

**Constat d'experts concernant StocaMine - MDPA Wittelsheim.**  
**Résultats des mesures de contraintes du terrain au moyen de la**  
**fracturation hydraulique dans les zones de déstockage de colis**  
**de déchets situées dans les blocs 12, 21 et 23 (mesures réali-**  
**sées en octobre 2015)**

---

Donneur d'ordre : Mines de Potasse d'Alsace (MDPA)  
Avenue Joseph Else - B.P. 50  
F 683010 Wittelsheim

Preneur d'ordre : K-UTEC AG Salt Technologies  
Am Petersenschacht 7  
99706 Sondershausen

Chargé du dossier : Dr.-Ing. Axel Stäubert  
Expert assermenté, agréé par la CCI d'Erfurt en matière de géotechnique (géomécanique et géologie de l'ingénieur), notamment pour les mines de sel

Sondershausen, le 19 novembre 2015

Dr. Volker Asemann  
Comité de direction

Dr. Axel Stäubert  
Chef de service géomécanique/extraction minière

## Sommaire

### TOC

### Récapitulatif des annexes

- Annexe 1 StocaMine. Projection verticale avec implantation du site de stockage de déchets et des vieux travaux dans les veines de potasse et des forages de mesure dans la zone de déstockage {Source : MDPA, 02/2015}
- Annexe 2 Documentation photographique StocaMine - Mines de Potasse d' Alsace (visites des 19 et 20 octobre 2015)
- Annexe 3 Formulaire de saisie des mesures de contraintes par sondage au moyen de la *fracturation hydraulique*, F4 - MDPA jusqu'à F7 - MDPA (10/2015)
- Annexe 4 Détermination in situ des contraintes au moyen de la *fracturation hydraulique* – Procédure écrite, Document de Management de la qualité : QM75AA501

### Table des illustrations

#### TOC

### Sommaire des tableaux

#### TOC

## 1 Mission

La DREAL (Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement), autorité minière chargée de la fonction d'inspection du travail pour les mines, a pris un *Arrêté de police des mines* en juillet 2015 imposant entre autres ce qui suit à la société *Mines de Potasse d'Alsace (MDPA; StocaMine)*<sup>1)</sup> :

- o mesures d'accompagnement, notamment mesures de contraintes des terrains et études selon les préconisations de la présentation/du rapport d'expertise de K-UTEC AG des 7 et 28 juillet 2015<sup>2)</sup>, rapport comportant une évaluation d'experts de la possibilité de reprise des travaux de déstockage de colis comprimés par le toit,

car des contrôles par mesures de fracturation hydraulique permettent d'obtenir des informations actuelles et de clarifier la situation géomécanique dans le *bloc 21* et les zones de déstockage avoisinantes, et notamment de vérifier les contraintes et la perte de cohésion du terrain en fonction de la situation d'exploitation des veines sus-jacentes. Cela vaut notamment pour l'incidence supposée des piliers résiduels ou de portions de gisement abandonnées dans les vieux travaux (longues tailles foudroyées) dans les deux veines de potasse sus-jacentes, et pour la détermination actuellement en cours des contraintes réelles au niveau de certains piliers choisis, et donc pour le pronostic quant à l'ampleur des efforts à déployer pour le déstockage<sup>2)</sup>.

En vue de préparer cette mission, l'expert s'est rendu sur place et a procédé à une visite du site minier, suivie de discussions de concertation, les 6 et 7 septembre 2015 à Wittelsheim.

## 2 Documentation des mesures de contraintes selon le procédé de la *fracturation hydraulique*

La société *K-UTEC AG Salt Technologies Sondershausen*, anciennement : *Institut de recherche sur la potasse (Kaliforschungsinstitut/ Kali-Umweltechnik GmbH)*, *Sondershausen*, a conduit, entre 1979 et fin octobre 2015 un total de 27 938 mesures de fracturation hydraulique, sur un total de 1 658 forages dans des sites miniers, dont 61 mesures sur le site de Mines de Potasse d'Alsace (4 forages). Depuis les années 1986/87, la mesure de contraintes dans des forages au moyen de la *fracturation hydraulique*, s'est imposée comme un outil fiable et indispensable d'évaluation géotechnique des contraintes in situ pour l'industrie d'extraction du sel en Allemagne centrale {[1] jusqu'à [6]}. Cette méthode de mesure permet de déterminer efficacement la contribution du plus petit tenseur de contrainte

1) *Arrêté de police des mines* du Directeur de la DREAL, Monsieur Mark Hoeltzel, Strasbourg, du 23/07/2015. 2 p.

2) STÄUBERT, A. ; ASEMAN, V. ; FLIß, Th. :  
*Constat d'experts concernant StocaMine - MDPA Wittelsheim. Evaluation géomécanique de la tenue des toits et des parements dans le contexte du déstockage des déchets dans le bloc 21. - K-UTEC Sondershausen, 28/07/2015. 29 p. 2 annexes.*

d'un secteur donné. Dans le cadre d'une surveillance métrologique complexe, les mesures de contraintes réalisées au moyen de la *fracturation hydraulique* fournissent des paramètres très précis pour chaque emplacement de mesure en termes :

- de constat d'experts et de surveillance pendant la phase d'exploitation,
- de dimensionnement, de configuration et d'optimisation de l'exploitation, de dimensionnement des ouvrages de cuvelage,
- de concepts de désaffectation et d'étude d'ouvrages de fermeture ou de confinement,
- d'analyses de sécurité pour la période de l'après-mine,
- de dérivation de critères d'évaluation scientifiquement fondés pour l'exploitation, la réhabilitation, le confinement et la valorisation des vides miniers dans les mines de sel, et pour tous types de problématiques ayant trait à la sécurité minière,
- de démonstration de l'exploitation sûre, ou de la continuation sûre de l'exploitation de sites de stockage souterrains de déchets ultimes, y compris du remblaiement de mines à l'aide de déchets autres que miniers, et
- de validation de modèles et de calculs de modélisation géomécaniques.

Les travaux de recherche et de développement entrepris à ce titre par la société *K-UTEC AG Sondershausen*, anciennement : *Institut de recherche sur la potasse (Kaliforschungsinstitut/ Kali-Umwelttechnik GmbH)*, en matière d'instrumentation et d'interprétation des mesures conduites par fracturation hydraulique depuis le milieu des années 1980<sup>3)</sup> ont également formé la base de la réalisation du programme de mesures sur le site minier de la société MDPA.

Tableau 1 Qualification des collaborateurs scientifiques et techniques de la société K-UTEC AG pour la réalisation de la mission

Nom, prénom	Profession, diplôme universitaire / année d'obtention	actif dans les travaux de R&D dans les mines de sel depuis <sup>*)</sup>	Agréé pour les travaux au fond depuis
Stäubert, Axel	Ingénieur diplômé de géotechnique (1984), Docteur-ingénieur (1986) ; Expert assermenté, agréé en matière de géotechnique (1996) ; <i>Chef de projet</i>	1983	1979
Sickel, Thorsten	Technicien diplômé d'État (diplôme obtenu en 1995)	2000	1986
Neubert, Olaf	Titulaire d'un CAP d'électronicien (diplôme obtenu en 1978)	1981	1981

<sup>\*)</sup> Jusqu'à fin 1991 : Institut de recherches sur la potasse (Kaliforschungsinstitut Sondershausen), Division Recherches sur la sécurité minière ; à partir du 01/02/1992 : Kali-Umwelttechnik GmbH Sondershausen ; à partir du 01/01/2008 : K-UTEC AG Salt Technologies Sondershausen.

<sup>3)</sup> Projet de R&D "Mise au point d'un système de mesure assisté par ordinateur pour la mesure de contraintes in situ à l'aide du procédé de fracturation hydraulique dans des terrains salifères et rocheux". - Projet subventionné par une aide à l'innovation du Ministère de l'économie allemand (BMWi), référence : IFP-1686, référence du dossier de subvention : ZI0314 ; durée : du 01/10/1993 jusqu'au au 31/10/1995.

Dans le cadre d'une série de mesures réalisées au titre d'une investigation géomécanique approfondie dans les zones de déstockage de déchets situées dans les *blocs 12, 21 et 23* du site de stockage de déchets des *Mines de Potasse d'Alsace* en octobre 2015, quatre forages d'une longueur respective de 12 m ont été réalisés. Dans ces quatre forages, *K-UTEC AG* a réalisé des 61 mesures de contraintes géomécaniques au moyen de la *fracturation hydraulique* (31 essais de fracturation (primaire ou essais "frac"), et 30 essais de fracturation secondaires (ou essais "re-frac").

