

Titre :

MINE DE SALSIGNE – TRAVAUX DE CONFORTEMENT DU BASSIN DE MONTREDON

Auteurs :

Stéphane CURTIL, Directeur, *GEOS*

Pierre GUERIN, Chef de projet, *GEOS*

Laurence ARATHOON, Chef de projet, *BRGM*

Chapô :

Des boues arséniées et divers résidus liés au traitement du minerai d'or de la mine de Salsigne ont été stockés dans le bassin de Montredon entre 1994 et 2005. Les travaux de confortement du bassin de Montredon avaient pour objectif de stabiliser la digue Ouest qui présentait des signes d'instabilité en surface ainsi qu'en profondeur. Trois techniques ont été mises en œuvre : mise en place de drains sub-horizontaux, mise en place de pieux et purge superficielle.

Texte :**1. Présentation générale du projet**

Le bassin de Montredon, localisé sur la commune de Salsigne dans l'Aude, est un ancien bassin de stockage de boues arséniées issues du traitement du minerai de la mine d'or de Salsigne. Un million de m³ de pulpes de concentrés de flottation ont été stockées à partir de 1994. Entre 1999 et 2005, des déchets, résidus de traitement et déblais pollués ont été ajoutés dans le stockage.

Les digues du bassin de Montredon sont constituées de matériaux marno-calcaire, schistes compactés et d'une paroi interne en argile. Initialement, l'ouvrage devait être édifié sur une vingtaine de mètres de hauteur. Cependant, l'exploitant de l'époque a décidé, à partir de 1997, de continuer à rehausser l'ouvrage jusqu'à 27 m, afin de poursuivre la mise en dépôt des résidus de traitement. Les digues de l'ouvrage, et en particulier la digue Ouest, ont été affectées par plusieurs épisodes d'instabilité plus ou moins profonde durant ces dernières périodes de rehaussement. A la fermeture du stockage, des glissements superficiels ont également été observés.

Figure 1

Depuis 2006, le Département Prévention et Sécurité Minière (DPSM) du BRGM s'est vu confié par l'Etat une mission de surveillance des anciennes installations minières et de mise en sécurité des sites miniers présentant des risques vis-à-vis des populations. A ce titre, l'Unité Territoriale Après-Mine Sud (UTAM SUD) gère notamment les ouvrages localisés dans le département de l'Aude en région Occitanie.

En 2007, il est constaté la persistance de mouvements profonds sous la digue Ouest du bassin de Montredon, et la présence d'un mouvement superficiel en sommet de cette même digue.

La maîtrise d'œuvre complète des travaux de confortement du bassin de Montredon a été confiée à GEOS Ingénieurs Conseils qui s'est associée à ECR Environnement pour le suivi des opérations sur site.

2. Contexte géotechnique et hydrogéologique

Le bassin de Montredon est situé dans la partie Sud-Ouest de la Montagne Noire à environ 3 km au Sud de la mine d'or de Salsigne.

Il est implanté au niveau des calcaires lacustres de Montolieu (Thanétien e2a) et de la série vitrollienne sous-jacente qui sont en totale discordance sur le socle hercynien. La série vitrollienne est constituée de faciès fluvio-deltaïques : argiles vertes et rouges à nodules ou niveaux carbonatés, lentilles et chenaux argilo-graveleux. Ces formations tertiaires sont en position monoclinale avec un faible pendage vers le Sud.

La figure 2 présente la position du bassin sur la carte géologique de Carcassonne.

En fond de bassin, la totalité des calcaires de Montolieu ont été extraits pour la construction des digues périphériques. Le bassin repose donc sur la série vitrollienne.

