



CFMR

## **Séance technique : Ouvrages souterrains à long terme : Que faire après l'exploitation ?**

Séance technique CFMR

Jeudi 19 Mars 2026 à 13h30

Séance organisée en mode hybride :

[Ecole des Mines de Paris](#) (60 Bd Saint-Michel, Paris)

**13 : 30** Accueil et introduction à la séance.

*Gilles ARMAND, Vice-président CFMR, Andra.*

**13 : 45** Risques Géotechniques et comportement à long terme des mines fermées

*Marwan AL HEIB, Isabelle VUIDART et Vincent RENAUD, INERIS*

**14 :15** Mise en sécurité d'anciens ouvrages miniers souterrains – quelques cas emblématiques

*Jacques MOREL, Michel DIETZ, Véronique HOANG, Florence RIVET, BRGM*

**14 :45** Fermeture définitive de l'unique site de stockage souterrain français en couches géologiques profondes, de produits dangereux, non radioactifs – Stocamine

*Régis FISCHER, Nicolas POIROT, MDPA*

**15 : 15** Pause

**15 :45** Evaluation de la stabilité après ennoyage et abandon de cavités de stockage de GPL en chambres et piliers dans la craie

*Nicolas GATELIER, Géostock*

**16 :15** Shale as natural barrier for well plugging and abonnement

*Julien EUDES, Kun SU, TotalEnergies*

**16 :45** La fermeture du Centre industriel de stockage géologique de déchets radioactifs - Cigéo : les grands enjeux scientifiques et technologiques

*Jean TALANDIER, Rémi DE LA VAISSIERE, Andra*

**17 : 15** Discussion

**17 :30** Fin de la séance

## **Risques Géotechniques et comportement à long terme des mines fermées**

*Marwan Al Heib, Isabelle Vuidart, Vincent Renaud*

*INERIS*

Aujourd'hui, la majorité des mines en Europe sont fermées, et le nombre de sites miniers abandonnés ne cesse d'augmenter à l'échelle mondiale. La problématique des mines abandonnées et de leurs impacts environnementaux et territoriaux est donc un enjeu majeur à la fois pour l'industrie minière et pour le devenir des territoires concernés.

À la suite de la fermeture des exploitations, de multiples perturbations peuvent ainsi survenir. Les exploitants miniers, les collectivités locales et les décideurs publics sont confrontés à divers aléas et risques post-miniers. Les facteurs géologiques, géotechniques et environnementaux (impacts sur les milieux) constituent des paramètres clés pour l'identification et la prévision de ces aléas.

Parmi ces aléas, les effondrements des mines souterraines représentent un risque majeur pour les personnes et les infrastructures, et un frein certain à l'aménagement du territoire.

Dans ce contexte, nous présentons une méthodologie d'évaluation des aléas mouvements de terrain, essentiellement fondée sur l'analyse des données disponibles, les retours d'expérience et les connaissances acquises.

Spécifiquement, afin d'illustrer le rôle de la mécanique des roches dans l'analyse des phénomènes d'effondrements, nous présentons le cas de certains désordres d'ampleur observés dans le bassin ferrifère lorrain. Dans la partie sud de ce bassin, des effondrements et des affaissements ont été recensés dans les années 1990, à la suite de l'arrêt de l'exploitation minière. Ces phénomènes sont apparus quelques mois après l'envoyage des travaux miniers, consécutif à l'arrêt du pompage des eaux d'exhaure. Malgré les progrès réalisés dans ce domaine, il n'existe toujours pas de modèle mécanique des roches suffisamment robustes intégrant la géologie et le comportement à LT de terrain pour expliquer ou prédire de manière fiable ces effondrements.

Nous présentons plus spécifiquement le cas de l'effondrement du stot d'Angevillers (Moselle). Il s'agit d'une zone exploitée selon la méthode des chambres et piliers, entourée de secteurs exploités par dépilage. L'analyse menée par le GIP GEODERIS a montré que le stot d'Angevillers est classé en zone d'aléa d'effondrement progressif. En octobre 2009, un affaissement en surface d'environ 70 cm a été constaté, accompagné de désordres observés sur le bâti. L'analyse initiale a montré que cet affaissement d'origine minière était lié à l'effondrement partiel du stot.

