HAL
archives-ouvertes.fr

Gestion du réservoir minier de Gardanne, Bouches du Rhône : Approches environnementales et hydrauliques du pompage et de son rejet dans la Mer Méditerranée

Anne Dheilly, Bernard Brigati

▶ **To cite this version:**

Anne Dheilly, Bernard Brigati. Gestion du réservoir minier de Gardanne, Bouches du Rhône : Approches environnementales et hydrauliques du pompage et de son rejet dans la Mer Méditerranée. Exploitations minières passées et présentes : Impacts environnementaux et sociétaux, pp. 71-84, 2015, Collection EDYTEM.

HAL Id: hal-01100951

https://hal-brgm.archives-ouvertes.fr/hal-01100951

Submitted on 7 Jan 2015

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial 4.0 International License

GESTION DU RÉSERVOIR MINIER DE GARDANNE
BOUCHES DU RHÔNE

APPROCHES ENVIRONNEMENTALES ET HYDRAULIQUES DU POMPAGE ET DE SON REJET DANS LA MER MÉDITERRANÉE

Gardanne mine water management - Environmental and hydraulic approaches of water pumping and releasing into the Mediterranean sea

Anne DHEILLY, Bernard BRIGATI

BRGM/Département de Prévention et de Sécurité Minière (DPSM), BRGM, France.

Contact : a.dheilly@brgm.fr

Résumé

Sur l'ancienne mine de Gardanne (Bouches-du-Rhône), le BRGM/DPSM gère, pour le compte de l'État, une station de pompage permettant de maîtriser les impacts sur le milieu récepteur de l'eau issue de la mine. La mine est localisée à 14 km au nord de Marseille et a exploité des couches de lignite interstratifiées dans du calcaire karstique du Crétacé supérieur. Géologiquement, la mine est composée de deux parties : des terrains autochtones et une nappe de charriage. L'arrêt de l'exhaure de la mine en 2003 a conduit à la remontée naturelle, dans les vides miniers, d'eau chargée en fer et en sulfates (oxydation de sulfures présents dans la lignite). Pour éviter tout débordement d'eau minéralisée en surface, la solution retenue pour gérer ces eaux a été l'installation de pompes dans l'ancien puits de mine Gérard, le transport de l'eau via un tuyau posé dans la « Galerie de la Mer » puis son rejet en mer par l'intermédiaire de forages inclinés et de diffuseurs. L'ensemble du dispositif minimise l'oxydation du fer de l'eau et est régulièrement contrôlé, notamment son impact sur le milieu marin. Aucune nuisance n'a été constatée sur celui-ci (faune, flore, sédiments) depuis le début du pompage en 2010. Le débit de pompage initial de 600 m³/h ne permettait pas de contrôler le niveau de l'eau dans la mine et a dû être porté à 1000 m³/h et s'avère toujours insuffisant. Plusieurs démarches ont été entreprises pour comprendre le comportement de l'eau dans le réservoir minier : modélisations, approches analytiques et mathématique. Elles ont conduit à la définition d'un nouveau schéma conceptuel de fonctionnement du réservoir minier en eau et la détermination d'un débit moyen d'exploitation de 1200 m³/h impliquant de modifier les installations de pompage. Les installations de rejet en mer, avec contrôle environnemental, ont déjà été modifiées en 2011 pour ce débit.

***Mots-clés** : Gardanne, Marseille, après-mine, lignite, calcaire karstique fuvélien, pompage, débit, teneur en fer, rejet en mer, contrôle environnemental.*

Abstract

The Post-Mining Department of the French Geological Survey (BRGM/DPSM), on behalf of the State, manages a pumping station controlling Gardanne's mine water and its impact on the environment. The mine, located at 14 kms north of Marseille, has extracted lignite from layers interbedded with Campanian karst limestone (upper Cretaceous). The geology of the mine site is constituted of autochthonous rock units covered by a thrust sheet. Stopping mine dewatering in 2003 led to its natural flooding with water rich in iron and sulphate (presence of sulfides in the oxidized lignite). To avoid any overflow of mineralized water at the surface, water flow is controlled by pumps set in a former mine shaft (Gérard). The pump water is carried out of the mine with a HDPE pipe installed inside the "Galerie de la Mer" and then discharged into the Mediterranean Sea through inclined boreholes and diffusers. This facility allows to minimize iron oxidation. Several parameters are regularly monitored, in order to assess the impact of the expelled water on the marine environment. No impact has been observed (fauna, flora and sediment) since the beginning of the pumping, back in 2010. The initial pumping rate of 600 cubic meters per hour was under-estimated. It has been increased to 800 then 1000 m³/h, which is still insufficient. Numericalo, modeling, as well as analytical and mathematical approaches were combined to understand water behaviour into the reservoir. They helped to draw a new conceptual model of mine water reservoir and led to the suggested proposal to increase the pumping rate to 1200 m³/h, which requires resizing the water pumping equipment. The diffusing facilities can accommodate this higher flow rate after being modified en 2011, coupled with monitoring of the undersea environment.

***Keywords**: Gardanne, Marseille, post-mining, lignite, campanian karstic limestone, pumping, flow rate, iron content, release in the sea, environmental control.*

Introduction

Dans le cadre de la réglementation après-mine française, le Département Prévention et Sécurité Minière (DPSM) du Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) assure, pour le compte de l'Etat, la surveillance de l'ancienne mine de lignite de Gardanne (Bouches-du-Rhône). Il gère notamment, au titre de l'article L163-11 du code minier, une station de pompage qui permet de maîtriser la remontée naturelle des eaux dans l'ancien réservoir minier en pompant celles-ci et en les rejetant en mer, au large, sous 30 m d'eau. Les études préalables avaient défini un pompage de 600 m^3/h et l'ensemble des installations étaient dimensionnées pour ces prévisions : pompes, tuyaux, aménagements en mer, etc. Or, dès le début, en 2010, ce débit s'est avéré insuffisant pour les enjeux et il a fallu, d'une part, comprendre le fonctionnement de l'aquifère minier pour pouvoir ajuster le pompage aux objectifs et, d'autre part, adapter ou modifier les installations en veillant à l'absence d'impact sur le milieu marin du rejet des eaux ferrugineuses de la mine.

I - Présentation de la mine de Gardanne

1 - Localisation du site minier

Les travaux miniers de Gardanne couvrent une superficie de 65 km^2 entre Aix-en-Provence et Marseille (est / ouest : env. 17 km et nord / sud : 10 km). La mine est reliée au port de Marseille par une galerie de 14 km de long, la Galerie de la Mer Celle-ci part à la cote + 18 m (nivellement général de la France : NGF) au puits Gérard (Mimet) et rejoint le niveau de la mer au bassin de Cap Pinède (Marseille). Elle servait autrefois au transport du minerai par wagonnets entre la mine et le port de Marseille et à l'évacuation de l'eau d'exhaure de la mine qui était rejetée dans la mer avec celle issue des terrains sus-jacents drainée tout au long de son parcours (Figures 1 et 2).



Figure 1 - Localisation de la mine de Gardanne, de ses principaux puits, de la Galerie de la Mer et de la coupe A-B (Figure 3).



Figure 2 - À gauche, le puits Gérard ; à droite la Galerie de la Mer avec le tuyau transportant l'eau pompée.

2 - Géologie du bassin minier

La mine (zone rouge sur la Figure 1 et rectangle noir sur la Figure 3) est localisée dans le bassin sédimentaire de l'Arc, constitué de formations fluvio-lacustres d'âge Crétacé supérieur et Tertiaire avec un soubassement jurassique. Ce bassin s'inscrit entre deux chaînes de montagnes où affleure, par le jeu de fractures et de chevauchements, le substratum calcaire jurassique, au nord, la Sainte-Victoire (chevauchement nord provençal à vergence sud) et au sud, l'Étoile (chevauchement sud provençal à vergence nord). L'écaille tectonique de la Ste Victoire repose sur des formations jurassiques, celles de l'Étoile sur l'écaille du Lambeau Charrié (Crétacé) (Figures 1 et 3).

Les couches de charbon sont interstratifiées au sein des calcaires karstiques fuvéliens (Crétacé supérieur). Quatre couches de lignite, présentes dans tout le bassin, ont été exploitées. Elles sont désignées en partant de la base, par Grande Mine (de 2,5 à 4 m d'épaisseur), Mauvaise Mine (de 0,7 à 1,7 m d'épaisseur), *4 Pans* (de 1,2 à 2 m d'épaisseur) et Gros Rocher, (de 1 à 1,2 m d'épaisseur) (Figure 4). En outre, les calcaires du Fuvélien ont été exploités comme pierre à ciment, au-dessus et entre les couches de lignite.

