

# STOCKAGES SOUTERRAINS ET REX MINIERS, METHODOLOGIE POUR L'APPLICATION DES NOTIONS DE TAUX DE DEFRUITEMENT

## **UNDERGROUND STORAGE AND FEEDBACK FROM MINE INDUSTRY, METHODOLOGY FOR THE APPLICATION OF THE EXTRACTION RATIO CONCEPT**

Sophie LAURENT<sup>1</sup>, Thierry YOU<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Geostock, CFMR, Rueil-Malmaison, France

<sup>2</sup> Geostock, CFMR, Rueil-Malmaison, France

**RÉSUMÉ** – Depuis 2003, les stockages souterrains français d'hydrocarbure sont soumis au Code Minier. La législation énonce des règles pouvant être utilisées pour écarter certains risques du souterrain dans les études de danger. Des cavités conçues plus récemment peuvent-elles être soumises aux retours d'expérience de l'après mine ? L'article apporte, en prenant un exemple réel, quelques éléments de réponse.

**ABSTRACT** – Since 2003, French hydrocarbon underground storages are subjected to mine industry regulations. The legislation expresses methodological rules which can be used to exclude some risks related to the underground from the hazard studies. Could or should caverns designed with the most recent methodologies be subjected to the feedback from mine industry? Elements of answer are given on a real case.

### 1. Introduction

Depuis 2003, les stockages souterrains d'hydrocarbure implantés en France sont soumis au règlement minier. A ce titre, les exploitants doivent justifier de l'exclusion de certains risques dont font partie les effondrements. De nouveaux textes énoncent les différentes règles méthodologiques pouvant être utilisées pour écarter les menaces liées au souterrain dans les études de danger. Ces règles résultent principalement des retours d'expérience français et internationaux des mines en chambres et piliers.

L'un des principes retenus pour exclure des études de danger le risque d'effondrement généralisé est que le phénomène pourra être écarté lorsque le taux de défruitement de l'excavation est inférieur à 50%. Nous commentons ici l'applicabilité des notions de taux de défruitement aux stockages souterrains de conception récente, le plus souvent composés de deux ou trois galeries parallèles.

Après une présentation de ces règles et des méthodologies récentes de conception des stockages souterrains d'hydrocarbure, l'analyse réalisée sur un cas réel de stockage est décrite : le chargement des piliers du stockage est estimé par un calcul tridimensionnel aux éléments finis, puis Il est comparé au chargement qui s'appliquerait aux piliers d'une excavation type « chambres et piliers » équivalente.

## 2. Règles méthodologiques d'exclusion des risques d'effondrement du sol

### 2.1. Cadre réglementaire

Depuis la loi n°2003-8 du 3 janvier 2003, l'ensemble des stockages souterrains de gaz naturel, d'hydrocarbures liquides, liquéfiés ou gazeux ou de produits chimiques à destination industrielle, sont régis par le Code Minier.

Cet article fera principalement référence à :

- la note technique relative à l'établissement de critères d'exclusion du risque d'effondrement au droit des stockages souterrains durant la phase d'exploitation, publiée en août 2009 par l'INERIS
- la circulaire du 10 mai 2010 qui définit les règles méthodologiques relatives aux études de danger, à l'acceptabilité de la démarche de maîtrise des risques et aux PPRT des stockages souterrains de gaz,
- le guide des règles méthodologiques applicables aux études de dangers des stockages souterrains publié par l'INERIS en décembre 2013.

### 2.2. Retour d'expérience minier, base de la recommandation de l'administration à l'égard des stockages souterrains

La circulaire du 10 mai 2010 traite notamment des risques d'effondrement du sol, localisé et généralisé. Le tableau 1 présente brièvement les règles d'exclusion applicables.