Les études réalisées à la suite de cet événement, ainsi que celles en cours, ont pour objectif de mieux identifier les facteurs de prédisposition et de déclenchement des effondrements miniers. Des modélisations tridimensionnelles de grande dimension sont en cours de développement afin de mieux comprendre les conditions spécifiques conduisant à l'apparition de mouvements de terrain en surface. Les résultats de ces analyses visent à améliorer l'évaluation des aléas et à apporter des éléments d'aide à la décision pour les experts et les ingénieurs impliqués dans la gestion des risques post-miniers.

CFMR

## Mise en sécurité d'anciens ouvrages miniers souterrains – quelques cas emblématiques

Jacques Morel, Michel Dietz, Véronique Hoang, Florence Rivet

BRGM

La Direction Prévention et Sécurité Minière du BRGM assure pour le compte de l'Etat la gestion d'anciens sites miniers sur le territoire métropolitain. Ces derniers peuvent être à l'origine de différents types de risques pour les biens et les personnes, notamment d'instabilité de terrain (affaissements, effondrements), nécessitant leur surveillance. En fonction du niveau de risque caractérisant les anciens ouvrages miniers souterrains, des travaux de mise en sécurité sont entrepris pour supprimer le risque. Situé sur une ancienne concession de charbon sur la commune de Bézenet (03), le puits Ste-Barbe a fait l'objet de travaux de mise en sécurité définitive en 2021 à la suite de l'apparition d'un désordre en surface. Le choix de la méthode de mise en sécurité, après analyse technico-économique de différentes options, s'est porté sur la réalisation d'un bouchon autoportant. Devant l'état de dégradation avancé du puits et notamment les risques d'effondrement du cuvelage maçonné, la solution a consisté à réaliser le bouchon sur un packer gonflable flottant préalablement mis en place sur le niveau d'eau présent dans le puits (figure 1), à 20 m de profondeur. Cette technique innovante a permis l'atteinte des objectifs de sécurisation sans intervention dans le puits.

Le village du Pradal (34) est situé en partie sur une ancienne mine de plomb argentifère dont l'exploitation remonte au 14<sup>ième</sup> siècle. La présence de cavités de grandes dimensions (> 10 m de hauteur) à faible profondeur (environ 10 m) génèrait un risque d'effondrement de niveau fort concernant plusieurs habitations, nécessitant la mise en sécurité des cavités par comblement. Le comblement réalisé en 2025 (figure 2) s'est déroulé en plusieurs phases, comprenant le confortement préalable d'un pilier, la construction des barrages de confinement de la cavité à combler, le comblement de la cavité avec du béton mousse et celui de la galerie d'accès à la cavité. Ce chantier a dû prendre en compte le contexte particulier du site lié à son intérêt archéologique, avec la réalisation de fouilles préventives, la forte teneur en radon nécessitant la mise en œuvre d'une ventilation de la cavité, et le relogement d'habitants pendant la durée des travaux.



**Figure 1 - Obturateur gonflable en place – Puits Ste Barbe - Bézenet**



**Figure 2 - Comblement de la grande salle – Le Pradal**



# CFMR



## **Fermeture définitive de l'unique site de stockage souterrain français en couches géologiques profondes, de produits dangereux, non radioactifs – Stocamine**

*Régis FISCHER, Nicolas POIROT*

*MDPA*

Le bassin salifère alsacien a été exploité au nord-ouest de Mulhouse pour la potasse à partir de 1904. 570 millions de tonnes de minerai ont été extraites jusqu'en 2002. Dans le cadre de l'arrêt de l'exploitation et la reconversion du bassin, l'idée de la création d'un site de stockage souterrain de déchets dangereux ultimes a émergé dans les années 90, à l'instar de ce qui était réalisé en Allemagne. Ainsi, le stockage en couches géologiques profondes (à environ 550 m de profondeur), dans des alvéoles dédiées, a été autorisé par arrêté préfectoral le 3 février 1997 pour une durée de 30 ans et une quantité de 320 000 tonnes. Son exploitation par la société Stocamine a débuté en février 1999 en utilisant les infrastructures minières existantes des Mines de Potasse d'Alsace ; En septembre 2002, des déchets non conformes ont été stockés et ont provoqué un incendie dans le stockage, arrétant à la fois son exploitation et celle de la potasse.