Les sites d'implantation des forages sont représentés sur les projections horizontales (détails), figures 1 et 2. Les mesures de *fracturation hydraulique* avaient pour objectif la détermination in situ des contraintes géomécaniques et de la déstabilisation des piliers aux abords des zones de déstockage, en tenant compte des effets des exploitations antérieures dans les veines de potasse sus-jacentes.

Le tableau 1 fournit un aperçu des mesures de contraintes précédemment effectuées sur le site de MDPA au moyen de la *fracturation hydraulique*.

Tableau 2 Récapitulatif des mesures des contraintes à l'aide de la *fracturation hydraulique* dans la mine de sel Joseph Else de MDPA à Wittelsheim

Forage	Implantation du site de mesure	Période de mesure	Nombre d'essais de fracturation		
			Fracturation (primaire)	Fracturation secondaire	Σn
F1-MDPA	Forage vertical montant F-SM-01/14, <i>Vam RAJ3</i>	05/2014	6	6	12
F2-MDPA	Forage horizontal F-SM-02/14, <i>Vam RAJ3</i>	05/2014	6	7	13
F3-MDPA	Forage vertical descendant F-SM-03/14, <i>Vam RAJ3</i>	05/2014	9	19	28
<b>Mesures de contrôle réalisées par IfG Leipzig<sup>4)</sup> (05/2014) :</b>			21	32	53
F4-MDPA	<i>Allée centrale - bloc 23</i> , pilier d'assez grandes dimensions 23/2- <i>Vam AQ10</i>	10/2015	9	9	18
F5-MDPA	<i>Bloc 21</i> , galerie A1R8 ; pilier A1R8-A1R7 / 21/1-21/2	10/2015	10	9	19

4) WIEDEMANN, M. & T. POPP :  
In-Situ Stress Measurement Planned Pilot Dam Location StocaMine. Field Test Report No. 1. - Institut für Gebirgsmechanik GmbH [Société Institut de géomécanique], Leipzig, 21/07/2014. 14 p., 7 annexes.

Forage	Implantation du site de mesure	Période de mesure	Nombre d'essais de fracturation		
			Fracturation (primaire)	Fracturation secondaire	$\Sigma n$
F6-MDPA	Bloc 21, allée 21/2 ; pilier A2R6-A2R7 / 21/2-21/3	10/2015	7	7	14
F7-MDPA	Allée centrale - bloc 12, pilier 12/1-12/2 / A1R1	10/2015	5	5	10
<b>Mesures de contrôle réalisées par K-UTEC Sondershausen (10/2015) :</b>			31	30	61
<b>Total :</b>			52	62	114

Chaque *forage de fracturation hydraulique* a été documenté de manière détaillée au moyen d'un formulaire de relevé normalisé quant à sa situation minière, géologique, tectonique et géomécanique (cf. Annexe 3). Les résultats du test de *fracturation hydraulique* ont été récapitulés sous forme de synthèse dans un tableau.

Les sites d'implantation des essais sont présentés à l'Annexe 1 sous forme d'une projection globale, et dans les figures 1 et 2, sous forme de détails, qui indiquent également les emplacements de prise des clichés photographiques récapitulés à l'Annexe 2.

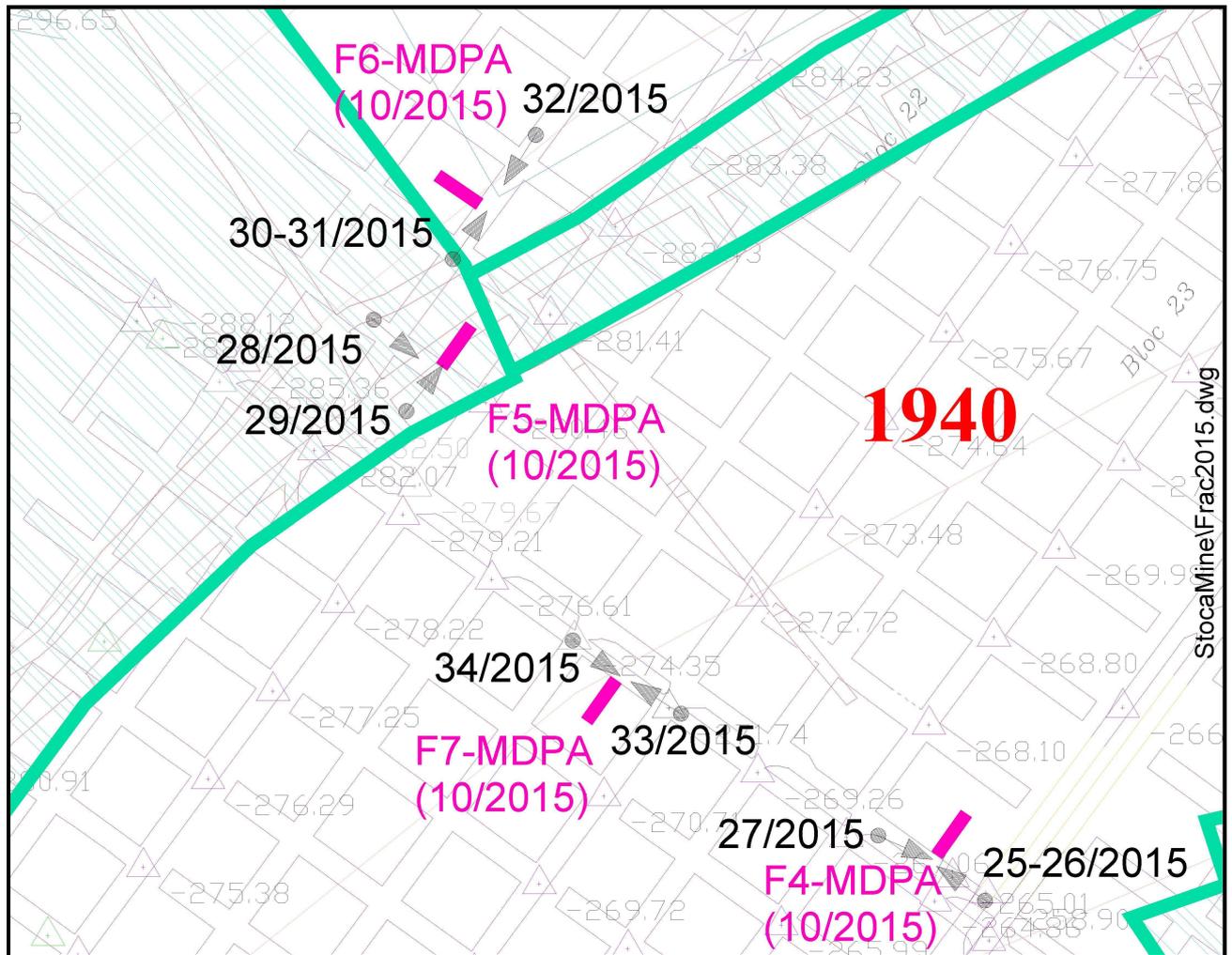


Figure 1 Implantation des forages de mesure dans la zone de déstockage des colis de déchets

A titre d'Annexe 4, nous avons fourni la procédure écrite en vigueur "*Détermination in situ des contraintes à l'aide du procédé de fracturation hydraulique*" (document de Management de la qualité de la société K-UTEC AG, réf. QM75AA501) ; cette procédure contient également des précisions sur les bases théoriques de cette méthode de mesure.