Tableau 1. Exclusion des risques d'effondrement du sol

	Risque d'effondrement localisé (ou fontis)	Risque d'effondrement généralisé
Critère d'exclusion du risque	<p><b><math>P/H &gt; 15</math></b></p> <p>P: profondeur du toit de la cavité minée H: ouverture de cette cavité</p>	<p><b><math>D/P &lt; 0.5</math></b></p> <p>D: plus petite extension horizontale du stockage P: profondeur de la cavité minée</p> <p><b>ou</b></p> <p><b>Taux de défruits &lt; 50%</b></p>

Ces critères d'exclusion sont issus des recommandations formalisées dans la note INERIS référencée DRS-09-103911-09771A. Ils sont, à la demande du législateur, volontairement simples, essentiellement géométriques et utilisables rapidement.

L'absence de retour d'expérience suffisant sur la tenue à long terme des stockages souterrains en cavités minées justifie de s'inspirer de celui acquis mondialement par les experts dans le domaine minier, sur les excavations en chambres et piliers. En France, on citera, entre autres :

- les accidents survenus dans les carrières de la région parisienne, étudiés par J-C Vachat en 1982,
- les effondrements ayant eu lieu sur des exploitations minières françaises répertoriés par J-P Josien en 1995,
- les nombreux cas d'affaissement, bien documentés, sur le bassin ferrifère lorrain.

### 3. L'applicabilité du règlement minier aux stockages souterrains d'hydrocarbure en question

L'un des principes retenus par le législateur (cf. 2.1) est que le phénomène d'effondrement généralisé peut être exclu des études de danger lorsque le taux de défrètement est inférieur à 50 %. L'applicabilité de ce critère d'exclusion est discutée ici.

#### 3.1 Méthodologies récentes de conception des stockages souterrains d'hydrocarbure

Chaque cavité de stockage est généralement constituée d'une ou plusieurs galeries principales, non revêtues, et organisées en faisceaux parallèles. Ces galeries sont reliées entre elles par des recoupes perpendiculaires de section plus faible permettant d'une part l'accès aux différents niveaux des galeries principales pendant la construction, et d'autre part la circulation des fluides stockés (phases eau, liquide et gaz) pendant l'exploitation. La section des galeries (forme et dimension) est déterminée en fonction des caractéristiques de la roche et de la profondeur. Elle est typiquement comprise entre quelques dizaines de m<sup>2</sup> dans les terrains de résistance médiocre (craies) et plusieurs centaines de m<sup>2</sup> dans des terrains résistants (calcaires massifs, roches granitiques, etc.). La longueur de galerie est très variable (de moins de 100 m à 1 km, voire davantage). Le cas le plus classique correspond à des galeries beaucoup plus longues que les recoupes largement espacées.

La profondeur d'implantation varie selon le produit à stocker et les conditions géologiques locales depuis quelques dizaines de mètres de profondeur jusqu'à 200 environ.

L'étanchéité des cavités minées est assurée par le confinement hydrodynamique. En tout point de la cavité un écoulement permanent d'eau vers le stockage, en provenance de la roche encaissante, s'oppose à toute migration du produit stocké vers l'extérieur. Si nécessaire, et en particulier dans le cas de nappes instables, peu réalimentées, ou d'écoulements naturels très anisotropes liés par exemple à des fissures, une galerie d'alimentation en eau est creusée au-dessus du toit des galeries de stockage. Un réseau de forages formant des rideaux plans au-dessus ou autour des cavités de stockage est réalisé à partir de cette galerie.