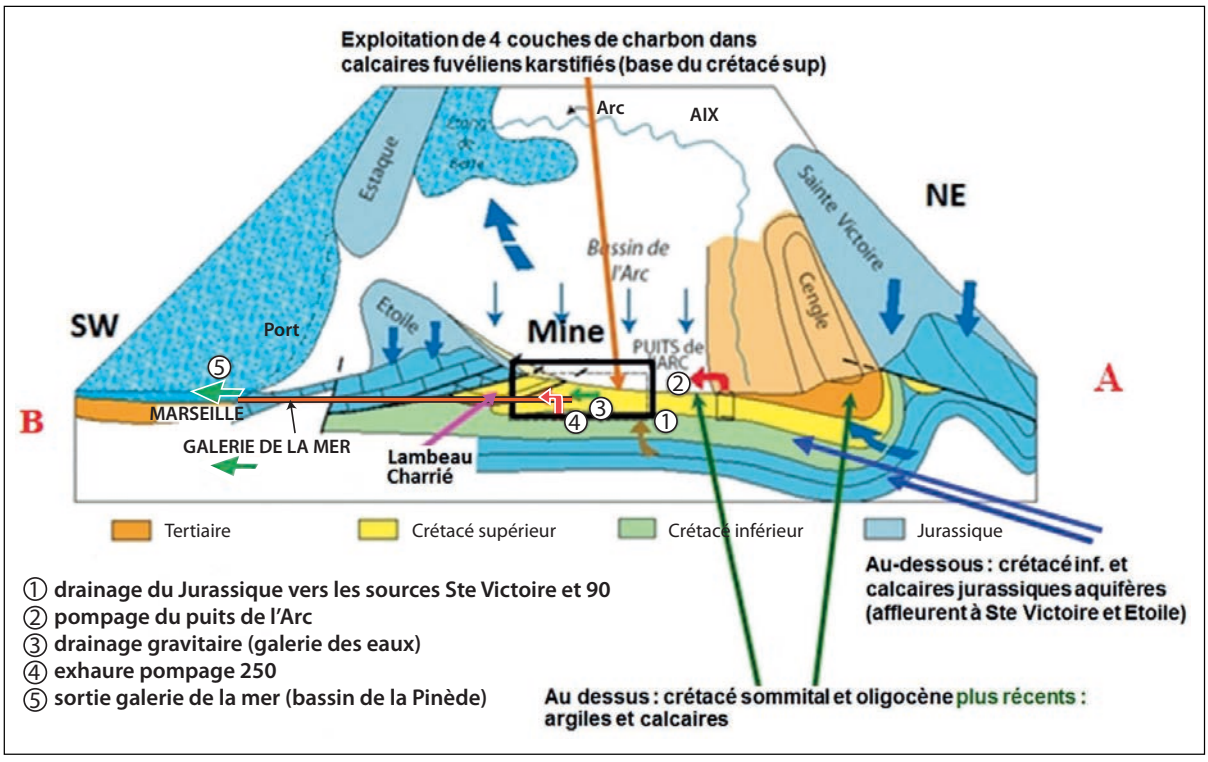


Figure 3 - Bloc diagramme schématique représentant la géologie régionale de la mine de Gardanne le long de la coupe A-B (d'après Géodéris, 2003).

La configuration géologique de la mine est particulière car elle est constituée de deux parties (Figures 3 et 4). Une partie autochtone de terrain en place où le calcaire karstique fuvélien contenant les couches de charbon affleure sur la partie est de la mine (Rocher Bleu, Valdonne, vers +300 m NGF) et s'enfonce vers l'ouest jusqu'à 1 400 m de profondeur (-1 100 m NGF) sous les séries géologiques supérieures plus récentes (crétacé terminal et tertiaire) avec lesquelles il y a peu ou pas d'échanges hydrauliques. L'autre partie, constituée de l'écaille tectonique du Lambeau Charrié (allochtone) repose sur les séries de la partie autochtone. Le Fuvélien y est, de nouveau, à l'affleurement sur la partie nord (vers 280 m NGF) et la série a un pendage vers le sud (-400 m NGF dans la partie méridionale de la mine).

3 - Historique et mode d'exploitation

L'exploitation du charbon (lignite) a débuté dès le 15 e siècle au niveau des affleurements dans le secteur oriental de la mine et sur le Lambeau Charrié. Les méthodes d'exploitation ont fortement varié au cours du temps du fait, d'une part, de l'évolution des techniques (mécanisation, électrification), et d'autre part, de l'approfondissement du gisement vers l'ouest.

Schématiquement, trois méthodes peuvent être distinguées chronologiquement (Figure 5). Tout d'abord, des exploitations anarchiques très anciennes (< 1850) à proximité des affleurements (moitié est de l'exploitation et au niveau du Lambeau Charrié). Puis, l'exploitation s'est développée par extraction de la lignite au niveau de chambres avec des piliers de soutènements (< 1976) entre 100 et 700 m de profondeur (à l'est de l'exploitation et sur le Lambeau Charrié). La méthode la plus récente utilisée (> 1930) et la plus performante, est celle des longues tailles foudroyées entre 400 et 1 400 m de profondeur (au milieu et à l'ouest de l'exploitation) (GEODERIS, 2003). Sur la Figure 5, les chiffres noir sur fond bleu indiquent les cotes (m NGF) du mur de la couche exploitée de lignite Grande Mine qui constitue la base de la mine.

L'état des vides miniers et, de ce fait, le stockage potentiel d'eau dans la mine est dépendant du type

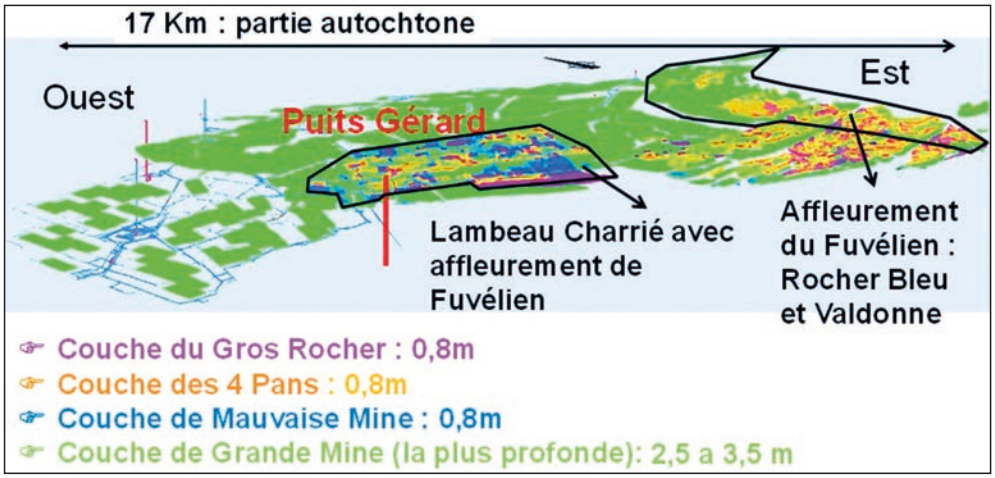


Figure 4 - Couches de charbon exploitées de la mine de Gardanne (Dheilly A, 2013).

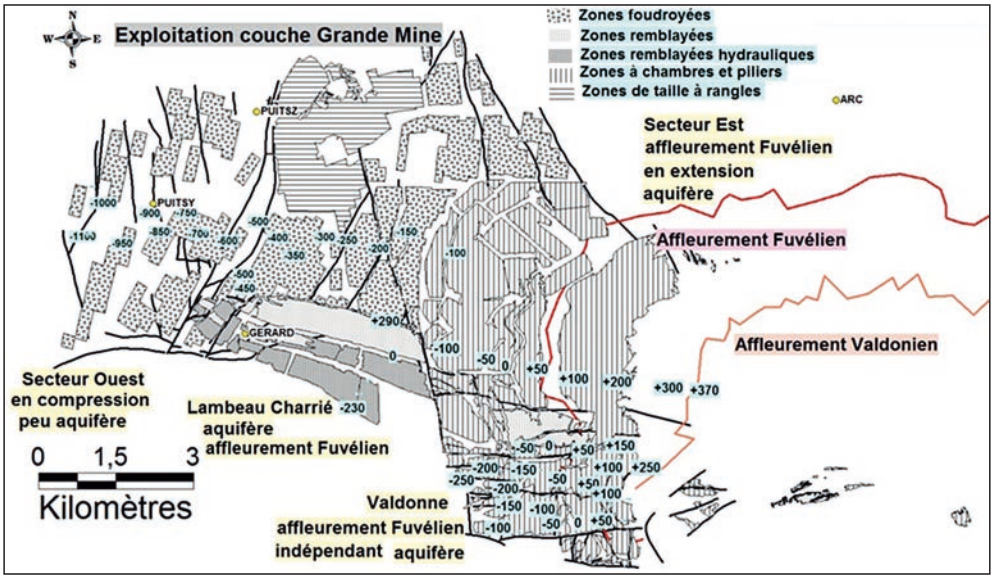


Figure 5 - Évolution des techniques d'exploitation et de remblayage de la couche Grande Mine (Dheilly A, 2013).

de remblayage et du mode d'exploitation. Certaines chambres avec piliers sont restées en état et permettent des stockages en eau importants. Elles sont principalement localisées à l'est de la mine autochtone et sont, en partie, à l'affleurement. D'autres ont été remblayées par du sable, principalement sur le Lambeau Charrié ou par du concassé (rangles) au nord de la mine. Les zones foudroyées sont automatiquement comblées par les matériaux effondrés du toit de la couche exploitée.