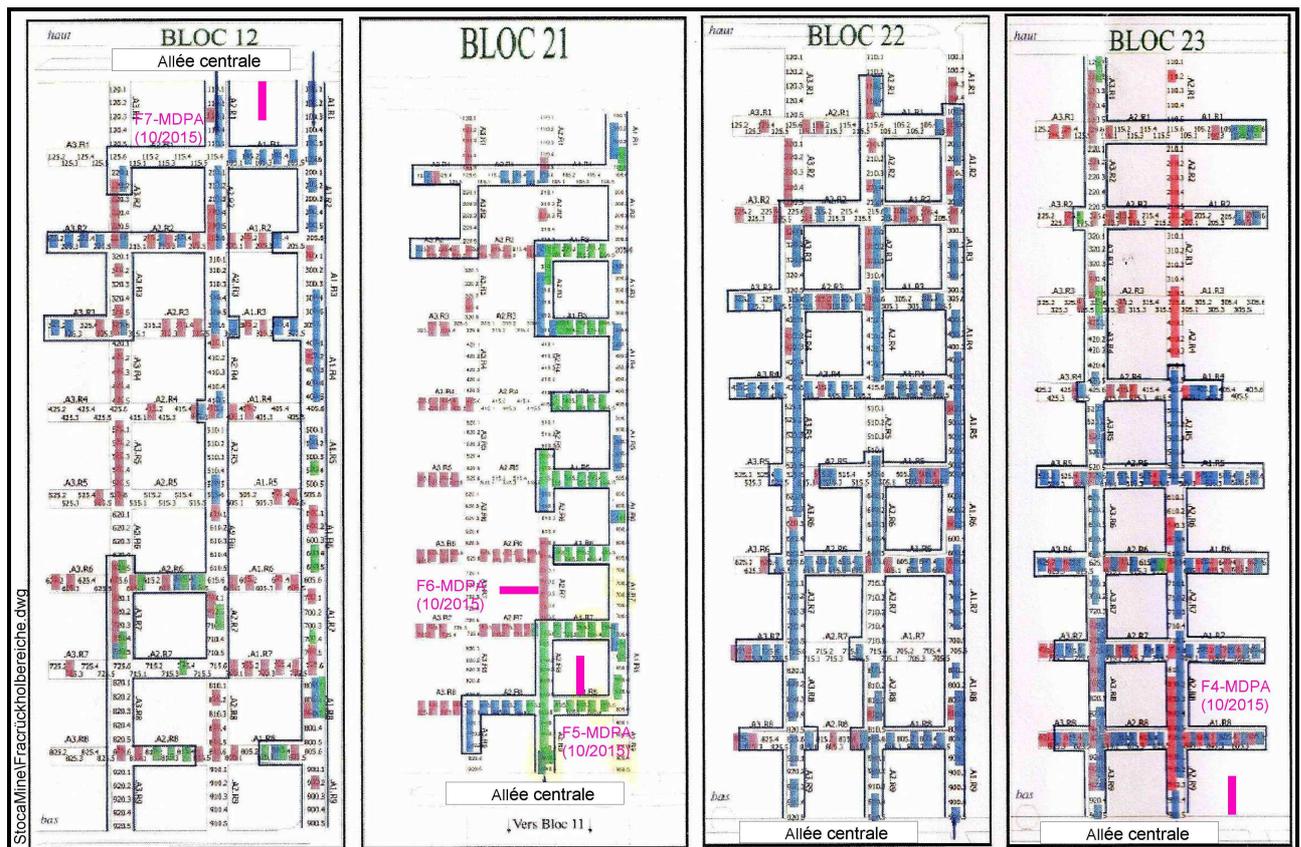


Figure 2 Représentation détaillée des forages de fracturation hydraulique mesurés

### 3 Investigations de Ifg GmbH de Leipzig par fracturation hydraulique en mai 2014

Les seules mesures de contraintes par fracturation hydraulique effectuées jusqu'ici dans la zone de stockage de MDPa ont été réalisées en mai 2014 au niveau de trois forages, par la société Ifg GmbH de Leipzig [6]. La figure 3 et l'Annexe 1 montrent l'implantation du point de mesure au niveau du pilier de sécurité du puits *Joseph* dans la zone située au sud-ouest du site de stockage ; dans ce périmètre, aucune des deux veines de potasse sus-jacentes n'a été exploitée.

Les mesures ont été réalisées sur un forage horizontal, un forage vertical montant et un forage vertical descendant.

Les résultats de mesure correspondaient aux attentes ; globalement, les pressions de repos après fracturation hydraulique étaient "*normales*", c'est-à-dire relativement faibles, de même que les contraintes du terrain mesurées à ces endroits ; néanmoins, on a pu noter une zone de perturbation au niveau du mur (sol) allant jusqu'à une profondeur d'env. 1,5 m (cf. figure 4, à droite) :

- Forage vertical montant F-SM-01/14 : Pression de repos 05/2014 :  $p_R \approx 10$  MPa,

1 ... 3 m de perte de cohésion au niveau du toit,  
 $\sigma_{Pf} = 15 \text{ MPa}$  ;

Charge réelle du pilier :

- Forage horizontal F-SM-02/14 : Pression de repos 05/2014 :  $p_R \leq 10,6 \text{ MPa}$ ,  
perte de cohésion au niveau du parement jusqu'à env. 1 m du contour, Charge réelle du pilier :  $\sigma_{Pf} = 11 \dots 16 \text{ MPa}$  ;
- Forage vertical descendant F-SM-03/14 : Pression de repos 05/2014 :  $p_R > 9,2 \dots (11) \text{ MPa}$ ,  
perturbations du mur (sol) sur 1,5 m , Charge réelle du pilier :  $\sigma_{Pf} = 14 \dots 16 \text{ MPa}$ .

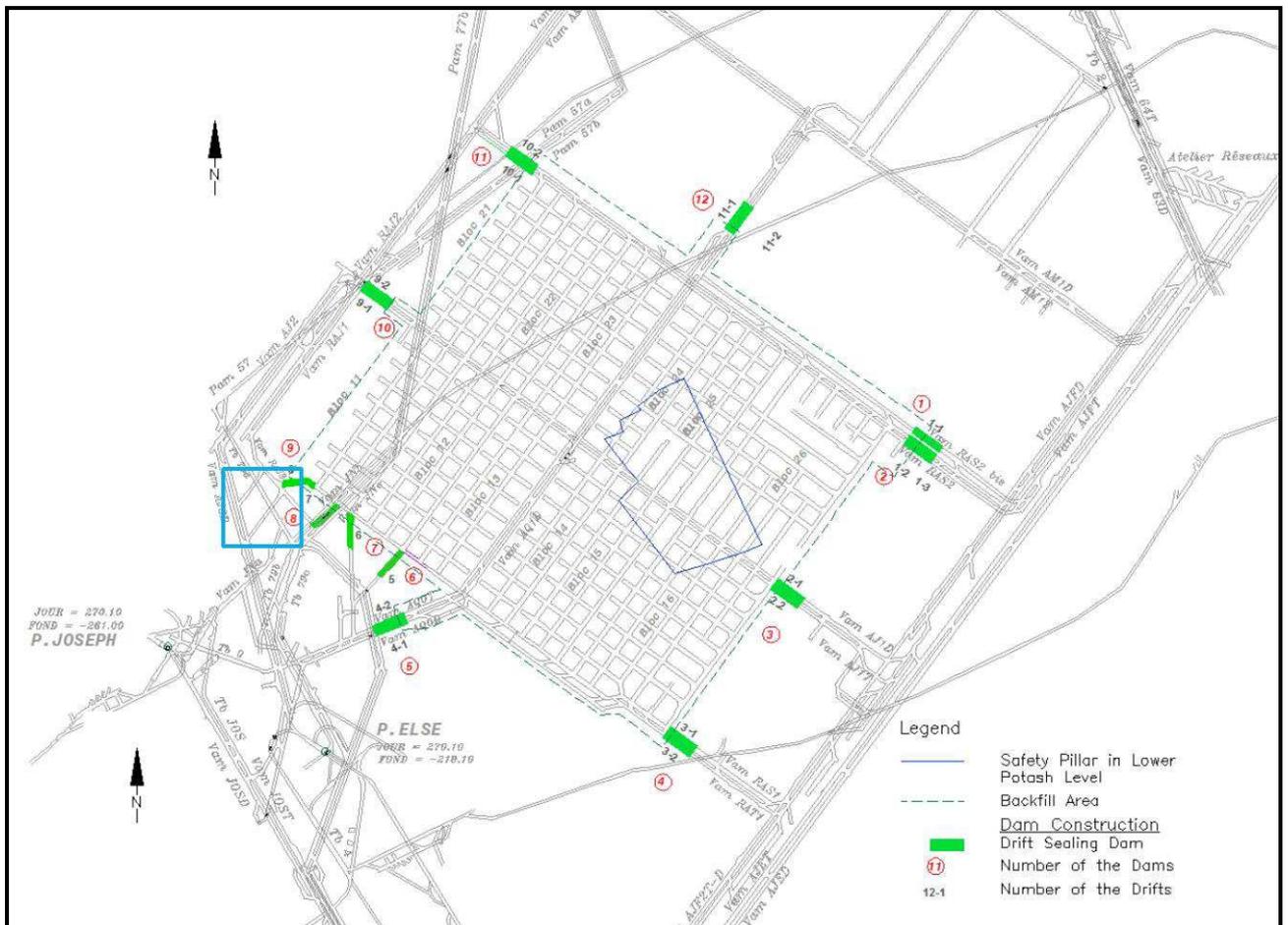


Figure 3 "In-Situ Stress Measurement at the planned Pilot Dam" {IfG Leipzig, 2014 [6]}

Forage vertical montant F-SM-01/14	Forage horizontal F-SM-02/14	Forage vertical descendant F-SM-03/14
------------------------------------	------------------------------	---------------------------------------