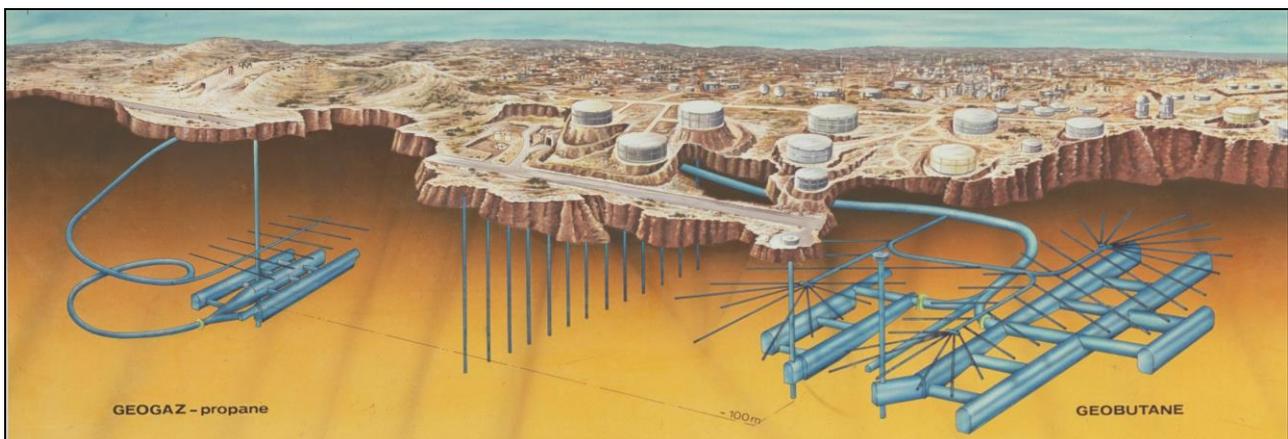


Figure 1. Stockages de GEOGAZ- implantation typique du type d'ouvrage

### **3.2 L'applicabilité de la notion de taux de défrètement aux stockages souterrains de conception récente en question**

Ce taux est défini par la circulaire (cf. § 2.1) comme étant le ratio entre la surface totale des projections au sol des cavités et la surface du polygone reliant ces projections au sol dans lequel ces projections sont inscrites.

Publié en 2013, le guide de l'INERIS détaille : « *Pour éviter toute confusion sur le tracé de ce polygone B, nous invitons à considérer, de manière systématique, celui de plus grande surface dont aucun sommet ne se situe en dehors des contours projetés des cavités.* » Cette définition demandait encore des clarifications et a occasionné de longs débats.

GEOSTOCK considère, comme l'INERIS, qu'une approche basée sur les concepts d'aire tributaire et de taux de défrètement est tout à fait légitime et permet de bénéficier d'un large retour d'expérience. Toutefois, l'application du concept au cas de stockages constitués de deux ou trois galeries, sans en adapter la façon de définir le périmètre, s'avère trop sécuritaire et soulève de nombreuses questions :

- Doit-on considérer que le taux de défrètement d'une galerie unique atteindrait 100 %?
- Comment peuvent jouer l'effet bénéfique et la contribution mécanique des bordures extérieures du stockage, protégées réglementairement de toutes nouvelles excavations ?
- Y-a-t-il réellement une notion de pilier représentatif sur un stockage classique en cavité minée ?

Le guide 2013 de l'INERIS ajoute à ce sujet :

*« Il convient de remarquer que cette définition du taux de défrètement peut avoir, du fait qu'elle ne prend pas en compte la contribution à la stabilité, des terrains extérieurs au polygone B précédemment défini, un caractère excessivement pénalisant dans certaines configurations. C'est le cas, par exemple, pour des stockages dont la géométrie est peu assimilable aux schémas de type « chambres et piliers » (par exemple, ceux où le nombre de cavités, de galeries ou d'excavations principales tend vers un).*

*Au regard de ces éléments, dans le cas où l'exploitant jugerait que la définition du taux de défrètement proposée dans la circulaire est excessivement pénalisante et que de ce fait, le critère ne peut pas être rempli, il pourra proposer une démonstration étayée du caractère irréaliste d'un effondrement généralisé compte tenu du contexte géomécanique du stockage concerné, justifiant que ce risque soit écarté de l'appréciation de la démarche de réduction du risque à la source, du PPRT et du PPI.»*

### **4 Analyse d'un cas réel : démonstration du caractère irréaliste d'un effondrement par approche comparative**

Le taux de défrètement du stockage considéré est supérieur aux 50% préconisés par la circulaire. En application du guide de l'INERIS, le caractère irréaliste de son effondrement généralisé a été démontré en utilisant une simple approche comparative : le chargement vertical réel des piliers du stockage est estimé par un calcul tridimensionnel aux éléments finis. Il est comparé au chargement qui s'appliquerait aux piliers d'une excavation type « chambres et piliers » équivalente (profondeur, taux de défrètement et poids des terrains sus-jacents sont similaires).