L'exploitation de la mine s'est arrêtée en février 2003 et la production totale a été estimée à 150 millions de tonnes de lignite.

II – INSTALLATIONS INITIALES DE GESTION DES EAUX DE L'ANCIEN RÉSERVOIR MINIER

1 - Les enjeux liés aux eaux de la mine de Gardanne

Durant toute la période d'exploitation, les sulfures présents dans le lignite se sont oxydés en présence de l'oxygène de l'air. À la fin de l'activité minière de Gardanne en 2003, l'arrêt des pompes d'exhaure de la mine s'est accompagné de la remontée naturelle des eaux dans les vides miniers avec une minéralisation de l'eau par contact avec les sulfures, selon la réaction suivante : $2\ FeS_2\ (s) + 2\ H_2O + 7\ O_2\ (g) \rightarrow 2\ Fe^{2+}(aq) + 4\ SO_4^{2-}(aq) + 4\ H^+\ (aq)$.

La durée de cette réaction est limitée dans le temps car elle est fonction du stock de sulfures oxydés disponibles et des débits transitant dans la mine. Les prévisions donnaient une concentration en fer en fin de remplissage de la mine de l'ordre de 80 à 100 mg/l et une atténuation rapide des concentrations en fer avec le temps à 10 mg/l, au bout de 7 à 10 ans selon les modèles, (Figure 6) (Géodéris, 2003).

Il avait été décidé, dans un premier projet, de laisser remonter l'eau dans la mine jusqu'à son débordement au niveau de la Galerie de la Mer puis son rejet directement dans le port de Marseille à Cap Pinède. Mais des essais d'injection d'eau ferrugineuse dans le port ont montré que cela provoquait une coloration des eaux inacceptable avec son activité dès une concentration de 5 mg/l (CETE méditerranée, 2003) (Figure 7).

2 - Scénario retenu pour la gestion des eaux après l'exploitation minière

Le scénario de gestion des eaux de la mine de Gardanne retenu et mis en œuvre a consisté à laisser l'eau remonter dans la mine jusqu'à la cote -14 m NGF sous l'effet des apports naturels. Une fois cette cote atteinte, un pompage de 600 m^3/h a été mis en route à partir du puits Gérard (à gauche, Figure 8). L'eau pompée est évacuée dans une canalisation fermée sans contact avec l'air pour éviter les précipitations d'oxydes de fer et installée dans la Galerie de la Mer (à droite, Figure 8 et Figure 2).

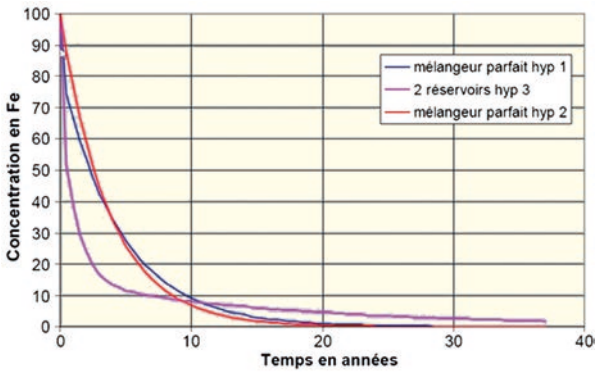


Figure 6 - Évaluation de la concentration en fer (mg/l) de l'eau du réservoir minier en fonction du temps et de différentes hypothèses (Géodéris, 2003).



Figure 7 - Coloration du port de Marseille à éviter (simulation).



Figure 8 - L'installation de pompage et la canalisation d'évacuation.

Cette canalisation relie le puits Gérard au Cap Pinède (Figure 1). Son débouché en mer s'effectue par l'intermédiaire de trois forages sous 30 m de hauteur d'eau dans une zone située à l'extérieur du port, à 80 m de distance de la digue extérieure du bassin Pinède du port de commerce (Figure 9).

Le pompage devait pouvoir maintenir un volume tampon de vides miniers, entre les pompes (-40 m NGF) et la cote de débordement à + 18 m NGF, afin d'absorber les venues d'eau importantes des périodes de pluies et éviter le débordement d'eau ferrugineuse de la mine dans le port de Marseille via la Galerie de la Mer. Il était prévu de pouvoir moduler le débit afin de conserver le contrôle des niveaux d'eau dans la mine.

La durée du pompage est assujettie aux teneurs en fer de l'eau du réservoir minier. Il est prévu de l'arrêter quand les concentrations en fer seront à un taux acceptable pour un rejet direct dans le port (< 3 à 5 mg/l).

3 - Caractérisation de l'eau pompée

a - Origine de l'eau pompée

Après l'arrêt des pompes, les vides miniers se remplissent naturellement en eau par des apports extérieurs (Figure 10), d'une part, de la pluie infiltrée sur les affleurements fuvéliens (ovales rouges,) et, d'autre part, des arrivées d'eau en fond de mine issues de nappes jurassiques sous-jacentes et mises en contact avec la mine par des travaux miniers, au moins à deux niveaux dans le secteur NE de la

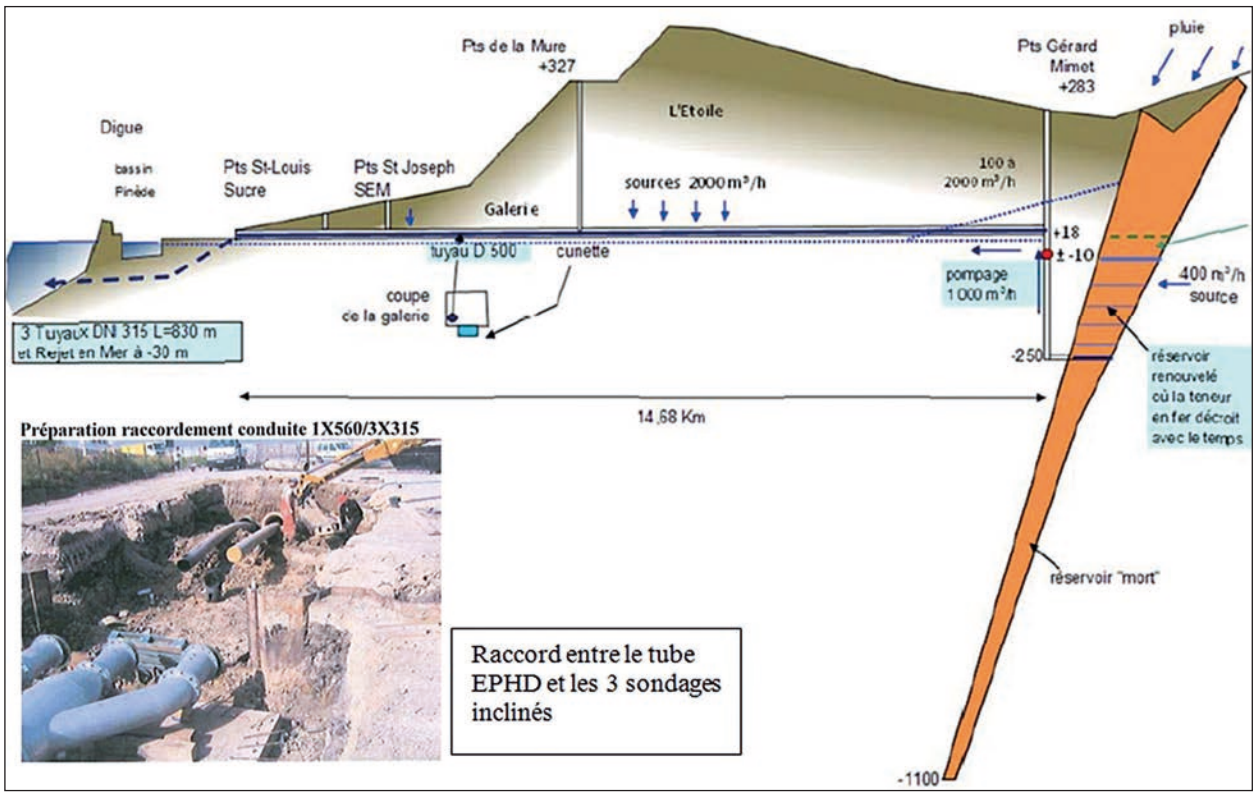


Figure 9 - Schéma simplifié du pompage post exploitation (d'après CESAME, 2002).