A la suite de l'arrêt définitif du stockage, de nombreuses études ont été menées pour définir la méthode à adopter pour la fermeture du site. Ainsi, plusieurs options depuis le retrait total des 44 000 tonnes de déchets stockés (hors bloc incendié) jusqu'à leur confinement complet ont été analysées. L'ensemble des études ont démontré qu'un confinement des déchets était la meilleure solution du point de vue environnemental et de la sécurité des opérateurs.

Par mesures de précautions, l'Etat a demandé aux MDPA de déstocker 93% des déchets contenant les polluants potentiellement les plus impactant avant d'opérer un confinement définitif des déchets. Le déstockage a eu lieu entre 2014 et 2017 non sans difficultés techniques liées notamment à l'environnement de travail et la dégradation de l'encaissant dans les blocs stockés.

En parallèle, et suivant les recommandations, des recherches préalables, des investigations, essais et études complémentaires ont été menés pour préciser les techniques à mettre en œuvre pour le confinement du stockage.

Ces études ont précisé le phasage, les matériaux et techniques constructives pour l'établissement de 12 barrages très peu perméables au droit de chaque accès du stockage, le remblayage des galeries et blocs vides situés dans l'emprise de la zone à confiner.

Ces travaux inédits, arrêtés à plusieurs reprises par décisions judiciaires, ont débuté en 2020 et devraient s'achever fin 2027.

# CFMR

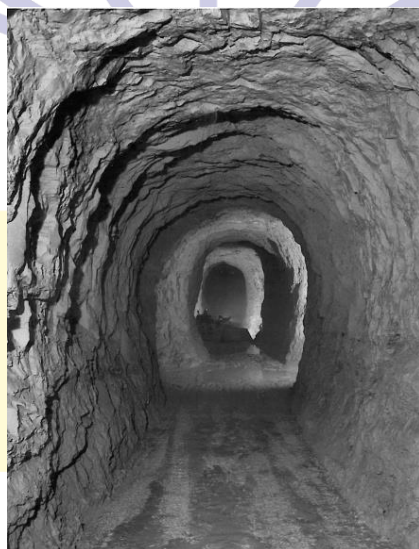
## **Evaluation de la stabilité après ennoyage et abandon de cavités de stockage de GPL en chambres et piliers dans la craie**