#### 4.1 Estimation du taux de défruitement

Le taux de défruitement de l'excavation, 53 %, est obtenu en ramenant l'ensemble des vides de la cavité sur un même plan et en calculant le rapport de cette surface sur la surface du polygone reliant ces projections au sol.

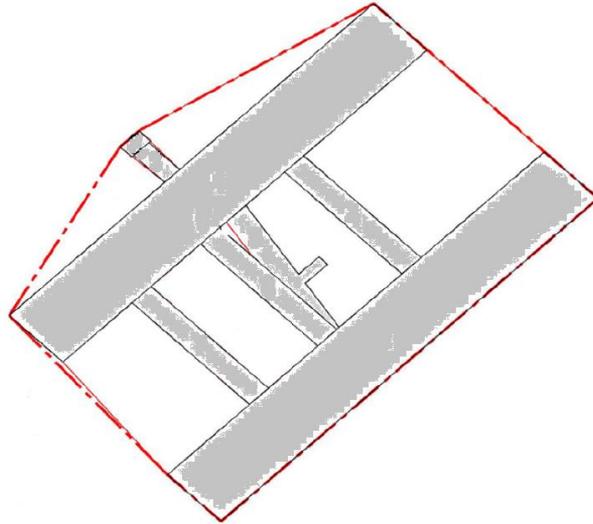


Figure 2 : Calcul du taux de défruitement du stockage (surface des projections au sol des cavités / la surface du polygone rouge)

#### 4.2 Calcul de la contrainte moyenne dans un pilier d'une excavation en chambres et piliers équivalente

Le concept classique de l'aire tributaire est utilisé pour déterminer la charge d'un pilier : chaque pilier supporte de façon uniforme le poids des terrains sus-jacents au pilier et à la moitié du vide situé de chaque côté du pilier.

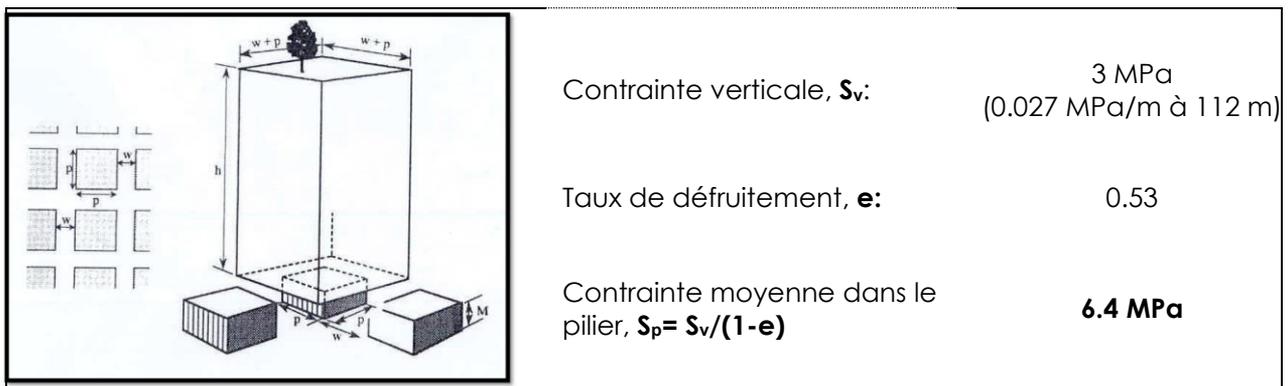


Figure 3 : Calcul de la contrainte moyenne dans un pilier d'une excavation en chambres et piliers équivalente

La valeur de la contrainte moyenne calculée selon le concept de l'aire tributaire, atteindrait environ 6.5 MPa dans les piliers d'une excavation en chambres et piliers supposés équivalents à ceux du stockage étudié (profondeur, taux de défruitement et poids des terrains sus-jacents sont similaires).

### 4.3 Modèle numérique tridimensionnel du stockage

L'objectif du calcul numérique tridimensionnel est d'évaluer, sur une géométrie réaliste, la contrainte moyenne dans les piliers du stockage.