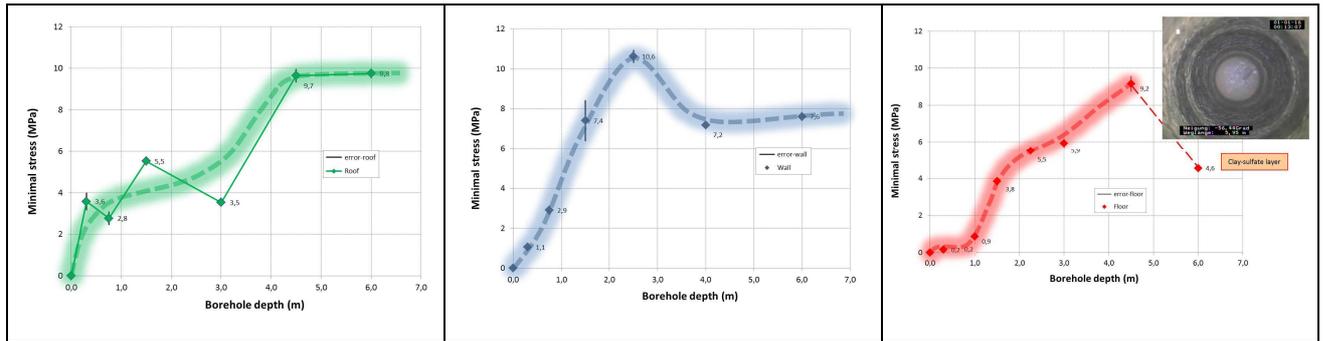


Figure 4 „Stress distribution with depth in the roof (F-SM-01/14), in the wall (F-SM-02/14), in the floor (F-SM-03/14)” {IfG Leipzig, 2014}

Par ses mesures, la société IfG Leipzig a ainsi relevé une situation d'exploitation quasi intacte, présentant des pertes de cohésion uniquement au niveau du mur, ce qui est très favorable pour le projet de construction des barrages de fermeture.

En vertu de l'expérience étendue de *K-UTEC AG* dans l'exploitation de potasse et de sel gemme en Allemagne, on pouvait supposer que la situation géomécanique dans le *bloc 21* qui nous intéresse, mais également dans d'autres blocs du site de stockage de déchets, allaient différer considérablement de ces résultats de mesure recueillis dans le périmètre du pilier de sécurité du puits ; cette affirmation restait néanmoins à étayer par des résultats de mesure (voir plus bas).

#### 4 Conditions de base et spécificités des mesures de contraintes au moyen de la *fracturation hydraulique* dans la zone de déstockage

- La réalisation des forages de mesure requis a été confiée à la société *Schachtbau GmbH de Nordhausen* ; la société *K-UTEC AG* de son côté a fourni un kit de forage spécial et l'adaptateur pour le train de tiges de forage.
- Le diamètre des forages était de 46 mm.
- Le forage a été réalisé à sec, avec rinçage à l'air (un compresseur injectait de l'air pour chasser les déblais ou poussières de forage), et à faible vitesse de rotation (forage dans le plein).
- Les emplacements exacts des forages ont fait l'objet d'une concertation, le 07 septembre 2015, au cours d'une visite sur place (cf. figures 1 et 2 et Annexe 1).
- Etendue des travaux : 4 forages horizontaux dans le plein d'une longueur de 12 m chacun. Les travaux ont été menés de front sur deux sites de forage simultanément, avec deux techniciens de *K-UTEC AG* et deux systèmes de fracturation hydraulique.

- Les consignes fondamentales applicables à la réalisation de relevés sur des forages in situ sont régies par une Directive de travail, assortie de Consignes de sécurité des travailleurs (Annexe 4).
- Observations réalisées/ spécificités constatées au cours des mesures (cf. formulaires de relevé des opérations de fracturation hydraulique, Annexe 3) :
  - **F4 - MDPA - allée centrale - bloc 23, pilier 23/2-Vam AQ10 :**

Au niveau du parement, à 0,75 m en direction nord-ouest du forage F4, nous avons détecté une fissure verticale d'une amplitude de 10 mm, et à 0,65 m au sud-est du forage, une fissure verticale d'une amplitude de 4 mm.

A une profondeur de 1,2 m du forage, une couche plus dure a été détectée ; à partir d'une profondeur de 6,3 m, nous avons détecté une couche argileuse (roche dolomitique ? carbonatée ?).

Immédiatement après les travaux de foration, le forage, d'une profondeur totale de 12 m, n'a pu être équipé que jusqu'à une profondeur de 9,0 m.
  - **F5 - MDPA - bloc 21, galerie A1R8 ; pilier A1R8-A1R7 / 21/1-21/2 :**

Au niveau du parement, à 1,0 m en direction du sud-est du forage F5, nous avons détecté une fissure d'une amplitude de 5 mm.

Aucune particularité n'était à signaler au cours du forage ; le sel gemme rencontré était relativement "tendre".
  - **F6 - MDPA - bloc 21, galerie 21/2 ; pilier A2R6-A2R7 / 21/2-21/3 :**

sel gemme entre 0 et 7,4 m de profondeur ; à une profondeur respective de 7,4 m et de 8,3 m, nous avons percé une couche (carbonatée ?) de roche argileuse.

Immédiatement après les travaux de foration, le forage, d'une profondeur totale de 12 m, n'a pu être équipé que jusqu'à une profondeur de 7,5 m.
  - **F7 - MDPA - allée centrale - bloc 12, pilier 12/1-12/2 / A1R1 :**

La trajectoire de forage a suivi par endroits une couche argileuse d'une épaisseur d'env. 8 cm, probablement d'origine dolomitique ; cette situation a eu un impact négatif sur la stabilité du forage et a entraîné la perte d'une sonde.

Roches rencontrées dans ce forage : sel gemme de 0 à 3,6 m de profondeur, puis de 3,6 m jusqu'à 6,8 m de profondeur, présence de roche argileuse (anhydritique ou dolomitique ?), et enfin, de nouveau une couche de sel gemme à partir d'une profondeur de 6,8 m. Le forage, d'une profondeur totale de 12 m, a été mesuré depuis le fond du forage jusqu'à une profondeur de 6,0 m à l'aide d'une sonde ; juste après la marque des 6,0 m, la sonde s'est coincée (probablement par suite de chutes de roche argileuse) ; toutes les tentatives de retrait de la sonde

ayant échoué, la sonde est restée en place à 6 m. Les mesures durent alors cesser au niveau de ce forage, mais l'objectif de l'investigation a été atteint.

Force a été de constater, tant au niveau des travaux de forage qu'au cours des mesures de fracturation hydraulique, que le sel gemme tertiaire rencontré se distingue fortement des roches salifères du Zechstein et du calcaire coquillier (Muschelkalk) moyen.

Du fait de l'alternance de couches de sel gemme et de couches d'anhydrite et/ou de roches argileuses, le parement présente certes une résistance "*normale*" pour du sel gemme, (cf. section n° 6), mais également une très forte hétérogénéité. Cette dernière explique entre autres les difficultés de forage et d'exécution des mesures, d'autant plus que, conformément à nos attentes, aucune surcontrainte n'a été détectée.

Des couches argileuses/d'anhydrite plus épaisses, comme celles rencontrées dans le forage F7 - MDPA, peuvent contribuer à la déstabilisation de forages "*neufs*", tout comme la stratification alternée de couches de halite et de fines couches d'anhydrite ou de roche argileuse, et entraîner ainsi la perte de sections des canaux de mesure voire la perte de sondes ; à titre de comparaison, dans les formations du Zechstein présentes en Allemagne, ce genre de phénomènes se limite aux couches de carnallite fortement perturbées (déstabilisées).

Aussi, pour d'éventuelles mesures de fracturation hydraulique à prévoir par la suite dans la zone de déstockage, il conviendra de mieux prendre en compte la stratification fine des couches de sel gemme, en orientant la direction du forage et notamment l'angle de forage (horizontal, vertical montant ou descendant) des forages de mesure vers des formations à stratification la plus homogène possible, à savoir en évitant la présence de grosses couches de roche argileuse ou anhydrite.

## 5 Evaluation des résultats de mesure

Le tableau 3 récapitule les résultats de mesure des quatre forages de contrôle ; aucune valeur de mesure critique n'est à signaler. Il n'y a lieu de craindre aucune restriction en termes de stabilité dans les zones de déstockage des *blocs 12, 21 et 23*.