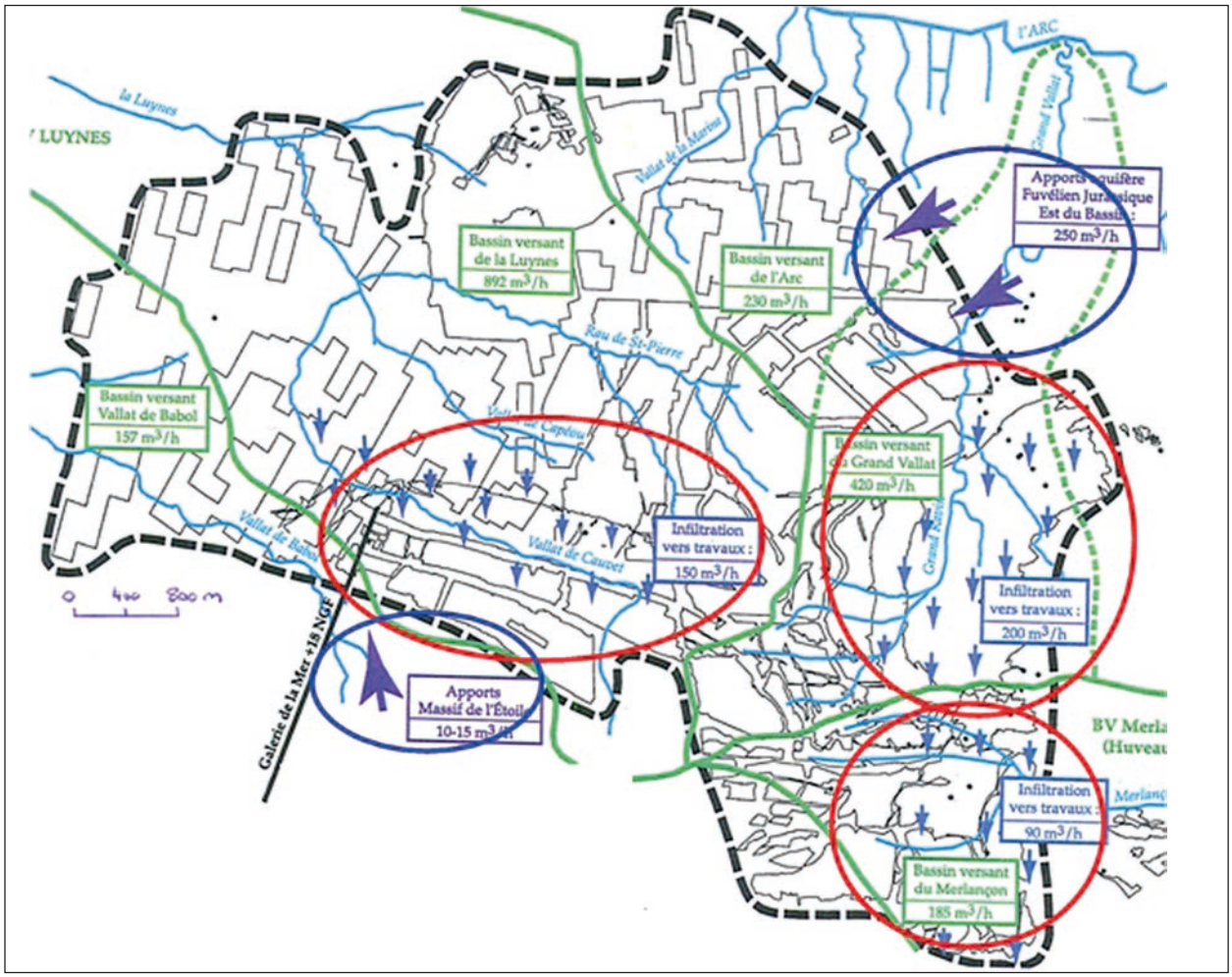


Figure 10 - Localisation des principales venues d'eau dans les travaux miniers (d'après rapport CESAME, 2002).

mine, les sources Sainte Victoire et source 90 (ovale bleu au nord-est) mais aussi à l'aplomb du Massif de l'Étoile (ovale bleu au SW) et en charge par rapport au réservoir en eau de la mine.

b - Qualité chimique de l'eau pompée

Les eaux issues du réservoir minier et circulant dans la conduite en PEHD font l'objet d'un certain nombre d'analyses avant leur rejet en mer.

Le fer total, l'oxygène dissous, la concentration des matières en suspension (MES), la turbidité, le pH et la température sont analysés 3 fois par semaine. La période concernée va de février 2011 à janvier 2014 inclus.

Une fois par mois, les éléments majeurs (anions, cations), les métaux, les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), les polychlorobiphényles (PCB) et la microbiologie s'ajoutent aux paramètres analysés hebdomadairement. Les échantillons d'eau ont été prélevés entre août 2010 et novembre 2013 (Tableau 1).

La lignite est interstratifiée dans des calcaires, de ce fait l'eau exhaurée a un pH proche de la neutralité, compris entre 6,55 et 7,1 (moyenne : 6,7). Elle est riche en calcium, (moyenne : 643 mg/l) et en magnésium (moyenne : 270 mg/l). Les teneurs en potassium sont, en moyenne, de 31 mg/l. Le sodium est présent à 14 mg/l en moyenne et les chlorures à 73 mg/l. Il y a très peu de nitrates, 3,9 mg/l en moyenne.

Les paramètres suivants caractérisent des eaux minières issues de charbon. La conductivité (ramenée à 25 °C) est importante, de 3200 à 4200 µS/cm (moyenne : 4110 µS/cm) en relation principalement avec les teneurs en sulfates élevées, de 1650 à 3900 mg/l (moyenne : 2275 mg/l) (Figure 11).

Les teneurs en ammonium sont relativement fortes, entre 0,06 et 28 mg/l avec une moyenne de 21 mg/l et elles ne contiennent peu ou pas de métaux, sauf du fer, entre 1,8 et 82 mg/l (moyenne : 44 mg/l) et du manganèse, entre <0,05 et 670 µg/l (moyenne : 488 µg/l).

Les teneurs en fer montrent de fortes fluctuations d'une mesure à l'autre, de 1,6 à 85 mg/l entre mars 2011 et janvier 2014. Les moyennes mensuelles (Figure 12) augmentent au début du suivi jusqu'à 55 mg/l en février 2012. Cette phase correspond à la fin de l'équilibrage chimique entre l'eau infiltrée et

Paramètres	Température	pH	Conductivité à 25°C	Calcium	Magnésium	Sodium	Chlorures	Potassium	Sulfates	Fer total	Manganèse total	Ammonium	Arsenic
Unité	°C	unité pH	µS/cm	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	µg/l	mg/l	µg/l
Minimum	20,6	6,55	3200	494	196	61	34	20	1650	1,8	<0,05	0,06	<0,01
Maximum	22,6	7,1	4900	900	440	260	160	48	3900	82	670	28	39
Moyenne eau minière	21,8	6,7	4109,3	643,1	270,4	114,2	72,8	30,7	2275,1	44,4	488,1	20,8	10,4
eau de mer		6,3	37500	400	1350	10500	19000	380	2650	0,01			

Tableau 1 - Concentration minimale, maximale et moyenne des analyses mensuelles du 11/08/2010 au 12/11/2013 pour les paramètres principaux de l'eau exhaurée .

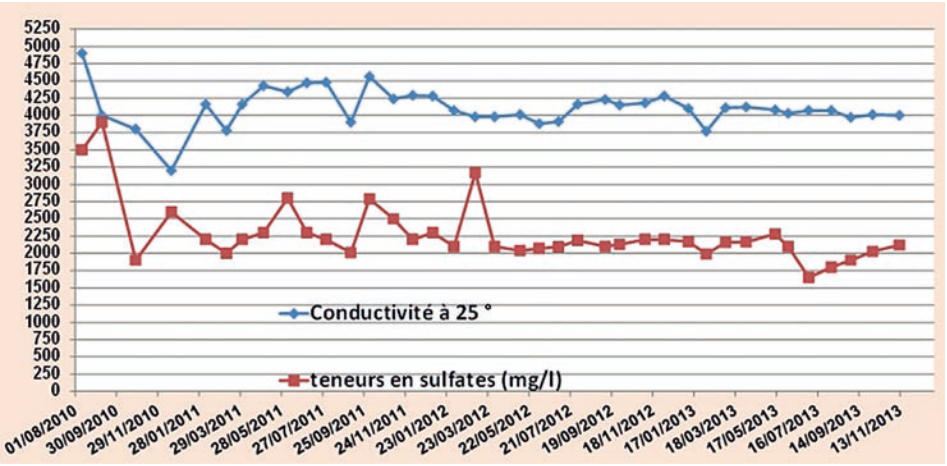


Figure 11 - Conductivité et teneurs en sulfates de l'eau exhaurée de 2010 à 2013 (analyses mensuelles).

les vides miniers. Il faut noter que les concentrations en fer sont en-dessous des prévisions qui se situaient à 100 mg/l en début de pompage. Ensuite, les teneurs oscillent autour de 50 mg/l et, depuis mai 2013, une légère diminution des concentrations s'amorce annonçant, peut-être, une diminution du stock de pyrite disponible.