Le calcul a été réalisé avec le logiciel aux éléments finis ABAQUS Standard. Le modèle rhéologique choisi est la loi élastique. Les contraintes initiales dans le modèle sont supposées isotropes et résultent du poids des terrains ( $2700 \text{ kg/m}^3$ ) à la profondeur du stockage (112m).

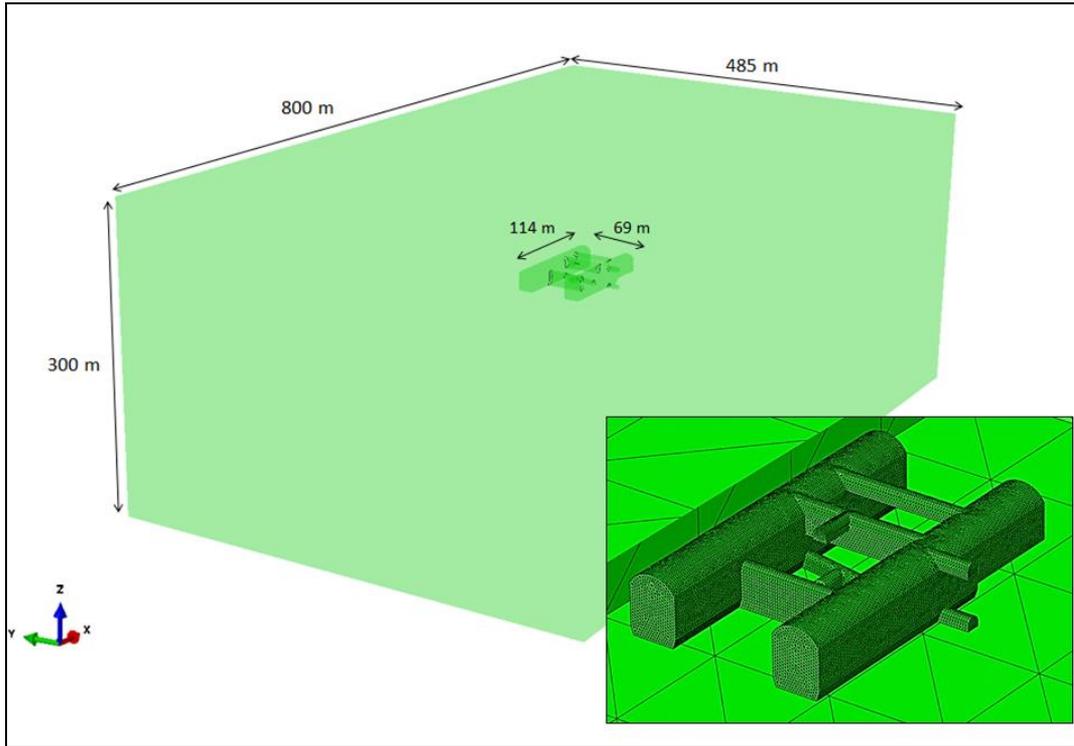


Figure 4 : Géométrie et maillage du modèle 3D aux éléments finis

Trois piliers ont été identifiés à différentes profondeurs de l'exploitation (figure 5). Afin d'estimer le chargement moyen de chaque pilier, des profils de valeurs de la contrainte verticale ont été relevés dans chacun d'eux et moyennés (figure 6).