La figure 5 récapitule les diagrammes d'évaluation y afférentes :

Tableau 3 Récapitulatif des pressions de repos déterminées au mois d'octobre 2015 au cœur des piliers

Forage	Implantation du site de mesure	Période de mesure	Profondeur [m]	Pression de repos moyenne au cœur des piliers (entre parenthèses : maximum) [MPa]
F4 - MDPA	Allée centrale - bloc 23, pilier d'assez grandes dimensions 23/2-Vam AQ10	10/2015	537	10,4 ± 0,5 (11,0)
F5 - MDPA	Bloc 21, galerie A1R8 ; pilier A1R8-A1R7 / 21/1-21/2	10/2015	553	10,7 ± 0,5 (11,3)
F6 - MDPA	Bloc 21, allée 21/2 ; pilier A2R6-A2R7 / 21/2-21/3	10/2015	555	8,1 ± 0,4 (8,5)
F7 - MDPA	Allée centrale - bloc 12, pilier 12/1-12/2 / A1R1	10/2015	546	11,9 ± 0,9 (13,0)

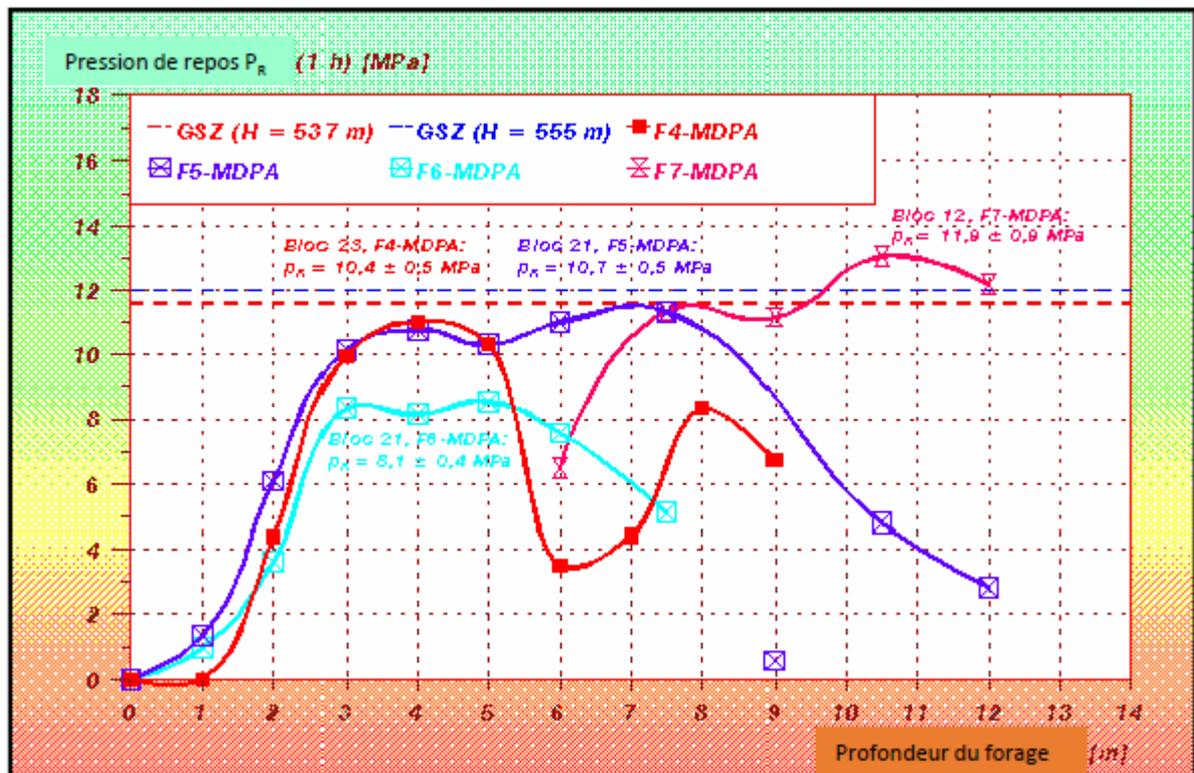


Figure 5 MDPA, blocs 12, 21 et 23. Tests de fracturation hydraulique, octobre 2015.

Certaines variations de paramètres au niveau d'un même forage résultent de variations localement très circonscrites dans la structure du sel (cf. ci-dessus) ; elles sont néanmoins normales à l'intérieur du volume géologique ; la dispersion des caractéristiques n'est en aucun cas liée à des défauts techniques de l'instrumentation.

Globalement, les pressions de repos mesurées après la fracturation hydraulique étaient "normales", c'est-à-dire relativement faibles. Néanmoins, on a pu noter une zone de perturbation marquante au niveau du mur (sol) allant jusqu'à une profondeur d'env. 1,5 m au niveau de la galerie simple Vam RAJ3, au niveau du site d'implantation prévu d'un barrage pilote (cf. figure 4, à droite) [6], et une zone de perturbation allant jusqu'à env. 1 m de profondeur à partir du contour dans les forages F4 jusqu'à F6 - MDPA (cf. figure 5 ; au niveau de F7 - MDPA, la prise de mesures proche du contour n'a pas été possible du fait de l'instabilité marquée du forage).

Dans le périmètre proche du contour des piliers, tous les forages horizontaux ont donné lieu à la détection de "petites zones de forte contrainte au repos", de l'ordre de 11 à 13 MPa (pression de repos), ou de 16 à 19 MPa (charge réelle du pilier). Plus on s'approche du cœur de pilier, plus la charge diminue en règle générale, ce qui peut également être dû à une variation localement très circonscrite de la structure du sel (p. ex. au niveau de F4 - MDPA, dans la section située entre 6 et 7 m du forage, et dans F5 - MDPA, on rencontre un sel gemme relativement "tendre" et mou → il en résulte des instabilités/fissurations et un transfert irrégulier de la pression de repos à une profondeur de 9 m ; il en est de même pour F6 - MDPA, à une profondeur de 7,5 m ; cf. figure 5 et formulaire de relevé, Annexe 3).

Le tableau 4 fournit un comparatif des pressions de repos mesurées au cœur des piliers, des charges réelles estimatives déduites à partir des pressions de repos, et des charges théoriques des piliers (y compris pour les 3 forages réalisés par IfG [6]) :

Tableau 4 Comparatif des pressions de repos déterminées pour le cœur des piliers, des charges réelles estimatives déduites à partir de ces dernières et des charges théoriques des piliers

Forage	Implantation du site de mesure	Pression de repos moyenne (maximum) [MPa]	Charge réelle du pilier [MPa]	Charge théorique du pilier [MPa]
<b>F1 - MDPA</b>	Forage vertical montant F-SM-01/14, Vam RAJ3 [IfG, 2014]	≈ 10	15	12,0
<b>F2 - MDPA</b>	Forage horizontal F-SM-02/14, Vam RAJ3 [IfG, 2014]	≤ 10,6	11 à 16	12,0
<b>F3 - MDPA</b>	Forage vertical descendant F-SM-03/14, Vam RAJ3 [IfG, 2014]	> 9 à (11)	14 à 16	12,0
<b>F4 - MDPA</b>	Allée centrale - bloc 23, pilier d'assez grandes dimensions 23/2-Vam AQ10	10,4 ± 0,5 (11,0)	15 à 16,5	16,4

Forage	Implantation du site de mesure	Pression de repos moyenne (maximum) [MPa]	Charge réelle du pilier [MPa]	Charge théorique du pilier [MPa]
F5 - MDPA	Bloc 21, allée A1R8 ; pilier A1R8-A1R7 / 21/1-21/2	10,7 ± 0,5 (11,3)	16 à 17	19,3
F6 - MDPA	Bloc 21, allée 21/2 ; pilier A2R6-A2R7 / 21/2-21/3	8,1 ± 0,4 (8,5)	12 à 13	19,4
F7 - MDPA	Allée centrale - bloc 12, pilier 12/1-12/2 / A1R1	11,9 ± 0,9 (13,0)	17 à 19,5	19,1

Les effets des exploitations antérieures sur le site de stockage souterrain de déchets de Stocamine, creusé en dernier dans le sel gemme, se caractérisent comme suit : creusement du site de stockage de *Stocamine* dans le sel gemme, à env. 20 m au-dessous de la veine de potasse inférieure, située à son tour à env. 20 m au-dessous d'une deuxième veine de potasse sus-jacente. Cette situation constitue en tant que telle une "**taille de détente**", à savoir que le site de stockage a été creusé dans des conditions géomécaniques favorables.

D'un autre côté, il a fallu s'attendre à des accumulations de contraintes indésirables, émanant des piliers résiduels et des bordures de secteur d'exploitation des vieux travaux dans le sel gemme, car ces configurations "attirent les contraintes". Ce phénomène a d'ailleurs été démontré à de multiples reprises, notamment dans les mines de sel en Allemagne exploitant plusieurs veines superposées {cf. [8], section 3}.

Les accumulations de contraintes et les "*effets de poinçonnement*" ont eu un impact négatif sur la stabilité des contours des derniers creusements effectués = *StocaMine*, situés en-dessous des vieux travaux, une exploitation menée par longue taille foudroyée dans les veines de potasse sus-jacentes (cf. figure 6).