Il faut noter la présence fréquente d'arsenic, entre <0,01 et 39 µg/l (moyenne : 10 µg/l) et occasionnelle d'aluminium, de 21 à 89 µg/l, de cuivre, de 5 à 160 µg/l et de zinc, 0,04 à 0,53 mg/l.

Les eaux ne contiennent pas de HAP, ni d'hydrocarbures totaux ni de PCB.

La concentration des matières en suspension (MES) et la turbidité de l'eau sont très fluctuantes d'une mesure à l'autre, comprises entre 17 et 170 mg/l (moyenne : 60 mg/l) pour la première et entre 7,8 et 870 NFU (Formazine Nephelometric Unit) avec une moyenne de 355 NFU pour la seconde (Figure 13). Les deux paramètres ont des liens indirects avec les teneurs en fer mais sont également liés aux périodes d'arrêt et démarrage des pompes et aux contributions respectives et variables des différentes eaux qui constituent le mélange liquide pompé.

La température est relativement constante autour de 21 °C de moyenne. L'oxygène dissous est de 4 mg/l en moyenne, compris entre 0,8 et 9 mg/l.

c - Comparaison avec l'eau de mer

Il faut noter que les paramètres les plus représentés dans l'eau minière sont déjà présents dans l'eau de mer (Tableau 1). Ceux dont il faudra surveiller les impacts sur le milieu naturel sont le fer, les matières en suspension et les teneurs en oxygène.

4 - Installation en mer et surveillance de l'impact potentiel du rejet

a - Études préalables

Le projet de rejet en mer des eaux pompées dans le réservoir minier de Gardanne a fait l'objet d'études préalables sur un large secteur du port de Marseille autour du Cap Pinède (fin de la Galerie de la Mer). Elles ont permis d'examiner les usages et activités de la zone et de réaliser un état zéro sur de nombreux paramètres : bathymétrie, courantologie, profils verticaux de la colonne d'eau (courant, température, salinité, densité), oxygénation des eaux, turbidité, sédimentologie, benthos (identification et comptage ; Ramade, 2005).

Les différentes études et meures de terrain ont permis d'optimiser la profondeur du rejet, de localiser et de pré-dimensionner les diffuseurs. Cela a conduit à proposer un emplacement et des aménagements particuliers pour le rejet avec pour objectif la diminution des teneurs en fer de 100 fois à 3 m sous la surface (Ramade, avril 2011).

b - Localisation du rejet en mer et aménagements

L'emplacement retenu est localisé à l'extérieur du port de Marseille, à 80 m au large du bassin de

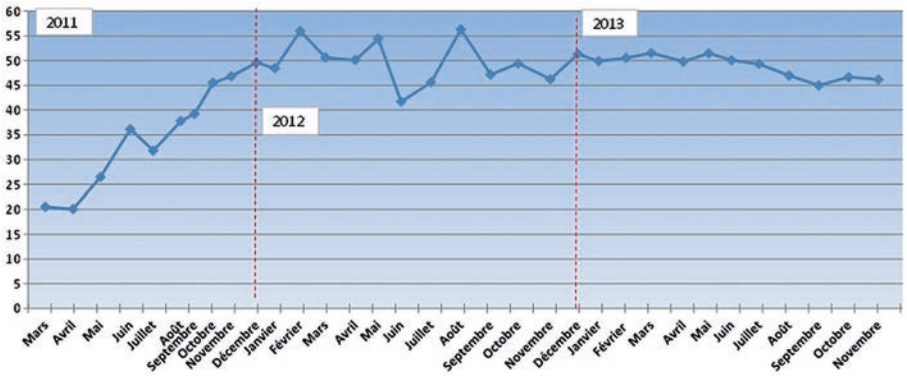


Figure 12 - Évolution de la teneur moyenne mensuelle en fer de l'eau de mine prélevée au Cap Pinède, de 2011 à 2013 (analyses pluri-hebdomadaires).

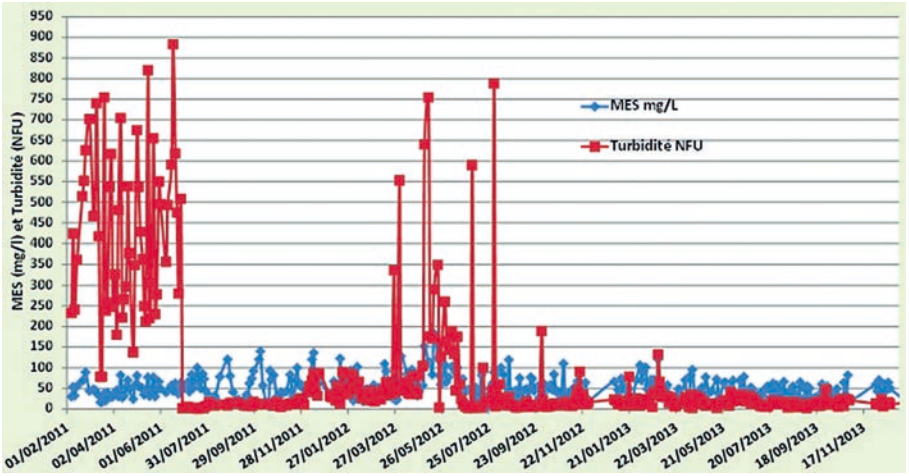


Figure 13 - Concentration en matières en suspension (MES), fer et turbidité de l'eau exhaurée (mesures pluri hebdomadaires).

la Pinède, sous 30 m de fond (Figures 14 et 15). Le rejet, au débouché des forages inclinés, se fait par l'intermédiaire de trois diffuseurs (clarinettes), de 15 m de long et de 300 mm de diamètre, posées sur le fond marin et équipés de cinq pipes de 150 mm de diamètre terminés chacun par deux éjecteurs disposés en T. Ceux-ci sont terminés par des clapets anti-retour spéciaux en becs de canard dont la section d'éjection varie avec le débit. L'ensemble est protégé par une armature métallique contre les filets de pêche (Figure 14). Le dispositif en place pour un débit de 600 m^3/h a une surface équivalente de l'ordre de 30 cm^2 avec une vitesse d'éjection de 1,9 m/s (Ramade, avril 2011).

c - Programme de suivi de l'impact du rejet sur le milieu marin

Le programme de suivi de l'impact du rejet en mer a été élaboré par un groupe de travail constitué par des représentants de la Direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement de la région Provence-Alpes-Côte d'Azur, de la Direction départementale des territoires et de la mer des Bouches du Rhône et du BRGM / DPSM. Les phénomènes majeurs redoutés sont la présence de flocs d'hydroxydes sur le fond, l'accumulation centimétriques de dépôts à proximité des diffuseurs et une demande accrue en oxygène au niveau du panache.

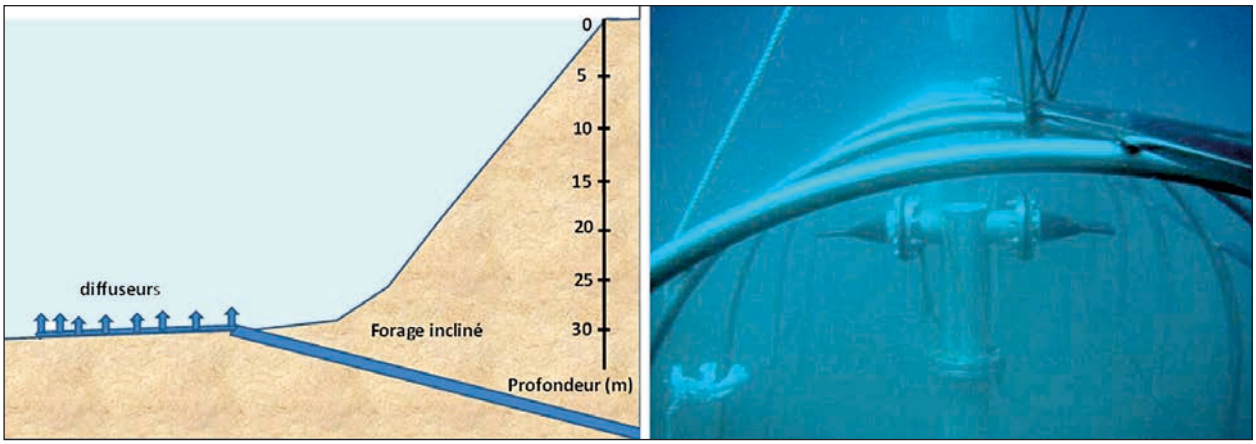


Figure 14 - Coupe de l'aménagement en mer et vue des diffuseurs avec leur protection métallique.