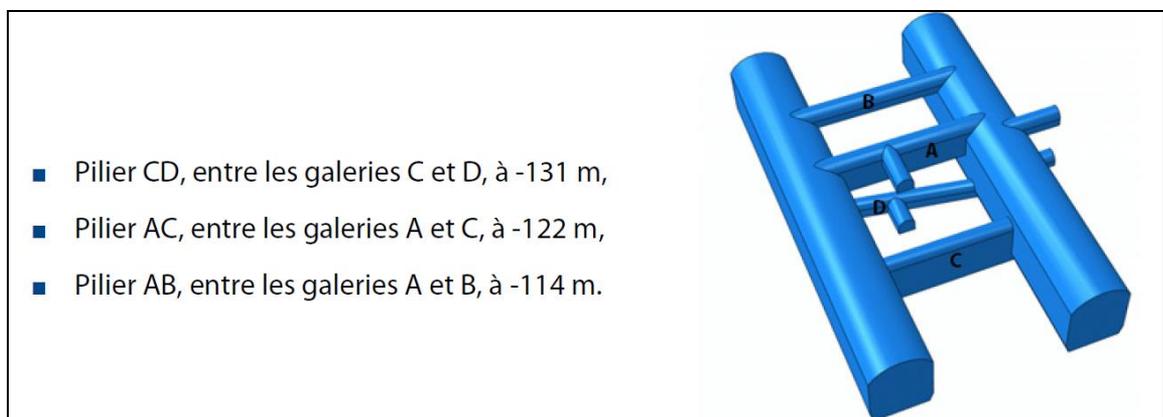


Figure 5 : Identification des piliers du stockage

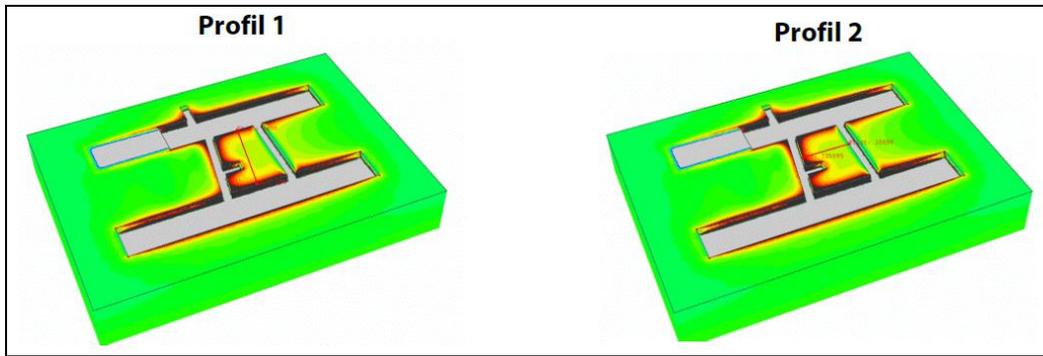


Figure 6 : Amplitude de la contrainte verticale dans le pilier CD et profils relevés pour calculer le chargement moyen du pilier

La contrainte verticale moyenne dans le pilier le plus sollicité du stockage est estimée à 5 MPa par le calcul numérique tridimensionnel.

Tableau 2. Contrainte verticale moyenne calculée par ABAQUS dans chaque pilier du stockage

	Dans le pilier CD à z= -131m	Dans le pilier AC à z= -122 m	Dans le pilier AB à z= -114 m
Contrainte verticale moyenne	<b>5 MPa</b>	<b>4.6 MPa</b>	<b>4.5 MPa</b>

#### 4.4 Synthèse des résultats

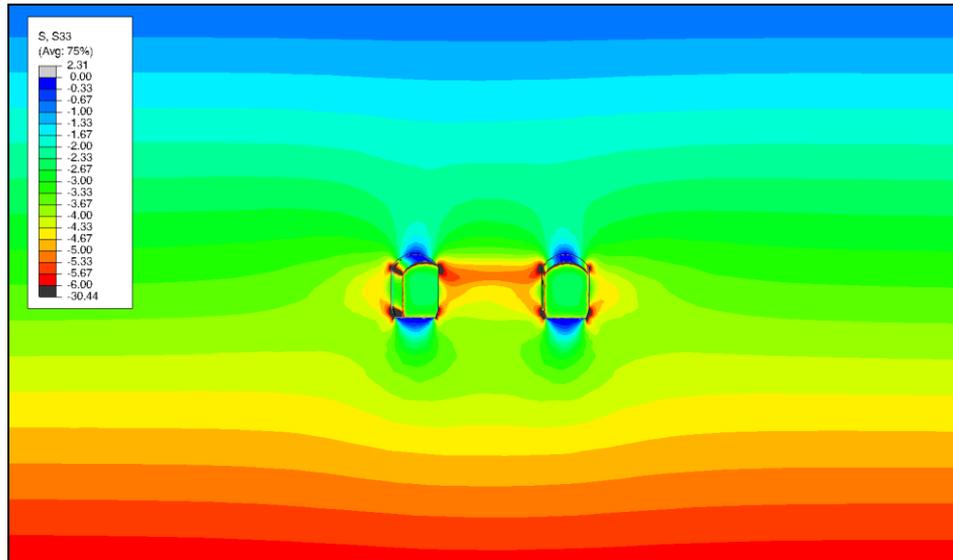
Il est ainsi démontré par cette étude que la contrainte verticale moyenne estimée par le modèle tridimensionnel sur une géométrie réaliste du stockage étudié est plus faible (5 MPa) que celle qui s'appliquerait sur un pilier dit équivalent d'une excavation type chambres et piliers (6,4 MPa). La contrainte moyenne verticale qui charge le pilier le plus sollicité du stockage (5 MPa) est en fait équivalente à la contrainte moyenne dans le pilier d'une excavation en chambres et piliers située à la même profondeur, avec un taux de défrètement de 40 %. Par ce seul critère, le risque d'effondrement généralisé du stockage pourra être écarté.