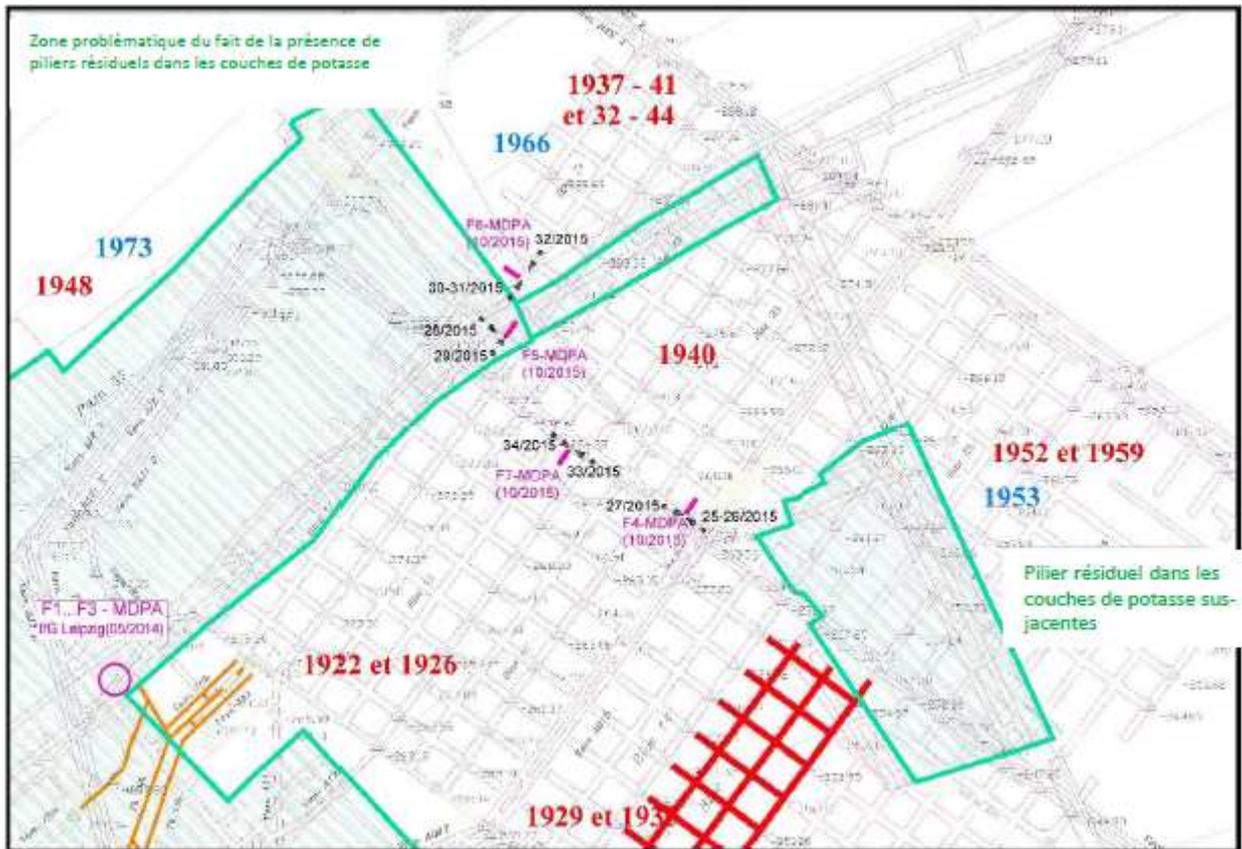


Figure 6 Mise en relation des mesures de fracturation hydraulique actuelles avec la situation d'exploitation des vieux travaux de la mine de potasse sus-jacente

En bonne logique, des surcontraintes ont dû être présentes temporairement sous les bordures des piliers résiduels laissés dans les vieux travaux sus-cacents, après le creusement du site de stockage entre 1998 et 2000, ce qui a été démontré par des taux de convergence/réduction des vides sensiblement accrus observés à ces endroits.

Des impacts sensibles sur le site de stockage de déchets souterrain ont été décelés au niveau du pilier résiduel sus-jacent aux blocs 24, 25 et suivants et bloc 21 ainsi qu'au niveau de la grande portion de gisement abandonnée touchant les blocs 21 et 11 (cf. notamment la figure 6).

L'effet de poinçonnement de la portion de gisement abandonnée, située au-dessus des blocs 24, 25 et suivants, avait été décelé selon MDPA dès le creusement des chambres de stockage, et avait conduit à abandonner un certain nombre de recoupes ; actuellement, ces zones, tributaires d'une très forte pression des terrains, présentent des déformations très importantes et ne sont plus accessibles.

Ces accumulations de contraintes, qui ont provoqué la compression des colis de déchets entre le toit et le mur par le passé, ne sont plus présentes au vu des résultats de mesure actuels réalisés au niveau du **bloc 21** (F5-F6 - MDPA) ; elles ont manifestement donné lieu à un phénomène de détente ou de déviation des contraintes. Cela permettra de réaliser les travaux de déstockage ac-

tuels dans des conditions exemptes de surcontraintes, même si la récupération de colis de déchets comprimés reste un travail exigeant du point de vue minier [8], [9].

Le forage F7 - MDPA a permis de démontrer, à l'aide de mesures actuelles, la charge théorique du pilier au niveau du **bloc 12**. Au niveau du **bloc 23**, des mesures réalisées sur un pilier d'assez grandes dimensions ont également permis de déceler l'absence de surcontraintes (F4 - MDPA).

Tous les résultats des mesures effectuées jusqu'ici indiquent l'absence de charges critiques, tant en ce qui concerne les surcontraintes, qu'en ce qui concerne l'évolution défavorable des processus de déstabilisation (absence de déstabilisation inadmissible).

D'un point de vue de la sécurité minière, il est recommandé de réaliser des mesures de fracturation hydraulique de contrôle, à mesure que le creusement/la récupération des colis de déchets progresse. Il est bien connu que les vieux travaux sus-jacents peuvent entraîner des surcontraintes en fonction de la situation d'exploitation du creusement le plus récent (soit le site de stockage de déchets), et que ces surcontraintes, qui peuvent être fortement marquées et circonscrites dans un très petit espace au sein du site de stockage, ne se laissent pas pronostiquer avec certitude par une modélisation.

## **6 Evaluation approfondie des mesures de fracturation hydraulique effectuées dans la zone de déstockage, blocs 12, 21 et 23**

La roche salifère rencontrée au cours des forages, réalisés et vérifiés par *fracturation hydraulique* en octobre 2015, avait été essentiellement homogène ; même dans la zone proche du contour jusqu'à 1 m de profondeur, la roche était étanche (imperméabilité démontrée à l'essai de fracturation primaire, puis secondaire).

Un seul forage, F4 - MDPA, présentait une déstabilisation totale jusqu'à 1 m de profondeur du contour du pilier, sans pour autant présenter un problème de sécurité.

**Déstabilisation progressive du terrain** : Outre le paramètre de la pression de repos, les tests de fracturation hydrauliques (uniques ou répétés) permettent de déterminer la résistance à la fracturation in situ  $\sigma_{AZ}$  de la roche salifère ; ce paramètre, qui est fonction de la roche elle-même, de la durée de repos, et de la déstabilisation, peut ensuite servir pour l'évaluation géomécanique du terrain. Le programme des travaux prévoyait la détermination de cette valeur pour les forages F4 jusqu'à F7 - MDPA. La résistance à la fracturation in situ  $\sigma_{AZ}$  comprend la résistance à la traction au niveau du contour du forage de mesure et représente également les forces de cohésion des grains ; elle décrit en outre les caractéristiques rhéologiques de la roche salifère. La *fracturation hydraulique* permet de déterminer cette résistance sous forme de pression différentielle entre la

fissure obtenue par fracturation primaire (*Frac*) et la réouverture de la fissure obtenue par la fracturation primaire (lors de la re-fracturation ou fracturation secondaire, appelée *Refrac*).

Le tableau 5 récapitule les valeurs moyennes de la résistance à la fracturation in situ  $\sigma_{AZ}$  pour tous les forages actuels (réalisés en 2015) (moyennes ne tenant pas compte de la déstabilisation au niveau du contour).