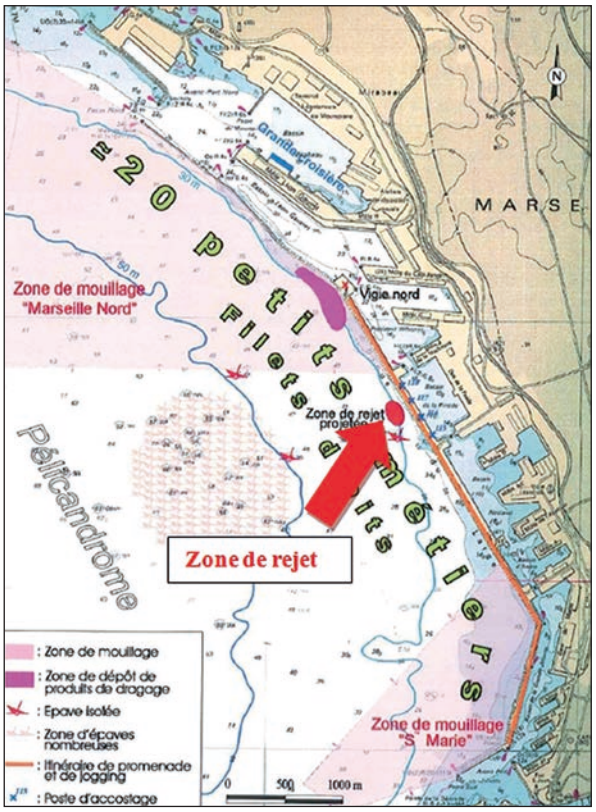


Figure 15 - Localisation du rejet en mer (Ramade A., 2005).

Des stations de mesures, parallèles à la côte (en lien avec les directions de courant), ont été définies à partir des études préalables (Figure 16). Elles sont constituées de cinq stations hydrologiques (sur lesquelles sont prélevés cinq échantillons d'eau dans la colonne d'eau à différentes profondeurs : surface, 7,5 m, 15 m, 22,5 m et au fond (30 m) pour des mesures in situ (courantologie, température, salinité, turbidité et oxygène dissous) et des prélèvements d'eau pour analyse (fer, matières en suspension) (Figure 18) et de 11 stations de prélèvement de sédiments (analyse granulométrique, géochimique) et de benthos (identification et comptage).

Un état des lieux zéro bis a été réalisé par des analyses préliminaires en mer en juillet-août 2010 juste avant le démarrage du pompage. Ensuite, la surveillance de l'état du milieu s'est faite tous les mois la première année, puis 4 fois par an.

Le dispositif de diffusion de l'eau rejetée en mer avait été dimensionné pour un débit de rejet de 600 m^3/h. Il a été modifié dès 2011 et surdimensionné pour pouvoir accepter des débits jusqu'à 1 200 m^3/h : chacun des trois diffuseurs a été rallongé et équipé de deux pipes (quatre éjecteurs) pour assurer le bon fonctionnement du rejet en mer.

Depuis la mise en service du pompage des eaux de mine en août 2010 et, malgré l'augmentation des débits pompés de 600 à 1 000 m^3/h depuis 2011, les résultats du suivi de l'impact du rejet en mer sur plusieurs paramètres, notamment les profils verticaux des teneurs des matières en suspension (Figure 17) mettent en évidence peu ou pas d'influence de celui-ci sur le milieu. Le dispositif de diffusion et de dilution des eaux de mines ferrugineuses fonctionne correctement, conformément aux prévisions. Aucun apport de sédiments potentiellement liés aux rejets miniers n'a été constaté dans la zone d'étude, ainsi qu'aucune dégradation physico-chimique des fonds sous-marins et aucune incidence sur le milieu marin vivant (benthos).

Le rejet n'impose pas la satisfaction d'une demande en oxygène supplémentaire dans la colonne d'eau.

Globalement, le rejet en mer des eaux minières depuis août 2010 n'a pas révélé de résultats hors norme quant à l'impact sur la zone marine de réception de ces eaux (derrière la digue du port de commerce Marseille ; Nedellec, 2013).

Les constats visuels montrent bien la présence de micro-suspensions dans le panache, mais ces parti-

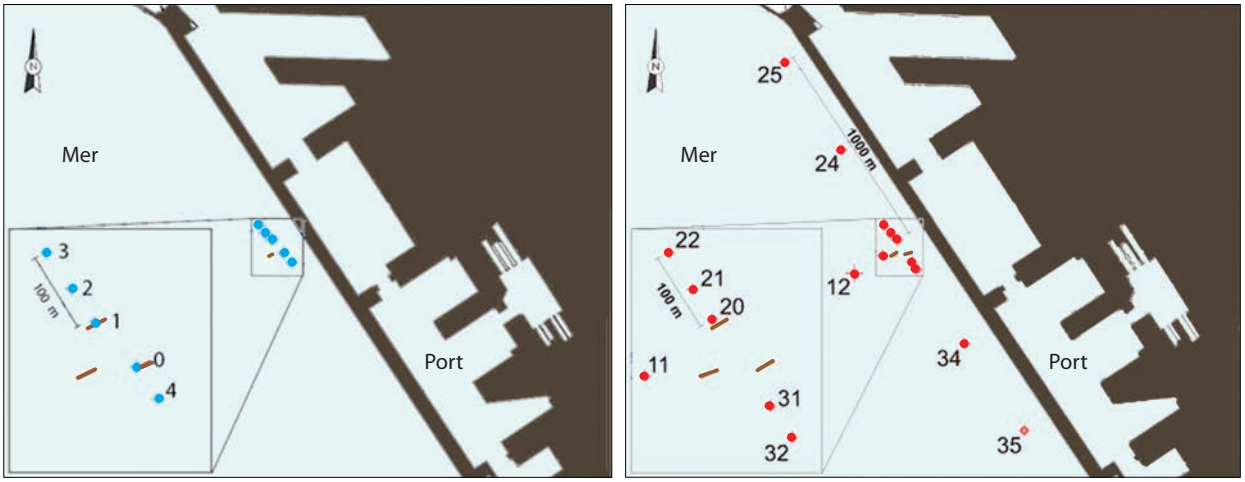
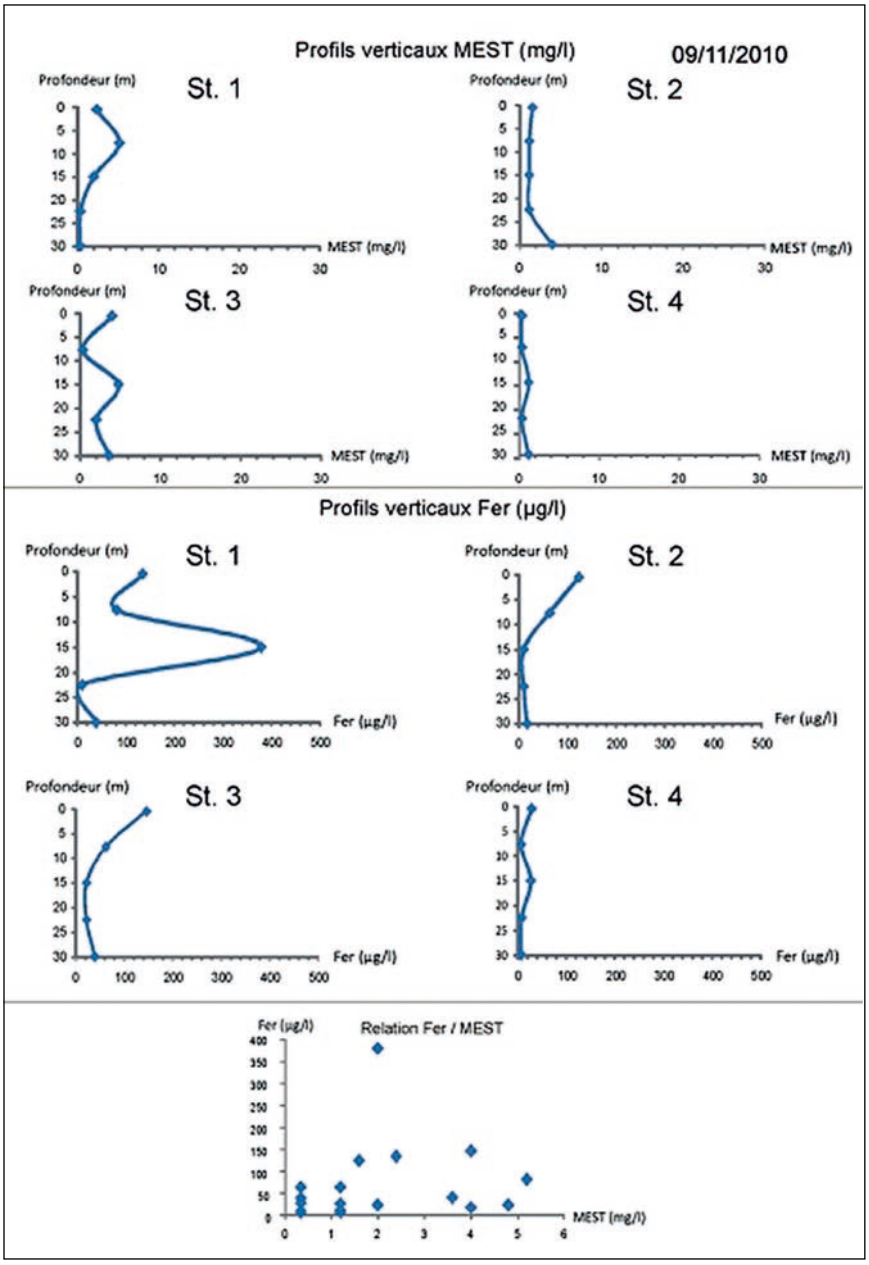