Suite aux différentes campagnes d'investigations menées sur le site, les formations géologiques, en place ont pu être identifiées et sont décrites ci-dessous :

- Argile C2 : horizon d'argilite gris-vert à brun violacé de comportement potentiellement plastique, située directement sous le bassin,
- Calcaire en place L3 : calcaire dolomitique ou dolomie gris beige à blanc comportant des interlits argileux, repéré sous la digue et la partie supérieure de la butée actuelle,
- Argile C4 : horizon d'argilite gris-vert à brune dans lequel ont été repérés les mouvements de cisaillement,
- S5 : grès dolomitique calcaire marron à noir de faible épaisseur,
- Argile C6 : argile silteuse intercalée de grès, sables, marnes et roches silteuses qui s'amincit vers le Nord-Est,
- S7 : horizon de sable ou de grès graveleux silteux, gris-vert à violet et parfois argileux,
- Argile C8 : argile silteuse à sableuse du gris violet à rouge ou gris,
- Argile C9 : argile ou marne dure à très dure rouge, gris-violet avec fissures très polies.

On observe, dans cette série, une forte hétérogénéité des formations en termes de granulométrie, de perméabilité et de compacité. Les couches argileuses situées à proximité de la base du bassin peuvent être le siège de ruptures préférentielles (couche savon). Les analyses menées dans les rapports au stade des études de faisabilité indiquent l'existence de tels phénomènes dans les couches argileuses sur la base des relevés inclinométriques.

3. Analyse de la stabilité avant travaux

La digue Ouest du bassin de Montredon présentait des signes de premières instabilités qui auraient pu donner lieu à d'importants mouvements de masses sans intervention permettant de rétablir une stabilité satisfaisante. Des instabilités étaient visibles au niveau de la partie sommitale (matériaux glissés sur la figure 3) et l'activité des inclinomètres est preuve d'une certaine instabilité d'ensemble (figure 4).

Une rétro-analyse de la stabilité de la situation avant travaux a été menée pour la partie sommitale et pour la stabilité d'ensemble en considérant un coefficient de sécurité minimal compris entre 1 et 1,5 représentatif des mouvements observés.

3.1. Glissement superficiels

Les glissements superficiels observés en tête de digue sont dus à des rechargements successifs et à une pente trop importante des talus vis-à-vis des caractéristiques des matériaux constitutifs de la digue à cet endroit (matériaux argileux). La conception initiale de la digue ne prévoyait pas une hauteur de digue si élevée. Des infiltrations d'eau, depuis le sommet, ont également joué un rôle dans le déclenchement du phénomène. Les argiles qui constituent à la digue en partie haute ne sont pas protégées des intempéries ce qui implique une dégradation progressive des caractéristiques mécaniques et notamment de la cohésion qui va tendre vers 0. La surface de rupture étudiée correspond au glissement observé sur site:

3.2. Mouvement profond

Le glissement profond correspond quant à lui à de faibles déformations détectées par les inclinomètres mis en place entre 1995 et 2005. La surface de rupture supposée se positionne dans les

argiles C4 d'après les mesures inclinométriques. Cette hypothèse est plausible lorsqu'on considère les autres glissements ayant affectés le bassin de Montredon (glissement de la digue Est en 2002 dans le même type de formation).

Les rechargements successifs, une nappe haute à l'intérieur du bassin et une nappe potentiellement en charge sous les couches argileuses sont susceptibles d'être à l'origine du déclenchement de ces mouvements de faible amplitude.

Compte-tenu des faibles déformations mesurées, on considère que la rupture n'est pas encore atteinte sur le flanc ouest du bassin (déformations très faibles), les mouvements observés étant d'une amplitude correspondant à des ajustements des états de contrainte dans un site ayant un niveau de stabilité précaire.

Figure 5

Conformément aux observations faites sur les piézomètres de suivi de la nappe d'accompagnement des boues au sein du bassin, l'analyse a été réalisée en considérant une nappe haute dans le bassin avec une densité élevée compte tenu de la présence de matériaux lourds dans les boues.

4. Dimensionnement de la solution de confortement

4.1. Gestion de la nappe en charge sous les argiles

L'eau joue un rôle moteur dans le phénomène de glissement observé, en particulier car la nappe est potentiellement en charge sous les horizons argileux C4 et C6.

La solution retenue ne comporte pas de chargement du versant par apport massif de matériaux, et ne devrait donc pas induire d'augmentation des pressions hydrostatiques. Néanmoins, l'installation d'un système de drainage est préconisé en pied de butée existante dans l'objectif de favoriser les écoulements qui s'établissent difficilement dans cette zone. Cela permettra d'éviter la mise en charge de la nappe située dans les horizons sableux lors d'épisodes pluvieux et participera ainsi à la sécurisation du versant.