*Nicolas Gatelier*

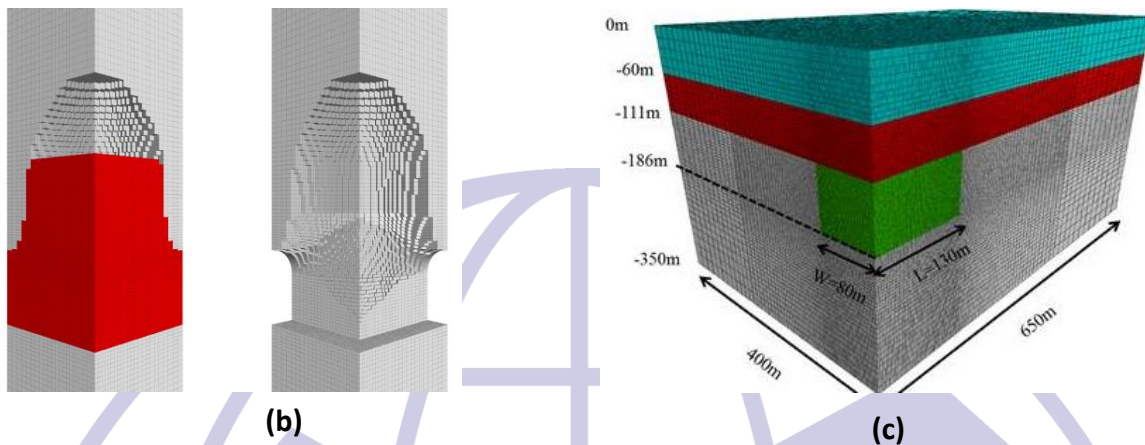
*Géostock*

Dans le cadre de l'abandon de deux cavités en chambres et piliers excavées dans les années 1960 dans la craie (Turonien) à environ 150 m de profondeur (Fig. 1-a), des études ont été réalisées afin de confirmer la stabilité à long terme des cavités après la phase d'ennoyage. Les cavités ont été mises en service en 1966 et exploitées jusqu'en 2013 en tant que stockage de GPL (Propane et Butane). Le taux de défrutement faible (de l'ordre de 25%), le dimensionnement des piliers (piliers de section carrée d'environ 15 à 16 m de côté et galeries de 4 à 5 m de largeur et 6 m de hauteur au plus) ainsi que la géologie du site (absence d'horizons fragiles et cassants dans les terrains de couverture) écartent le risque d'effondrement brutal généralisé. Les calculs analytiques préliminaires permettent également d'écarter le risque d'effondrement localisé par rupture d'un pilier isolé et formation de fontis par rupture du toit. En effet, dans les cas les plus pénalisants, la remontée de la cloche géométriquement possible au-dessus du toit des galeries se stabilise par auto-comblement. Le calcul de la contrainte moyenne dans les piliers les plus chargés, à partir du concept classique de l'aire tributaire, a permis également de vérifier que la contrainte moyenne dans le pilier est inférieure à sa résistance en compression, et cela même à pression atmosphérique. En complément des approches analytiques et empiriques, un modèle numérique tridimensionnel local (intersection de deux galeries) a été mis en œuvre (Fig. 1-b) avec la société Itasca intégrant la dégradation progressive des propriétés mécaniques de la craie, l'évaluation de la formation de la cloche au toit par élimination des éléments volumiques suivant un critère de détachement basé sur la contrainte principale maximale et l'auto-comblement de la cavité par foisonnement des éléments détachés au toit. Le modèle a permis de montrer qu'une dégradation très forte des propriétés mécaniques de la craie est nécessaire pour initier le phénomène de rupture au toit et que, dans le cas très peu probable de rupture, la remontée de la cloche se stabilisait avant d'atteindre le jour. Enfin le phénomène d'affaissement des terrains de surface a été évalué par un modèle numérique tridimensionnel global (Fig. 1-c) intégrant la zone de rupture des terrains de couverture par un milieu continu équivalent avec un calage de la déformabilité apparente de ce milieu sur les résultats du modèle local de remontée de cloche.

Les études réalisées ont permis de valider la possibilité d'abandonner les cavités après ennoyage sans nécessité de traiter les galeries avec un matériau de remplissage. Finalement, seuls les puits d'exploitation des cavités ont fait l'objet d'un remplissage au coulis de ciment et béton.



**(a)**



**Figure 1 – photo d’une galerie pendant la construction (a) ; remontée de la cloche et comblement de la galerie par blocs foisonnés (b) ; modèle global pour évaluation de l’affaissement des terrains (c)**

# CFMR

## Shale as natural barrier for well plugging and abandonment

Julien EUDES, Kun SU

TotalEnergies

In the coming decade, several thousand wells operated by TotalEnergies will reach the end of their life and will need to be plugged and permanently abandoned, particularly in the North Sea region. The conventional approach to plugging and abandonment (P&A) consists of removing the casing and setting cement plugs across the designated intervals. Such operations require mobilizing a drilling rig, which is very costly.

A key question is therefore: *Can certain caprock shale be considered as a natural barrier in cases where cement in the annulus is absent or of poor quality?* The answer to this question has major implications for the cost of P&A operations.

In this presentation, we describe TotalEnergies' approach to evaluating the creeping ability of caprock shale as a natural barrier, including laboratory testing, constitutive model development, numerical modelling, and acquisition of in situ data. We present several field cases in which geomechanical modelling predicted shale creep closure of the annulus, and where effective closure was subsequently observed in the wells.



