle cette cheminée figure sur les plans de récolement des archives de SOGEREM. (Le plan de projet est, lui, daté de 1975)

Cette cheminée débouchait initialement au niveau –170. Elle a été détruite jusqu'au niveau –135 par l'exploitation en tranches montantes. Elle a été remblayée entre –54 et –135.

Le seul accès à cette cheminée actuellement visitable est au niveau –54.

Mode d'obturation envisagé pour cette cheminée

Selon les conseils de l'INERIS, il est prévu une obturation de surface par la mise en place d'un bouchon perché autoportant en béton. Voir en Annexe 11 la justification technique de ce mode d'obturation ainsi que le calcul de dimensionnement.

Le béton utilisé pour la constitution du bouchon sera conforme aux réquisitions émises par l'INERIS dans sa note jointe en Annexe 13.

Mode opératoire :

1) repérage (visuel) de la zone altérée de surface,
2) mise en place d'un remblai jusqu'à une profondeur de 25 mètres (soit à la cote –29 m, compte tenu de l'inclinaison de la cheminée),

Nota : ce remblai n'a aucun rôle de soutènement ou de remblayage à long terme. Sa seule fonction est de servir de sous-bassement provisoire au bouchon. Aucune réquisition technique n'est définie en ce qui concerne les caractéristiques de ces remblais.

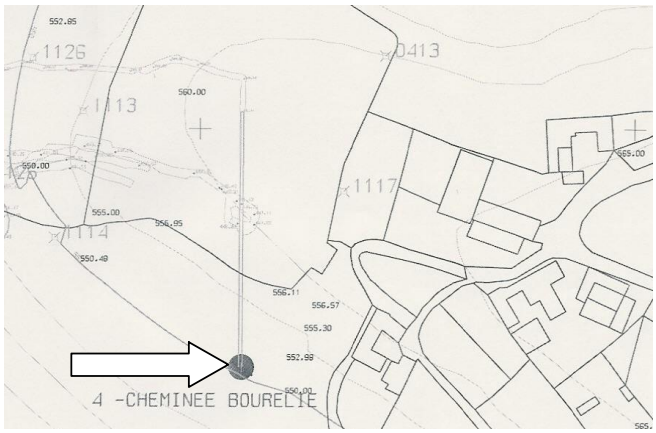
3) coulage du bouchon (sur 7 mètres de hauteur) .
4) remblayage de la partie supérieure de la cheminée.

Event de dégazage : Un tuyau PEHD de 2 pouces sera mis en place au travers du bouchon de façon à éviter tout développement de pression au cours de la remontée des eaux.

Traitement paysager des installations en surface
Les installations de surface seront détruites et l'emplacement sera intégrée au traitement paysager du carreau de façon à ce qu'aucune trace apparente de la cheminée ne subsiste.

Accès n° 4 La Cheminée Bourrelier

La Cheminée Bourrelier



Localisation. Extrait du plan au1/2000° joint en annexe 07

Cette cheminée a été forée au raise boring en diamètre 1,80 mètres à partir du niveau –170 jusqu'à la surface.

La foration date de 1981, date à partir de laquelle cette cheminée figure sur les plans de récolement des archives de SOGEREM.

Son accès à –170 est visitable.

Un percement a été réalisé au niveau –100. Un autre percement est prévu début 2006 au niveau –135.

Le percement du niveau –100 est accessible, de même que le sera celui de –135.

Mode d'obturation envisagé pour cette cheminée

Selon les conseils de l'INERIS, il est prévu une obturation de surface par la mise en place d'un bouchon perché autoportant en béton. Voir en Annexe 11 la justification technique de ce mode d'obturation ainsi que le calcul de dimensionnement.

Le béton utilisé pour la constitution du bouchon sera conforme aux réquisitions émises par l'INERIS dans sa note jointe en Annexe 13.

Mode opératoire :

1) repérage (visuel) de la zone altérée de surface,
2) mise en place d'un remblai jusqu'à une profondeur de 25 mètres (soit à la cote –29 m, compte tenu de l'inclinaison de la cheminée),

Nota : ce remblai n'a aucun rôle de soutènement ou de remblayage à long terme. Sa seule fonction est de servir de sous-bassement provisoire au bouchon. Aucune réquisition technique n'est définie en ce qui concerne les caractéristiques de ces remblais.

3) coulage du bouchon (sur 7 mètres de hauteur) .
4) remblayage de la partie supérieure de la cheminée.

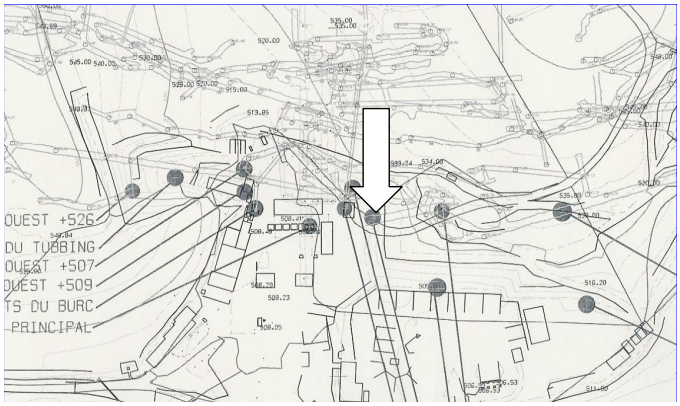
Event de dégazage : Un tuyau PEHD de 2 pouces sera mis en place au travers du bouchon de façon à éviter tout développement de pression au cours de la remontée des eaux.

Traitement paysager des installations en surface

Les installations de surface seront détruites et l'emplacement sera intégré au paysage champêtre par régalage de terre végétale, de façon à ce qu'aucune trace apparente de la cheminée ne subsiste.

Accès n° 5 La descenderie principale

Vue de l'entrée avec son portique



Localisation. Extrait du plan au1/2000° joint en annexe 07

Dans les archives de SOGEREM le plan du projet est daté de 1978 en largeur 2.50 m. La descenderie principale apparaît dans tous les plans de récolement postérieurs à 1978.

Cette descenderie a donc été

- creusée en 1978-1979 en largeur 2.50 m,
- élargie entre 1999 et 2001 à la largeur actuelle (= 3.50 m)

Elle constitue au stade actuel l'accès principal aux travaux souterrains, avec une section comprise entre 12 et 15 m2 et une pente comprise entre 15 et 20%. Son soutènement est constitué de boulons à friction et de grillage mis en place à l'avancement de façon non systématique.

Mode d'obturation envisagé pour cette descenderie

Vis-à-vis des risques de désordre de surface

Le remblayage jusqu'à la voûte de la partie superficielle de la descenderie est requis de façon à prévenir les risques d'apparition de fontis qui pourraient survenir en surface à l'aplomb de cette dernière. Voir, à ce sujet, l'étude géotechnique (ANTEA) jointe en Annexe 12.

Ce remblayage est nécessaire lorsque le recouvrement de l'ouvrage est inférieur à 25 mètres. Ce recouvrement correspond aux 35 premiers mètres de la descenderie environ.

Aussi, cette section sera remblayée jusqu'à la couronne.

Vis-à-vis du risque d'intrusion volontaire

L'entrée de la descenderie sera obturée par un mur en blocs à bancher remplis de béton, et armé de fers à béton de 20 mm de diamètre tous les 0.25 mètres.

La section supérieure de la descenderie sera remblayée comme exposé ci-dessus, sur une longueur de 35 mètres au minimum. Compte-tenu du risque d'intrusion ce remblai sera clavé jusqu'à la couronne par une mise en place hydraulique.

Ce remblai sera drainé par la mise en place sous-jacente d'un drain PVC dans un géotextile.

La stabilité à long terme de ce remblai sera garantie par la mise en place préalable, en aval, d'un ouvrage maçonné. Cet ouvrage maçonné aura également une fonction anti-intrusive compte tenu de sa solidité, et de sa conception, dimensionnée en sorte de nécessiter, pour sa destruction, des moyens autres que ceux ordinairement à la disposition du public.

Cet ouvrage consistera en :

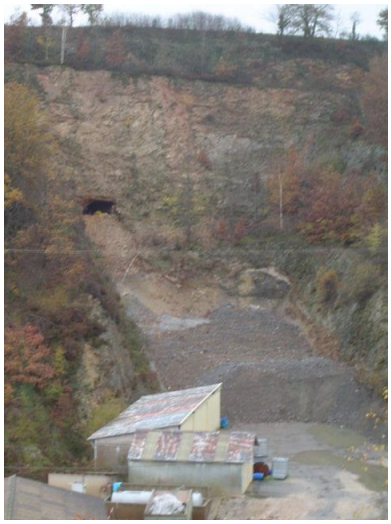
- 2 murs en maçonnerie, distants de 1 m ,
- un béton coffré (Rc # 30 Mpa) dans l'intervalle entre ces deux murs.

Cet ouvrage sera équipé de barbacannes permettant la circulation de l'eau (et de l'air au cours de l'ennoyage), en PEHD diamètre 100 mm.

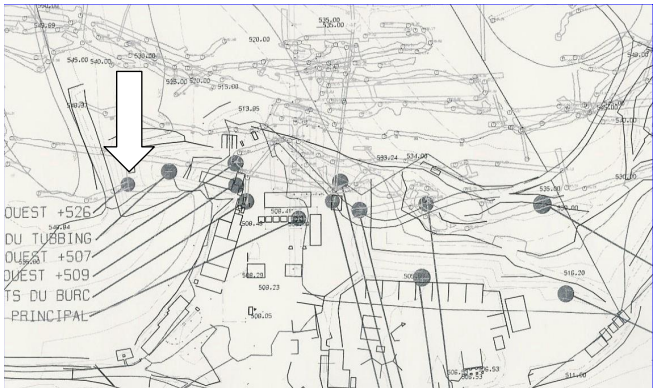
Le plan joint ci-dessous (voir pages suivantes : « Accès n°7 : accès derrière les boxes ») schématise les travaux projetés.

Traitement paysager
Le portail de l'entrée sera démoli, et un remblai occultant l'entrée mis en place contre le talus. Ce remblai sera végétalisé et intégré au traitement paysager du carreau, de façon à occulter toute trace visible de l'ouvrage.

Accès n° 6 L'accès ouest +526 (= « niveau zéro »)



Accès perché à flanc de talus de cet ancien chantier « niveau zéro »



Localisation. Extrait du plan au1/2000° joint en annexe 07

Cet accès est la voie de tête d'un chantier de tranche montante remblayée débouchant dans le talus délimitant le carreau. Le chantier a été terminé d'exploiter au début des années 1990.

Mode d'obturation envisagé pour cet accès

L' obturation complète et la dissimulation intégrale de cet accès sont requises.

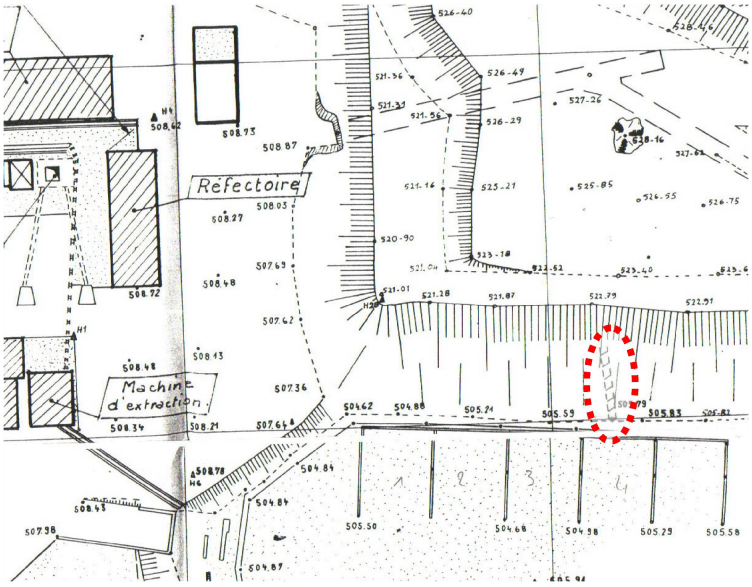
Cet accès ne peut efficacement être muré comme la descenderie, en raison de l'absence de sole solide (cette dernière étant constituée de remblais tassés consolidés).

Il est donc envisagé :

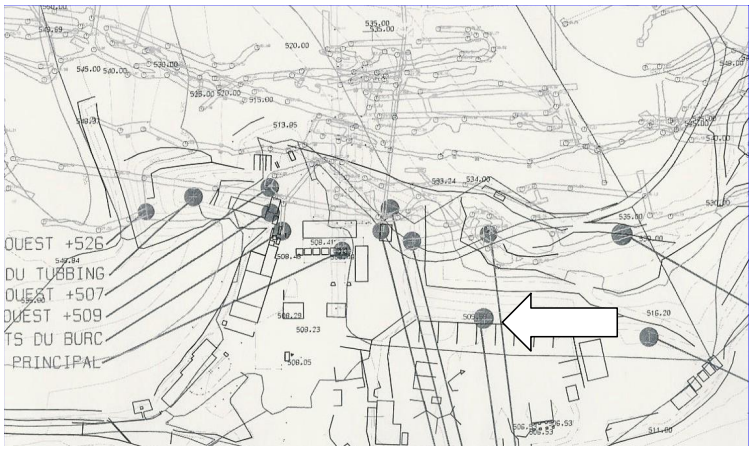
- de remblayer les premiers mètres de cet accès au moyen de remblais et de blocs rocheux,
- de réaliser un remblai occultant l'entrée du chantier, remontant au moins 2 mètres au-dessus du niveau de la couronne de l'accès, et intégré au traitement paysager du carreau.

Accès n° 7 L'accès derrière les boxes

Cet accès ne figure que sur les plans de récolement du carreau des années 1980, et a été oublié sur les plans postérieurs. Il s'agit donc probablement d'un accès antérieur à l'établissement de la concession.



Plan SOGEREM, 02/05/88



Localisation. Extrait du plan au 1/2000° joint en annexe 07

Les boxes ont été construits au cours de l'hiver 1980 et le témoignage d'un mineur (R ROUSTIT) ayant réalisé ces travaux confirme l'existence de cet accès, bien qu'aujourd'hui aucune trace ne soit apparente derrière les boxes.

Cet accès recoupe la descenderie principale à 35 m de son débouché au jour, à la cote 505.00 (cote sole).

Cet accès est l'accès aux travaux souterrains le plus aval connu, il est donc choisi et sera aménagé comme exutoire des eaux d'exhaure. Les raisons du choix de cette solution en ce qui concerne l'exutoire sont explicitées au paragraphe 8.3.4 ci-après

Mode d'aménagement envisagé pour cet accès

Cet accès doit traité vis à vis du risque d'intrusion mais le scellement effectué doit permettre l'écoulement des eaux d'exhaure.

De plus l'écoulement des eaux d'exhaure doit être sécurisé à long terme.

L'accès sera entièrement décapé en surface, et son débouché très soigneusement purgé sur les premiers mètres jusqu'aux terrains sains. Il sera ensuite busé pour assurer la collecte des eaux d'exhaure, et obturé de façon à éviter tout risque d'intrusion

Voir en Annexe 09, les préconisations de CESAME en ce qui concerne l'aménagement de cet accès. Ces préconisations ont été utilisées et adaptées comme exposé ci-dessous.

Voir également, ci-après (pages suivantes), plan et coupe des aménagements projetés.

Traitement vis-à-vis du risque d'intrusion

Un ouvrage d'obturation maçonné sera mis en place à l'entrée de l'accès (n° 5 sur plan ci-dessous)
Cet ouvrage maçonné consistera en :

- 2 murs en maçonnerie, distants de 1 m ,
- un béton coffré (Rc # 30 Mpa) dans l'intervalle entre ces deux murs. Ce béton coffré sera en outre vibré pour garantir l'étanchéité la meilleure possible avec les parois de la galerie préalablement purgées.

Sécurisation des écoulements d'eau.

Des encroûtements calcaires importants ne sont pas susceptibles d'apparaître, même à long terme, en raison de la nature chimique des eaux (voir étude ENSMP en annexe 08).

4 tuyaux PEHD de 100 mm de diamètre seront mis en place dans cet accès, entre son débouché au jour et son carrefour avec la descenderie principale, soit sur une quarantaine de mètres de longueur .

Les tuyaux seront rectilignes, sans blessure ni angle vif, propices à la sédimentation de matériaux susceptibles d'être obturants. Les raccords par manchons seront évités dans la mesure du possible, et si la pose de manchons s'avère nécessaire au cours de la mise en place, ces derniers seront coulés dans un coffrage de béton de façon à garantir leur immobilité définitive.

Le diamètre 100 mm est largement dimensionné pour permettre l'écoulement sans pertes de charge significatives de débits de plusieurs dizaines de m3 /h. Il ne permet

cependant pas l'intrusion humaine volontaire ne fut-ce que celle d'un enfant de petit gabarit.

Il n'a pas paru souhaitable d'utiliser un diamètre supérieur (200 mm par exemple) de façon à favoriser la vitesse de l'écoulement, afin de limiter les risques d'obturation liés à la sédimentation de matériaux.

4 tuyaux seront mis en place de façon à garantir un fonctionnement continu, même en cas d'obturation de l'un ou de plusieurs de ces tuyaux.

L'extrémité extérieure des tuyaux rejoindra un ouvrage de collecte (regard maçonné), équipé d'une bordure de façon à éviter l'écoulement et le mélange des eaux de ruissellement du carreau avec les eaux d'exhaure collectées.

L'extrémité intérieure des tuyaux sera adaptée et installée dans une chambre d'écoulement aménagée afin de prévenir tout risque d'obstruction de l'écoulement :

- L'extrémité libre des tuyaux sera crépinée au moyen de percements latéraux, de façon à prévenir le bouchage des tuyaux même en cas d'accumulation de matériaux autour de leur extrémité,
- L'extrémité libre des tuyaux sera installée en position verticale sur au moins 3 mètres de hauteur, de façon à prévenir leur ensevelissement complet en cas d'accumulation éventuelle d'éboulis,
- La chambre d'écoulement sera séparée de la descenderie principale par un mur de retenue des matériaux flottants susceptibles d'être acheminés par le premier flux (ouvrage maçonné n°2 sur le plan ci-dessous),
- La chambre d'écoulement, disposée à proximité immédiate de l'ouvrage maçonné de la descenderie principale (n° 3 sur le plan ci-dessous, double mur + 1 mètre de béton vibré) sera soutenue par ce dernier, procurant une assurance complémentaire de stabilité à long terme.

Pour tous ces aménagements, aucun matériau métallique (même inoxydable) ne sera utilisé en raison de la nécessité de pérennité de l'ouvrage, en présence simultanée d'eau potentiellement acide et de l'oxygène de l'air.

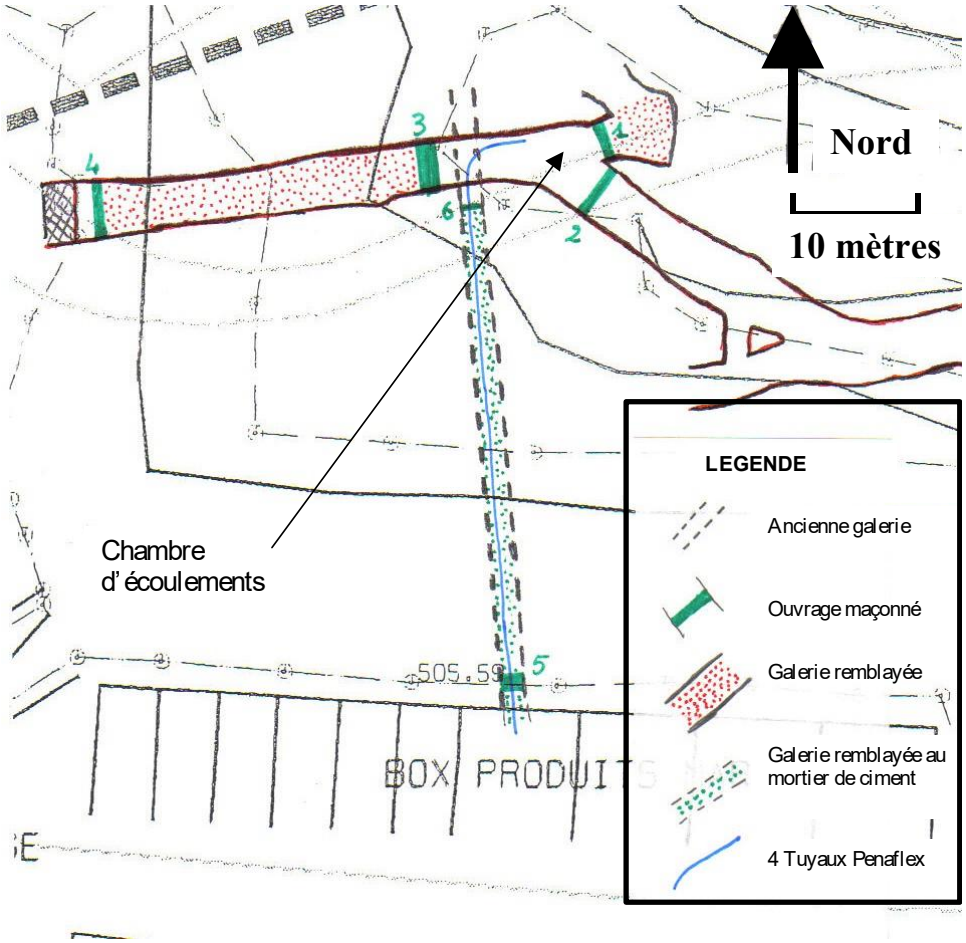
Le niveau de débordement dans le regard sera 505.40 NGF. Cette cote correspond à la cote de stabilisation prévue du niveau d'eau après ennoyage.

En outre, pour éviter tout risque de dégradation des tuyaux en cas d'affaissement de l'accès lui-même :

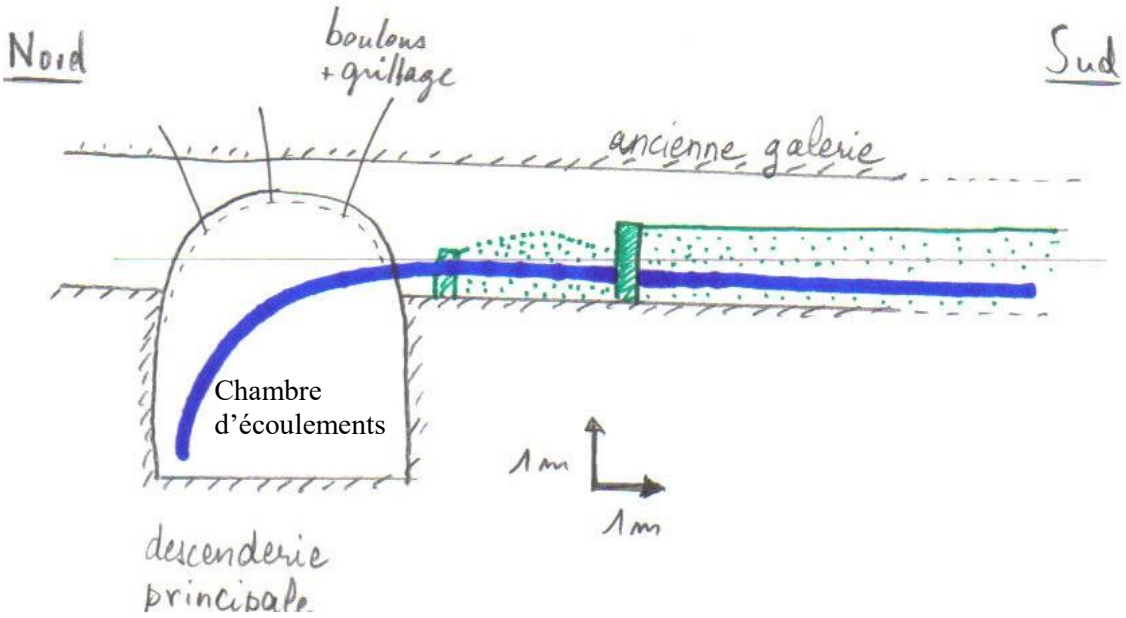
- ces tuyaux seront posés sur une assise de mortier de ciment, sur toute leur longueur,
- ces tuyaux seront protégés par une coulée de mortier au ciment, recouvrant la génératrice supérieure de ces derniers sur une hauteur de 20 cm minimum.

Les caractéristiques principales de ce mortier seront sa résistance aux agressions chimiques et non sa résistance mécanique.