Il est proposé la mise en œuvre d'un système composé de 20 drains subhorizontaux de 15 à 35 m de longueur, répartis sur la largeur du pied de butée (espacement de 8 m entre chaque drain).

4.2. Confortement pour la stabilité globale

La solution retenue (figure 6) consiste à clouer la masse instable sur le substratum fixe à l'aide d'éléments résistants. Une stabilisation par des clous, de faible inertie, résistant principalement à la traction et sont placés subhorizontalement n'était pas envisageable compte-tenu de la profondeur de la surface de glissement et de l'importance des masses en mouvement. Un renforcement par pieux de grande rigidité était donc plus adapté à la cinématique du glissement. Ceux-ci ont été mis en œuvre perpendiculairement à la surface de glissement et travaillent essentiellement en flexion/cisaillement compte tenu de leur importante inertie.

L'analyse de stabilité sous GEOSTAB a permis d'évaluer les efforts mobilisés dans les pieux à la rupture par la méthode du multicritère, le calcul utilise l'ensemble des critères de rupture des interactions sol-inclusion.

L'espacement retenu de 4,0 m permet de se prémunir de l'incertitude liée à la verticalité des pieux. La réalisation de pieux à 23 m de profondeur dans des sols pouvant comporter des blocs risque de connaître des écarts de trajectoire et ainsi obtenir des rapprochement/écartement de pieux modifiant de manière non négligeable le comportement du renforcement localement.

Les pieux retenus en phase conception ont les dimensions suivantes :

- Diamètre : 8000 mm
- Longueur : 23 m
- Armature : HEB 500
- 3 lignes de pieux espacées de 8 à 10 m
- Espacement de 4 m entre deux pieux d'une même ligne

Compte tenu de l'hétérogénéité des matériaux rencontrés et notamment la présence d'horizons calcaires, il a été envisagé au stade des études la réalisation de pieux forés avec tubage des formations instables. Cette technique est bien adaptée à la nature des terrains et permet une mise en œuvre aisée des profilés métalliques.

4.3. Confortement pour la stabilité de la partie sommitale

La sécurisation de la partie sommitale de la digue s'effectue par la purge des matériaux glissés ou en équilibre précaire et par la mise en œuvre d'un remblai de renforcement. Cette opération vise à reprofiler le sommet de l'ouvrage de manière à garantir définitivement sa stabilité.

Le remblai est constitué de matériaux granulaires drainants. Les caractéristiques géotechniques suivantes sont proposées :

- $c' = 5 \text{ kPa}$
- $\varphi' = 30 \text{ kPa}$
- $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$

5. Réalisation des travaux

Fin 2016, le groupement Botte Fondations / Vinci Construction Terrassement est retenu pour la réalisation des travaux qui se sont déroulés entre avril et octobre 2017.

La stabilité du site avant travaux étant précaire un phasage précis des travaux a été nécessaires pour garantir à tout moment la stabilité du site.

5.1. Travaux préparatoires

La première étape a été la réalisation des travaux préparatoires suivants (figure 7)

- d'une plate-forme de travail avant réalisation des pieux afin d'assurer une assise et une circulation satisfaisante à la machine employée. Ils ont nécessité le dégagement provisoire de la plateforme, les matériaux purgés ont été stockés en dehors de la zone travaux puis étalés sur la plateforme après exécution des pieux.
- d'une piste d'accès pour la réalisation des drains subhorizontaux. Cette piste a été conservée pour permettre l'entretien des drains.

5.2. Réalisation des drains

Les drains subhorizontaux ont été réalisés depuis la piste par la technique du forage ODEX pour permettre un tubage du forage à l'avancement. Les drains mis en place ont une longueur comprise entre 19 et 35 m pour un diamètre de 100 mm.

La réalisation des drains en premier lieu permet d'assurer l'absence de mise en charge de la nappe sous les argiles à l'origine des mouvements.