Figure 16 - Localisation de stations d'hydrologie (points bleu) et de prélèvements (points rouges) de sédiments et de benthos par rapport aux trois zones de diffuseurs (traits marron) (Ramade, mai 2011).



cules de faible taille, et apparemment de faible densité, restent en suspension dans la masse d'eau et sont emportées hors du champ proche par le courant. On n'observe pas de coagulation, d'agglomération ni de coalescence de ces particules fines pour former des flocons susceptibles de se déposer en champ proche (pas de grossissement du floc). Les observations confirment la présence de coups de courant affectant la lame profonde, capables de vitesses comprises entre 10 et 25 cm/s. Ces conditions, favorables à la reprise et à la dispersion des dépôts les plus fins, sont plus fréquentes l'hiver que durant les autres saisons. Elles s'avèrent être corrélées au régime de mistral, le plus souvent indirectement. Ce phénomène empêche des cumuls de dépôt pour des durées supérieures à une saison, cela constitue un avantage décisif du site, bien confirmé par les mesures (Ramade, avril 2011).

Figure 17 - Exemple de mesures de matière en suspension transversales (MEST) effectuées sur 4 stations hydrologiques en novembre 2010 (Ramade, mai 2011).

III - POMPAGE APRÈS MINE : PROBLÈMES RENCONTRÉS

1 - Evolution des niveaux d'eau en fonction du pompage

Entre l'arrêt de l'activité minière en 2003 et le début du pompage en 2010, le niveau est remonté dans le réservoir minier de -1100 à -14 m NGF (entre quinze et quarante-cinq millions de mètres cube de vides miniers ont été saturés). Le 4 août 2010, un pompage de 600 m^3/h a démarré au puits Gérard alors que le niveau de l'eau était toujours en phase de remontée. Le graphique ci-après (Figure 18) montre l'évolution du niveau (points bleus et échelle de gauche en mètres NGF) en fonction du débit (points rouges) dont les chiffres (m^3/h) de l'échelle de droite sont à multiplier par 10, de la pluie (trait vert) et de la pluie efficace (trait violet) à Aix en Provence (données Météo France), en millimètres sur l'échelle de droite.

Contrairement à ce qui était attendu, le niveau a continué à monter dans le puits malgré le pompage à 600 m^3/h et il a fallu rapidement l'augmenter à 800 m^3/h, ce qui a permis durant un court laps de temps (du 18/09 au 21/10/2010) de maintenir le niveau autour de la cote -11,20 m NGF. Puis le niveau a commencé à descendre jusqu'à -12,53 m NGF (11/12/2010). Mais cette évolution a été contrariée par l'arrivée de pluie efficace qui a entrainé une remontée du niveau durant plusieurs mois

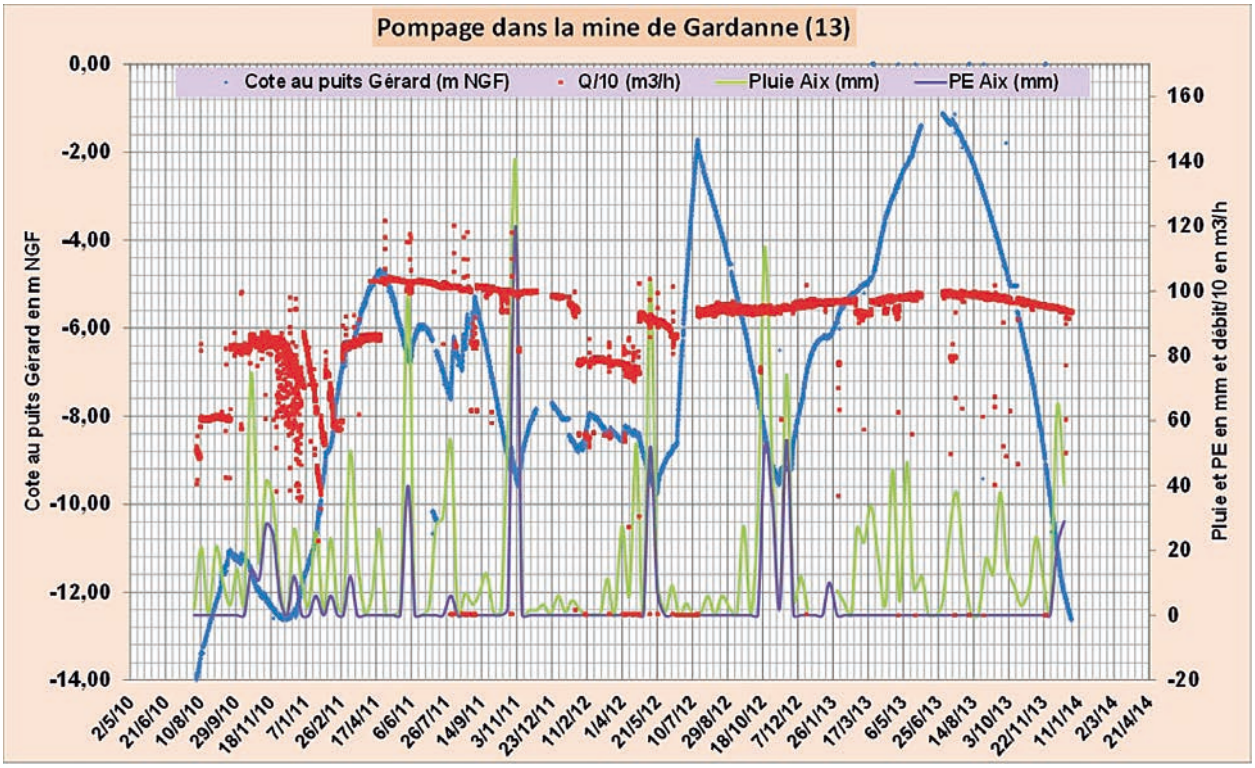


Figure 18 - Pompage sur le puits Gérard : évolution des niveaux, des débits pompés, de la pluie et de la pluie efficace d'août 2010 à fin 2013.

aux niveaux de redescendre jusqu'à -12,62 m NGF au 31/12/2013.

Sur l'ensemble de la chronique, d'août 2010 à fin décembre 2013, le niveau initial n'a jamais été retrouvé (-14 m NGF). Le réservoir minier ne réagit pas comme cela était prévu et l'analyse des trois années de pompage montre que la capacité des pompes actuelles est insuffisante pour contrôler le niveau d'eau dans le puits Gérard.

2 - Compréhension des circulations d'eau au sein du réservoir minier

Pour appréhender le fonctionnement actuel de l'eau dans le milieu minier souterrain, plusieurs approches ont été mises en œuvre de 2011 à 2013.

Tout d'abord, pour comprendre le fonctionnement de la mine dans son environnement lithologique et structural, la réalisation d'une modélisation 3D de la géologie régionale du site minier a été mise en œuvre (Stéphan-Perrey J. et *al*., 2011) puis une représentation 3D de la mine avec intégration de ce contexte géologique.

Puis, la courbe d'évolution du niveau de l'eau en fonction du temps dans le puits Gérard a été interprétée sur la période 2010 à 2011 (Dheilly A., 2011) puis avec les logiciels GARDENIA et GARDEMUL (Thiery, 2012 ; 2013) sur les données de 2004 à 2012. Ces outils sont des logiciels d'analyse d'entrées/sorties d'un système hydrogéologique développés par le BRGM. Ils permettent d'imposer des contraintes au système.

L'ensemble de ces approches, qui ne seront pas détaillées ici, ont permis de proposer un nouveau schéma conceptuel simplifié du réservoir minier post exploitation minière (Dheilly A., 2013 ; Dheilly A. et *al*., 2013).

Le débit à pomper est supérieur à celui annoncé car, en condition d'absence de pluie efficace, un débit constant de l'ordre de 800 m^3/h arrive au puits Gérard en provenance de la partie autochtone de la mine à partir de deux ressources (Figure 19).