Le plan et la coupe reproduits ci-après montrent les aménagements projetés :



Plan des travaux projetés concernant les accès n°5 et n° 7

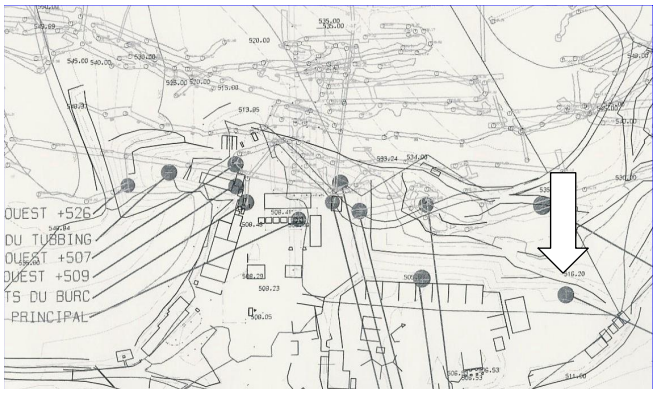


Fil d'eau :
505,40 NGF

Coupe schématique du carrefour de l'ancienne galerie et de la descenderie principale

Accès n° 8 L'accès derrière le stock mine

Derrière le stock, l'accès, dans le talus



Localisation. Extrait du plan au1/2000° joint en annexe 07

Cet accès ne figure que sur les plans de récolement du carreau du début des années 1980, et a été oublié sur les plans postérieurs. Il s'agit donc probablement d'un accès antérieur à l'établissement de la concession.
Cet accès ne recoupe d'ailleurs pas les travaux miniers connus.

En l'état, cet ouvrage n'est pas visitable en raison de la présence de remblais, visibles sur au moins une dizaine de mètres.

Mode d'obturation envisagé pour cet accès

Cet accès sera traité selon le même principe que la descenderie principale.

Il sera décapé et purgé à la main jusqu'à une zone rocheuse saine et dure. Au droit de la roche saine sera construit un ouvrage maçonné, qui garantira la fonction anti-intrusion compte tenu de sa solidité. Cet ouvrage sera conçu et dimensionné en sorte de nécessiter, pour sa destruction, des moyens autres que ceux ordinairement à la disposition du public.

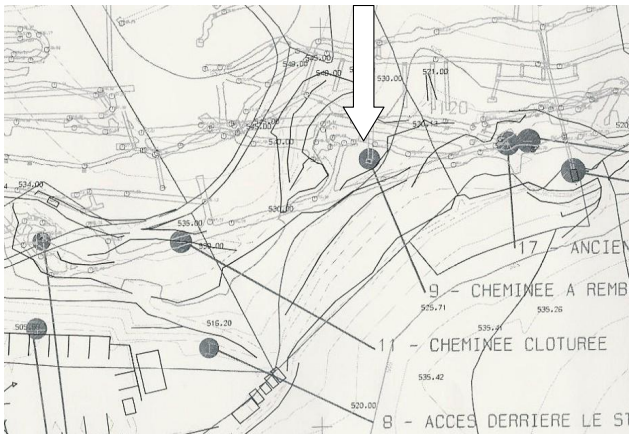
Cet ouvrage consistera en :

- 2 murs en maçonnerie, distants de 1 m ,
- un béton coffré (Rc # 30 Mpa) dans l'intervalle entre ces deux murs.

Traitement paysager
Un remblai occultant l'entrée mis en place contre le talus. Ce remblai sera végétalisé et intégré au traitement paysager du carreau, de façon à occulter toute trace visible de l'ouvrage.

Accès n° 9 La cheminée à remblais

Sous le merlon, à droite sur la photo de droite



Localisation. Extrait du plan au1/2000° joint en annexe 07

Cette cheminée creusée par la méthode traditionnelle à partir du niveau –100 dans le filon est très ancienne puisqu'elle figure déjà sur des plans de 1974, et figure encore sur des plans de récolement de la fin des années 1980.

Cette cheminée doit avoir une dimension de 1.50 X 2.50 m environ .

Elle a été exploitée pour le remblayage des chantiers depuis la surface, ainsi que pour leur ventilation (ventilateur soufflant en surface).

Son accès inférieur n'est plus visitable.

Cette cheminée a été remblayée au début des années 1980 (en tout cas avant 1984 selon plusieurs témoignages). Son bâti de surface (en bois) a été démoli.

Ces remblais se sont tassés au fil des années sur plusieurs mètres et un appoint de remblai a du être effectué en 2000.

Depuis lors, aucun mouvement n'a été remarqué en surface ce qui témoigne de la bonne stabilité de la colonne de remblais.

Compte tenu de ce tassement de plusieurs mètres il convient de penser que la colonne de remblai s'est tassée plutôt qu'à un débourrage complet. Les remblais ont démontré leur stabilité depuis plus de 5 ans, ce qui donne une bonne assurance sur leur stabilité à long terme.

Mode d'obturation envisagé pour cet accès

Néanmoins, pour prévenir tout risque de réouverture, un bouchon de béton sera mis en place.

Ce bouchon sera coulé après un décapage de la surface et le creusement des remblais de la cheminée sur une longueur suffisante.

Le décapage des terrains de surface se fera à la pelle mécanique et la purge se prolongera latéralement et en profondeur de façon à garantir une bonne assise du bouchon sur les terrains **sains et durs, sur toute sa circonférence**.

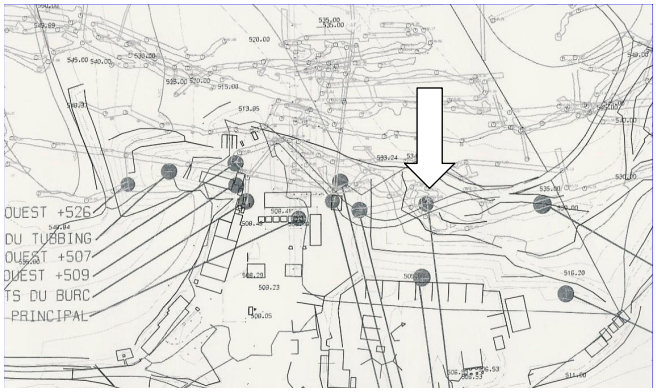
La profondeur sera définie de façon à obtenir, en fin de purge, une géométrie trapézoïdale ou conique **avec un élancement vertical supérieur à 2**.

Le bouchon sera réalisé dans une qualité de béton conforme aux réquisitions de l'INERIS (voir annexes 11 et 13)

Ce bouchon sera ensuite lui-même remblayé puis recouvert de terre végétale, qui sera naturellement reconquise par la végétation de taillis existant à sa proximité immédiate.

Accès n° 10 La cheminée à l'entrée de la descenderie

Différents points de vue de la gravette couvrant la cheminée



Localisation. Extrait du plan au1/2000° joint en annexe 07

Cette cheminée est verticale et est en relation avec un chantier actuellement inaccessible à la cote 502.

Le projet de son creusement date de 1976 et elle figure sur un plan daté de 1977.

Le chantier en relation avec cette cheminée a été arrêté en 1996 car trop dangereux. La cheminée elle-même été remblayée en 1996. Ce remblayage a été effectué avec des matériaux de toutes sortes et dimensions (d'après témoignages), en sorte que des vides ont été laissés en place dans la cheminée elle-même. La colonne de remblai n'est donc pas stabilisée et fait l'objet d'un appoint peu abondant, mais régulier (chaque année).

Mode d'obturation envisagé pour cet accès

Pour cette cheminée également, un bouchon sera mis en place.

Ce bouchon sera coulé après un décapage de la surface et le creusement des remblais de la cheminée sur une longueur suffisante.

Le décapage des terrains de surface se fera à la pelle mécanique et la purge se prolongera latéralement et en profondeur de façon à garantir une bonne assise du bouchon sur les terrains **sains et durs, sur toute sa circonférence**.

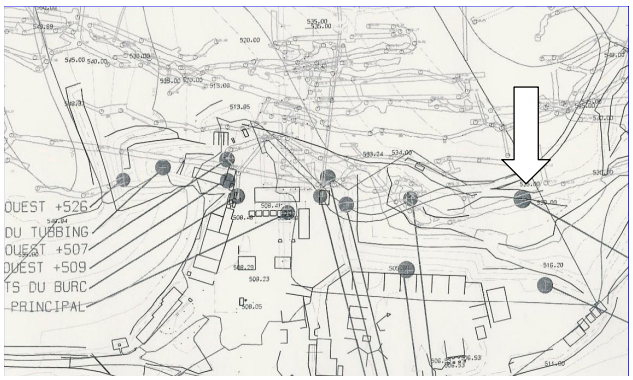
La profondeur sera définie de façon à obtenir, en fin de purge, une géométrie trapézoïdale ou conique **avec un élancement vertical supérieur à 2**.

Le bouchon sera réalisé dans une qualité de béton conforme aux réquisitions de l'INERIS (voir annexes 11 et 13)

Ce bouchon sera ensuite lui-même remblayé puis recouvert de terre végétale, qui sera naturellement reconquise par la végétation de taillis existant à sa proximité immédiate.

Accès n° 11 La cheminée clôturée

Différentes vues de la cheminée clôturée



Localisation. Extrait du plan au1/2000° joint en annexe 07

Cet accès ne figure que sur les plans de récolement du carreau postérieurs à 1977. Il figure également sur un plan très ancien (1963), sans aucune légende, et a été oublié sur les plans postérieurs. Il s'agit donc probablement d'un accès antérieur à l'établissement de la concession.

Cet accès ne recoupe d'ailleurs pas les travaux miniers connus.

Aujourd'hui, cet accès n'est pas visitable et ne permets pas la moindre possibilité de pénétration humaine. Il est totalement couvert par une végétation déjà ancienne et n'est plus signalé que par la clôture, d'ailleurs en mauvais état.

Sa stabilité à long terme est aujourd'hui démontrée par une longue période d'immobilité.

Mode d'obturation envisagé pour cette cheminée

Bien que la stabilité à long terme de cette cheminée soit démontrée, un bouchon de béton sera mis en place. Ces travaux devront se faire en préservant autant que possible le couvert végétal, constitué d'arbres imposant à proximité immédiate.

Ce bouchon sera coulé après un décapage de la surface et le creusement des remblais de la cheminée sur une longueur suffisante.

Le décapage des terrains de surface se fera à la pelle mécanique et la purge se prolongera latéralement et en profondeur de façon à garantir une bonne assise du bouchon sur les terrains **sains et durs, sur toute sa circonférence**.

La profondeur sera définie de façon à obtenir, en fin de purge, une géométrie trapézoïdale ou conique **avec un élancement vertical supérieur à 2**.

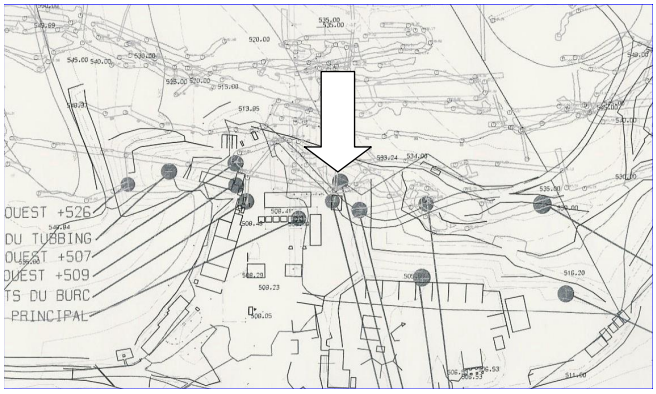
Le bouchon sera réalisé dans une qualité de béton conforme aux réquisitions de l'INERIS (voir annexes 11 et 13)

Ce bouchon sera ensuite lui-même remblayé puis recouvert de terre végétale, qui sera naturellement reconquise par la végétation de taillis existant à sa proximité immédiate.

L'intégration paysagère sera finalisée par le démontage de la clôture.

Accès n° 12 La cheminée à remblais sous le Viane

Sous le tas de concassé (« Viane »), la cheminée



Localisation. Extrait du plan au1/2000° joint en annexe 07

Cette cheminée figure sur un plan de récolement des travaux daté de 1974, et ne figure plus en 1980. Elle a donc été remblayée avant cette date, soit depuis plus de 25 ans. Sur la surface du carreau il ne subsiste plus de trace apparente de cet ouvrage.

Il convient en outre de signaler :

- Que depuis le remblayage initial de cette cheminée les remblais sont restés en place (pas de nécessité d'y faire un appoint régulier). Les matériaux de remblayage sont donc demeurés stables depuis leur mise en place.
- Qu'en outre, compte tenu de sa localisation, sur le carreau de la mine en un emplacement de circulation forte et régulière, et de surcroît un emplacement utilisé pour du stockage de matériaux, les remblais de cette cheminée ont nécessairement subi un tassement maximal, depuis leur mise en place jusqu'à ce jour.
- Qu'enfin, aucune trace de cette ancienne cheminée ne subsiste sur la surface actuelle du carreau.

Par conséquent, la stabilité à long terme du remblayage de cette cheminée est démontré, et son intégration paysagère n'est pas un problème particulier.

Il convient de noter que le pied de cette cheminée est localisé sous le niveau d'eau final. Bien que le risque de débourrage de cette cheminée au cours de l'ennoyage soit jugé insignifiant (voir étude ANTEA jointe en annexe 12), il ne peut être complètement ignoré. La prise en compte de ce risque est développée au chapitre 8.4.1 ci-après.

Accès n° 13 La cheminée à remblais sous le concasseur

Devant la descenderie, l'emplacement de cette cheminée

Localisation. Extrait du plan au1/2000° joint en annexe 07

Cette cheminée a été forée au raise boring en diamètre 1,20 mètres à partir du niveau –170 jusqu'à la surface. Son accès à –170 n'est plus visitable.

En surface cette cheminée débouchait dans une chambre enterrée sur le carreau, équipée d'une grille et d'un concasseur. La chambre de surface faisait une dizaine de m2 sur 2 mètres de profondeur au moins.

Le plan du projet de creusement de la cheminée et d'installation du concasseur date de 1977, et les installations figurent sur les plans de récolement de la mine depuis 1980.

La cheminée a été couverte de poutrelles en béton, le concasseur démonté et la chambre enterrée remplie de béton (1 m d'épaisseur environ, coulé en 1 seule fois, selon témoignages). L'ensemble du génie civil a ensuite été occulté sous une bonne couche de remblai (# 0.5 m).

Ces travaux ont été réalisés en 2000.

Une réservation au travers de la dalle avait été faite au moyen d'une buse de 200 mm, en prévision de besoins éventuels ultérieurs (passages de câbles, …) mais cette dernière a été perdue sur la surface du carreau et n'a pas été retrouvée, sans doute détruite par le roulage intense à cet emplacement.

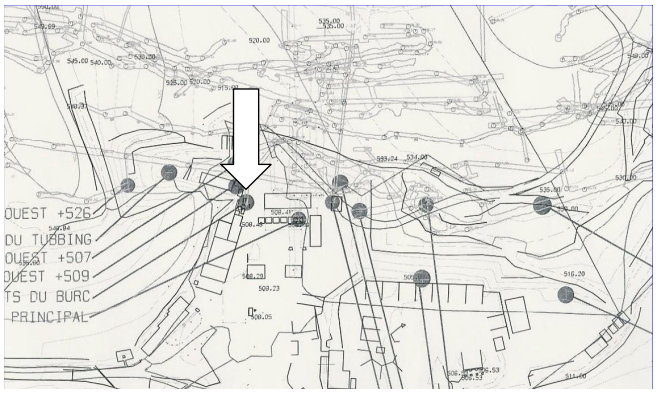
Au stade actuel, aucune trace apparente, ni de la cheminée, ni du bâtiment enterré, ne subsistent sur le carreau.

Il convient en outre de signaler que compte tenu de sa localisation, sur le carreau de la mine en un emplacement de circulation forte et régulière (l'entrée de la descenderie), et de surcroît un emplacement utilisé pour du stockage de matériaux, le bloc de béton coulé dans le bâti enterré n'a pas bougé depuis sa mise en place jusqu'à ce jour.

Par conséquent, la stabilité à long terme de l'obturation de cette cheminée est démontrée, et son intégration paysagère n'est pas un problème particulier.

Il convient de noter que le pied de cette cheminée est localisé sous le niveau d'eau final. Bien que le risque de débourrage de cette cheminée au cours de l'ennoyage soit jugé insignifiant (voir étude ANTEA jointe en annexe 12), il ne peut être complètement ignoré. La prise en compte de ce risque est développée au chapitre 8.4.1 ci-après.

Accès n° 14 L'ancien puits du Burc



Localisation. Extrait du plan au1/2000° joint en annexe 07

Ce puits d'une trentaine de mètres figure sur les documents les plus anciens y compris le dossier de demande de concession minière. Il figure encore sur un plan de récolement de 1988 et son remblayage doit dater, selon plusieurs témoignages concordants, de 1978 ou un peu avant.

Il s'agissait d'un puits boisé, de section carrée (section utile 1,80 x 1,80 m), à recette unique (niveau –24) et à bouniou borgne.
Il a été utilisé comme accès unique pour la reconnaissance du niveau –24, puis utilisé comme puits de service.

Sous le groupe, la dalle. Sous la dalle, le puits

Il a été remblayé en 1978 et sa surface a été couverte d'une dalle de béton, visible sur le carreau. Sur cette dalle, le groupe électrogène de la mine
Au travers de la dalle a été ménagée une buse de béton (diamètre 300) pour permettre l'inspection du niveau de remblai. Le niveau de remblai est visible à 1 ou 2 mètres de la surface. Il n'a pas fait l'objet d'appoint de remblai, vraisemblablement depuis leur mise en place initiale.

Au travers de la buse d'inspection, on voit le niveau de remblai.

Mode d'obturation envisagé pour ce puits

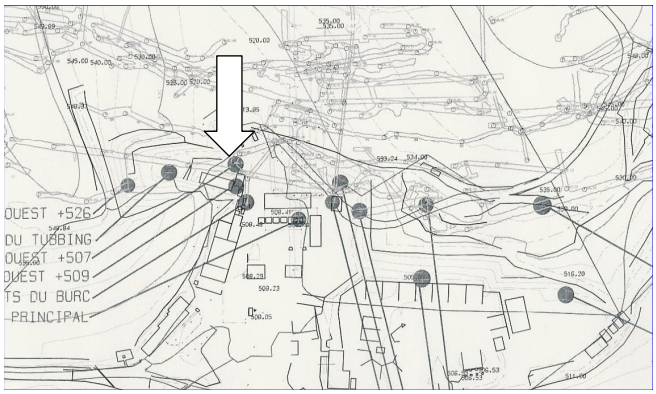
Ce puits ayant été remblayé, et sa surface dallée en 1978, les travaux d'obturation ont fait la preuve de leur stabilité à long terme. Il n'y a donc pas lieu de reprendre ces travaux, hormis le rebouchage définitif de la buse d'inspection.

Cette dalle sera ensuite intégrée au traitement paysager du carreau – soit recouverte de remblai, soit décaissée, en fonction de l'aspect final qui sera donné au carreau.

Il convient de noter que le bouniou de ce puits est localisé sous le niveau d'eau final. Bien que le risque de débourrage de ce puits au cours de l'ennoyage soit jugé insignifiant (voir étude ANTEA jointe en annexe 12), il ne peut être complètement ignoré. La prise en compte de ce risque est développée au chapitre 8.4.1 ci-après.

Accès n° 15 L'accès ouest à +507 (ancien « accès niveau zéro »)

ancien accès au niveau du carreau, à dr. du hangar



Localisation. Extrait du plan au1/2000° joint en annexe 07

Cet accès aux chantiers a été creusé dans le filon au niveau de son affleurement naturel. Les terrassements à proximité du filon affleurant se sont prolongés en profondeur, et ont ensuite été remblayés, jusqu'à obtention de la topographie actuelle du carreau.
L'accès dans le filon au niveau +507 NGF a donc été détruit dans les travaux de terrassement antérieurs à 1978, date de la configuration actuelle du carreau. Il n'existe donc plus à l'heure actuelle.

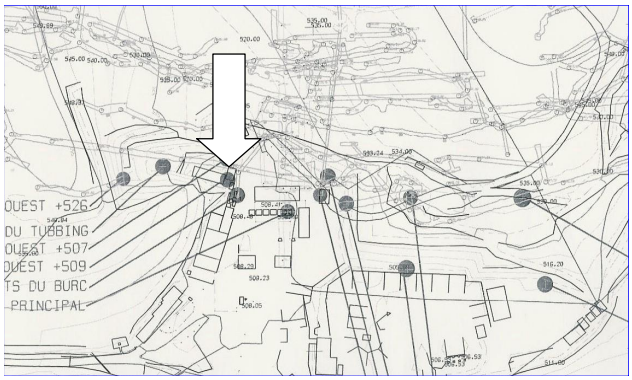
Il convient en outre de signaler :

- Que depuis le remblayage initial de ces travaux les remblais sont restés en place. Les matériaux de remblayage sont donc demeurés stables
- Qu'en outre, compte tenu de la localisation de ces travaux, sur le carreau de la mine, en un emplacement de circulation forte et régulière, et de surcroît un emplacement utilisé pour du stockage de matériaux, les remblais de la surface actuelle de cette zone ont nécessairement subi un tassement maximal, depuis leur mise en place jusqu'à ce jour.
- Qu'enfin, aucune trace de ces anciens travaux ne subsiste sur la surface actuelle du carreau.

Par conséquent, la stabilité à long terme du remblayage de ces terrassements est démontré, et leur intégration paysagère s'inscrit dans le traitement paysager du carreau.

Accès n° 16 L'accès ouest à +509

ancien accès au niveau du carreau, à l'emplacement du hangar



Localisation. Extrait du plan au1/2000° joint en annexe 07

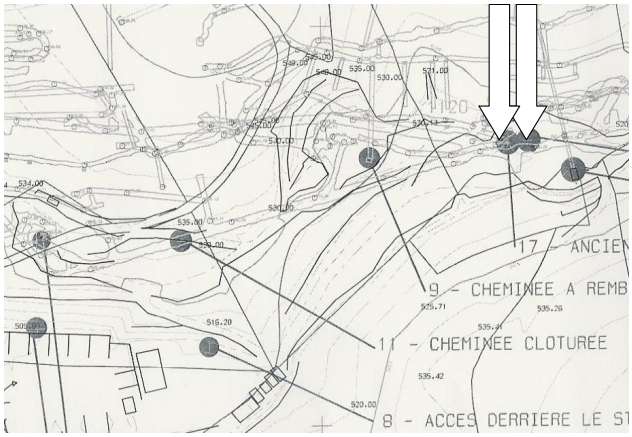
Cet accès creusé juste au mur du filon a du servir d'accès principal à une époque de l'exploitation.

Il a été détruit dans les travaux de terrassement antérieurs à 1978, date de la configuration actuelle du carreau, et s'est inscrit dans leur emprise. Il n'existe donc plus à l'heure actuelle. Les remarques faites ci-dessus (accès n° 15 – accès ouest à +507) sont applicables de la même manière

Par conséquent, la stabilité à long terme du remblayage de cet accès est démontrée, et son intégration paysagère s'inscrit dans le traitement paysager du carreau.

Accès n° 17et 18 Les anciens puits

Sous la gravette, les anciens puits



Localisation. Extrait du plan au1/2000° joint en annexe 07

Ces accès ne figurent que sur un plan très ancien (1963), et sur aucun plan de récolement du carreau de la période actuelle d'exploitation. Il s'agit donc probablement d'accès antérieurs à l'établissement de la concession. Les puits (s'agissait-il de puits ou de cheminées ?) ont été creusés dans le filon ou à sa proximité immédiate.
Ces deux puits ont été détruits, en totalité ou en partie, dans les travaux de terrassement antérieurs à 1987, date de la configuration actuelle du carreau à cet endroit.

Il convient en outre de signaler :

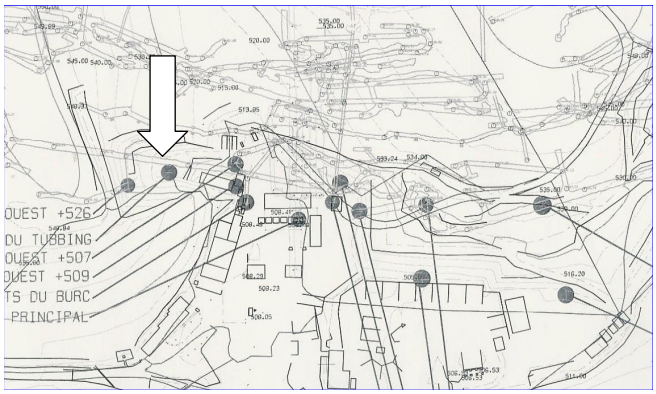
- Que ces deux puits ont été nécessairement remblayés en raison de leur emplacement sous le stock actuel de gravettes stériles produites par l'usine de traitement.
- Qu'en outre, les remblais utilisés dans ces puits ont nécessairement subi un tassement maximal, depuis leur mise en place jusqu'à ce jour, en raison des stocks mis en place.
- Qu'enfin, aucune trace de ces puits très anciens ne subsiste sur la surface actuelle du carreau.

Par conséquent, la stabilité à long terme du remblayage de ces puits (si tant est qu'ils existent encore) est démontrée, et leur intégration paysagère n'est pas un problème particulier.

Il convient de noter que les pieds de ces anciens puits ne sont pas répertoriés, ils sont donc susceptibles d'être localisés sous le niveau d'eau final. Dans cette hypothèse, et bien que le risque de débourrage de ces puits au cours de l'ennoyage soit jugé insignifiant (voir étude ANTEA jointe en annexe 12), il ne peut être complètement ignoré. La prise en compte de ce risque est développée au chapitre 8.4.1 ci-après.