Lors de l'exécution des drains, il n'a été rencontré que très peu d'eau ce qui est cohérent avec la pluviométrie très faible au moment des travaux (nappe basse). Il a toutefois été observé lors du soufflage d'un drain une remontée d'eau dans un drain voisin signe du bon fonctionnement des drains et de la présence d'un aquifère.

Les drains sont connectés au niveau de la piste à un fossé afin de canaliser les écoulements vers le système de collecte des eaux déjà existants.

5.3. Réalisation des pieux

Le groupement d'entreprise a proposé la mise en œuvre de pieux de type tarière creuse de diamètre 1000 mm équipés de cage d'armature fournissant un niveau de résistance équivalent au système retenu en phase conception.

Ce choix risqué compte tenu de la présence d'éléments résistants (horizons calcaires) a été possible grâce à l'utilisation d'une foreuse très puissante (Fundex 2800) et de tarières de type III renforcées (figure 8). Le forage des pieux s'est déroulé sans difficulté pour chacun des 86 pieux y compris à travers les horizons calcaires.

La technique présentait un second risque relatif à la mise en œuvre des cages d'armatures dans le béton frais sur une hauteur de 23 m. Le groupement a dû procéder à plusieurs tests de formulation de béton afin de pouvoir assurer une bonne mise en œuvre des cages sans refus prématurés (figure 9).

Les déblais issus du forage des pieux ont été conservés sur site et répartis de manière homogène sur la plateforme en fin d'opération afin de limiter les évacuations de matériaux à l'extérieur du site (rien n'a été sorti à l'exception des déchets propres au chantier) et d'augmenter les forces résistantes participant à la stabilité de la digue.

5.4. Réalisation du remblai sommital

Les travaux de remblaiement (correspondant à la mise en œuvre de remblais granulaires en partie sommitale) ont été réalisés après les travaux de pieux car ils apportent une charge supplémentaire défavorable vis-à-vis de la stabilité générale.

Le remblai a été mis en œuvre par le bas par couches compactées. Les terrains glissés ont été préalablement décapés sur toute l'épaisseur décomprimée. Des redans d'ancrages ainsi qu'une bêche en pied ont été réalisés avant mise en œuvre du remblai. Les eaux drainées par le remblai sont récoltées dans la bêche et évacuées via des épis drainants.

Afin de limiter l'impact environnemental, tous les matériaux granulaires ont été produits par la carrière située au voisinage immédiat du site. Ce choix d'entreprise était en accord avec la charte environnementale du chantier.

L'instrumentation existant (inclinomètres, piézomètres et plots topographiques) a été conservée dans la mesure du possible ou remplacée le cas échéant afin de permettre de continuer à suivre les déplacements ou l'absence de déplacement des terrains suite à la réalisation des travaux.

Le site a ensuite été remis en état (figure 10) et a fait l'objet d'une végétalisation par projection hydraulique pour éviter l'érosion lors d'épisodes pluvieux.

Résumé

Les travaux de confortement du bassin de Montredon ont consisté en la mise en œuvre de drains sub-horizontaux, de pieux armés de 23 m de longueur et de remblais granulaires.

Ces travaux avaient pour objectif d'intercepter les éventuelles montées en charge de la nappe sous les horizons argileux, la stabilisation de la digue vis-à-vis du mouvement profond observé sur les inclinomètres et de rétablir la stabilité superficielle du talus sommital ayant subi un glissement. Les travaux ont été menés à bien et l'instrumentation du site va permettre de confirmer l'arrêt des mouvements observés avant travaux.

Encadré des principales quantités :

Travaux de drainage	20 drains Ø100 mm 515 ml
Travaux de pieux	86 pieux Ø1000 mm 2000 ml 1700 m ³ de béton 175 000 t d'armatures
Travaux de terrassements	6000 m ³ de déblai 10000 m ³ de remblai

Encadré des principaux intervenants :

Maitre d'ouvrage :	DREAL Occitanie
Maitre d'ouvrage délégué :	BRGM
Maitre d'œuvre :	GEOS Ingénieurs Conseils / ECR Environnement
Groupement d'entreprises :	Botte Fondations / Vinci Construction Terrassement