La première proviendrait de l'augmentation de la contribution de l'aquifère jurassique. En effet, un puits de mine, le puits de l'Arc (implanté dans le Crétacé mais en liaison hydraulique avec la nappe jurassique ; Figures 1 et 3), qui exploitait l'aquifère jurassique au débit de 1 500 à 2 000 m^3/h a été arrêté depuis 2003. Cela maintiendrait, dans l'aquifère jurassique, une charge hydraulique plus élevée qu'autrefois engendrant une augmentation du débit issu de cet aquifère et entrant dans la mine.

La deuxième serait liée à la présence d'un stock d'eau (18 millions m^3) constitué durant la période d'arrêt des pompages, de 2003 à 2010, dans la partie est de la mine où se situent des chambres et piliers non remblayées (Fuvélien). Ce stock serait en charge par rapport au Lambeau Charrié et sa contribution serait variable mais, d'au moins 200 m^3/h.

Les pluies efficaces infiltrées sur les affleurements s'ajouteraient à ce débit constant de 800 m³/h. Celles-ci sont très variables d'une année à l'autre dans la région provençale, engendrant des volumes infiltrés de 1 à 9 millions de m³/an (Figure 19).

Cela conduit à déterminer un débit minimal de pompage de 1 200 m³/h avec modification, d'une part, des installations de pompage et, d'autre part, des aménagements du rejet en mer avec contrôle de l'absence d'impact sur le milieu. Ceci implique de changer les installations de pompage en 2014. En attendant ces travaux, le débit pompé a été porté à 1 000 m³/h depuis 2011. Les installations en mer ont également été modifiées dès 2011.

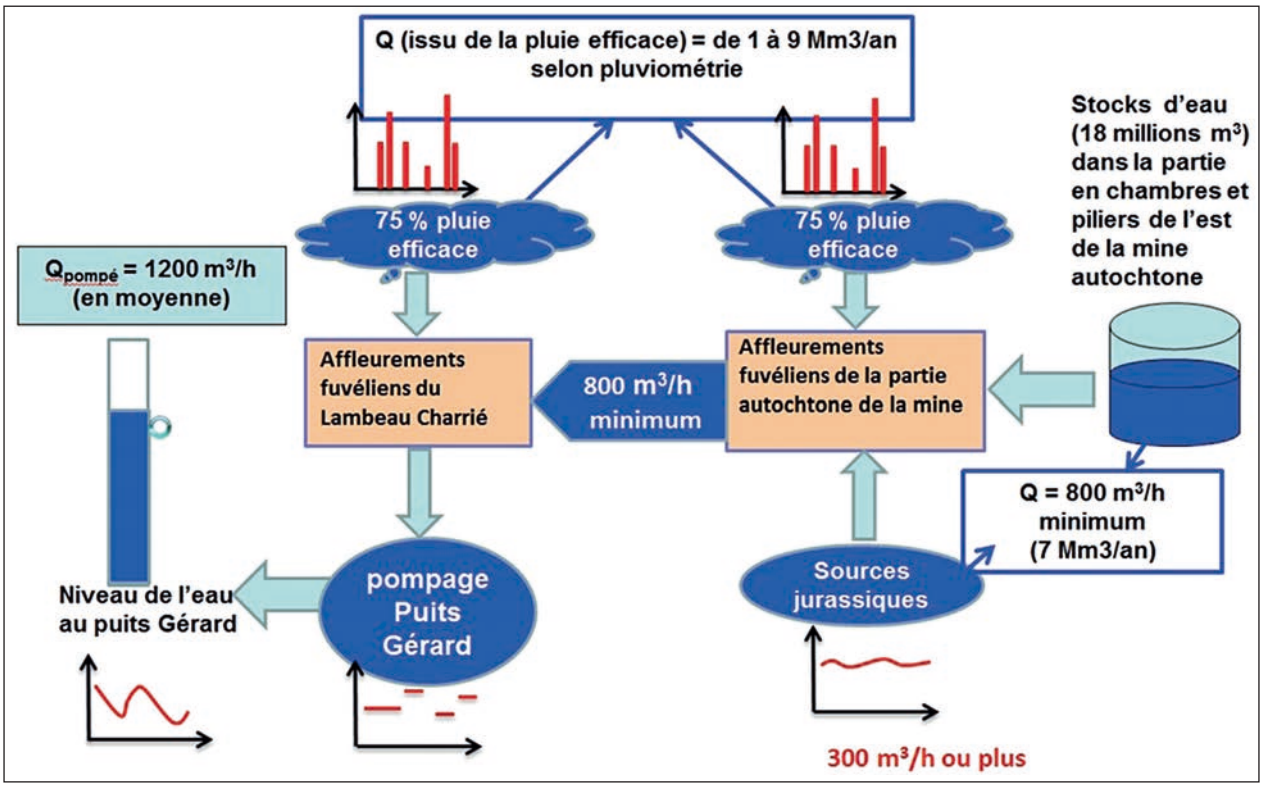


Figure 19 - Schéma conceptuel simplifié du fonctionnement du réservoir minier post exploitation minière (Dheilly A., 2013).

CONCLUSION

Les différentes approches géologiques et hydrogéologiques réalisées sur le site pompé de Gardanne ont permis la compréhension des circulations d'eau entre les 2 parties de la mine et entre les différentes zones exploitées et ont conduit à la définition d'un nouveau schéma conceptuel hydraulique et à la détermination d'un débit moyen d'exploitation recommandé de 1 200 m³/h. Ceci afin d'éviter un débordement non contrôlé de l''eau ferrugineuse de la mine dans le port de Marseille.

Cela implique la modification des installations de pompage au puits Gérard. Le dispositif de rejet en mer a déjà été modifié dès 2011 et il est dimensionné pour ce débit. Le rejet en mer est encadré par un suivi environnemental qui ne montre pas d'impact de celui-ci sur le milieu marin.

Il y a déjà un projet de valorisation à court terme de l'eau du réservoir minier pour de la géothermie (projet en développement avec la ville de Gardanne), et plusieurs possibilités se présentent, à moyen terme, pour une utilisation de cette eau à des fins industrielles et/ou potable lorsque les teneurs en fer auront diminué (projets avec la ville de Marseille).

Bibliographie

CESAME, 2002. Étude hydrogéologique - Concessions minières de la région de Gardanne (13). H.B.C.M., vol. 1 et 2, 100 p.

CETE Méditerranée, 2003. Rejet des eaux d'exhaure des mines de Gardanne dans le port de Marseille – Expérimentation de traçage dans le bassin de la Pinède. H.B.C.M., 13 p.

Dheilly A., 2011. Évolution des niveaux de l'eau dans le réservoir minier de Gardanne (13) après la fin de l'exploitation minière en mai 2003 et analyse de la première année de pompage (août 2010 - juillet 2011). Rapport final, BRGM/RP-60231-FR, 118 p.

Dheilly A., 2013. Compréhension des circulations d'eau souterraine dans l'ancienne mine de Gardanne (13) - Argumentaire pour l'implantation de 2 à 3 piézomètres dans le réservoir minier. Rapport final, BRGM/RP-62412-FR, 45 p.

Dheilly A., Brigati B., Nedellec J.-L., Nicolas M., 2013. Mine water management in the former Gardanne lignite mine: towards sustainable uses of the mine aquifer. In proceedings of Mine Closure 2013, September 18th-20th 2013, Cornwall (UK), 15 p.

GÉODÉRIS, 2003. Expertise internationale du dossier d'arrêt définitif des travaux des concessions de Gardanne (13). Géodéris 03 PACA - 5001R03, 64 p.

Nedellec J.-L., 2013. Rapport annuel de surveillance DPSM - Année 2012 - Région Provence-Alpes-Côte d'Azur. BRGM/RP-62580-FR, 78 p.

Ramade A. (Cabinet)/GERIM, 2005. Bassin de Gardanne-Impact du rejet du trop-plein minier sur le milieu naturel. Rapport, 98 p.

Ramade A. (Cabinet)/GERIM, 2011. Rejet des eaux de Gardanne – Augmentation de débits de rejet - faisabilité – Impact sur le milieu marin. Rapport, 24 p.

Ramade A. (Cabinet)/GERIM, 2011. Rejet des eaux de Gardanne - Suivi 2010. 120 p.

Stephan-Perrey J., Gabalda S., Guillen A., Courrioux G. avec la collaboration de Dheilly A., Ben Slimane K., Moulin M., Gonzalez G., 2011. Modélisation géologique 3D du bassin minier de Gardanne à l'échelle régionale. Rapport BRGM/RP-60551-FR, 44 p.

Thiéry D., 2012. Modélisation globale de l'évolution des niveaux dans la mine de Gardanne de 2004 à juillet 2012. BRGM/RP-61475-FR, 45 p.

Thiéry D., 2013. Modélisation globale de l'évolution des niveaux dans la mine de Gardanne de 2004 à juillet 2013 - Actualisation sur la période août 2012-juillet 2013. BRGM/RP-62865-FR, 50 p.