Accès n° 19 La cheminée « du tubbing »

Sous le tas de remblai



Localisation. Extrait du plan au1/2000° joint en annexe 07

Cette cheminée figurait déjà sur des plans de récolement antérieurs à 1974. Vers la fin des années 1970 elle a été intégrée dans l'emprise actuelle du carreau. Sa partie inférieure a subsisté jusqu'à la fin des années 1990 avec un tubbing métallique apparent en surface.
Elle a été complètement remblayée en 2002, ainsi que les parties superficielles du tubbing ont été démontées. A l'heure actuelle aucune trace de cette ancienne cheminée ne subsiste sur le carreau actuel.

Il convient en outre de signaler :

- Que depuis le remblayage de cette cheminée les remblais sont restés en place (pas de nécessité d'y faire un appoint régulier). Les matériaux de remblayage sont donc demeurés stables depuis leur mise en place.
- Qu'en outre, compte tenu de sa localisation, sur le carreau de la mine en un emplacement utilisé pour du stockage de matériaux, les remblais de cette cheminée ont nécessairement subi un tassement maximal, depuis leur mise en place jusqu'à ce jour.
- Qu'enfin, aucune trace de cette ancienne cheminée ne subsiste sur la surface actuelle du carreau.

Par conséquent, la stabilité à long terme du remblayage de cette cheminée est démontré, et son intégration paysagère n'est pas un problème particulier.

Il convient de noter que le pied de cette cheminée est localisé sous le niveau d'eau final. Bien que le risque de débourrage de cette cheminée au cours de l'ennoyage soit jugé insignifiant (voir étude ANTEA jointe en annexe 12), il ne peut être complètement ignoré. La prise en compte de ce risque est développée au chapitre 8.4.1 ci-après.

8.2.3.2 Récapitulation des travaux d'obturation restant à faire

Sur les 19 accès répertoriés dans le présent mémoire :

- 4 ont été détruits ou inclus dans l'emprise actuelle du carreau (accès n° 15, 16, 17, 18)
- 4 ont une stabilité à long terme démontrée, sans risque d'intrusion (accès n° 12, 13, 14, 19),
- 11 nécessitent encore d'être traités :

Sur ces 11 ouvrages :

- Le puits sera traité par bouchon autoportant plus dalle enterrée (accès n° 1)
- Les cheminées d'aérage actuelles seront traitées par bouchon autoportant (accès n°2, 3, 4),
- Deux anciennes cheminées par complétion de leur remblayage puis par bouchon autoportant,
- Un ancien ouvrage vertical par bouchon simple (accès n° 11),
- Un accès borgne obturé par la mise en place d'un remblai (n° 6),
- La descenderie principale par un ouvrage maçonné plus un remblai (n° 5),
- Deux anciennes galeries par un ouvrage maçonné (n° 7 et 8), dont l'une (n° 7) aménagée comme exutoire.

A signaler également, pour mémoire, l'existence d'un sondage (diam < 150 mm) équipé d'un tuyau PVC entre la surface et le niveau 511, au droit de la coupe 605 290. Ce sondage n'est pas un sondage d'exploration géologique, mais un sondage d'exploitation (passage de câbles d'alimentation électrique).

Ce tuyau sera coupé et le trou obturé puis cimenté.

8.2.4 Désordres de surface : évaluation, mesures prises ou à prendre vis à vis des risques de désordres de surface .

8.2.4.1 Collecte de données disponibles utiles à l'évaluation des risques de désordres en surface

L'étude du risque de désordres de surface confiée à ANTEA s'est basée sur l'ensemble des données disponibles.

Certaines de ces données sont récapitulées ci-dessous.

Ces données sont complétées par l'ensemble des documents cartographiques, plans et coupes, joints :

- en Annexe 07 du présent rapport (voir également le paragraphe 8.1.3 ci-dessus)
- dans l'étude ANTEA, présentée en Annexe 12.

Par ailleurs elles ont été complétées sur place par ANTEA par plusieurs journées complètes de visites sur site (au fond et en surface) pour observations et collecte de données de terrain, ainsi que par la collecte de témoignages de mineurs ciblés sur des sujets d'importance tels que :

- la composition et la compacité des remblais,
- l'état d'abandon des anciens couloirs et cheminées, ainsi que leurs dimensions,
- la tenue des stots d'exploitation,
- l'occurrence des venues d'eau,
- l'occurrence des éboulements, effondrements et évènements de nature minière,
- etc

Géométrie de la mine à l'échelle des quartiers - Les quartiers d'exploitation

Le filon subvertical a été partitionné en 5 quartiers bien individualisés, correspondant aux zones exploitées par tranches montantes remblayées :

- Le quartier central (noté C sur la coupe jointe en annexe 7-6)
- Le quartier Ouest (O1),
- Le quartier extrême Ouest (O2)
- Le quartier Est (E1)
- Le quartier extrême est (E2).

Cette partition est due d'une part à la présence de faille ayant divisé le filon en éléments distincts et rejeté certains compartiments, d'autre part à la présence de passées stériles à l'intérieur de la caisse filonienne elle-même, zones stériles qui n'ont pas été exploitées.

Sur la coupe jointe en Annexe 7-6 figurent en hachuré les zones exploitées et remblayées, ainsi que la position de leurs infrastructures d'accès.

Les infrastructures d'accès aux quartiers d'exploitation

Elles sont constituées des ouvrages suivants, pour chaque chantier :

- un accès par remonte ou descenderie dans chaque chantier, tracé au mur du filon,
- une cheminée de ventilation tracée dans le filon ou au mur de ce dernier.

La mine elle-même comporte les ouvrages principaux suivants :

- plusieurs descenderies (dont la principale qui relie les travaux souterrains au carreau) qui desservent les différents quartiers d'exploitation,
- un puits d'accès,
- des cheminées latérales de ventilation principale,
- des cheminées de jet , soit entre différents niveaux, soit à partir de la surface.

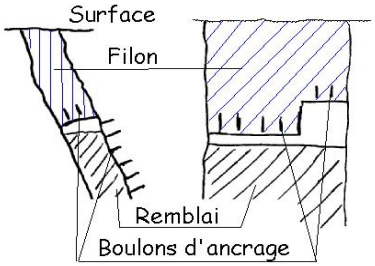
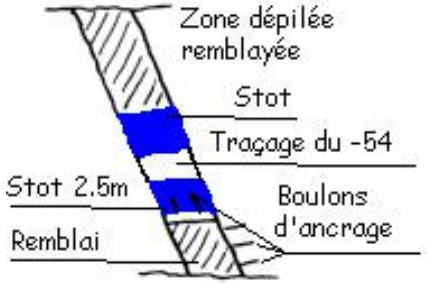
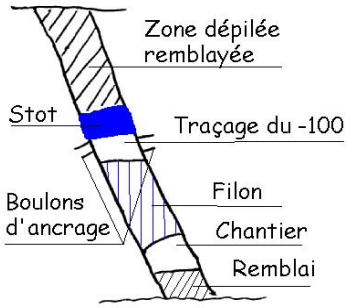
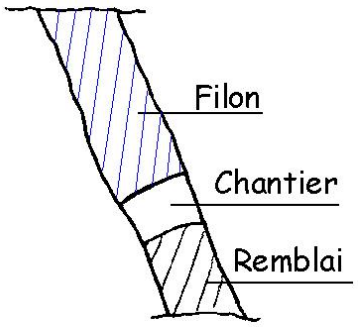
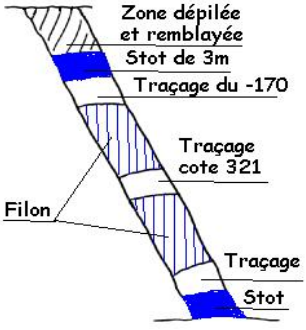
En outre les différents quartiers sont reliés entre eux par les voies de niveau (traçées dans le filon) qui ont été conservées pour des raisons d'accessibilité, de roulage et de ventilation.

La méthode d'exploitation

Cette méthode est décrite ci-dessus (voir § 6.6), et également en détail dans le document joint en Annexe 03.

Il convient de noter que seule la méthode par tranches montantes remblayées a pu être utilisée dans cette mine.

Les schémas ci-dessous présentent quelques exemples récents de chantiers en cours d'exploitation, en mettant en évidence leur environnement particulier (notamment l'existence ou non d'anciens chantiers à proximité) ainsi que les mesures particulières de soutènement jugé nécessaire dans chaque cas :

Chantiers actifs en 2002				
Chantiers	**Cote de la couronne**	**Nature des travaux au dessus**	**Prévention / chutes de blocs**	**Croquis**
O1-54	498	Pas de travaux au dessus	boulonnage du toit et de la couronne du filon à l'approche de la surface. Abattage à plat	
C-100	454	Traçage du -54. Chantier dépilé au dessus du traçage (anciens travaux ne figurant sur aucun plans)	Arrêt du chantier à l'approche du traçage du -54. Chantier à incidents. Epontes en schistes noirs, très mauvaises caractéristiques mécaniques de ce matériaux.	
C-135	406	Traçage du -100. Chantier du C-100 dépilé au dessus du traçage	Confortement par boulonnage des épontes du traçage du niveau -100	
O2-170	353	Pas de travaux au dessus		
E1-220	300 (traçage)	Galerie de traçage au dessus, cote sole = 321	Pose de grillage en couronne dans la galerie du dessus Les épontes de ce filon sont dans du schiste vert (bonne tenu mécanique), pas de traitement particulier à priori des épontes lors du percement dans la galerie du dessus.	

Provenance des remblais mis en place

Les matériaux utilisés en tant que remblais dans les chantiers exploités ont pour la plupart été produits sur place, les compléments nécessaires ayant pu être acheminés depuis le site de Montroc.

Les matériaux produits sur place sont issus :

- des stériles d'exploitation, pour la plupart laissés sur place à l'endroit où ils ont été abattus,
- des creusements des galeries souterraines : traçages au filon et voies de niveau dans les parties stériles, travers bancs de liaison entre niveaux
- des aménagements du carreau (la plupart de ces aménagements ont été réalisés en déblais, et datent d'avant les années 1980),
- des résidus de traitement de l'usine de gravimétrie (à partir de 1978, date de sa mise en service). Ces résidus étaient constitués principalement de sables grossiers et de graviers.
- des infrastructures d'accès en souterrain (descenderies et recoupes d'accès), à partir des années 1980 lorsque le roulage sur pneu a été introduit

Les matériaux complémentaires nécessaires aux remblayage des chantiers ont été acheminés du site de Montroc. Ces matériaux étaient principalement des résidus de traitement de flottation (sables), et appréciés dans les remblais, au même titre que les résidus de traitement de la gravimétrie du Burc, en raison de leurs qualités draînantes.

En outre, accessoirement, des matériaux calcaires durs concassés 25/50 (dits « Viane ») ont été épandus sur les pistes de roulage, y compris dans les chantiers aux emplacements spécialement pentés, afin d'éviter le patinage des engins sur pneus.

Les soutènements réalisés

Tant en chantiers qu'en infrastructures le soutènement réalisé a été non systématique.

Il a consisté :

- en un boulonnage du toit dans le filon si requis par les conditions minières,
- en un boulonnage, selon les cas, des parements et de la couronne, dans les galeries d'infrastructure

Les boulons ont été de type ancrage par friction à partir des années 1990, et ancrages ponctuels auparavant.

Les infrastructures n'ont été cintrées qu'exceptionnellement :

- au droit des failles de mauvaise tenue minière,
- dans les voies de base des chantiers qu'il a été décidé de conserver.

Ces cintrages sont des ouvrages constitués, selon les cas :

- de cintres coulissants (profil TH 25 ou TH 29) entretoisés et garnis de bois,
- de carrures (piédroits en UPN et couronnes en IPN) également entretoisées et garnies de bois ou (rarement) de pneus.

Les vides laissés non remblayés

Compte tenu de la méthode d'exploitation les chantiers ont été remblayés, et les remblais tassés par l'exploitation montante (tirs, marinage).

En fin d'exploitation de chantier, la voie de tête n'a pas été remblayée, sauf ponctuellement et en cas de nécessité particulière (création d'un accès à un autre chantier, etc.)

En fin d'exploitation de chantier, également, les cheminées ont généralement été abandonnées non remblayées.

Enfin, il faut considérer les voies de base (sous stot), les accès aux chantiers par travers-bancs ainsi que les descenderie d'accès ou de liaison : autant de galeries qui pour la plupart sont demeurées non remblayées, sauf ponctuellement et en cas de nécessité particulière.

Une évaluation des vides délaissés par l'exploitation a été réalisée par l'ENSMP (voir étude jointe en Annexe 08, pages 43 et 44). Ces données ont été reprises par ANTEA et les hypothèses faites pour leur évaluation discutées et commentées.

Cahier des charges de l'étude confiée à ANTEA

Les vides créés et laissés non remblayés pourraient être susceptible d'être la cause d'éboulements souterrains. Ces éboulements pourraient, selon le cas :

- affecter les terrains sus-jacents jusqu'à la surface de façon cassante (apparition de fontis d'effondrement)
- affecter les terrains sus-jacents jusqu'à la surface de façon déformante (apparition d'affaissements miniers),
- affecter les terrains jusqu'à un niveau inférieur à celui de la surface, jusqu'à stabilisation définitive.

L'objet de l'étude ANTEA, jointe en Annexe 12, est l'évaluation de ces risques, ainsi que la localisation précise des zones qui y sont soumises en surface.

8.2.4.2 Evaluation des risques de désordres en surface

L'évaluation des désordres de surface est l'objet de l'étude jointe en Annexe 12. Il résulte des conclusions de cette étude, les éléments suivants :

1) Stabilité globale de la mine

La géométrie des chambres d'exploitation dans le filon, les caractéristiques des remblais utilisés, ainsi que le faible volume relatif des zones laissées non remblayées, permettent **d'éliminer tout risque d'affaissement** minier, ou d'instabilité globale.

2) Stabilité locale

En roche saine
Les caractéristiques mécaniques des roches recoupées, et l'analyse des caractéristiques mécaniques et hydromécaniques de leurs discontinuités, ont permis d'établir le pronostic de leur **stabilité à long terme**.

En zone de faille
Néanmoins ce pronostic ne concerne pas les excavations affectées par des failles, qui, de façon très locale, pourront se dégrader sous la forme d'une cloche progressant vers le haut, se comblant progressivement de rocher foisonné jusqu'à une hauteur limite. Cette hauteur limite est de l'ordre de 5 fois environ la dimension l'ouvrage, soit, dans le cas de la Mine du Burg, une vingtaine de mètres.
Lorsque l'ouvrage est plus profond, la remontée éventuelle du vide vers la surface n'est plus à craindre, car ce vide aura été complètement auto-remblayé et l'effondrement stabilisé par les remblais.

Afin d'éliminer tout risque de désordre en surface, il y a donc lieu de remblayer toutes les galeries qui sont trop proches de la surface.

3) Inventaire et qualification des zones de risques de désordre de surface

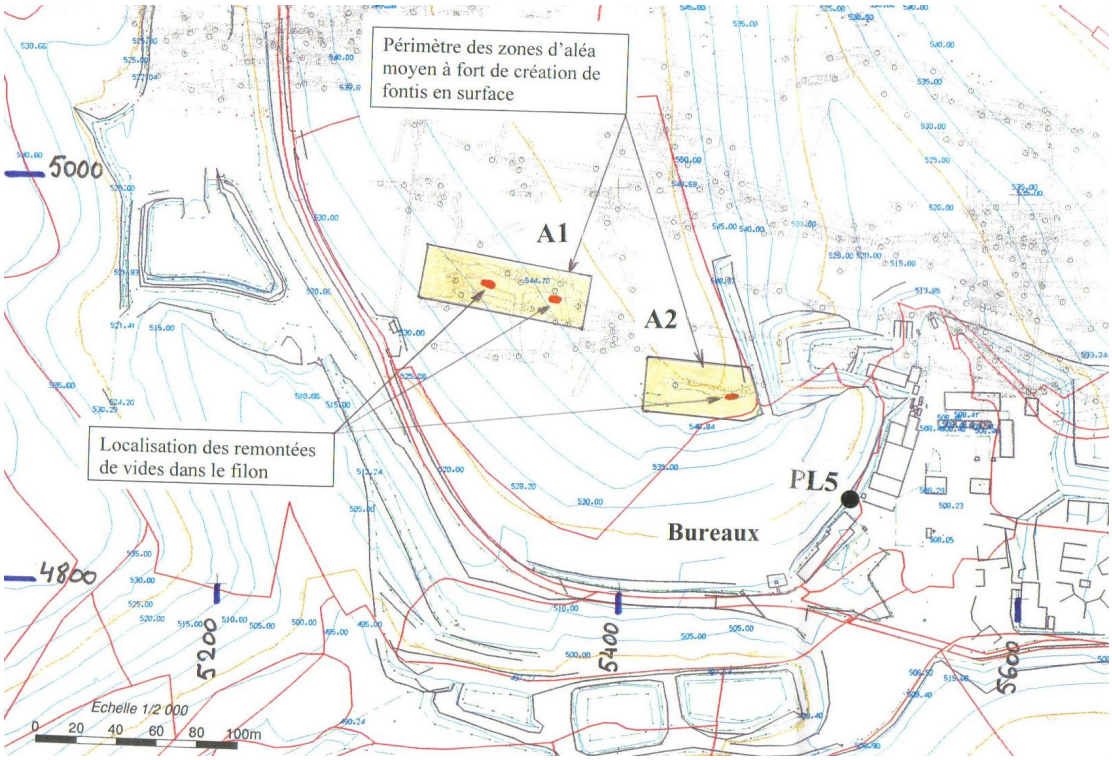
Accès horizontaux
Les débouchés en surface des accès horizontaux constituent une zone de risque de désordre de surface, en raison de la proximité immédiate de cette dernière.
Sont concernées :
- l'entrée de la descenderie principale (accès n° 5),
- les autres accès horizontaux, n°7 et 8.

Anciens chantiers superficiels
En outre, le travail d'inventaire réalisé au cours de l'étude jointe en Annexe 12 a mis en évidence 3 zones d'aléa d'apparition de fontis :
- à l'ancien chantier du « niveau zéro »,
- en deux emplacements dans le chantier O1-24.

Aléa
Dans ces 3 zones un aléa est identifié, avec une probabilité plus ou moins grande en fonction de la hauteur de recouvrement (respectivement de l'ordre de 15, 20 et plus de 30 mètres).
La probabilité d'occurrence est qualifiée de faible (Est du Chantier O1-24), moyenne (Ouest du chantier O1-24), même si, dans un souci de précaution, l'ensemble des zones concernées a été inscrit dans un périmètre affublé d'un aléa moyen à fort.
Dans tous les cas les zones à aléa sont très localisées.

Vulnérabilité
En surface les zones concernées par ces aléas de fontis sont parfaitement délimitées (voir le plan joint à l'étude en Annexe 12, reproduit ci-dessous), et ne concernent que des zones boisées et des surfaces agricoles. **La sensibilité au risque est donc nulle.**

Risque résiduel
Pour conclure sur le risque d'apparition de fontis, compte tenu de l'aléa et de la vulnérabilité, **le risque résiduel est très faible**



Cartographie des aléas d'apparition de fontis de surface (d'après ANTEA, Annexe 12)

8.2.4.3 Mesures à prendre pour l'élimination du risque

Accès horizontaux
Le traitement des accès horizontaux objet du risque exposé au 2) ci-dessus est détaillé au paragraphe 8.2.3.1 ci-dessus.

Aussi, pour mémoire :

- l'accès n°8 est déjà remblayé sur au moins une dizaine de mètres,
- l'accès n°7, aménagé pour l'exutoire des eaux d'exhaure, sera partiellement remblayé au moyen d'un mortier de ciment,
- l'accès n°5 (descenderie principale) sera complètement remblayé sur les 35 mètres susceptibles de présenter des risques.

Anciens chantiers superficiels
En ce qui concerne ces zones, il n'existe pas de solution simple permettant leur remblayage dans des conditions de sécurité acceptables.
En effet, le risque qu'il faudrait prendre au cours de l'opération (exposition des opérateurs au risque de chutes de blocs) n'est pas justifié. Le chantier O1-24 avait été arrêté en 2003 sur les conseils de la DRIRE en raison de ce risque.
Les autres solutions techniquement possibles, qu'elles soient mises en œuvre depuis le fond ou la surface, sont trop lourdes de mise en œuvre, et d'un coût rhédibitoire, eu égard au risque résiduel d'apparition de fontis (risque très faible). En outre aucune de ces solutions ne présente de garantie absolue de succès.

Les deux chantiers en question seront par conséquent laissés en l'état.

8.3. Bilan relatif aux effets sur l'eau des travaux miniers et de leur arrêt

Les études hydrauliques préalables à l'arrêt des travaux miniers de la mine du Burc ont été initiées en 2002. Elles ont atteint un bon niveau de prédictibilité des effets de l'arrêt des travaux en particulier en raison d'un suivi régulier des débits d'exhaure ainsi que de surface, en amont et en aval du site, depuis 1995 et même avant. Ces chroniques hydrauliques étaient enrichies d'un suivi qualitatif.

Les études préalables à l'arrêt des travaux sont les suivantes :

- Collecte de données sur les circulations des eaux de la Mine du Burc, SOGEREM, 2002.

- Etat actuel et évolution prévisionnelle du régime et de la qualité des eaux issues de l'exploitation de fluorine du Burc. E LEDOUX, J-M SCHMITT., *CIG / ARMINES LHM/RD/03/29.* (Ecole des Mines de Paris). Cette étude est jointe en Annexe 08 et prend en compte les résultats de l'étude SOGEREM de 2002.

- Mine du Burc (81) Bilan relatif aux effets sur l'eau des travaux et de leur arrêt. A BLACHERE, S MOREL*, CESAME.* Cette étude est jointe en Annexe 09 et complète l'étude précédente.

Ces études ont permis de bien cerner :

- les différents flux d'eau issus de la mine (eaux d'exhaure) et du réseau de surface après l'arrêt des travaux,
- la qualité prévisible des eaux d'exhaure, juste après la résurgence de ces dernières, ainsi qu'à long terme,
- l'exutoire résultant de la fermeture des accès qu'il convenait d'aménager, ainsi que les risques de fuite par des exutoires naturels éventuels,
- les dispositions à prendre afin de d'obtenir naturellement et de façon durable des eaux d'exhaure de la meilleure qualité possible,
- enfin, les possibilités de récupération des eaux .

En outre, un certain nombre d'aménagements sont proposés, visant tous à améliorer l'impact à court ou long terme sur la qualité des eaux rejetées.

Les conclusions de ces études (par ailleurs jointes en annexe 8 et 9) sont synthétisées ci-dessous, de même que les dispositions à prendre vis à vis des eaux d'exhaure.

8.3.1 Synthèse des conclusions des études hydrauliques

L'origine des eaux minières, et ses conséquences

Il résulte des bilans effectués sur les différents bassins versants que Les eaux d'infiltration collectées dans le réseau de galeries existant sont d'origine superficielle. Elles sont toutes prélevées sur le bassin versant du Ferrier. Les écoulements concernent préférentiellement le réseau de failles d'orientation N/S, ce qui est démontré par les bilans de collecte d'eau au fond.

En conséquence :

- 1) après ennoyage de la mine le débit des eaux d'exhaure diminuera fortement,
- 2) de la même manière le débit du Férrier augmentera d'autant.
- 3) Il n'est pas possible d'isoler des travaux et de collecter sélectivement une venue d'eau particulière dans la mine.

Le réservoir minier

Le réservoir ne peut pas être divisé en plusieurs compartiments captés séparément. L'estimation de son volume est de 200 000 ou 400 000 m3 selon les hypothèses retenues. Il est prudent de considérer 400 000 m3 pour tenir compte de la porosité du massif rocheux.

Durée de la phase de remplissage

7 à 9 mois si l'on ne tient compte que des vides artificiels (galeries non remblayées et porosité incluse dans les remblais), et si l'on ne tient pas compte de la porosité du massif rocheux (cette dernière est impossible à évaluer).

1 à 2 ans si l'on prend en compte une marge tenant compte de la porosité du massif rocheux.

Il faut donc retenir : au moins 7 mois, au plus 2 ans.

Débits de l'exhaure après ennoyage

Après stabilisation du niveau d'ennoyage, 15 m3 /h environ .

- jusqu'à 30 m3/h en périodes de hautes eaux
- même en période d'étiage le débit reste aux alentours de 15 m3 / h.

De façon schématique, il est anticipé une *alimentation régulière du réservoir* par la nappe de surface via la matrice de la roche, avec une contribution « de fond » de l'ordre de 15 m3/h. A ce débit de fond, *s'ajoute un débit, ponctuel* pendant les phases

de fortes précipitations, empruntant principalement les cheminements existant dans les failles N/S, à temps de résidence courts.

Exutoires possibles

- Tous les accès artificiels au réservoir ont été inventoriés. Plusieurs solutions existent pour aménager l'exutoire.
- l'hypothèse d'écoulements remontant à travers des failles recoupant les travaux, et débouchant sous le niveau de l'exutoire finalement retenu (risque de déversement accidentel d'eaux polluées), apparaît fortement improbable voire impossible.