Tableau 3. Résultats de l'approche comparative

Type d'excavation	Stockage	Excavation minière en chambres et piliers	Excavation minière en chambres et piliers
Profondeur du toit de l'excavation	112 m	112 m	112 m
Taux de défrètement	53% « L'ensemble des vides est ramené sur un même plan »	53 %	40 %
Méthode de calcul de la contrainte verticale moyenne sollicitant les piliers	Calcul numérique 3D ABAQUS	Concept de l'aire tributaire (base de la recommandation Ineris)	Concept de l'aire tributaire (base de la recommandation Ineris)
Valeur de la contrainte verticale moyenne dans le pilier	5 MPa (Dans le pilier le plus sollicité)	6.4 MPa	5 MPa

La figure 7 illustre l'impact bénéfique de l'effet de bord ; le massif reprend une partie de la charge verticale. L'effet de bord est négligé par la méthode de l'aire tributaire qui

considère un pilier au centre d'une excavation infinie. Dans le cas présenté, un calcul 3D a été effectué, d'autres approches demeurent possibles pour justifier du caractère trop pénalisant d'un taux de défrètement calculé sur la stricte limite du périmètre excavé.



## 5. Conclusion

Depuis 2003, les stockages souterrains français d'hydrocarbure sont soumis au Code Minier. La législation énonce des règles méthodologiques pouvant être utilisées pour écarter certains risques liés au souterrain dans les études de danger. Le guide publié en 2013 rappelle que ces critères, volontairement simples et essentiellement géométriques, résultant du retour d'expérience mondial sur des excavations en chambres et piliers, peuvent s'avérer trop sécuritaires pour des stockages souterrains de conception récente. Les stockages ont un faible nombre de galeries, des piliers souvent non adjacents et à des profondeurs différentes. Ils sont conçus pour durer et leur stabilité est continuellement surveillée. L'étude présentée dans cette publication montre que les piliers d'un stockage souterrain constitué par un nombre limité de galeries de stockage et de recoupes à différentes profondeurs sont bien moins sollicités (plus de 20% d'écart) que ceux d'une cavité en chambres et piliers 'équivalente' ; la méthodologie quantifie sur un cas réel le caractère très pénalisant de la définition utilisée dans la circulaire du 10 mai 2010.

## 6. Références bibliographiques

- Charbonnage de France. (2006). L'après-mine en France. Mines de Paris. Edition BRGM.
- Salmon R. (1998). Validation d'une nouvelle méthode de mise en sécurité des anciennes carrières souterraines abandonnées, DEA Ecole centrale Paris, France.
- Vachat J.C. (1982) Les désordres survenant dans les carrières de la région parisienne, CNAM.
- You T. (2013). Manuel de mécanique des roches Tome III, CFMR, Retours d'expériences génie minier et pétrolier, Presse des mines, Paris, France.
- You T. et al. (2015). Design specific of hard-rock caverns for hydrocarbon storage; 50 years of feedback and recent developments. The 13<sup>th</sup> International ISRM congress 2015. Montréal, Québec, Canada.