Tableau 5 Evaluation récapitulative des résistances à la fracturation in situ  $\sigma_{AZ}$  mesurées dans la zone de déstockage des blocs 12, 21 et 23(octobre 2015)

Forage	Implantation du site de mesure	Période de mesure	Profondeur (m)	Résistance à la fracturation in situ $\sigma_{AZ}$ [MPa]	$\sigma_{AZ}$ de ... jusqu'à [MPa]
F4 - MDPA	Allée centrale - bloc 23, pilier d'assez grandes dimensions 23/2-Vam AQ10	10/2015	537	[A 1 m du contour : 1,48] 5,24 ± 0,85	4,5...6,2
F5 - MDPA	Bloc 21, galerie A1R8 ; pilier A1R8-A1R7 / 21/1-21/2	10/2015	553	4,86 ± 1,29	3,6...7,6
F6 - MDPA	Bloc 21, allée 21/2 ; pilier A2R6-A2R7 / 21/2-21/3	10/2015	555	3,17 ± 0,56 6,75 ± 0,84	2,7...3,8 6,0...7,5
F7 - MDPA	Allée centrale - bloc 12, pilier 12/1-12/2 / A1R1	10/2015	546	6,26 ± 0,93	5,3...7,8

En fonction du degré de pureté et/ou de la cristallinité de l'halite ( $\sigma_{AZ}$  ↓) ou en fonction de l'ampleur des inclusions d'argile, d'anhydrite ou de carbonate ( $\sigma_{AZ}$  ↑), les valeurs de résistance à la fracturation dans les forages de mesure variaient entre 4 et 7,5 MPa, sans perturbation notable de la zone proche du contour au repos.

Des contaminations de plus grande ampleur, comme p. ex. sous forme de couches d'anhydrite, d'argile ou autres dans le sel gemme, typiques des formations salifères tertiaires de l'Alsace, conditionnent des résistances à la fracturation plus élevées, de l'ordre de > 6 jusqu'à 7,5 MPa.

Facteurs susceptibles de diminuer ces résistances : perturbations avancées liées au temps de repos, notamment proches du contour (p. ex. au niveau du forage F4 - MDPA avec  $\sigma_{AZ} = 1,48$  MPa à 1 m de profondeur du contour).

D'ailleurs, les 30 essais de re-fracturation d'octobre 2015 n'ont permis de fournir que de premiers indices ; ils ne sauraient constituer un constat représentatif pour l'ensemble de la zone de déstockage.

Une série de tests de re-fracturation, effectuée sur différents types de roche salifère, dans différentes mines, ont permis d'établir une moyenne des résistances à la fracturation comme suit (cf. figure 7) :

**Zechstein (Länder de Sachse-Anhalt, Thuringe, Basse-Saxe, Hesse, Rhénanie du nord - Westphalie) :**

- Carnallite stratifiée, Teutschenthal	$\sigma_{AZ} = 3,5...4,5 \text{ MPa}$
- Carnallite avec tachyhydrite, Teutschenthal	$\sigma_{AZ} = 1,5...2,5 \text{ MPa}$
- Carnallite "normale" du Harz du sud	$\sigma_{AZ} = 3...4 \text{ MPa}$
- Carnallite perturbée	$\sigma_{AZ} = 2...2,5 \text{ MPa}$
- Sel dur "normal" de type sylvinite	$\sigma_{AZ} = 3,5...6 \text{ MPa}$
- Sel dur avec anhydrite	$\sigma_{AZ} = 5...8 \text{ MPa}$
- Sel dur perturbé	$\sigma_{AZ} = 1...2 \text{ MPa}$
- Stériles de type anhydrite	$\sigma_{AZ} = 6...12 \text{ MPa}$
- Veine secondaire Hesse (carnallite/sel gemme)	$\sigma_{AZ} = 3...4 \text{ MPa}$
- Veine secondaire Hesse, perturbée	$\sigma_{AZ} = 1...2,5 \text{ MPa}$
- Sel gemme, intact	$\sigma_{AZ} = 3...5 \text{ MPa}$
- Sel gemme Stassfurt, structure plus fortement cristalline	$\sigma_{AZ} = 3...4 \text{ MPa}$
- Sel gemme Stassfurt, imperméable	$\sigma_{AZ} = 4...5 \text{ MPa}$
- Couche principale d'anhydrite (Leine)	$\sigma_{AZ} = 8...14 \text{ MPa}$
- Sel gemme Leine, structure cristalline	$\sigma_{AZ} = 3...3,5 \text{ MPa}$
- Sel gemme Leine, structure microcristalline à imperméable	$\sigma_{AZ} = 3...6 \text{ MPa}$
- Sel gemme perturbé (situation générale)	$\sigma_{AZ} = 0,5...2,5 \text{ MPa}$

**Calcaire coquillier (Muschelkalk) moyen (Bade-Wurtemberg) :**

- Sel gemme, fortement cristallisé (situation générale)	$\sigma_{AZ} = 2,5...4 \text{ MPa}$
- Sel gemme, fortement marqué par des inclusions (situation générale)	$\sigma_{AZ} = 3,5...6 \text{ MPa}$
- Formation de sel inférieure	$\sigma_{AZ} = 4...7 \text{ MPa}$
- Formation de sel stratifiée "Bändersalz" (selon la présence ou non d'anhydrite)	$\sigma_{AZ} = 8...12 \text{ MPa}$
- Couches de sulfate inférieures (en partie dolomitiques)	$\sigma_{AZ} = 10...22 \text{ MPa}$
- Formations dolomitiques inférieures	$\sigma_{AZ} = 15...35 \text{ MPa}$

**Formations tertiaires (plaine alluviale du Rhin supérieur / Alsace) :**

- Sel gemme tertiaire, finement stratifié, structure cristalline	$\sigma_{AZ} = 4...6 \text{ MPa}$
- Sel gemme tertiaire, grossier / fortement marqué par des inclusions (impuretés)	$\sigma_{AZ} = 5...7,5 \text{ MPa}$

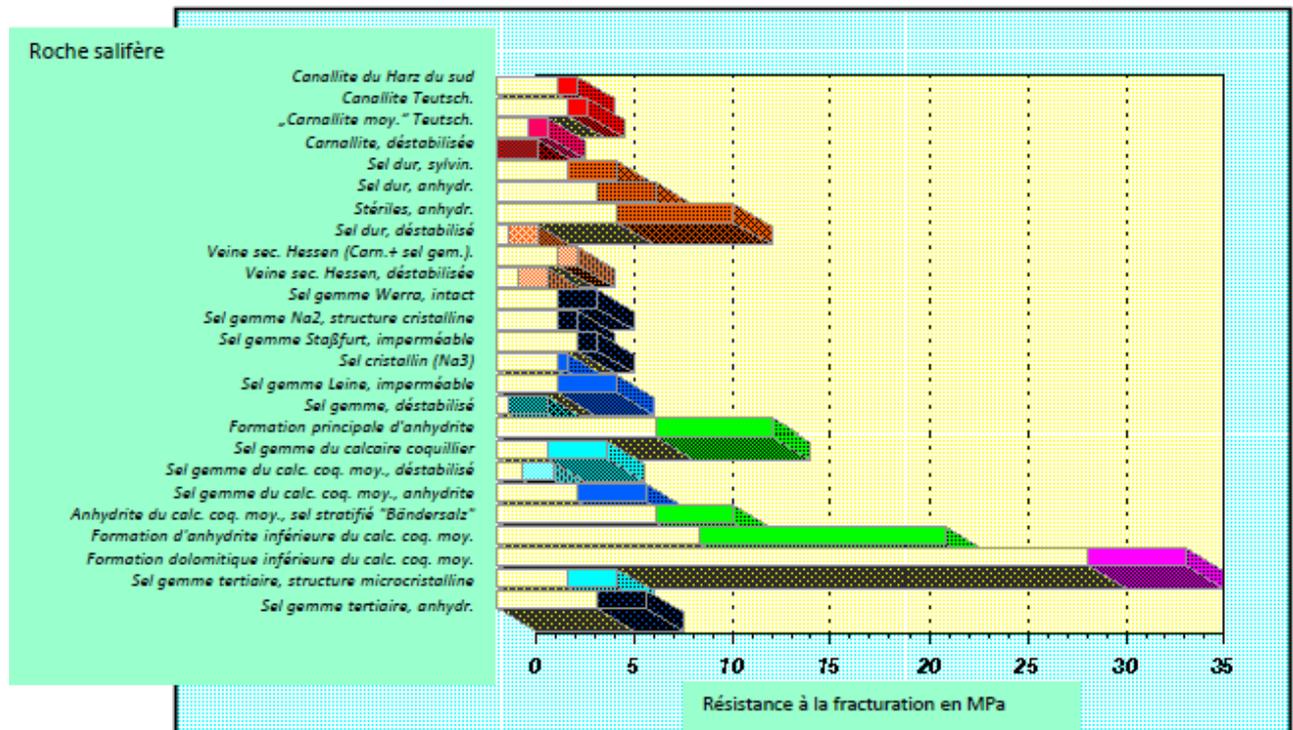


Figure 7 Résistances à la fracturation déterminées in situ au moyen de la *fracturation hydraulique* - valeurs indicatives relevées dans différentes mines de sel allemandes

## 7 Synthèse

Dans le cadre d'une investigation géomécanique approfondie des zones de déstockage de déchets situées dans les blocs 12, 21 et 23 des Mines de Potasse d'Alsace en octobre 2015, un total de 61 mesures de contraintes géomécaniques a été réalisé dans quatre forages, au moyen de la *fracturation hydraulique*.