Qualité de l'eau d'exhaure après ennoyage

A court terme

A court terme, la chimie des eaux d'exhaure résultera de la mise en solution en milieu oxydant d'espèces minérales présentes dans les terrains au contact des parois ainsi que dans les matériaux de remblayage.

Cette composition (voir ci-dessous) interdit tout rejet direct sans traitement dans le milieu naturel.

A long terme

Cette solution évoluera « rapidement » (au rythme du retour, dans le réservoir, à des conditions pauvres en oxygène) vers une minéralisation stabilisée.

La durée du retour à des conditions de minéralisation stabilisées est de l'ordre de 5 à 10 ans, avec une décroissance graduelle des concentrations.

Les compositions à court et long terme prévisibles sont les suivantes :

	Court terme	***Long terme***
pH	5.5 à 6	7
Minéralisation totale (mg/l)	700	100
Fluorure (mg/l)	40	10
Sulfates (mg/l)	400	<30
Fer (mg/l)	?(1)	<0,005
Manganèse (mg/l)	60	0.02
Cuivre (mg/l)	30	0.4
Aluminium (mg/l)	15	< 0.005

(1)Selon les études les prédictions diffèrent : < 0.005 mg/l , ou jusqu'à quelques mg/l

Aménagements possibles visant à garantir la qualité des eaux d'exhaure

Il est possible d'envisager plusieurs mesures qui toutes visent à garantir la qualité des eaux d'exhaure, à court terme ou à long terme :

1) Garantir la qualité de l'eau à long terme.

Il est possible de garantir la qualité de l'eau à long terme, en stabilisant le niveau de l'eau dans le réservoir.

Cette mesure implique deux choses :

- s'interdire de pomper dans la mine,
- aménager un écoulement gravitaire à l'exutoire, par débordement à niveau constant.

2) Réduire la durée de la phase transitoire de forte minéralisation.

Il serait possible de réduire la durée de la phase transitoire de forte minéralisation (= la phase initiale d'exhaure au cours de laquelle les eaux sont les plus minéralisées), en favorisant le cheminement des eaux souterraines dans le niveau – 54 et la descenderie principale jusqu'à l'exutoire. Cette mesure impliquerait la mise en place de remblais ou de scellements en des endroits bien choisis des infrastructures souterraines.

Utilisations possibles pour l'eau potable et pour l'eau d'irrigation.

Il n'est envisageable :

- ni de pomper de l'eau dans le réservoir minier pour quelque usage que ce soit (en raison de la nécessité de laisser se maintenir un niveau d'eau stabilisé, voir ci-dessus),
- ni de réutiliser l'eau pour l'alimentation en eau potable, ni à court ni à long terme.

En revanche, l'utilisation de l'eau à des fins agricoles après reste envisageable, à condition de ne pas pomper de l'eau directement dans le réservoir minier mais de la récupérer en aval de l'exutoire, et (pendant les premières années), après leur traitement.

8.3.2 Dispositions à prendre au fond avant la montée des eaux

Prévention des hypothétiques remontées d'hydrocarbures

- les engins diesels et autres appareils équipés de moteurs thermiques seront sans exception remontés en surface. Aucun engin ne sera abandonné dans les travaux souterrains,
- *la plupart* des équipements nobles à motorisation électrique (pompes, ventilateurs) seront également récupérés. Pour ceux qui ne le seraient pas, leurs graisseurs automatiques seront démontés,

Malgré ces précautions, afin de prévenir tout risque de déversement d'hydrocarbures dans le milieu naturel :

- la station de traitement des eaux d'exhaure sera équipée d'un dispositif de rétention des hydrocarbure (lame de rétention),
- des boudins absorbants seront disponibles pour faire face en cas de pollution des bassins de rétention.

8.3.3 Dispositions concernant les ouvrages d'obturation des accès jour-fond

Tous les ouvrages maçonnés d'obturation des accès seront rendus perméables à l'eau et à l'air, par la mise en place d'évents, afin d'éviter, pendant et après l'ennoyage, l'accumulation de pressions notables à leurs interfaces.

Il est par ailleurs requis, (voir ci-dessus) de s'interdire tout pompage dans le réservoir minier, afin de garantir une qualité d'eau satisfaisante à long terme.

Par conséquent, les regards d'inspection ménagés dans les ouvrages de scellement seront cimentés après la stabilisation du niveau d'eau consécutive à l'ennoyage de la mine. En particulier, le regard aménagé dans l'ouvrage de scellement du puits (équipé d'un tuyau de diamètre 40 mm) sera définitivement détruit et comblé.

En ce qui concerne l'exutoire aménagé dans l'accès n° 7, qui restera définitivement tel quel, sa conception horizontale ne permet pas l'introduction d'un dispositif de pompage efficace.

Pour conclure, le niveau de débordement s'établira et demeurera au niveau du fil de l'eau de l'exutoire, à savoir **505, 40 (NGF**), sans qu'il soit possible de faire varier ce dernier, d'aucune manière que ce soit.

8.3.4 Choix de l'exutoire et aménagement du captage

L'étude jointe en annexe 09 présentait plusieurs alternatives possibles pour le choix de l'exutoire des eaux d'exhaure .

Option retenue

Le choix réalisé est celui de l'accès derrière les boxes (accès n°7). Le choix de cet accès est justifié par son altitude, la plus basse, faisant de l'accès n°7 le point de débordement le plus bas des travaux souterrains existants. Tout autre choix (par exemple, celui de la descenderie principale) aurait nécessité d'étancher parfaitement les accès plus bas de façon à éviter les pollutions par fuites d'eaux d'exhaure. Or il est difficile, voire impossible, compte tenu de la nature des terrains, de réaliser un scellement d'accès dont on puisse garantir la parfaite étanchéité : si le scellement proprement dit peut facilement être étanché, les épontes au droit du scellement peuvent difficilement l'être, surtout à long terme. **Le choix de l'accès n°7 comme exutoire privilégie donc la sécurité vis-à-vis du risque de pollution diffuse par les eaux d'exhaure.**

D'autres raisons sont également favorables à ce choix :

- l'emplacement de cet exutoire est plusieurs mètres au-dessus du lit du Ferrier, ce qui permet une collecte de l'eau d'exhaure bien séparée de ce dernier, même en cas de crue importante.
- c'est l'exutoire qui permet les aménagements de surface les plus modestes.

L'aménagement du captage est décrit ci-dessus au chapitre 8.2.2.1 (accès n°7).
Le niveau de débordement sera 505.40 NGF. **Cette cote correspond donc à la cote de stabilisation prévue du niveau d'eau après ennoyage.**

Cet aménagement permet l'écoulement **gravitaire** des eaux d'exhaure, en sorte de laisser s'établir un niveau d'eau stabilisé dans le réservoir. Cette condition est requise pour garantir une qualité d'eau satisfaisante à long terme.

Alternative

Il sera toujours possible, en cas d'échec du dispositif prévu au cours de la remontée des eaux, de procéder à la réalisation d'un forage de collecte en l'un ou l'autre des emplacements préconisés dans l'étude jointe en annexe 09.

8.3.5 Traitement des eaux d'exhaure avant leur rejet dans le Ferrier

Le principe retenu est naturellement de traiter les eaux d'exhaure **et elles seules**, c'est à dire avant qu'elles ne soient mélangées aux eaux de ruissellement du carreau ou à celles du Ferrier.

Description des réseaux de surface à l'arrêt des travaux

A l'arrêt des travaux, les réseaux d'eau de surface sont décrits sur le plan en annexe 7.1.

- Le Ferrier, ruisseau naturel, traverse le site dans une canalisation enterrée sous le carreau,
- les eaux de ruissellement du carreau sont collectées dans la même buse enterrée et mélangées à ces dernières,
- les eaux d'exhaure sont collectées séparément et directement acheminées vers les bassins où elles sont décantées, avant d'être restituées au milieu naturel.

Description des réseaux de surface en projet avant mise en service de la station de traitement

Après l'arrêt des travaux, en prévision de la remontée des eaux consécutives à l'arrêt du pompage, les réseaux d'eau de surface seront réaménagés. Le projet de réaménagement est décrit sur le plan joint en annexe 7.3 .

Ce projet de réaménagement, de même que l'exploitation de la station de traitement d'eau, fera l'objet d'une autorisation ou d'une déclaration, établie en application de l'art. 10 de la loi 92-3 du 03 Janvier 1992 (dite « Loi sur l'eau »).

Après l'arrêt des travaux un nouvel exutoire pour les eaux d'exhaure sera aménagé (voir ci-dessus § 8.3.4).

Les eaux d'exhaure ainsi récupérées seront acheminées séparément jusqu'à la station de traitement d'eau. Pour cela, une conduite sera mise en place dans la buse enterrée existante.

En ce qui concerne l'écoulement du Ferrier et la collecte des eaux de ruissellement du carreau, aucun changement n'est prévu.

Après traitement, l'eau sera restituée au milieu naturel.

Dimensionnement de la station de traitement
Le mode de traitement des eaux retenu est un traitement par précipitation à la chaux puis acidification. Il réutilise les 3 bassins de décantation existants.

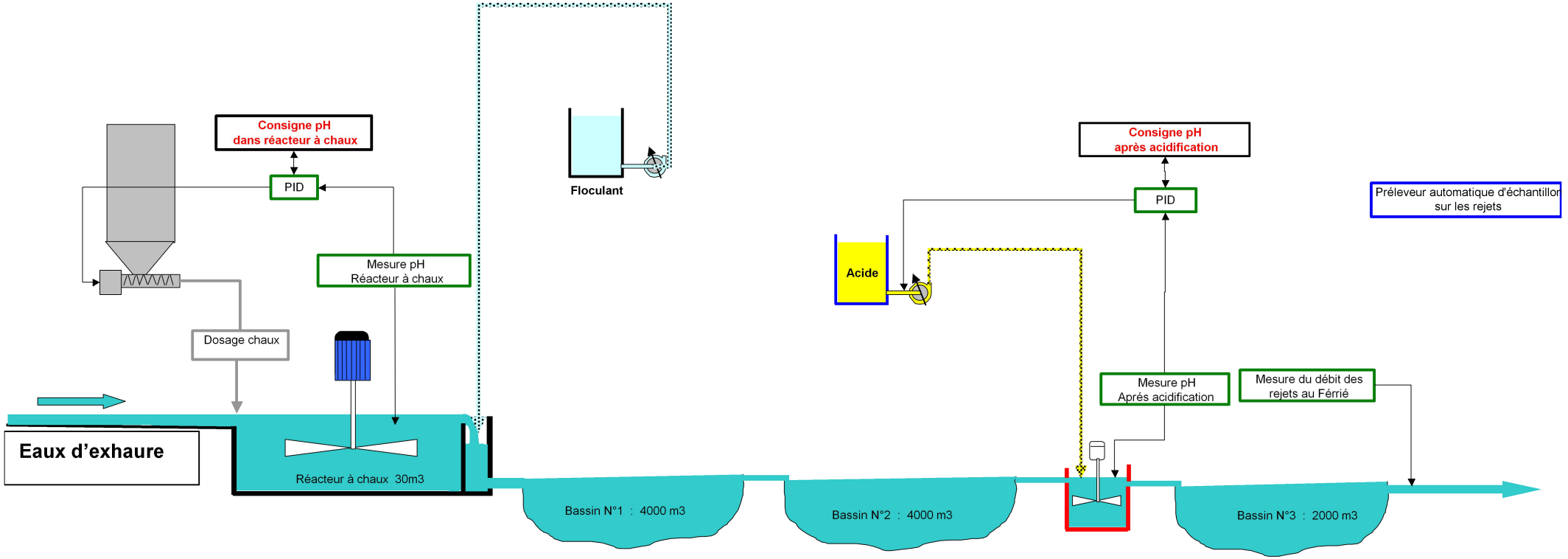
Vue du bassin n° 1 ; Au fond, le bassin n°2

Le débit sur lequel la station est dimensionnée est 30 m3/h, débit de pointe anticipé des eaux d'exhaure à traiter.

Après leur décantation dans les bassins, les boues seront collectées et acheminées sur le site de Montroc

Le flow-sheet de l'installation est le suivant :

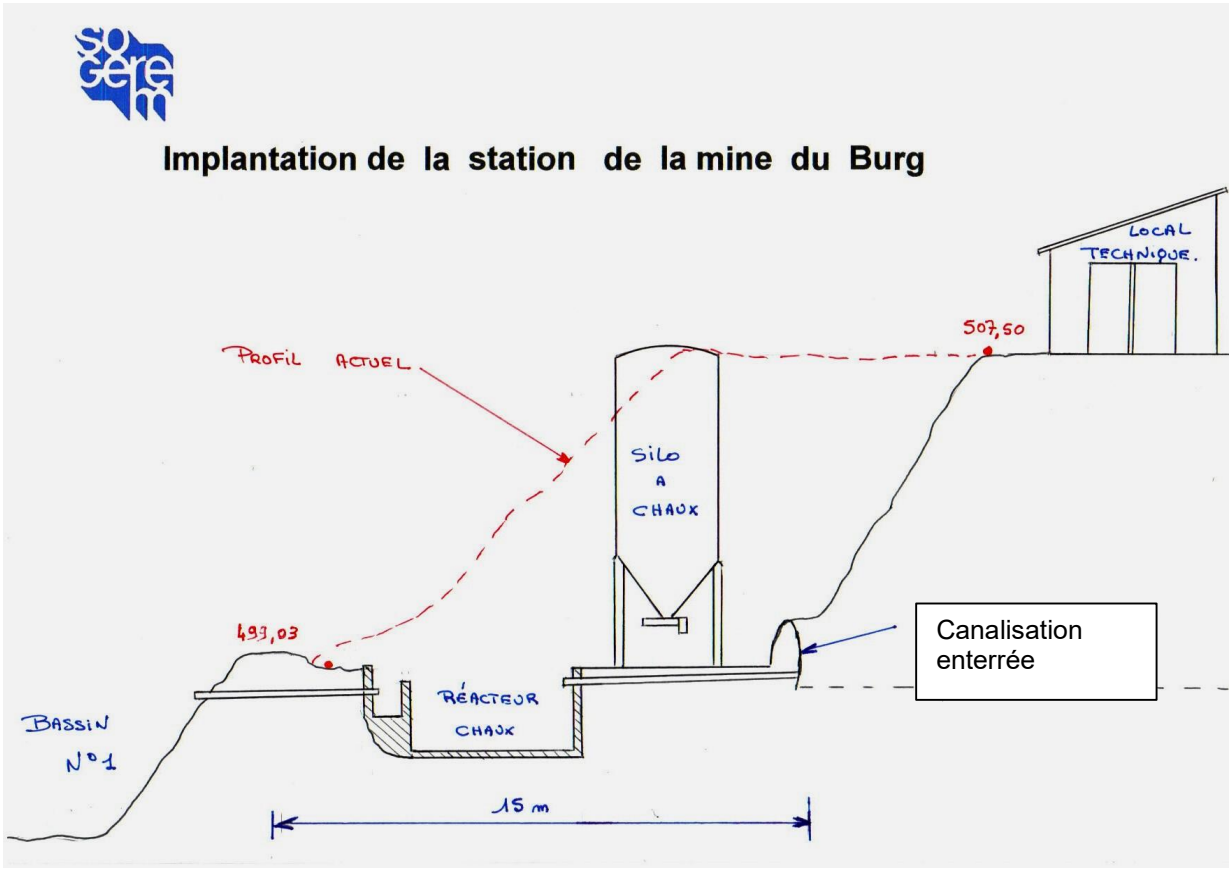
Schéma de principe de la station de la mine du Burg



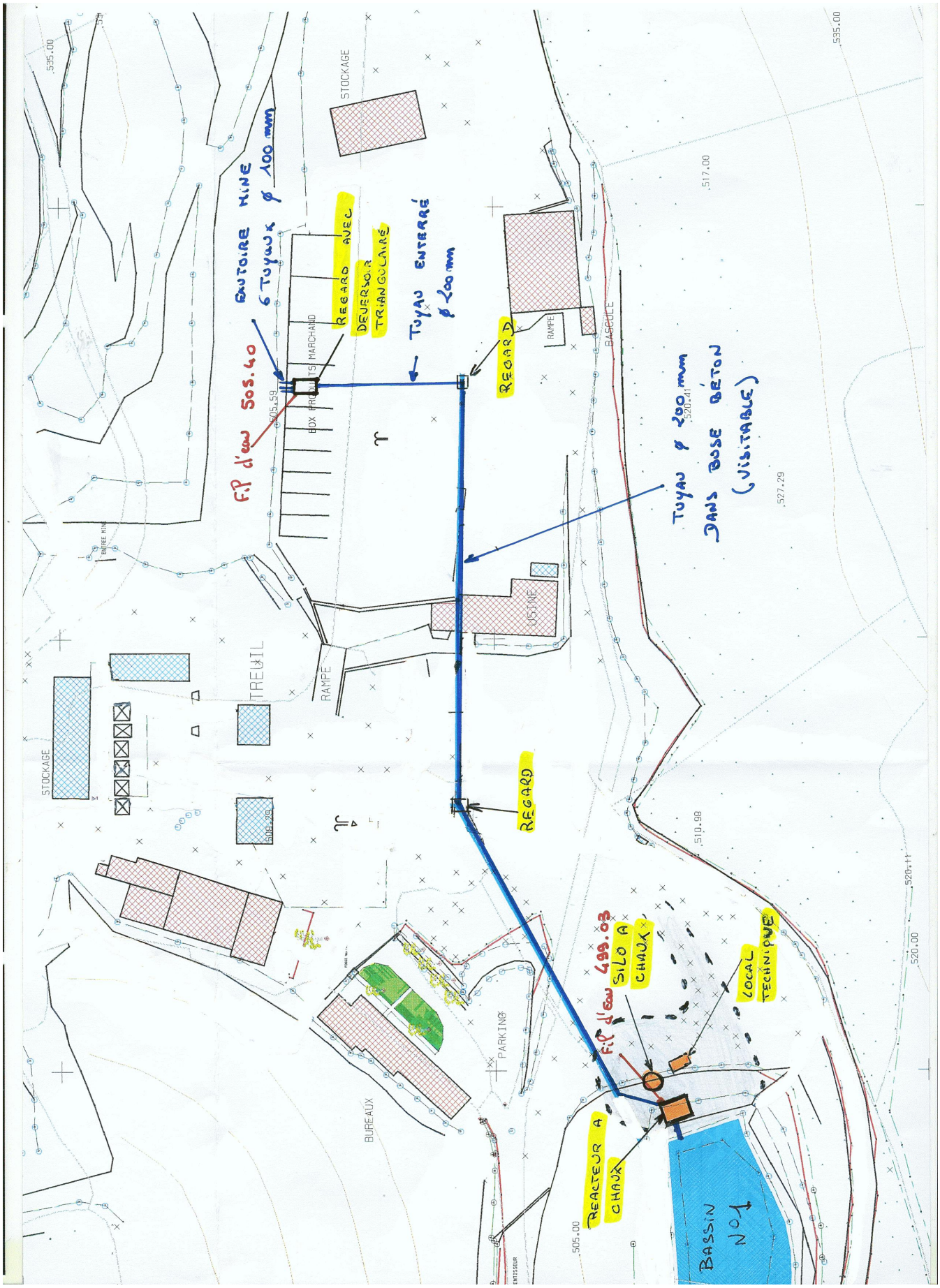
Implantation de la station de traitement

L'emplacement adéquat pour cette station, compte tenu de la topographie du carreau, est répertorié sur les documents suivants :

plan de projet des terrassements



Coupe schématique d'implantation



Plan d'ensemble des réseaux de surface

Dispositions constructives particulières

Cette implantation permet une circulation d'eau **gravitaire** à travers l'ensemble du circuit, sans que le recours à un relevage par pompage soit nécessaire. Cette disposition, de nature à fiabiliser le fonctionnement de l'installation, vise également à éviter autant que possible les rejets de nature accidentelle d'eau non traitée dans l'environnement.

Les dispositions constructives prises propres à éviter tout rejet accidentel d'eaux polluées en aval de la station de traitement sont les suivantes :

- conception fiable et éprouvée de l'ensemble du procédé de traitement,
- surdimensionnement du volume des bassins de décantation (au total, 10 000 m3 de réserve d'eau soit un temps de résidence dans les bassins de l'ordre d'un mois,)
- dilution des rejets accidentels éventuels dans les eaux du Ferrier,

En fait, le retour d 'expérience de SOGEREM sur les stations de Montroc et du Moulinal montre que les arrêts de traitement restent très exceptionnels.

Autres dispositions de nature à prévenir toute pollution accidentelle

En outre, cette station fera l'objet de procédures de maintenance opérationnelle et de surveillance et mesurage qui incluront :

- l'échantillonnage des rejets pour suivi qualité (échantillonnage par prélèvements automatiques).
- l'intervention d'organismes indépendants pour tous contrôles particuliers (prélèvements inopinés, etc …), le cas échéant, à la demande de l'administration

Ces procédures s'inscriront dans le cadre des directives internes en vigueur dans le groupe ALCAN, et conformes aux réquisitions de l'ISO 14 001

Qualité des eaux rejetées dans l'environnement

Après traitement (=sortie du bassin n° 3) les eaux sont restituées au milieu naturel où elles se mélangent avec celles :

- de ruissellement du carreau,
- du Ferrier.

SOGEREM dispose d'un retour d'expérience important en ce qui concerne le traitement des eaux d'exhaure de mine comparables à celles qui devraient être exhaurées au Burc après ennoyage.

En termes d'efficacité, on peut comparer la composition chimique possible des rejets de la station projetée avec celle des rejets de la station du Moulinal.
En effet, le procédé de traitement est le même, et leur dimensionnement comparable.

Selon l'expérience de SOGEREM, on peut estimer que la qualité des eaux après traitement sera du même niveau de qualité que celle rejetée par les stations de traitement des mines de Montroc et du Moulinal.

8.3.6 Les réseaux d'eau de surface après démontage de la station de traitement.

Lorsque au vu de la qualité des eaux d'exhaure, il sera jugé que le traitement d'eau n'est plus nécessaire, les installations correspondantes (dites de sécurité, voir au § 8.7) seront démantelées.

Toute modification fera l'objet si nécessaire d'une autorisation ou d'une déclaration, établie en application de l'art. 10 de la loi 92-3 du 03 Janvier 1992 (dite « Loi sur l'eau »).

8.4. Etude des risques importants après le 1er donné acte

Ce chapitre retrace l'ensemble des risques potentiels qui subsisteraient à l'issue du 1er donné acte de l'administration. Il tient compte de l'ensemble des analyses présentées au chapitre 8.2 et considère les travaux envisagés dans les chapitres 8.2 et 8.3 réalisés.

8.4.1 Risques de débourrage des accès pendant la remontée des eaux

Pendant la remontée des eaux les matériaux de remblayage obturant les anciens accès débouchant en surface seront complètement resaturés, de façon progressive.
A cette occasion, le risque de débourrage est insignifiant comme démontré dans l'étude jointe en Annexe 12, néanmoins, il ne peut être totalement écarté, au cours de la remontée des eaux ainsi que pendant les quelques mois qui vont suivre.

A noter :

- ce risque est nul en ce qui concerne les accès obturés selon les règles de l'art conformément aux réquisitions de l'INERIS (voir Annexe 11), et notamment le puits principal,
- ce risque ne concerne que les ouvrages verticaux anciennement obturés, et dont l'étude au paragraphe 8.2.2.1 aurait été erronée par manque de données, ou les accès éventuels involontairement non répertoriés dans cette étude. Les ouvrages concernés sont les accès répertoriés sous les numéros 12,13,15,17,18,19 sur le plan joint en annexe 7.7.

Aussi, pendant la phase de remontée des eaux dans la mine ainsi que les mois qui vont suivre :

- Le site sera sous la surveillance et la responsabilité d'une entité identifiée, apte à déclencher une intervention de sauvegarde de la sécurité (interdiction d'accès par balisage, clôturage, …)
- le niveau d'eau sera suivi par un levé mensuel (= adapté au besoin d'information)
- l'accès au site sera réglementé, et des zones d'évolution définies et visualisées selon les standards en vigueur sur tous les sites ALCAN.

L'entité identifiée responsable en charge de cette surveillance sera :

- la SOGEREM jusqu'au 1er Janvier 2007,
- Alcan, Bauxite et Alumine, Opérations Atlantique, Direction des Mines et Co-entreprises après cette date.

En temps utile, la Préfecture et la DRIRE seront informés des changements de portage au sein du Groupe Alcan .

Ce risque sera pris en compte conformément aux directives ALCAN et aux réquisitions de l'ISO 14 001

Ce risque ne concerne que la phase d'ennoyage à savoir au plus les deux années consécutives à l'arrêt du pompage au fond, ainsi que les 6 mois suivant la résurgence de l'eau en surface.