# CFMR



## La fermeture du Centre industriel de stockage géologique de déchets radioactifs - Cigéo : les grands enjeux scientifiques et technologiques,

Jean TALANDIER, Rémi DE LA VAISSIERE

Andra

Le Centre industriel de stockage géologique (Cigéo), est conçu pour accueillir les déchets radioactifs français de haute activité et de moyenne activité à vie longue. S'il est autorisé, ce stockage localisé dans l'Est du Bassin Parisien, sera situé à ~500 mètres de profondeur dans la formation argileuse du Callovo-Oxfordien (COX). A l'issue de la phase d'exploitation, l'Andra doit mettre en place un dispositif de fermeture pour assurer le confinement passif des déchets, c'est-à-dire sans intervention humaine. Même si la couche du COX dans laquelle est positionné le stockage constitue la barrière principale entre les déchets et la biosphère, il est nécessaire de fermer l'ensemble des accès : galeries, puits et descenderie. Bien que le système de fermeture ne soit mis en œuvre que dans plus d'un siècle, l'Andra doit développer des solutions techniques robustes dès la phase de conception du stockage. A ce stade, la stratégie retenue est de remblayer toutes les galeries et de positionner dans des endroits clés des scellements à base d'argile gonflante.

- Les ouvrages de fermeture de Cigéo



Figure 1 Exemples de scellements de galerie (a) et de puits (b)

Les remblais sont essentiellement constitués d'argilite excavée. Leur fonction est de minimiser la déformation de l'argilite autour des galeries et d'empêcher l'extension des zones endommagées, créées initialement lors du creusement, quand le revêtement en béton se détériore.

Les scellements sont installés dans les puits, les descenderies et dans certaines galeries de sorte à avoir au minimum deux scellements entre les déchets et les exutoires. Leur fonction principale est de limiter la circulation de l'eau principal vecteur du transfert des radionucléides. Pour atteindre le niveau d'étanchéité spécifié, le scellement s'appuie sur un noyau d'argile gonflante (bentonite) dont la perméabilité à l'eau est très faible (Figure 1). Cependant, une grande quantité d'hydrogène est générée dans le stockage du fait de la corrosion anaérobie des éléments métalliques (déchets, soutènements, conteneurs...). Les scellements sont donc conçus pour être perméables aux gaz afin de maintenir la pression de gaz en dessous de la pression de fracturation de la couche géologique et sans compromettre leurs fonctions hydrauliques et mécaniques.

- Une utilisation de la bentonite dans les scellements

Les matériaux à base de bentonite, purs ou mélangés à un additif, sont étudiés depuis plus de 40 ans à travers le monde dans le cadre de projets de stockage géologique de déchets radioactifs [1]. Une base de connaissances solide est ainsi disponible sur leurs propriétés hydromécaniques-gaz et leur mise en œuvre. Les deux fonctions attendues des scellements sont, a priori, antagonistes : limiter le flux d'eau et laisser passer les gaz. L'amélioration de la capacité des scellements à être « perméables aux gaz » et étanches à l'eau conduit naturellement à s'orienter vers des mélanges contenant du sable. Les propriétés hydromécaniques des mélanges bentonite/sable sont contrôlées par deux paramètres : la teneur en sable et la densité sèche équivalente en bentonite dans le mélange [2]. Les essais réalisés sur des mélanges dont la teneur en sable est comprise entre 50 % à 70 % permettent de cibler une gamme de matériaux compatibles avec les perméabilités à l'eau souhaitées

(conductivité hydraulique inférieure à  $10^{-11}$  m/s) et avec des pressions de percée au gaz faibles (inférieures à 2MPa), tout en conservant un potentiel de gonflement élevé.