Lors des travaux de forage et au cours des mesures de fracturation hydraulique, il a été constaté que le sel gemme tertiaire rencontré se distingue fortement des roches salifères du Zechstein et du calcaire coquillier (Muschelkalk) moyen. Du fait de l'alternance de couches de sel gemme et de couches d'anhydrite et/ou de roches argileuses, le parement présente certes une résistance "normale" pour du sel gemme, (cf. section n° 6), mais également une très forte hétérogénéité. Des variations de paramètres au niveau d'un même forage résultaient de variations localement très circonscrites dans la structure du sel, qui sont néanmoins normales à l'intérieur du volume géologique ; la dispersion des caractéristiques n'est en aucun cas liée à des défauts techniques de l'instrumentation.

Globalement, les pressions de repos mesurées après la fracturation hydraulique étaient "*normales*", c'est-à-dire relativement faibles. Nous avons détecté une déstabilisation jusqu'à une profondeur d'env. 1 m au niveau du parement au niveau des forages F4 jusqu'à F6 - MDPA, ce qui correspond bien aux fissures décelées au niveau du contour extérieur des parements.

Les effets des exploitations antérieures sur le site de stockage souterrain de déchets de *StocaMine*, creusé en dernier dans le sel gemme, se caractérisent par la localisation du site de stockage de déchets *StocaMine* en-dessous des deux veines de potasse sus-jacentes. Cette situation constitue en tant que telle une "*taille de détente*", à savoir que le site de stockage a été creusé dans des conditions géomécaniques favorables. D'un autre côté, il a fallu s'attendre à des accumulations de contraintes indésirables, émanant des piliers résiduels et des bordures de secteur d'exploitation des vieux travaux dans le sel gemme, car ces configurations "attirent les contraintes". Ce phénomène a d'ailleurs été démontré à de multiples reprises, notamment dans les sites miniers exploitant plusieurs veines superposées {cf. [8], section 3}.

Les accumulations de contraintes et les "*effets de poinçonnement*" ont eu un impact négatif sur la stabilité des contours des derniers creusements effectués = *StocaMine*, situés en-dessous des vieux travaux, une exploitation menée par longue taille foudroyée dans les veines de potasse sus-jacentes.

Ces accumulations de contraintes, qui ont provoqué la compression des colis de déchets entre le toit et le mur par le passé, ne sont plus présentes au vu des résultats de mesure actuels réalisés au niveau du **bloc 21** (F5/F6 - MDPA) ; elles ont donné lieu à un phénomène de détente ou de déviation des contraintes. Cela permettra de réaliser les travaux de déstockage actuels dans des conditions exemptes de surcontraintes, même si la récupération de colis de déchets comprimés reste un travail exigeant du point de vue minier [8], [9].

Le forage F7 - MDPA a permis de démontrer, à l'aide de mesures actuelles, la charge théorique du pilier au niveau du **bloc 12**. Au niveau du **bloc 23**, des mesures réalisées sur un pilier d'assez grandes dimensions ont également permis de déceler l'absence de surcontraintes (F4 - MDPA).

Ainsi, tous les résultats des mesures effectuées jusqu'ici indiquent l'absence de charges critiques, tant en ce qui concerne les surcontraintes, qu'en ce qui concerne l'évolution défavorable des processus de déstabilisation (absence de déstabilisation inadmissible).

D'un point de vue de la sécurité minière, il est recommandé de réaliser des mesures de fracturation hydraulique de contrôle, à mesure que le creusement/la récupération des colis de déchets progresse. Il est bien connu que les vieux travaux sus-jacents peuvent entraîner des surcontraintes en fonction de la situation d'exploitation du creusement le plus récent (soit le site de stockage de déchets), et que ces surcontraintes, qui peuvent être fortement marquées et circonscrites dans un très petit espace au sein du site de stockage, ne se laissent pas pronostiquer avec certitude par une modélisation.

## 8 Références bibliographiques :

- [1] HEYDER, D. :  
Einsatz und Vervollkommnung von Spannungs- und Deformationsmessungen zur systematischen Gebirgsüberwachung [Utilisation et perfectionnement de mesures de contraintes et de déformations pour le monitoring systématique des terrains]. Teilbericht zur Aufgabe "Experimentelle Untersuchungen zum Einsatz der Aufreißsonde [Rapport partiel dédié à la mission "Etudes expérimentales sur l'utilisation de la sonde de fracturation]". - Kaliforschung Sondershausen [Recherches sur la potasse], 12/12/1979. 28 p., inédit.
- [2] STÄUBERT, A. :  
Spannungssondierungen mittels Hydraulic Fracturing zur geomechanischen Überwachung des Carnallitabbaus im Südharz-Kaligebiet [Sondage des contraintes à l'aide de la fracturation hydraulique pour la surveillance géomécanique des mines de carnallite dans le bassin potassique du Harz du Sud].  
- Périodique Kali Steinsalz Spat [Potasse, sel gemme, spath], A, Sondershausen 13 (1989) 9, p. 145 - 152
- [3] STÄUBERT, A. :  
Spannungssondierungen mittels Hydraulic Fracturing zur geomechanischen Überwachung des Kalibergbaus im Südharz-Kaligebiet der DDR [Sondage des contraintes à l'aide de la fracturation hydraulique pour la surveillance géomécanique des mines de potasse dans le bassin potassique du Harz du Sud en RDA].  
- Périodique "Neue Bergbautechnik" (nouvelles techniques minières), Leipzig 20 (1990) 9, p. 335 - 339
- [4] STÄUBERT, A. :  
Spannungsmessungen mittels *Hydraulic Fracturing* zum Nachweis zeitabhängiger Entfestigungsprozesse im Salzbergbau (Mesures de contrainte au moyen de la *fracturation hydraulique* permettant de démontrer les processus de perte de cohésion du terrain en fonction du temps).  
- Périodique "Glückauf-Forschungshefte", Essen 59 (1998) cahier n° 4, p. 116 à 122
- [5] STÄUBERT, A. & W. LEHMANN :  
Markscheiderische und gebirgsmechanische Überwachung von Verwahrungsarbeiten in stillgelegten Südharz-Kaliwerken (Surveillance par arpentage/géomécanique de travaux de fermeture de mines de potasse désaffectées dans le Harz du sud). - Geoforschung, Geotechnik und Geoinformatik aus markscheiderisch-geodätischer Sicht; Vorträge zum 49. Berg- und Hüttenmännischen Tag 1998 in Freiberg (- La recherche géologique, géotechnique et géo-informatique, du point de vue de l'arpentage minier/géodésique, interventions dans le cadre de la 49e Journée des Mineurs 1998 à Freiberg). - Freiberg : Université technique et minière "TU Bergakademie", 1998 ; Périodique "Freiberger Forschungshefte", A 847, p. 100 à 124
- [6] WIEDEMANN, M. & T. POPP :  
In-Situ Stress Measurement Planned Pilot Dam Location StocaMine. Field Test Report No. 1. - Institut für Gebirgsmechanik GmbH [Société Institut de géomécanique], Leipzig, 21/07/2014. 14 p., 7 annexes.
- [7] STÄUBERT, A. :  
*Constat d'experts concernant StocaMine - MDPA Wittelsheim. Résultats des mesures de contrainte du terrain au moyen de la fracturation hydraulique dans les zones de déstockage*

de colis de déchets situées dans les blocs 12, 21 et 23 (plan de déroulement pour les mesures prévues en octobre 2015).

- K-UTEC Sondershausen, 10/09/2015. 7 p.

- [8] STÄUBERT, A. ; ASEMANN, V. ; FLIß, Th. :  
Constat d'experts concernant StocaMine - MDPA Wittelsheim. Evaluation géomécanique de la tenue des toits et des parements dans le contexte du déstockage des déchets dans le bloc 21.  
- K-UTEC Sondershausen, 15/09/2015. 27 p. 3 annexes.
- [9] STÄUBERT, A. & V. ASEMANN :  
Constat d'experts concernant StocaMine - MDPA Wittelsheim. Evaluation d'expert d'une nouvelle méthode de déstockage de colis de déchets dans le bloc 21 (septembre 2015).  
- K-UTEC Sondershausen, 25/09/2015. 8 p., 6 annexes.