8.4.2 Risques de déversement accidentel d'eaux polluées dans le Ferrier.

Un tel risque ne peut se produire que dans les cas suivants :

- 1 station de pompage livrée en ordre de marche opérationnelle **après** que le débordement de la mine consécutive à son ennoyage ait eu lieu,
- 2 fuites du réservoir minier, en des endroits non anticipés et non collectés de façon adéquate,
- 3 défaillance de la station de traitement elle-même.
- 4 rupture de la conduite de liaison de l'exutoire à la station

Risque de livraison en retard de la station de pompage

Ce risque est prévenu par la prise en compte, dans le planning de construction, d'une durée optimiste de remplissage du réservoir minier.
Les simulations réalisées par 2 spécialistes (voir annexes 8 et 9) donnent des résultats, selon les hypothèses prises en compte, comprises entre 5 mois et 2 ans. Par conséquent la station de pompage devra être en état de marche **5 mois après l'arrêt du pompage au fond**.

Par expérience (construction de la station du Moulinal) un délai normal de réalisation d'une telle station n'excède pas 3 mois.

Risques de fuites du réservoir minier

Ce risque a été évalué (voir Annexe 09) comme insignifiant. Néanmoins, il se pose, en particulier :

- de façon diffuse, dans la partie Nord du carreau établie en déblais, et percé de nombreux anciens accès aujourd'hui détruits,
- éventuellement, mais dans ce cas avec des débits limités, en aval des bassins le long de l'accident géologique N/S correspondant au talweg de la verse à stérile.

Ce risque est prévenu par :

- une détection en temps utile, au moyen du piézomètre de suivi des eaux d'exhaure (la stabilisation du niveau indiquera l'existence probable d'une fuite du réservoir)
- la surveillance du carreau et de ses abords, renforcée dès lors que le niveau d'eau atteindra la cote 490,00

Risque de défaillance de la station de traitement elle-même.

Ce risque est prévenu :

- par les dispositions constructives prises pour la conception de cette station (voir paragraphe 8.3.5),
- par la responsabilité d'une entité identifiée en charge de l'opération et de la maintenance opérationnelle de la station.

Ce risque sera pris en compte conformément aux directives ALCAN et aux réquisitions de l'ISO 14 001

Risque de rupture de la conduite de liaison de l'exutoire à la station

Les risques de rupture de cette conduite sont prévenus par sa surveillance constante par l'entité responsable de l'exploitation de la station. La buse dans laquelle la conduite sera installée est visitable et en bon état sur toute sa longueur.

Même en cas de rupture, les risques de déversement accidentel sont limités par une détection rapide et une intervention pour remise en état par l'entité identifiée en charge de l'opération et de la maintenance opérationnelle de la station

8.4.3 Risques d'apparition de fontis en surface

Voir, en Annexe 12, l'étude d'ANTEA, ainsi que le paragraphe 8.2.4 ci-dessus.

Les risques d'apparition de fontis en surface concernent
- des zones limitées en extension et identifiées (voir Annexe 12),
- ces zones sont à sensibilité nulle (terres agricoles, taillis).

Il a été défini qu'un traitement préventif des fontis était hors de proportion eu égard à la classe du risque qui a été évaluée comme très faible.

La surveillance d'un tel risque pourrait mettre en œuvre différentes techniques plus ou moins sophistiquées, parmi lesquelles la plus simple consisterait en un suivi topographique de points répartis en surface. Cette méthode est bien adaptée au suivi et à la prévision de déplacements importants comme des tassements ou affaissements. Elle n'est pas adaptée à la prédiction de fontis d'apparition soudaine (sans mouvement précurseur) et d'extension très limitée. **Ce mode de surveillance est donc inadapté au cas présent**.
Toutes les autres méthodes qui sont théoriquement possibles sont généralement envisagées dans les zones à forte sensibilité (zones urbaines par exemple) car elles sont d'un coût élevé. De plus, elles ne seraient pas toutes adaptées au cas présent, et leur prédictibilité reste discutable. Leur mise en œuvre dans le cas présent n'est pas justifiée compte tenu du risque résiduel, très faible.

Aussi, aucune mesure de surveillance particulière ne peut être retenue.

Par ailleurs, il aurait pu être envisagé de condamner tout accès aux zones d'aléas par un clôturage de ces zones. Ce mode de condamnation n'est pas pérenne et paraît également exagéré au regard du risque résiduel, ainsi que de l'ampleur des effondrements éventuels, qui n'apparaissent pas de nature à porter atteinte à la sécurité publique.

Ces zones seront portées à la connaissance de la municipalité de Paulinet. Il est suggéré, en ce qui concerne les zones délimitées sur le plan joint à l'Annexe 12, incluses dans la parcelle AN51, que la mémoire de ces zones soient conservées par la municipalité et qu'en outre une mention soit portée au Plan d'occupation des sols déclarant ces zones inconstructibles.

Le porter à connaissance de la commune de Paulinet fera l'objet d'un dossier spécifique constitué par SOGEREM et remis à la DRIRE. Ce dossier comportera une carte cadastrale où seront reportées les zones à risque, ainsi que les extraits du rapport d'ANTEA relatifs à ces zones.

8.4.4 Risques d'affaissements de surface

Voir, en Annexe 12, l'étude d'ANTEA, ainsi que le paragraphe 8.2.4 ci-dessus.

Cette étude démontre que **le risque d'affaissements de surface n'existe pas,** puisque la stabilité globale est assurée.

8.4.5 Risques de dommages sur les bâtiments existants

Comme déjà indiqué supra (§ 8.2), **l'absence de toute potentialité de dommages sur les bâtiments existants est assurée.** C'est le cas en ce qui concerne :

- les bureaux, ainsi que les bâtiments actuels situés sur le carreau,
- les bâtiments de la ferme du Burc ainsi que ceux de la Bourrelier.

La question d'une référence topographique se pose néanmoins, en raison des enjeux qui apparaissent importants.
L'enjeu d'un tel suivi consiste, le cas échéant, en cas de litige, d'être capable de démontrer l'origine de dégradations qui apparaîtraient sur les bâtiments existants, par exemple de pouvoir discriminer une origine minière d'une origine non minière (sécheresse, etc …).

Il est donc décidé de procéder à un Nivellement de référence de bases topographiques attachées aux bâtiments existants, par rapport à une base fixe.

Ce nivellement sera confié à un Géomètre topographe expert.

Ce nivellement de référence sera de haute précision, au sens des seuils de tolérance fixés par l'arrêté ministériel du16 Septembre 2003 (JOFR du 30 Octobre 2004), pour la fermeture en altitude d'un cheminement géométrique ou direct.

8.5. Mesures prises pour la surveillance et la prévention des risques pouvant éventuellement subsister après le 1er donné acte

références réglementaires : art. 93 du Code Minier
art. 49.2 du décret n°95-696 du 09 Mai 1995

Voir ci-dessus au paragraphe 8.4 l'exposé détaillé des mesures prises au cas par cas.

En résumé :

- surveillance visuelle du site pendant la remontée des eaux et les 6 mois qui suivront,

Pour l'eau :

- prévention des risques de pollution accidentelle par construction d'une station de traitement d'eau surdimensionnée, et construite de façon à éviter tout rejet accidentel dans le milieu,
- maintenance opérationnelle et surveillance de ladite station,
- prélèvements d'échantillons de contrôle des eaux avant leur rejet, tant que le maintien de la station sera nécessaire.

Pour les fontis :

- signalement en mairie de Paulinet (POS)

Pour la prévention des litiges concernant les bâtiments :

- nivellement de référence.

8.6. Récapitulatif des installations dont l'exploitation minière a cessé

Travaux miniers sur le site de la mine du Burc

Les installations de surface dont l'exploitation minière a cessé sur le site du Burc sont récapitulées au chapitre 8.8.
En ce qui concerne les installations souterraines, dans leur intégralité, leur exploitation a cessé.

Sondages de recherche hors du site de la mine du Burc, dans l'emprise de la concession.

Des sondages de recherche minière ont été effectués dans l'emprise de la concession minière du Burc.
Tous ces sondage ont fait l'objet de déclarations en temps utile auprès de l'administration. A la demande de l'administration, leur abandon a été à chaque fois précédée d'une cimentation de la colonne complète du sondage.

Travaux de recherche ou d'exploitation minière, hors du site de la Mine du Burc, dans l'emprise de la concession

Cinq sites de travaux d'exploitation ou de recherche de fluorine existent dans l'emprise de la concession. Dans tous les cas, ces travaux ont été arrêtés avant l'octroi de la concession du Burc. Aussi, un dossier de déclaration d'arrêt des travaux au sens de l'article 44 du décret 95-696 du 09 Mai 1995 n'est pas requis.

De plus, pour trois d'entre eux, l'exploitant n'était ni SOGEREM ni aucune des Sociétés ayant apporté leurs actifs à SOGEREM.

Pour aucun de ces travaux, SOGEREM n'a établi :

- de déclaration d'arrêt de travaux au sens de l'article 44 du décret 95-696 du 09 Mai 1995,
- de déclaration de délaissement de travaux miniers au sens de l'art.22 du décret 80-330 du 07 Mai 1980,
- de déclaration d'abandon de travaux miniers au sens de l'art.24 du décret 80-330 du 07 Mai 1980.

Malgré le fait que le lien historique entre quatre de ces sites et SOGEREM ne soit pas établi, SOGEREM souhaite laisser une situation future irréprochable conformément aux pratiques et à l'éthique du Groupe ALCAN. Un état des lieux est donc établi en ce qui concerne ces anciens travaux. Cet état des lieux est joint en annexe 14.

8.7. Eventuelles lettres d'information sur les équipements hydrauliques

références réglementaires :

- art. 92 du Code Minier
- art. 49 et 49.1 du décret n°95-696 du 09 Mai 1995, modifiés par le décret 2001-209 du 06 mars 2001,
- (arrêté ministériel à paraître, relatif à la nature des coûts à prendre en compte pour le calcul des sommes mentionnées à l'art . 92 du Code Minier, ainsi qu'aux modalités de calcul de ces sommes)

Résumé des prescriptions réglementaires et de leurs modalités d'application

La réglementation en vigueur offre la possibilité aux collectivités ou aux établissements publics de coopération intercommunale de se porter acquéreur des installations hydrauliques existantes, si elles le jugent nécessaire ou utile. Les droits et obligations afférents sont également transférés.
Si les installations hydrauliques sont considérées comme nécessaires vis-à-vis de la sécurité, leur transfert n'est possible que si le représentant de l'Etat donne son accord. Le transfert est alors assorti du versement par l'exploitant d'une somme correspondant aux coût estimé des 10 premières années de fonctionnement de l'installation, dont le montant est fixé par le représentant de l'Etat, et les modalités d'évaluation fixées par un arrêté ministériel à paraître.

La procédure administrative prévue est la suivante :

- déclaration d'arrêt des travaux par l'exploitant au Préfet (=le présent document), informant ce dernier de l'existence d'installations hydrauliques, et décrivant ces dernières,
- publication de ces informations au recueil des actes administratifs par le Préfet,
- délai de 6 mois pendant lesquels les collectivités peuvent formuler leur demande de transfert (défaut de demande valant refus).

En outre, concernant les installations de sécurité :

- Le transfert éventuel fait l'objet d'un arrêté préfectoral,
- A défaut de transfert des installations vers les collectivités, c'est l'exploitant qui en assure l'exploitation.
- L'exploitant peut demander le transfert à l'Etat de ces installations, sous conditions.

En ce qui concerne les installations hydrauliques n'ayant pas le caractère de sécurité, et à défaut de transfert, l'exploitant met fin à l'exploitation des installations.

Inventaire des équipements hydrauliques

Les installations hydrauliques transférables en application de l'article 92 du Code Minier sont décrites dans les parties 8.3.4, 8.3.5, 8.3.6 ci-dessus.

Voir également le plan joint en annexe 7-3.

Pour mémoire, ces installations hydrauliques consistent en :

Un réseau d'eaux d'exhaure, qui consiste en :

- le point d'exutoire des eaux d'exhaure, aménagé,
- la conduite d'écoulement gravitaire de ces eaux jusqu'à la station de traitement. Cette conduite emprunte la buse de collecte des eaux de ruissellement du carreau et du Ferrier,
- la station de traitement des eaux,
- les 3 bassins de décantation, jusqu'à leur sortie.

D'autres réseaux de surface, à savoir :

- Le Ferrier, ruisseau naturel, traverse le site dans une buse de collecte visitable enterrée sous le carreau,
- les eaux de ruissellement du carreau, collectées dans la même buse enterrée et mélangées à ces dernières,
- les autres réseaux (eaux vannes, eaux usées) alimentant les bureaux et l'atelier mécanique

Caractère « de sécurité » de ces équipements (art. 92 du Code Minier)

La station de traitement d'eau est nécessaire pour garantir l'absence de rejets pollués dans le milieu naturel. De même, le bon état du réseau d'exhaure dans son ensemble est nécessaire. Par conséquent, le réseau d'eaux d'exhaure tel que défini ci-dessus doit être considéré « de sécurité », et relever de *l'article 49-1* du décret n°95-696 du 9 Mai 1995.

Ce caractère de sécurité est provisoire car les études menées montrent que la qualité des eaux d'exhaure doit s'améliorer au cours du temps. Ces études (annexes 09 et 10) prévoient une durée du retour à une qualité stabilisée des eaux d'exhaure comprise entre 5 et 10 ans.

A partir du moment où la qualité des eaux d'exhaure de la mine deviendra, de façon stabilisée, à un niveau de qualité suffisant pour que soit possible **un rejet direct sans traitement**, le caractère « de sécurité » de l'installation sera abandonné, et la station sera démantelée.

Les autres réseaux de surface décrits ci-dessus ne présentent pas de caractère de sécurité, et relèvent de *l'article 49* du décret n°95-696 du 9 Mai 1995.

Maîtrise foncière des équipements de sécurité

Il est par ailleurs suggéré qu'une mention aux hypothèques soit prévue, sur les parcelles concernées par ces équipements hydrauliques, prévoyant expressément un droit de préemption des services de l'Etat ainsi qu'une servitude concernant leur accès. Ces droits et servitudes seront justifiées tant que perdurera le caractère de sécurité des équipements.

Utilisations autres que celles couvertes par le Code Minier

Les équipements hydrauliques décrits ci-dessus n'ont actuellement pas d'utilisations autres que celles couvertes par le Code Minier .

La seule utilisation envisageable dans le futur consisterait en une récupération des eaux traitées à des fins d'utilisation agricole, avec dans cet objectif la possibilité d'installer un pompage dans le bassin n° 3.

L'annexe 15 synthétise et récapitule les informations nécessaires au transfert des installations hydrauliques.

Coûts annuels de fonctionnement

Cette station n'est au stade actuel pas encore érigée. Sa mise en service interviendra après l'ennoyage complet des travaux miniers.
Ses coûts de fonctionnements ne pourront être évalués sérieusement qu'à l'issue d'une période de mise en service, et au vu de ses performances.

Lettres d'informations sur les équipements hydrauliques

Au stade actuel aucun contact n'a été pris par SOGEREM, ni avec les collectivités, ni avec les établissements publics de coopération intercommunale compétents, en préparation de la reprise de ces équipements.

8.8. Utilisation des installations existantes pour des activités non couvertes par le Code Minier.

8.8.1 Activités demeurant sur site après arrêt des travaux miniers

Les activités suivantes, actuellement opérées sur le site, cesseront à la date d'arrêt des travaux miniers :

- les activités minières proprement dites,
- les activités connexes à l'activité minière : transport de minerai, entretien mécanique et électrique, stockage d'explosifs et détonateurs, activités administratives, etc.

Les activités relatives au traitement des eaux d'exhaure seront maintenues sur site tant que ce traitement sera nécessaire :

- surveillance des installations et équipements,
- maintenance opérationnelle des équipements ,
- approvisionnements en chaux,
- curage des bassins de décantation,
- prélèvements et contrôles des effluents.

A ce stade, il n'est pas prévu que des activités non liées aux activités minières du site s'installent sur le site. Au stade actuel, le cas ne peut néanmoins pas être exclu. A titre d'exemples, on pourrait citer les éventualités suivantes :

- activités de construction ou de Travaux Publics,
- activités d'entretien ou de réparation mécanique, serrurerie, chaudronnerie,
- stockage de matériel agricole,
- activités agricoles, forestières ou de la filière bois.

8.8.2 Utilisation des installations existantes pour des activités non minières

Voir en annexe 7.2 le plan des installations actuelles du carreau. Voir également les photographies jointes en fin de paragraphe.

Les bureaux

Le bâtiment utilisé actuellement pour les bureaux sera cédé au propriétaire des terrains, conformément au contrat de location en vigueur entre SOGEREM et le propriétaire des terrains. Il en est de même en ce qui concerne l'alimentation électrique, en eau potable ainsi que l'installation d'assainissement (fosse septique) associée au bâtiment, qui sera curée au préalable.

Vues du bâtiment des bureaux(nov. 2005)

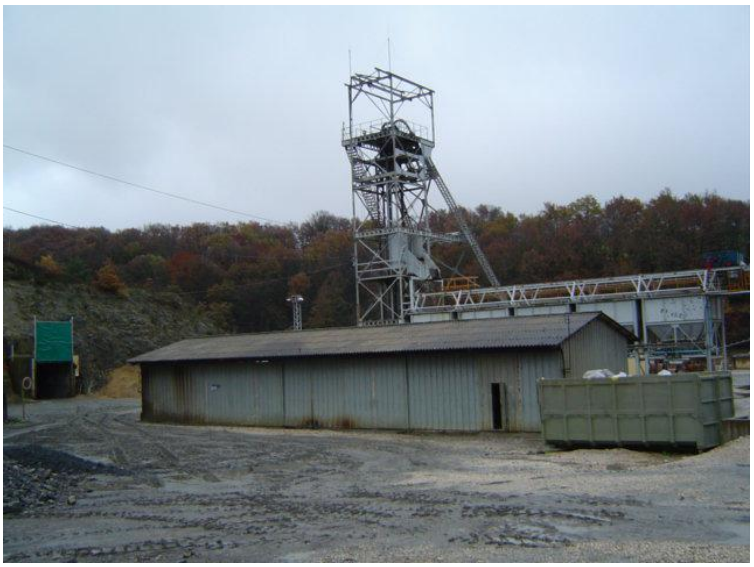
Les installations qui seront démantelées

Les installations suivantes seront démantelées :

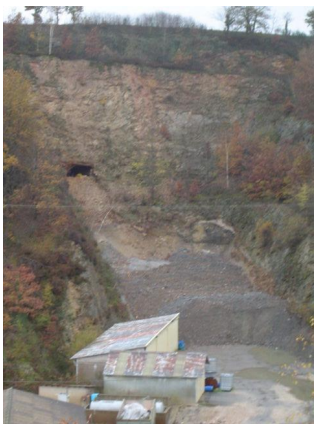
- treuil,
- chevalement et trémies ,
- menuiserie,
- local du compresseur,
- station service
- ancien réfectoire, vestiaire et sanitaire,
- hangars en construction métallique (8 baraquements au total).
- l'usine de gravimétrie et le bâti associé à son exploitation (boxes de stockage).
- le dépôt de détonateurs,
- le dépôt d'explosifs.

Les installations classées pour l'environnement (ICPE) existant sur le site feront l'objet de dossiers d'arrêts définitifs, établis conformément aux prescriptions du décret n° 77-1133 du 21 Septembre 1977, pris en application de la loi 76-663 du 19 Juillet 1976 relative aux ICPE. C'est le cas de l'usine de gravimétrie ainsi que des dépôts de détonateurs et d'explosifs.

Le chevalement et les trémies associées



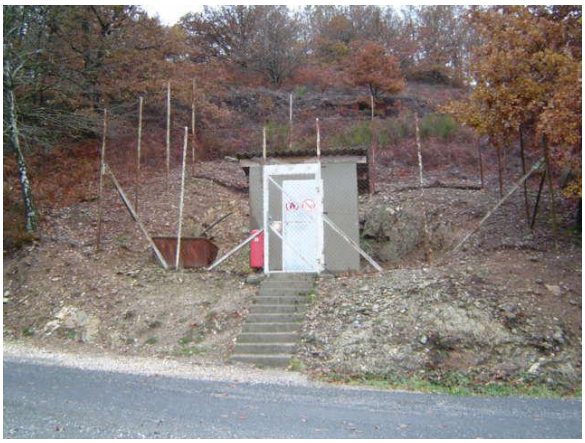
Local du compresseur

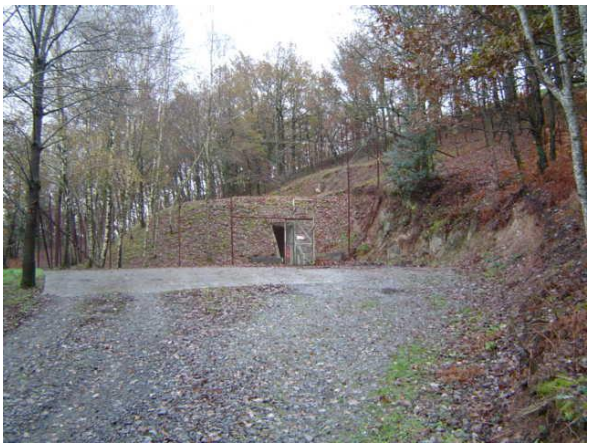


Hangars de construction métallique.

Au premier plan, de g à dr : le local du treuil, l'ancien réfectoire, vestiaire et sanitaires, le local du compresseur. Au 2° plan : station service et menuiserie. Au fond, l'atelier et tout au fond les bureaux.

L'usine de traitement par gravimétrie. Au premier plan, les boxes de stockage.





Dépôt de détonateurs et dépôt d'explosifs

Les installations qui pourront être reprises.

Comme indiqué au paragraphe 8.8.1 ci-dessus, le site est susceptible d'accueillir des activités non minières. Cependant, à ce jour, aucune conservation d'installations existantes n'est envisagée, hormis en ce qui concerne les bureaux (voir ci-dessus). **Les autres installations qui n'auraient pas fait l'objet d'un engagement irrévocable de reprise à une échéance restant à définir seront démantelées**. C'est le cas des installations suivantes :

- les bâtiments en dur autres que les bureaux : ateliers et annexes de l'atelier,
- le pont bascule et le hangar des expéditions,
- la surface du carreau lui-même.

Pont bascule et hangar expéditions

Les équipements hydrauliques

Pour mémoire, les équipements hydrauliques sans caractère de sécurité (voir ci-dessus au § 8.7) pourront être utilisés à des fins agricoles.

Dossier de déclaration d'arrêt définitif de Travaux Miniers

Concession du Burc, Paulinet, Tarn

(art 91 du Code Minier)

Annexes 01 à 06

SOGEREM

version V3 du 28 04 2006 (Avril 2006)

Annexe 01

Information en vue d'une consultation des Représentants du Personnel qui constituent la Délégation Unique de la société SOGEREM, agissant dans le cadre de sa mission de Comité d'Entreprise au titre des dispositions de l'article L.432-1du Code du Travail, sur un projet de fermeture de la Société SOGEREM. *Document interne SOGEREM*

Annexe 02

« SOGEREM Company general presentation » (dossier de presse). Déc 2005. *Document interne SOGEREM*.