- Des tests sur échantillons aux démonstrateurs à grande échelle

Le programme réalisé au laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne de l'échelle du forage à celle des démonstrateurs de grandes tailles a permis de montrer le fonctionnement des scellements à base de d'argile gonflante et la capacité de l'Andra à construire ces ouvrages. Le choix de la mise en forme des matériaux (briques ou blocs pré-compactés, pellets ou compactage en place) dépend principalement des performances souhaitées, mais aussi de considérations techniques et économiques. L'utilisation de blocs pré-compactés est une des possibilités, et a été retenue par l'Andra pour l'expérience NSC (Figure 2) lancée en 2013 [3]. Dans cet essai, une galerie de 4,6 m de diamètre et de 5 m de long, un démonstrateur de scellement à l'échelle  $\frac{1}{2}$  par rapport aux structures Cigéo a été mis en place. Les briques sont constituées d'un mélange 40% bentonite/60% sable. La phase de resaturation a duré environ 10 ans et a été suivi par des tests de performance à l'eau. Dans l'année à venir des tests de performance au gaz vont être réalisés.

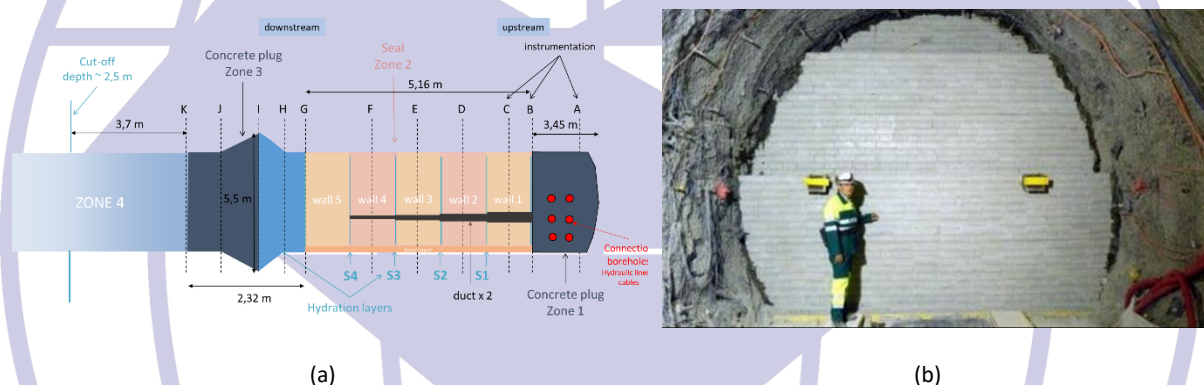


Figure 2 (a) Représentation schématique de l'essai NSC, (b) installation de briques à constituées d'un mélange bentonite/sable

Ce programme d'essais ambitieux continue avec plusieurs essais de démonstration dans le laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne : REG (remblaiement de galerie, 2025-2026), SSM (scellement sans massif d'appui en béton, 2026), SMA (scellement avec massif d'appui en béton, 2026-2027) et des essais permettant de montrer la capacité à réaliser les différentes étapes de construction des scellements.

Ces essais sont systématiquement associés à des modélisations numériques permettant ainsi le développement des modèles et l'amélioration de leurs capacités de prédiction. L'un des enjeux concerne le développement de modèles capables de simuler le comportement couplé HMC-gaz des composants du dispositif de fermeture et de prédire leur évolution à long terme.

- Conclusions

Cette contribution propose une vue d'ensemble des grands enjeux technologiques et scientifiques attachés au système de fermeture de Cigéo et des exemples concrets de réalisations et résultats obtenus. Les scellements, composants de la sûreté à long terme, sont les seuls ouvrages construits du stockage qui doivent remplir leur fonction durant toute la vie de l'installation.

## Références

1. Sellin P, Leupin OX. The Use of Clay as an Engineered Barrier in Radioactive-Waste Management, A Review. Clays and Clay Miner. 2013; 61(6):477–98.
2. Zeng, Z., Cui, YJ. & Talandier, J. Investigating the swelling pressure of highly compacted bentonite/sand mixtures under constant-volume conditions. Acta Geotech. 17, 2573–2580 (2022). <https://doi.org/10.1007/s11440-021-01352-0>
3. De La Vaissière R., Talandier J., More than ten years of hydration of an in situ large-scale sealing experiment (NSC), Meuse/Haute-Marne Underground Research Laboratory, France, Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, Volume 18, Issue 1, 2026, Pages 20-38, ISSN 1674-7755, <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2025.03.038>.