« SOGEREM – Extraction de spath fluor, Montroc, Tarn » Document de présentation technque – Août 2005. *Document interne SOGEREM*

Annexe 03

Tranches montantes remblayées avec rampe au filon dans la Mine de Fluorine de Burc. Camille SICARD. *Publications de l'Industrie Minérale, série « Les Techniques » , Février 1983.*

Annexe 04

Copies des actes de concession minière et de leurs transferts successifs

Annexe 05

Délégation de pouvoirs et de responsabilités

Annexe 06

Certificats de non-hypothèque

Dossier de déclaration d'arrêt définitif de Travaux Miniers

Concession du Burc, Paulinet, Tarn

(art 91 du Code Minier)

Annexe 07

SOGEREM

version V3 du 28 04 2006 (avril 2006)

Annexe 07

Documents cartographiques :

- **7.1** 1/2500° Plan de masse du carreau. format A3
Situation à l'arrêt des travaux miniers.
Etat des réseaux hydrauliques de surface à l'arrêt des travaux,
Etat de la verse à stériles à l'arrêt des travaux
(fichier : i2500jf1.cgs)

- **7.2** 1/1000° Plan de masse du carreau. format A3
Situation à l'arrêt des travaux miniers.
Dénomination des bâtiments
(fichier : i1000jf1.cgs)

- **7.3** 1/2500° Plan de masse du carreau. format A3
Avant-projet de réaménagement des réseaux hydrauliques,
Avant-projet de réaménagement de la verse à stériles.
(fichier : i2500jf4.cgs)

- **7.4** 1/5000° Parcellaire cadastral format A3
(fichier : i5000jf3.cgs)

- **7.5** 1/1000° Plan des travaux souterrains format 1170 x 410
à l'arrêt des travaux miniers
(fichier : cci0206.cgs)

- **7.6** 1/1000° Coupe E-W des travaux souterrains format 1170 x 410
à l'arrêt des travaux miniers
Zones remblayées
(fichier : drire06.cgs)

- **7.7** 1/2000° Plan de superposition fond et surface format 730 x 380
Situation à l'arrêt des travaux miniers.
Implantation des sondages
Implantation des accès au fond
(fichier : iantea2.cgs)

Dossier de déclaration d'arrêt définitif de Travaux Miniers

Concession du Burc, Paulinet, Tarn

(art 91 du Code Minier)

Annexes 08 à 15

SOGEREM

version V3 du 28 04 2006 (Avril 2006)

Annexe 08

Etat actuel et évolution prévisionnelle du régime et de la qualité des eaux issues de l'exploitation de fluorine du Burc. E LEDOUX, J-M SCHMITT. *CIG / ARMINES LHM/RD/03/29*

Annexe 09

Mine du Burc (81) Bilan relatif aux effets sur l'eau des travaux et de leur arrêt. A BLACHERE, S MOREL*, CESAME*

Annexe 10

Mesures de l'activité volumique du radon 222 et de l'énergie alpha potentielle due à ses descendants à vie courte sur les retours d'air généraux et dans les zones d'activité de l'exploitation souterraine du Burc – Yves VAUZELLE, *ALGADE* réf SOGM 60-0 2-06 04 V1-SB

Annexe 11

Mine du Burc (81) - Conception et dimensionnement des traitements de mise en sécurité du puits et des cheminées d'aérage – Nicolas POIROT, Xavier DAUPLEY, Mehdi GHOREYCHI, *INERIS*, ref DRS – 05 – 72908/R01

Annexe 12

Mine souterraine du Burc – Paulinet (81) – Evaluation géotechnique des désordres en surface suite à l'arrêt de l'exploitation. JM BONNART, *ANTEA*, ref. A 39 809/A

Annexe 13

Types de béton pour bouchon autoportant. Note INERIS ref. DRS – 06 – 72908 / L03
Nicolas POIROT, Xavier DAUPLEY

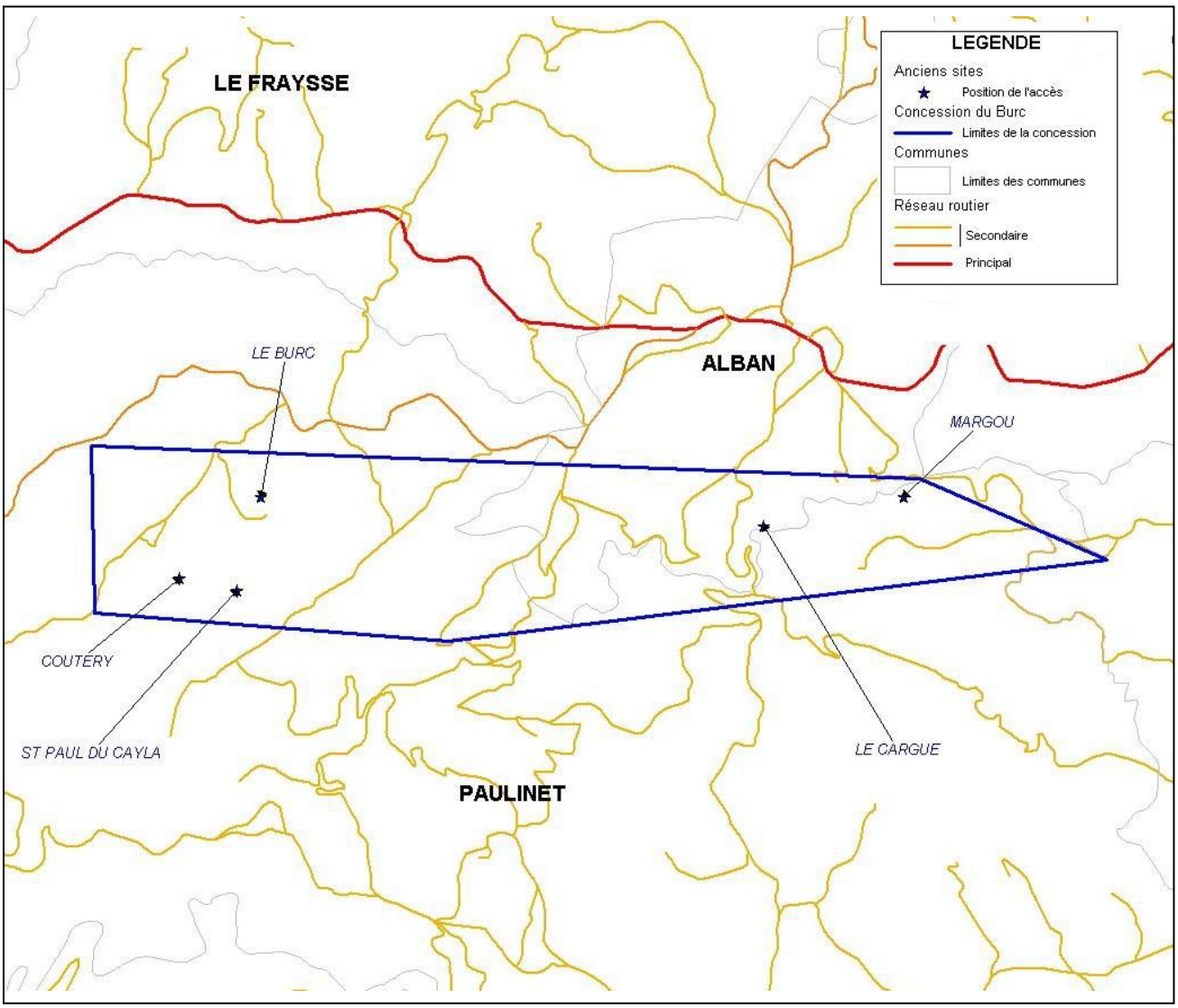
Annexe 14

Anciens travaux d'exploitation ou de recherche localisés dans l'emprise de la concession du Burc : Etat des lieux

Les anciens travaux d'exploitation ou de recherche de fluorine localisés dans l'emprise de la concession du Burc sont les suivants :

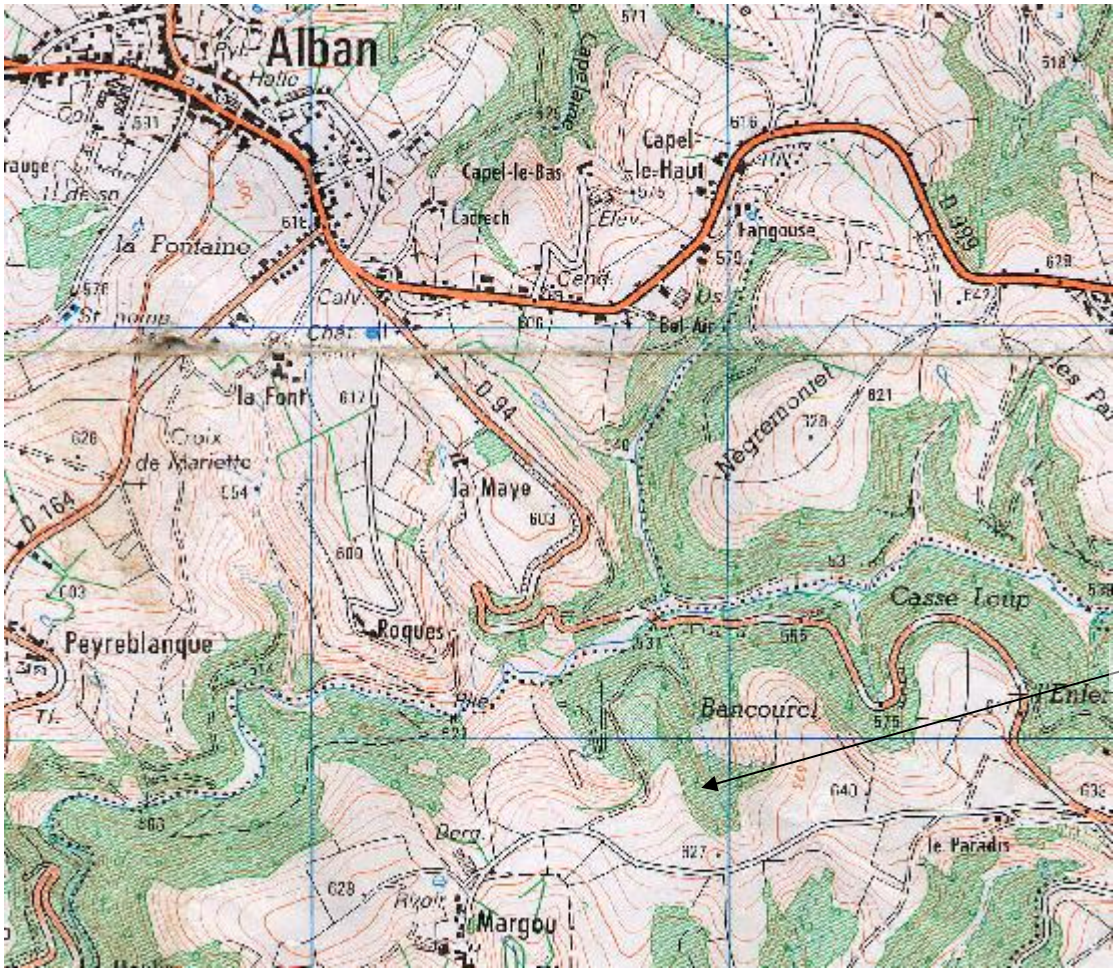
- Margou (travaux Ugine)
- Margou (travaux Gauthier)
- Coutery,
- Saint Paul du Cayla,
- La Cargue

La localisation de ces anciens sites est figurée sur le plan ci-dessous :



1 Margou (Travaux Ugine)

Situation géographique du site :



fond IGN Alban (2342 E) 1/25 000

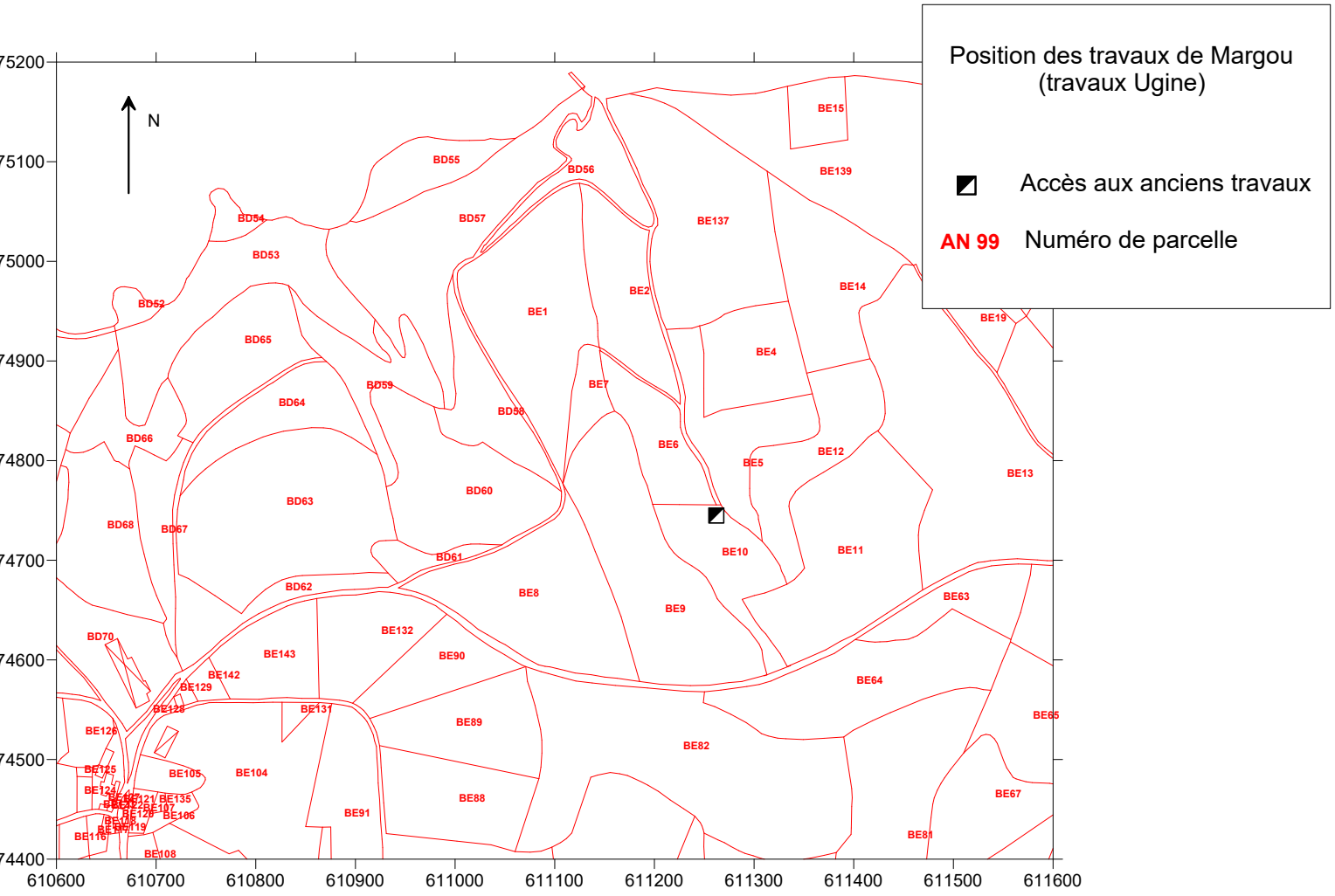
Coordonnées Lambert III :

X = 611 250
Y = 174 750
Z = 600

Situation administrative du site :

Copie des actes
Une déclaration d'ouverture de carrière a été faite le 6 Août 1955 par la Société d'Ugine en vertu du décret du 12.2.1892. Cette déclaration est jointe en fin de ce document.
Il n'existe pas d'autre document administratif concernant ce site.

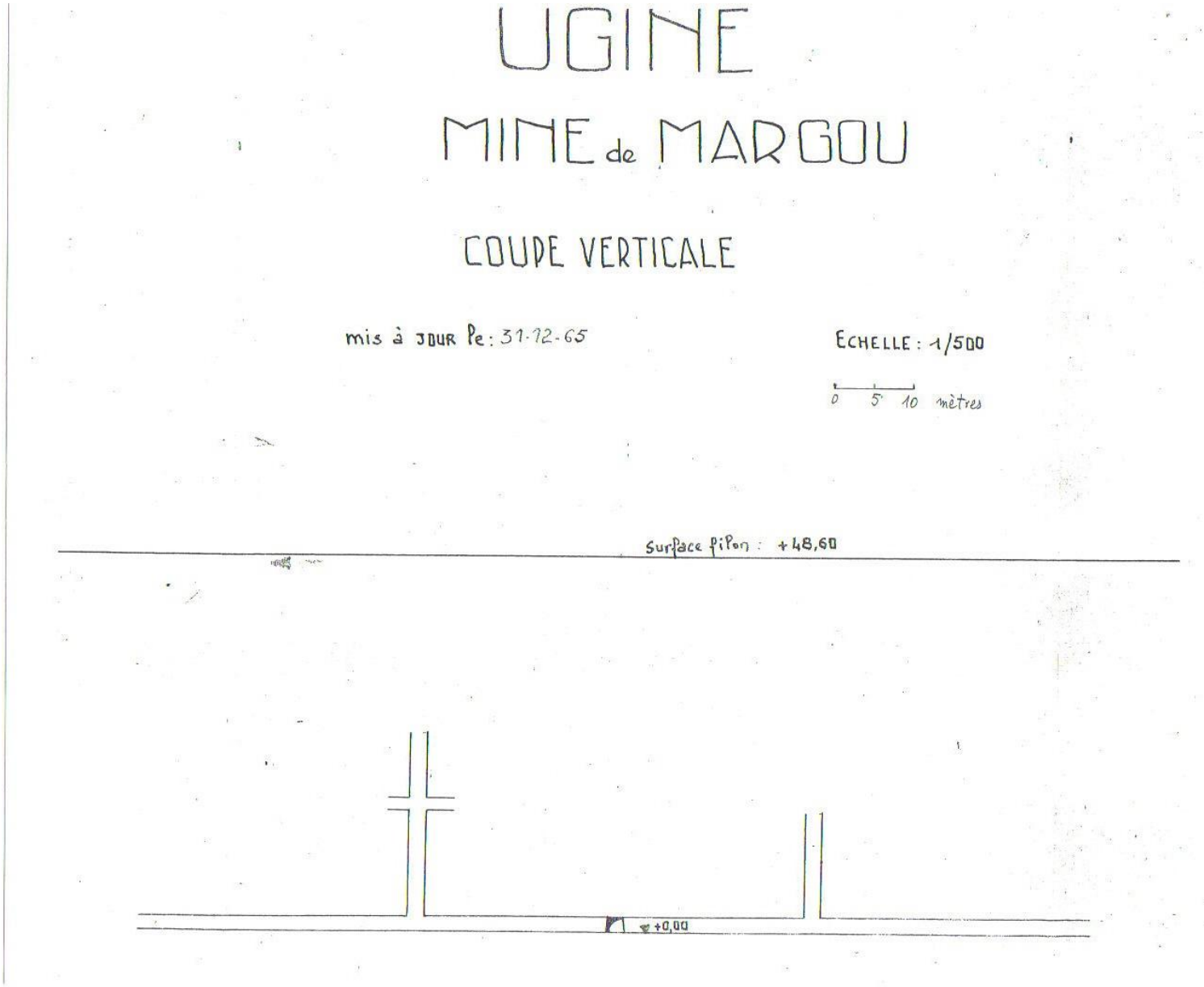
Parcellaire cadastral (Commune de Paulinet)



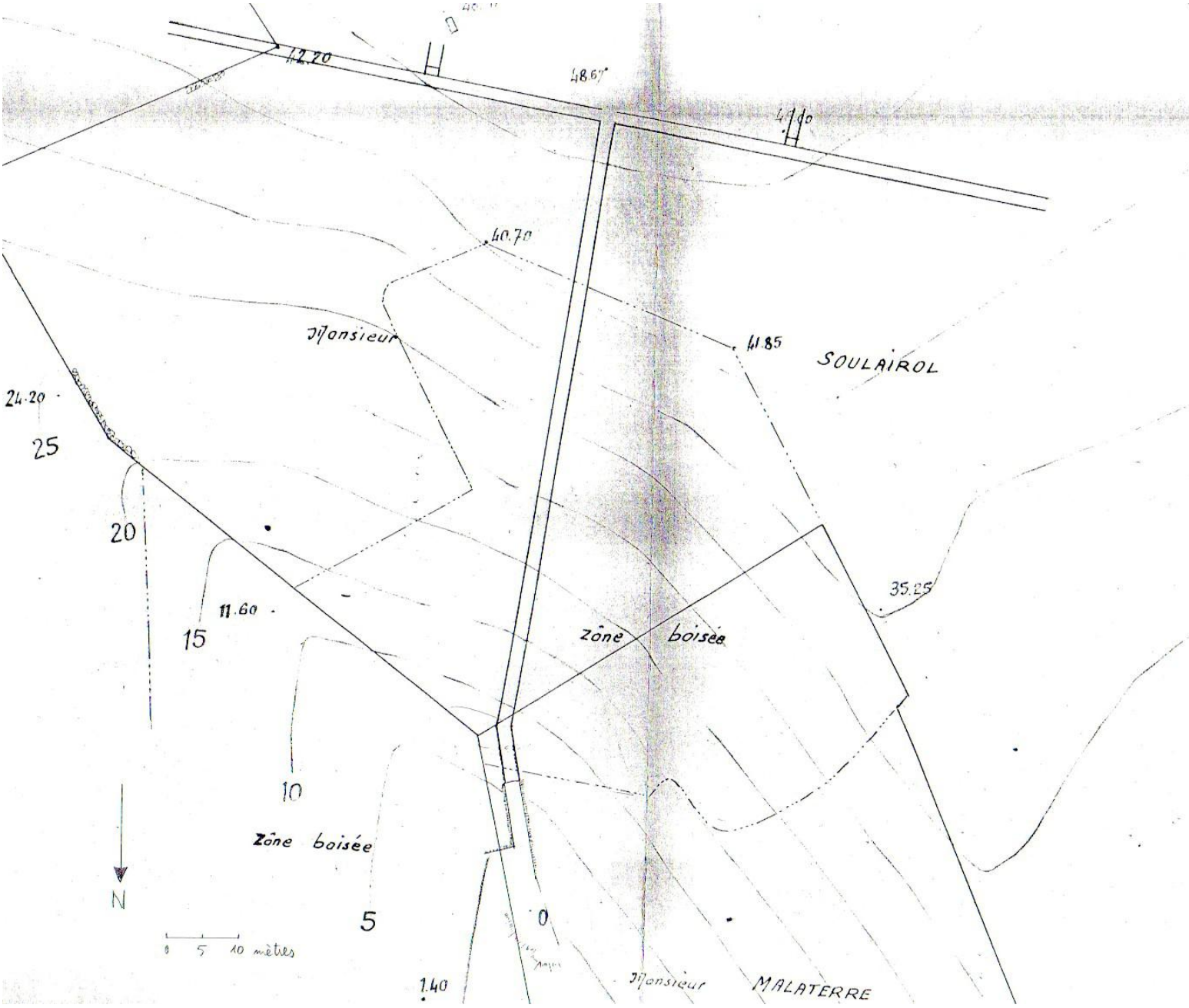
L'accès est localisé sur la parcelle référencée BE 10 sur la commune de Paulinet

Plans et coupes des travaux

Les plans et coupes disponibles sont reproduits ci-dessous :



Plan Ugine, Archives SOGEREM, mise à jour du 31/12/1965



Plan Ugine, Archives SOGEREM, mise à jour du 31/12/1969

Historique du site

Un affleurement a été trouvé au début des années 1950 par M Gauthier. A proximité et à la même période, un indice a été reconnu et aurait été exploré jusqu'en 1959 par galerie à partir de l'accès référencé ci-dessus, ainsi que par des tranchées de surface.

La galerie de reconnaissance aurait fourni environ 10 000 tonnes de fluorine entre 1955 et 1959.

Le site a fait l'objet de prospections plus récentes par SOGEREM :

Entre 1973 et 1974, Sogerem a effectué 2 lignes de géochimie sol et plusieurs profils de géophysique (résistivité).

En 2002, 1471 prélèvements de sol pour analyse à la Fluorescence X ont été prélevés.
Aucune tranchée ni aucun sondage n'a été par la suite réalisé.

Etat des lieux (mars 2004)

L'accès reste visitable et accessible à partir de la parcelle référencée BE 6 (propriétaire : Mr MALATERRE Jacques).

Il n'y a pas de chemin d'accès. Les travaux sont accessibles en remontant le talweg dans les bois. Le début du travers-banc est praticable puis il est en partie noyé. La section est de l'ordre de 2 mètres de hauteur sur 1.50 m environ. Il n'y a pas de trace d'effondrement de surface sur ce site.

A l'extérieur du travers banc, on peut suivre des rails sur une vingtaine de mètres jusqu'à une ancienne trémie.

De l'eau s'écoule de la galerie (échantillonnée en mars 2004).

Caractéristiques :

PH = 6.97
Conductivité = 0.1 mS/cm
Fluor = 3.25 mg/L
Fer = 0.02 mg/L
Cuivre et Manganèse < 0.01 mg/L

Le débit d'exhaure observé en Mars 2004 était faible, de l'ordre de quelques m3 /heure.

Examen des mesures à prendre vis-à-vis des intérêts fondamentaux

Risque d'écoulements d'eaux polluées
La teneur en ions dissous est très faible et ne justifie pas de traitement de l'eau d'exhaure.

Accumulation de matières polluées
Néant.

Risque d'instabilité de verses
Néant (Aucune verse n'est repérable sur le site)

Risques d'instabilité de talus de surface
Les talus des abords de la galerie sont stabilisés depuis plus de 50 ans et ne présentent plus de risque d'instabilité ou de chutes de blocs.

Risques d'intrusion
Le risque apparaît limité en raison de la situation des travaux (presque entièrement noyés. Pas d'affleurement minéralisé apparent). Néanmoins ce risque existe.

Risques de fontis / effondrement en surface.
L'aléa est inexistant en raison :

- de l'étroitesse de l'accès, en relation avec la profondeur supposée des travaux de reconnaissance dans le filon (recouvrement de l'ordre d'une vingtaine de mètres, compte tenu de la situation topographique de l'accès)
- de la bonne tenue des épontes,
- de l'âge de l'accès (retour d'expérience de 50 années sans effondrement).

La sensibilité au risque est nulle en raison de l'utilisation des terrains sus-jacents (prairies, terres agricoles, taillis, bois)

En conclusion, le risque d'apparition de désordre de surface apparaît nul, et il n'y a pas lieu de prévoir de rémédiation particulière vis-à-vis de ce risque particulier.

Travaux prévus

Compte tenu des risques énumérés ci-dessus, il conviendra d'obturer l'entrée vis-à-vis du risque d'intrusion. Cette opération permettra en plus de caler le talus de l'accès et de prévenir tout risque d'instabilité éventuel. La stabilité à long terme de ce talus sera de plus garanti par un drainage préalable des eaux d'exhaure.

Compte tenu de l'absence de chemin d'accès (et dans le souci de préserver l'environnement et le paysage actuels du site) il n'est pas envisagé la réalisation d'un ouvrage maçonné dans l'entrée de la galerie, mais plutôt d'utiliser les matériaux disponibles sur place.

La trémie sera éliminée.

Un drain sera mis en place dans l'accès.

La végétation couvrant le talus qui surplombe l'entrée sera préservée.

Les matériaux récupérés par des emprunts à proximité seront utilisés pour réaliser un talus obstruant totalement l'accès et parfaitement stable. La pente du talus sera inférieure à la pente naturelle de stabilité des matériaux, à savoir de l'ordre de 35°.
L'ensemble sera ensuite recouvert de terre végétale disponible à proximité.

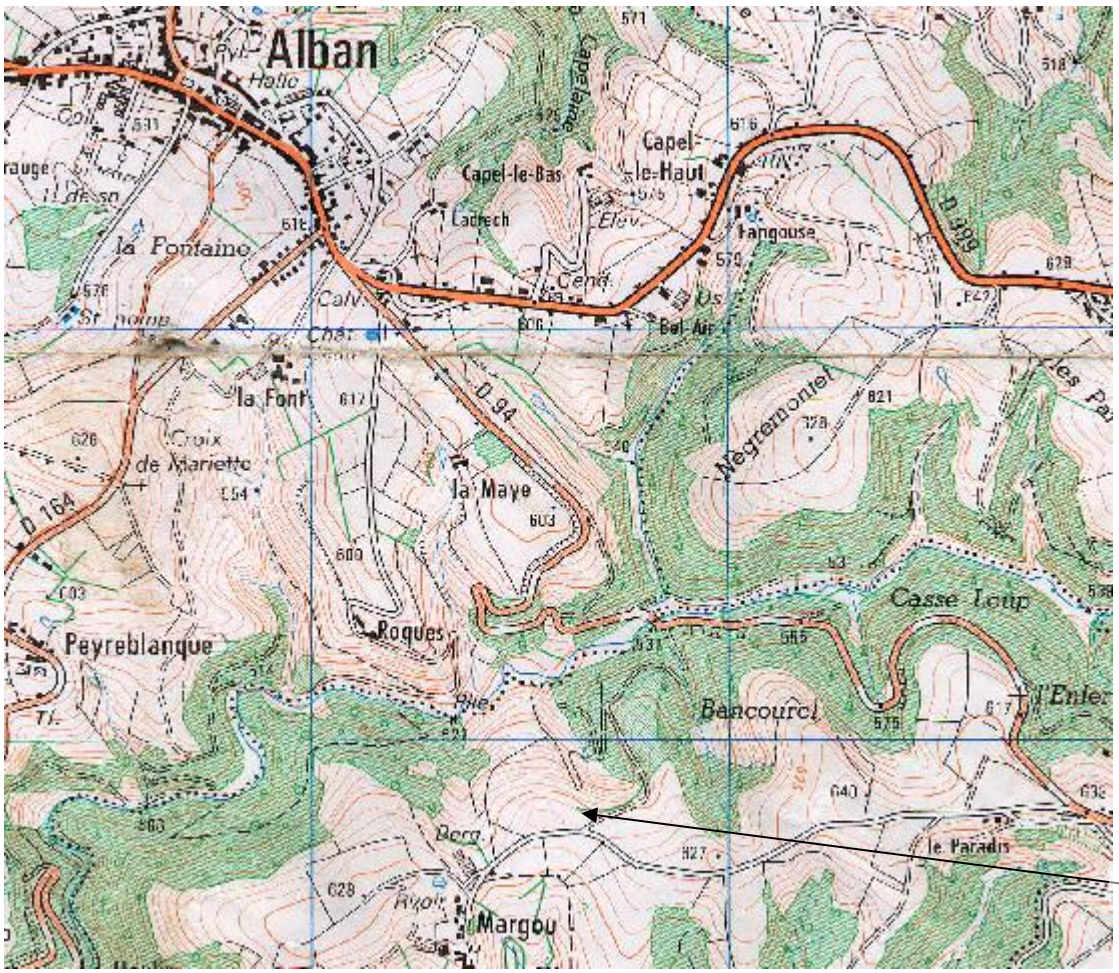
Cette terre sera colonisée par la végétation environnante, de façon à occulter toute trace visible de l'ouvrage

Examen des risques résiduels à l'issue des travaux, et nécessité de surveillance à long terme

A l'issue des travaux prévus les risques résiduels tant vis-à-vis de la sécurité des personnes que vis-à-vis de l'environnement sont inexistants.
Il n'est donc pas nécessaire de prévoir de mesures de suivi d'aucune sorte.

2 Margou (Travaux Gauthier)

Situation géographique du site :



fond IGN Alban (2342 E) 1/25 000

Coordonnées Lambert III :

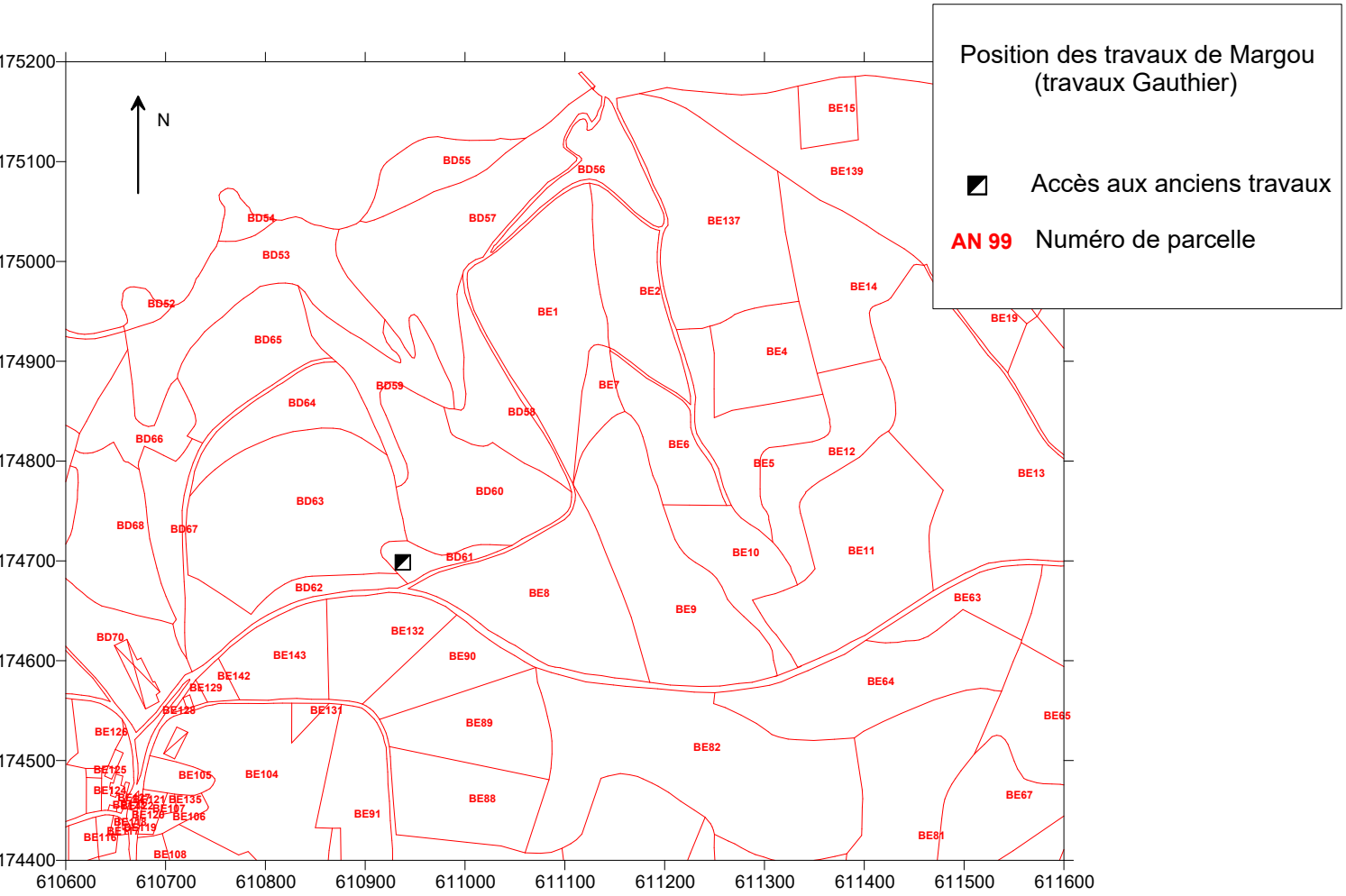
X = 610 950
Y = 174 700
Z = 600

Situation administrative du site :

Copie des actes
Le site n'ayant pas été exploité par SOGEREM (ni par aucune société ayant apporté ses actifs à SOGEREM), SOGEREM ne dispose d'aucun document.

En l'absence d'ayants droit connu de la Société d'Exploitation concernée, le site peut être considéré comme orphelin.

Parcellaire cadastral (Commune de Paulinet)



L'accès est localisé sur la parcelle référencée BD 61 sur la commune de Paulinet

Plan des travaux

Aucun plan ni coupe des travaux n'existent dans les archives de SOGEREM concernant ce site

Historique du site

Un affleurement a été trouvé au début des années 1950 par un particulier (M Gauthier) sur ce site. Ce particulier a exploité pour son propre compte ce prospect entre 1954 et 1959 et en aurait extrait 15 000 tonnes de fluorine.

Etat des lieux (mars 2004)

Les dépilages et accès sont situés sur la parcelle BD 61, et accessibles par cette dernière (à 50 m au nord de la route du hameau de Margou)

On peut distinguer trois accès :

- un dépilage à ciel ouvert,
- une dépression conique à proximité du dépilage.
- un ancien accès horizontal, vraisemblablement en travers-banc, situé en contrebas des deux derniers accès.

Le travers banc
Il n'est plus accessible car totalement effondré. De l'eau d'exhaure s'en écoule (échantillonnée en Mars 2004)
Caractéristiques de l'eau :

PH = 7.17
Conductivité = 0.1 mS/cm
Fluor = 1.23 mg/L
Fer = 0.019 mg/L
Cuivre et Manganèse < 0.01 mg/L

Le débit d'exhaure observé en Mars 2004 était faible, de l'ordre de quelques m3 /heure.

Près de cette entrée effondrée on peut encore voir l'ancienne trémie en bois, des rails et des wagonnets.

Le dépilage à ciel ouvert
Il se présente sous la forme d'une tranchée de 3 à 8 m de profondeur, et 5 à 6 m de large, sur une quinzaine de mètres de longueur.

La dépression conique à proximité du dépilage
Ses talus sont en pente raide et ses abords malaisés. Cette dépression est située dans l'alignement du dépilage, et à une vingtaine de mètres de ce dernier.

L'existence d'un travers banc d'accès, ainsi que celle de la dépression conique, laisse supposer l'existence de travaux souterrains, dont la position et l'extension sont inconnus.
La petite quantité de minerai produite, la faible durée de l'exploitation (5 ans), les dimensions des équipements d'extraction (roulage et trémie) indiquent de toutes façons des travaux d'extension limitée.

Examen des mesures à prendre vis-à-vis des intérêts fondamentaux

Risque d'écoulements d'eaux polluées
Les eaux s'écoulant du travers-banc ne sont pas polluées comme le montre l'analyse réalisée. Il n'existe d'ailleurs pas de possibilité technique d'améliorer encore la faible teneur en fluor des eaux d'exhaure.

Accumulation de matières polluées
Présence de déchets agricoles mis en verse d'un côté du dépilage.

Risque d'instabilité de verses
Néant (Aucune verse n'est repérable sur le site)

Risques d'instabilité de talus de surface
Les abords du dépilage ont été colonisés par une végétation abondante, qui a contribué à stabiliser les talus depuis plus de 50 ans. Pas de risque notable.

Risques d'intrusion ou de chute de personnes
L'accès souterrain est effondré et n'est plus accessible
Le dépilage peut encore être visité, du moins partiellement.
Il existe un risque de chute de personnes dans la dépression conique.

Risques de fontis / effondrement en surface.
En ce qui concerne le travers-banc lui-même, qui est déjà effondré, l'aléa d'effondrement est nul.

En ce qui concerne les travaux souterrains, l'aléa d'effondrement est faible ou nul compte tenu des arguments suivants :

- compte tenu des équipements d'extraction utilisés (petit roulage), les galeries de reconnaissance éventuelles ainsi que les accès sont de faible dimension (probablement pas plus larges qu'1,50 m à 2 m),
- l'âge des galeries éventuelles (plus de 50 ans) procure un retour d'expérience conséquent sans effondrement.

De plus, dans l'éventualité d'un traitement, il faudrait procéder à des terrassements dont l'ampleur et les dommages vis-à-vis de l'environnement seraient certainement importants :

- destruction paysagère et destruction de surfaces agricoles,
- dégradation de la qualité des eaux d'exhaure.

Le remède à un danger supposé risquerait d'être bien pire que ce dernier qui n'est qu'improbable.

La sensibilité au risque d 'effondrement est nulle en raison de l'utilisation des terrains sus-jacents (prairies, terres agricoles, taillis, bois)

Travaux prévus

Compte tenu des risques énumérés ci-dessus, les travaux envisagés sont les suivant :

- Remblayage du dépilage,
- Remblayage de la dépression conique,
- Elimination de la trémie

Le remblayage de la dépression et du dépilage à ciel ouvert se fera au moyen de matériaux disponibles à proximité, de la façon suivante :

- décapage et mise en tas de la terre végétale disponible sur le talus amont,
- ripage sur le talus amont, et remblayage du dépilage et du puits,
- étalage de la terre végétale en surface.

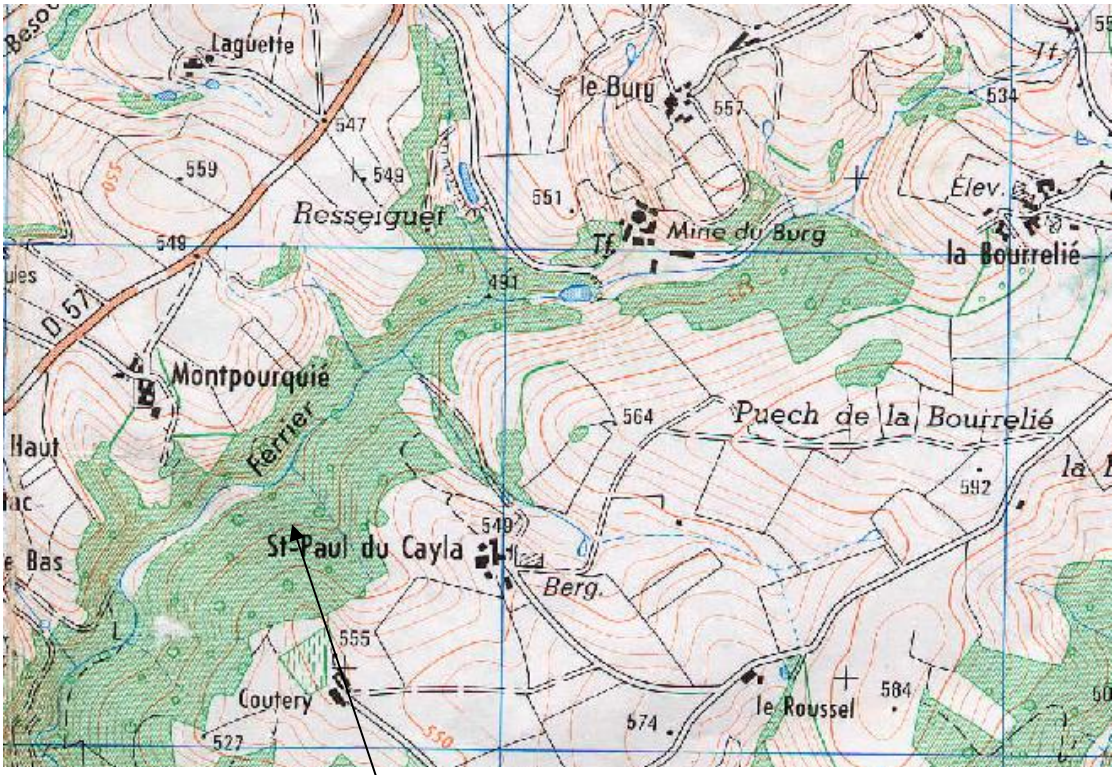
Le travers-banc en aval, déjà effondré (=sécurisé) et correctement drainé depuis 50 ans, sera laissé en l'état.

Examen des risques résiduels à l'issue des travaux, et nécessité de surveillance à long terme

A l'issue des travaux prévus les risques résiduels tant vis-à-vis de la sécurité des personnes que vis-à-vis de l'environnement sont négligeables.
Il n'est donc pas nécessaire de prévoir de mesures de suivi d'aucune sorte.

3 Coutery

Situation géographique du site :



Coordonnées Lambert III :

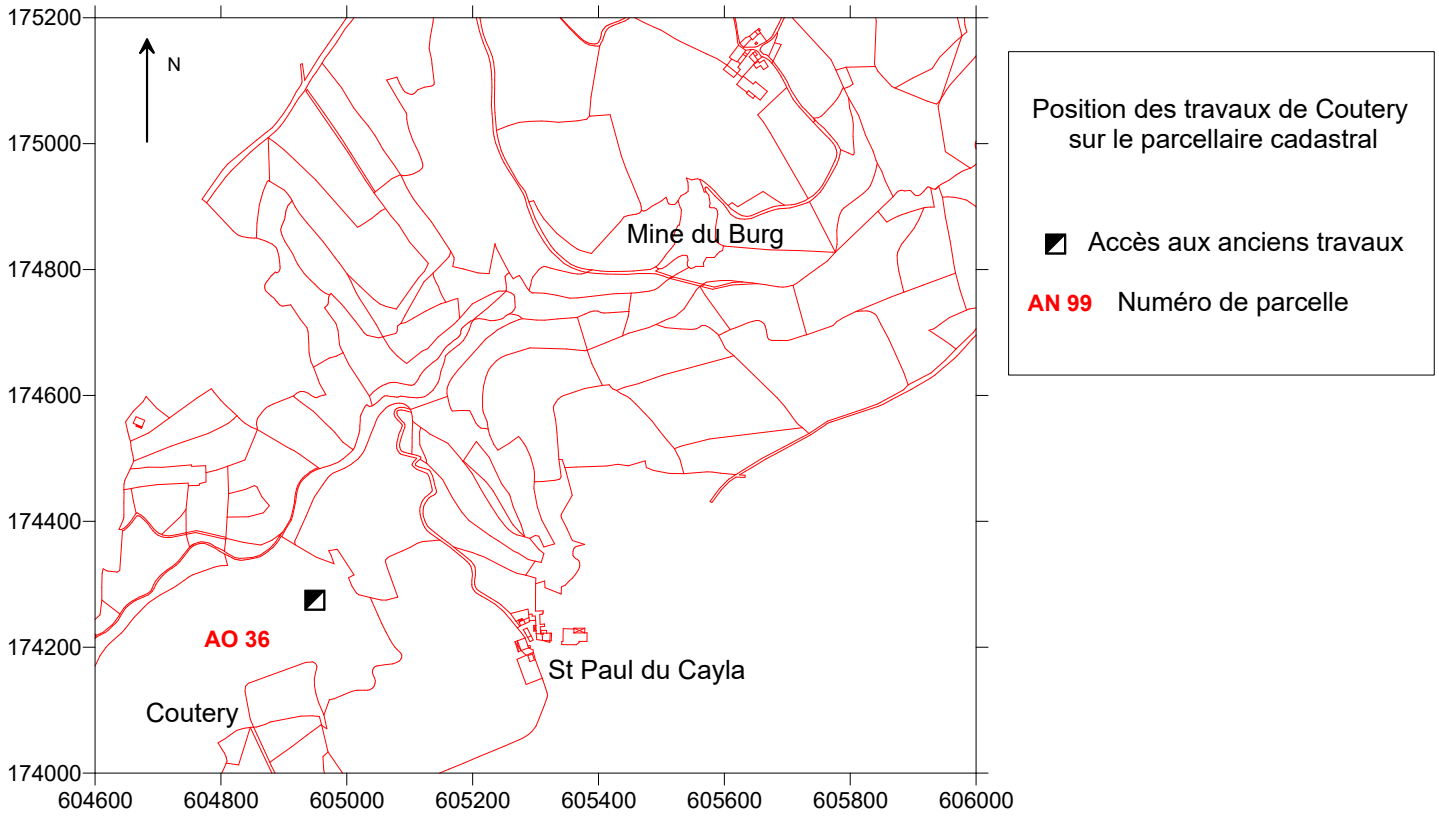
X = 604 950
Y = 174 280
Z = 502

Situation administrative du site :

Copie des actes
Le site n'ayant pas été exploité par SOGEREM (ni par aucune société ayant apporté ses actifs à SOGEREM), SOGEREM ne dispose d'aucun document.

En l'absence d'ayants droit connu de la Société d'Exploitation concernée, le site peut être considéré comme orphelin.

Parcellaire cadastral (Commune de Paulinet)



L'accès est localisé sur la parcelle référencée AO 36 sur la commune de Paulinet.
Propriétaire : PUJOL Solange Ep. BOULARAN Jean

Plan des travaux

Aucun plan ni coupe des travaux n'existent dans les archives de SOGEREM concernant ce site

Historique du site

L'indice de Coutery aurait été découvert au début des années 50 et exploité entre 1956 et 1959 par un particulier (Mr Gauthier). Cet indice est lié à celui de Saint Paul de Cayla (voir ci-dessous), ce dernier n'ayant fait l'objet que de travaux de prospections.

Les travaux d'exploitation menés au cours de cette période consistent en :

- un dépilage à ciel ouvert sur 30 à 40 mètres de long, large de 5 à 8 mètre et profond jusqu'à 15 mètres,
- des travaux souterrains constitués d'un puits et de traçages latéraux dans le filon, qui ne sont plus apparents

La production aurait été de l'ordre de 12 000 tonnes[4].

Pendant l'exploitation, 2 tranchées dans le prolongement Sud Ouest ont été ouvertes.

Au cours des années 1980, SOGEREM a érigé une clôture ceinturant les travaux. En 2000, 1200 prélèvements de sol pour analyse à la Fluorescence X ont été prélevés par SOGEREM dans les alentours. En août et septembre 2003, SOGEREM a foré 7 sondages carottés sous l'ancienne mine et dans le prolongement Est (Puech de la Bourrelié).

Etat des lieux (août 2005)

La clôture posée par Sogerem dans les années 90 autour de l'ancienne exploitation est endommagée par endroit par des arbres qui sont tombés dessus. Les galeries semblent effondrées mais le puits reste ouvert avec ces parois à pic.

L'un des sondages effectué en 2003 est artésien. A la demande de la commune, il a été mis en place un bouchon et une vanne pour laisser la possibilité ultérieure de canaliser cette eau.

En Mai 2003 deux échantillons d'eaux ont été prélevés à des fins d'analyses par l'ENSMP (Voir étude jointe en annexe 08, ainsi que les résultats des analyses ci-dessous).

Vue générale du dépilage de Coutery (Mars 2006).

[4] L'Inventaire minéralogique de la France N° 6, Editions du BRGM, 1976

Examen des mesures à prendre vis-à-vis des intérêts fondamentaux

Risque d'écoulements d'eaux polluées

Les analyses réalisées en 2003 sur les eaux s'écoulant des anciens travaux ainsi que de la verse à stérile indiquent des teneurs en ions dissous très faibles, qui ne justifient pas de traitement d'eau :

Echantillon	**BS3**	**BS4**
Lieu	Coutery – débord. filon	Coutery – égoutt. remblais
Date		
Temp en °C	14,2	14,1
pH	6,16	6,6
Eh /ENH en mV	375	288
Cond en µS/cm	81,6	122,2
TDS mg/L		
O_2 dissous mg/L	7	9,1
HCO_3^- mg/L	29,3	31,7
F^- mg/L	1,08	1,38
Cl^- mg/L	4,37	4,92
NO_2^- mg/L	< 0,01	< 0,01
Br^- mg/L	< 0,01	< 0,01
NO_3^- mg/L	2,24	0,68
SO_4^{--} mg/L	7,59	11,79
Li^+ mg/L	< 0,01	< 0,01
Na^+ mg/L	1,29	1,33
NH_4^+ mg/L	< 0,01	< 0,01
K^+ mg/L	1,4	1,84
Mg^{++} mg/L	1,31	2,82
Ca^{++} mg/L	5,61	9,49
$SiO_2(aq)$ mg/L	4,71	6,96
Fe mg/L	0,027	1,00
Cu mg/L	0,028	0,012
Pb mg/L	< 0,001	< 0,001
Cd mg/L	<0,001	<0,001
Zn mg/L	0,017	< 0,015
Co mg/L	0,002	0,003
Mn mg/L	0,33	0,43
Ni mg/L	0,004	< 0,001
Al mg/L	0,096	0,037
f **CO_2**		

Accumulation de matières polluantes
Néant

Risque d'instabilité de verses
Une verse constituée de stériles miniers, d'un volume estimé à environ 500 m3, est stockée en aval du dépilage. Ses talus sont érodés et recouverts d'une végétation déjà ancienne. Ils ne présentent pas de risque d'instabilité.

Risques d'instabilité de talus de surface
Les talus amont et aval sont à pic. La roche encaissante est massive (faciès BTH, brèche très hydrothermalisée), et d'apparence saine. Ces talus ne présentent pas de trace d'effondrement récent néanmoins le risque d'instabilité de ces talus ne peut être écarté.

Risques d'intrusion ou de chute de personnes
Compte tenu de la hauteur des talus le risque de chute de personnes existe.

Risques de fontis / effondrement en surface.
En ce qui concerne les travaux souterrains, il paraît difficile d'évaluer l'aléa d'effondrement, car leur position exacte n'est pas connue.
Les seuls arguments disponibles, qui indiquent un aléa faible, sont les suivants :

- la bonne tenue des épontes, et notamment la présence d'un toit massif de BTH,
- la topographie, qui implique, dans la direction du filon, un approfondissement rapide des voies tracées de niveau dans le filon
- les techniques minières connues dans les années 1950 (petit roulage / galeries tracées à la main en petite section),
- l'ancienneté des travaux (50 ans) qui procurent un retour d'expérience conséquent sans effondrement

De plus, dans l'éventualité d'un traitement, il faudrait procéder à des terrassements dont l'ampleur et les dommages vis-à-vis de l'environnement seraient certainement importants :

- destruction paysagère et destruction de surfaces boisées,
- dégradation de la qualité des eaux d'exhaure, alors qu'il est établi que celles-ci sont aujourd'hui de bonne qualité.

Le remède à un danger supposé risquerait d'être bien pire que ce dernier qui n'est qu'improbable.

La sensibilité au risque est nulle en raison de l'utilisation des terrains sus-jacents (zones boisées)

Travaux prévus

La clôture sera démontée.

Le dépilage sera remblayé. Pour ce remblayage, les matériaux de la verse à stérile existant sur le site seront utilisés ce qui permettra en outre de faire disparaître cette dernière. Les matériaux supplémentaires nécessaires proviendront :

- des gravats issus de la démolition des installations de la mine du Burc,
- de matériaux prélevés sur la verse à stérile du Burc.

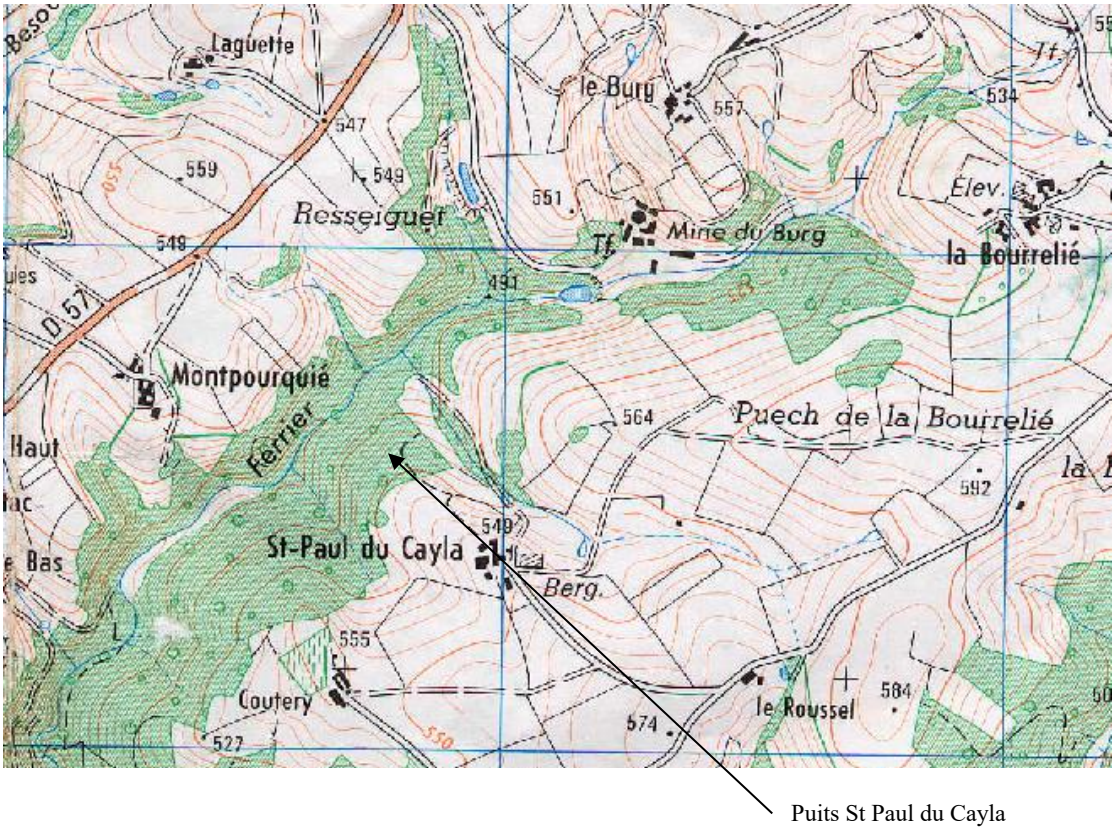
Enfin de la terre végétale disponible à proximité sera régalée au mieux sur la surface reconstituée proche des terrains naturels initiaux.

Examen des risques résiduels à l'issue des travaux, et nécessité de surveillance à long terme

A l'issue des travaux prévus les risques résiduels tant vis-à-vis de la sécurité des personnes que vis-à-vis de l'environnement sont négligeables.
Il n'est donc pas nécessaire de prévoir de mesures de suivi d'aucune sorte.

4 Saint-Paul du Cayla

Situation géographique du site



Coordonnées Lambert III

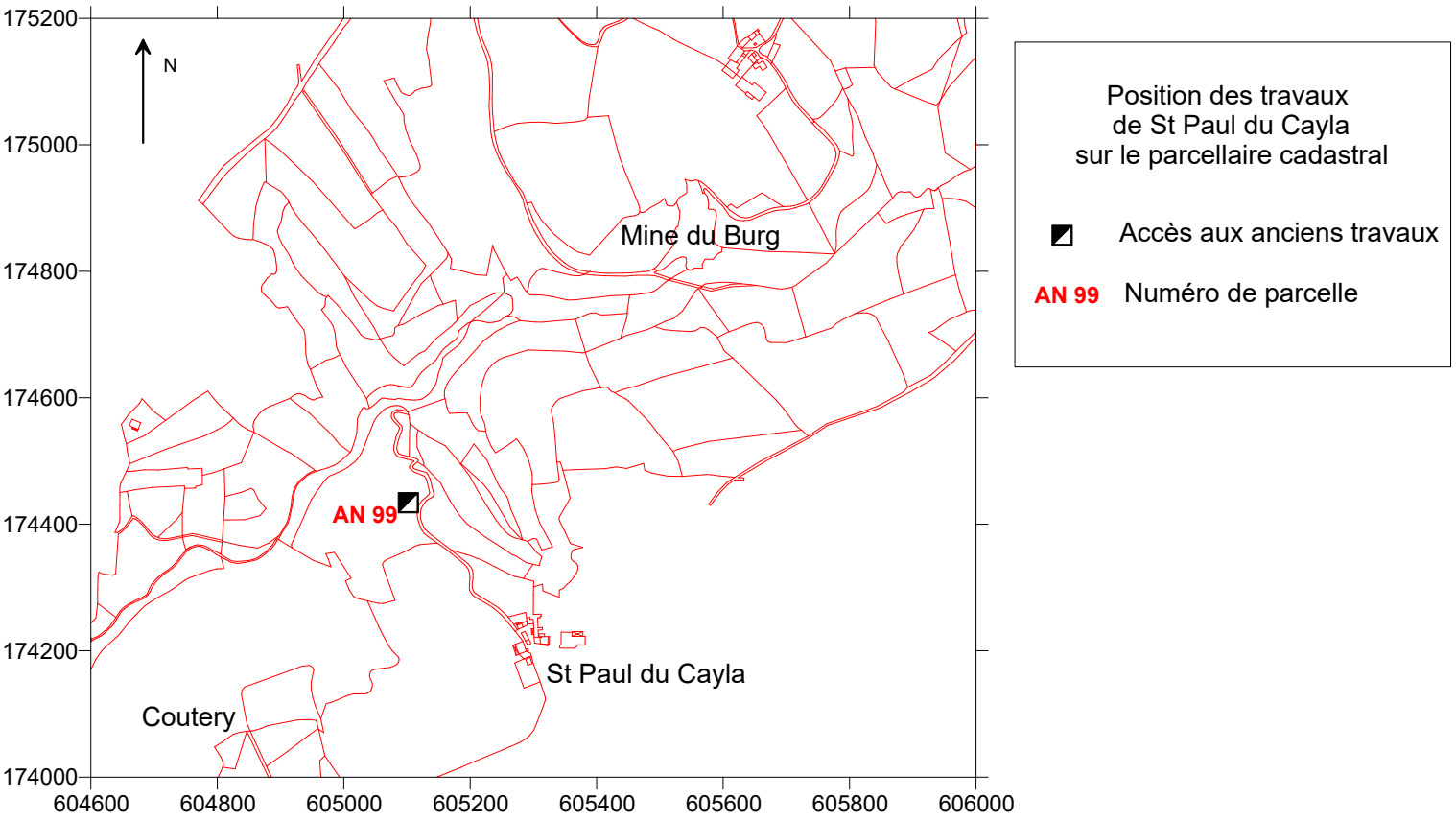
X= 605 100
Y= 174 400
Z= 520

Situation administrative du site :

Copie des actes
Le site n'ayant pas été exploité par SOGEREM (ni par aucune société ayant apporté ses actifs à SOGEREM), SOGEREM ne dispose d'aucun document.

En l'absence d'ayants droit connu de la Société d'Exploitation concernée, le site peut être considéré comme orphelin.

Parcellaire cadastral (Commune de Paulinet)



L'accès connu se situerait sur la parcelle référencée AN99 sur la commune de Paulinet.

Plan des travaux

SOGEREM ne dispose d'aucun plan de travaux

Historique du site

Il s'agit d'un indice sur lequel des travaux de recherches ont été effectuées, dans le prolongement Est du filon de Coutery.

En 1973 et en 1981, SOGEREM a effectué quelques lignes de géochimie sol dans le prolongement Est de Coutery, sur le Puech de la Bourrelié.
En 2000, 1200 prélèvements de sol pour analyse à la Fluorescence X ont été prélevés.
En février 2003, 2 tranchées au tracto pelle sur le Puech de la Bourrelié, rebouchée au fur et à mesure.
En août et septembre 2003 : 7 sondages carottés sous l'ancienne mine de Coutery, ainsi que dans son prolongement Est (Puech de la Bourrelié).

Etat des lieux (Mars 2004)

Aucun travaux n'ont été retrouvé malgré le ratissage effectué de l'emplacement supposé de ce puits.

Examen des mesures à prendre vis des intérêts fondamentaux

Les travaux supposés ont par conséquent été remblayés après des recherches infructueuses.

Travaux prévus

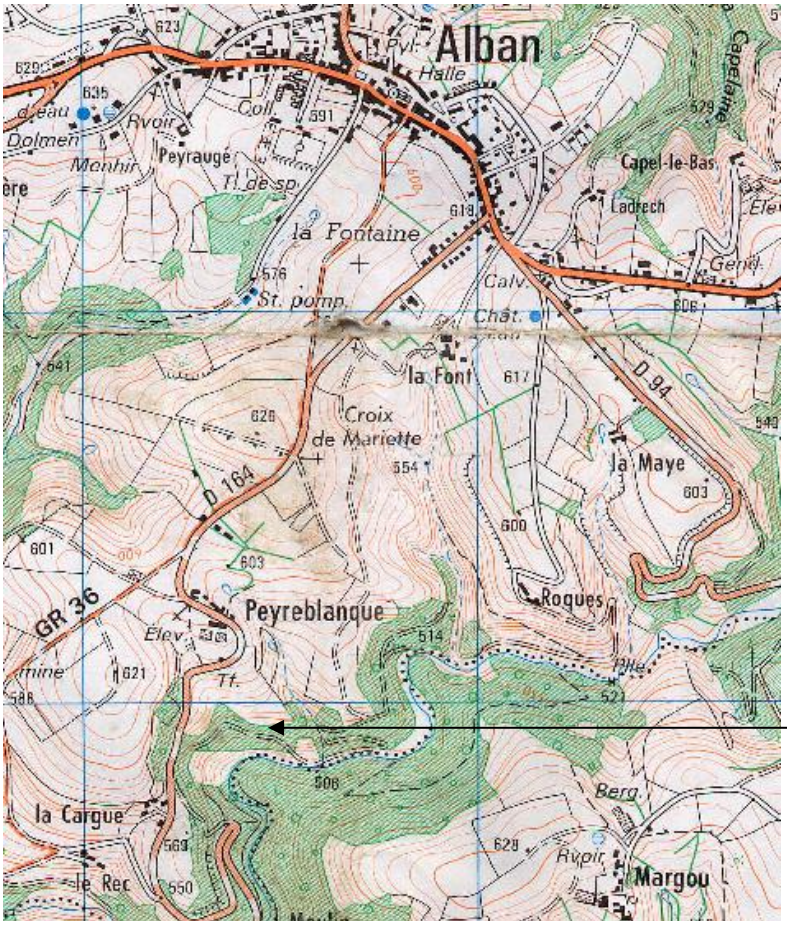
Aucun

Examen des risques résiduels

Aucun risque résiduel

5 La Cargue

Situation géographique du site :



Coordonnées en Lambert III :

X = 609 720
Y = 174 770
Z = 520

Situation administrative du site

Travaux de reconnaissance effectués par Ugine pour la fluorine sur sa concession minière (concession du Burc, acte ci-joint en annexe 04).

Parcellaire cadastral (Commune d'Alban)

Extrait du plan SOGEREM « Peyreblanque » réf DA 574, Mai 1974, sur fond de parcellaire cadastral de la commune d'Alban, section A, 3ème feuille, 2° édition à jour de 1963, 1/250 000)

Les reconnaissances sont localisées sur les parcelles référencées n° 825 et 826 sur la commune d'Alban. Les propriétaires indivisionnaires sont M Christian RODIERE et Mme Nadine RABAUD (épouse RODIERE Christian).

Historique du site

Indice de fluorine découvert par Ugine dans les années 1970 entre les mines de Peyreblanque (ancienne carrière souterraine de barytine) et de Margou.
Cet indice n'a fait que l'objet de prospection.

- 2 tranchées (de 8 et 9 m) effectuées au tractopelle en septembre 1974, 1 rebouchée de suite et l'autre est restée ouverte car zone marécageuse.
- 3 sondages percutants de 39 à 45 m de long en 1975.

Voir plan joint ci-dessus.

Etat des lieux (Août 2005)

Les tranchées ne sont plus visibles.

Examen des mesures à prendre vis des intérêts fondamentaux

Aucune mesure à prendre

Travaux prévus

Aucun

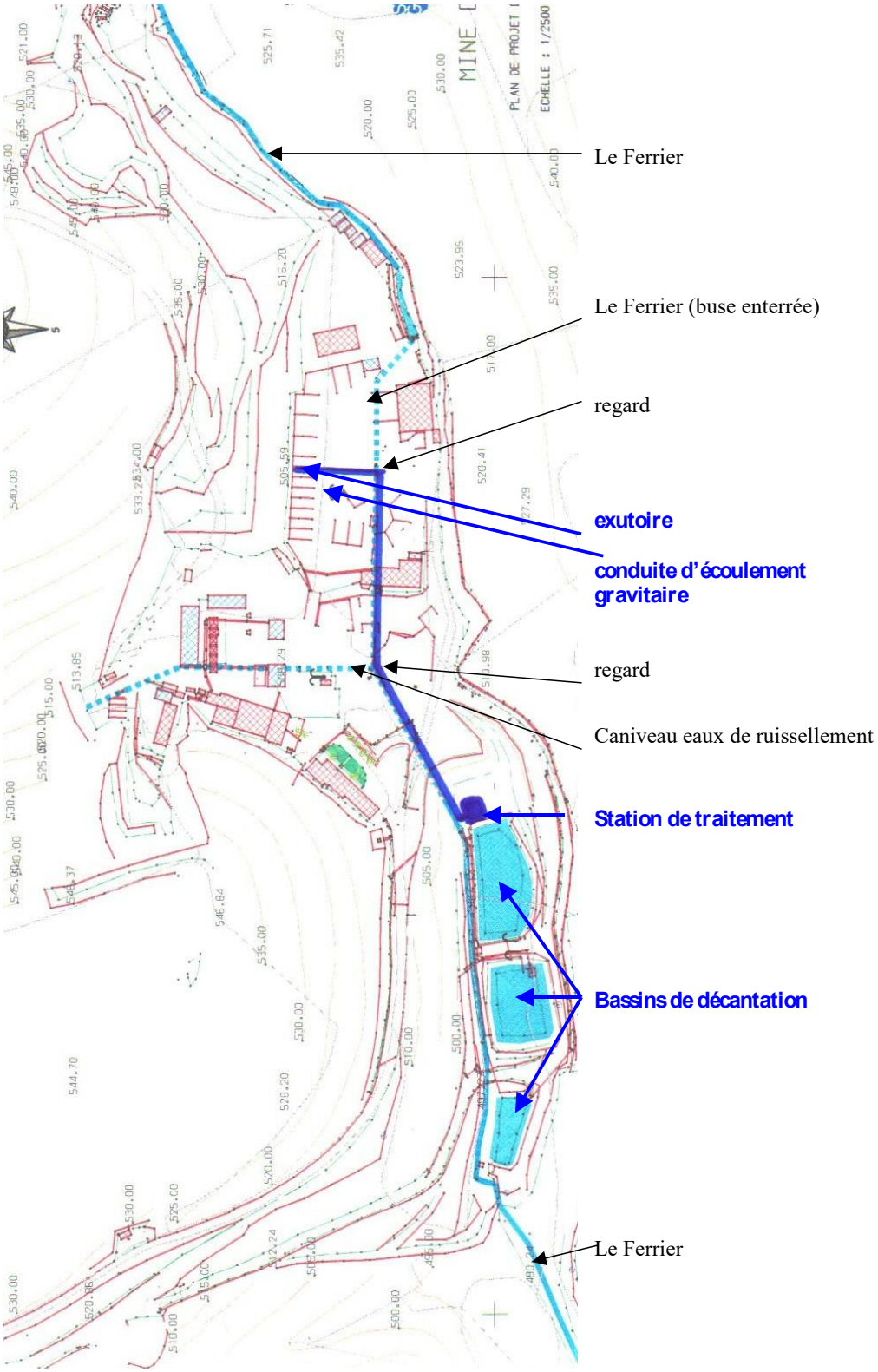
Examen des risques résiduels

Aucun risque résiduel

Annexe 15

Inventaire descriptif des installations hydrauliques à l'arrêt des Travaux (art. 49 et 49-1 du décret n°95-696 du 9 Mai 1995 modifié, pris en application de l'art.92 du Code Minier).

Les installations hydrauliques ont été décrites plus en détail dans les parties 8.3.4, 8.3.5, 8.3.6 du mémoire ci-dessus. Voir également le plan d'ensemble du site joint en annexe 7-3, partiellement reproduit ci-dessous, qui localise ces installations.



extrait du plan joint en annexe 7-3

Installations « de sécurité », transférables au titre de l'article 49-1 du décret n°95-696 du 09 Mai 1995 (application du 2eme alinéa de l'article 92 du Code Minier)

Il s'agit du réseau d'eaux d'exhaure, qui consiste en :

- le point d'exutoire des eaux d'exhaure, aménagé,
- la conduite d'écoulement gravitaire de ces eaux jusqu'à la station de traitement. Cette conduite emprunte la buse de collecte des eaux de ruissellement du carreau et du Ferrier,
- la station de traitement des eaux,
- les 3 bassins de décantation, jusqu'à leur sortie.

Ces installations sont légendées en bleu sur le plan ci-dessus.

Installations transférables au titre de l'article 49 du décret n°95-696 du 09 Mai 1995 (application du 1er alinéa de l'article 92 du Code Minier)

Il s'agit des autres réseaux de surface, à savoir :

- Le Ferrier, ruisseau naturel, traverse le site dans une buse de collecte visitable enterrée sous le carreau,
- les eaux de ruissellement du carreau, collectées dans la même buse enterrée et mélangées à ces dernières,
- les autres réseaux (eaux vannes, eaux usées) alimentant les bureaux et l'atelier mécanique

Utilisations autres que celles couvertes par le Code Minier

Les équipements hydrauliques décrits ci-dessus n'ont pas d'utilisations autres que celles couvertes par le Code Minier .

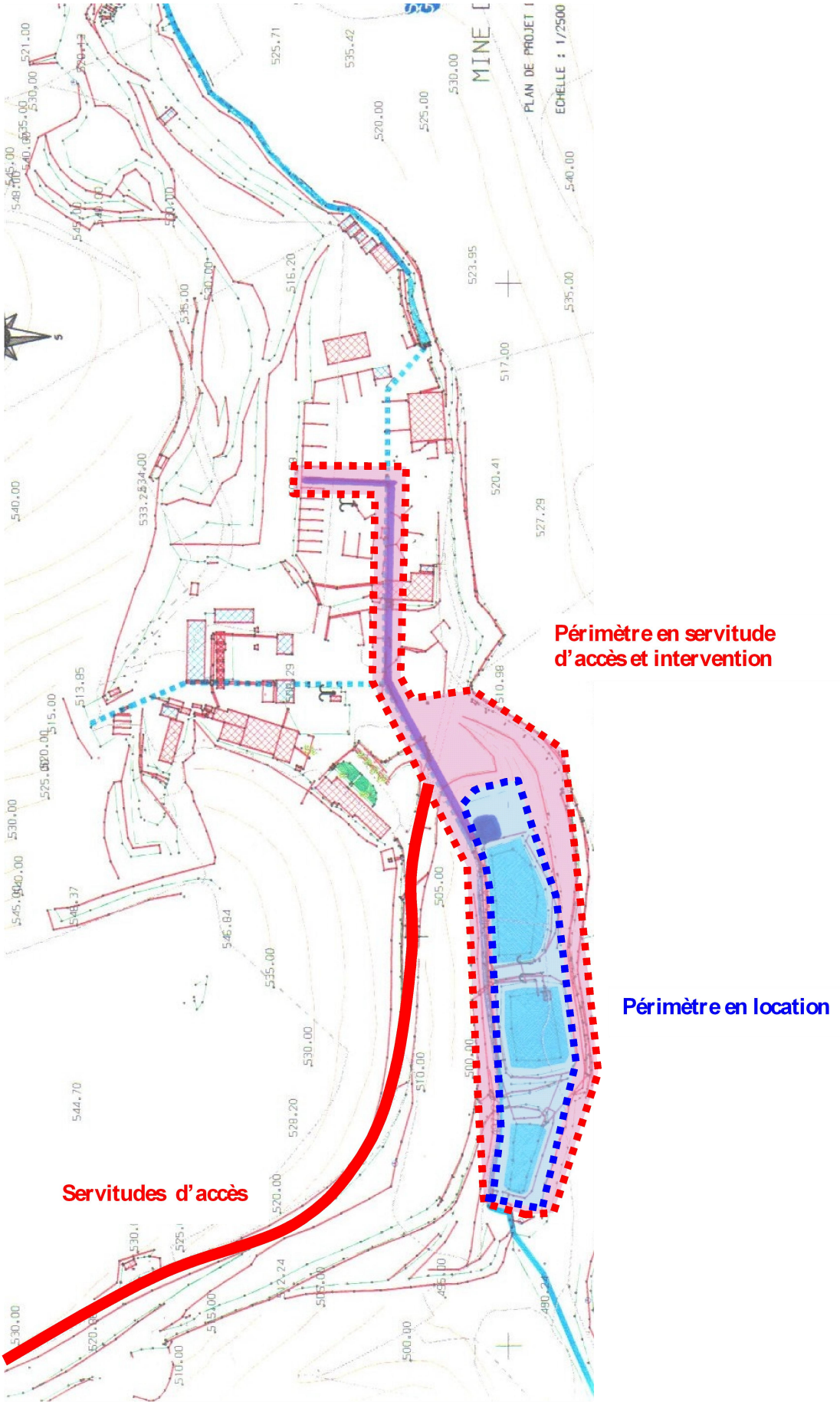
La seule utilisation envisageable dans le futur consisterait en une récupération des eaux traitées à des fins d'utilisation agricole, avec dans cet objectif la possibilité d'installer un pompage dans le bassin n° 3.

Maîtrise foncière des équipements de sécurité

L'accès aux équipements hydrauliques de sécurité doit être sécurisé en vue d'en permettre la maintenance. Ainsi :

- Il est prévu que l'entité identifiée responsable de la maintenance de ces installations conserve en location le périmètre concernant la station de traitement et les bassins, et se réserve une servitude d'accès et d'intervention,
- En cas de transfert des installations hydrauliques de sécurité, une mention aux hypothèques devra être prévue, prévoyant expressément les droits de préemption et servitudes d'accès et d'intervention nécessaires. Ces droits et servitudes seront justifiées tant que perdurera le caractère de sécurité des équipements.

Le périmètre concerné par la location, celui concerné par les servitudes ainsi que la route d'accès sont reportés sur l'extrait ci-dessous du plan d'ensemble joint en annexe 7-3.



extrait du plan joint en annexe 7-3