

# LIMITATION PAR RENFORCEMENTS GÉOSYNTHÉTIQUES DES RISQUES LIÉS AUX EFFONDREMENTS DES TOITS DE CATICHES

## LIMITATION OF THE HAZARD CAUSED BY THE COLLAPSE OF ROOFS OF UNDERGROUND CAVITIES USING GEOSYNTHETIC REINFORCEMENT

Mouhamad HASSOUN<sup>1,2</sup>, Pascal VILLARD<sup>2</sup>, Marwan ALHEIB<sup>1</sup>, Fabrice EMERIAULT<sup>2</sup>

<sup>1</sup> INERIS, Verneuil en Halatte 60550, France

<sup>2</sup> 3SR, Grenoble 38000, France

**RÉSUMÉ** – Pour améliorer le dimensionnement des remblais renforcés par géosynthétiques sur cavité dans le cas de sols cohésifs, il est prévu de réaliser en 2017 à Lille une expérimentation en vraie grandeur. Le pré dimensionnement de cette expérimentation (raideur du géosynthétique, géométrie du remblai et longueur d’ancrage) a été réalisé sur la base des connaissances actuelles et est supporté par des résultats issus d’une expérimentation à échelle réduite qui permet de suivre, en utilisant la technique de corrélation d’images, les déformations du géosynthétique de renforcement ainsi que le comportement de la couche de sol renforcée lors de la création d’une cavité sous-jacente.

Mots-clés : Effondrement localisé, renforcement, géosynthétique, dimensionnement, expérimentation.

**ABSTRACT** – To improve the design of geosynthetic reinforced embankment over cavity in the case of cohesive soils, it is expected to achieve at 2017 in Lille district (France) a full scale experiment. The Pre-design of this experiment (stiffness of the geosynthetic, embankment geometry and anchorage length) has been done on the basis of current knowledge and is supported by experimental results of a small-scale experiment that allows to obtain, by using digital image correlation technique, strains and displacements of the geosynthetic and the behaviour of the reinforced soil layer during the creation of an underlying cavity.

Keywords: Sinkhole, reinforcement, geosynthetic, design method, experiment.

### 1. Introduction

La région Lilloise compte parmi les régions de France les plus concernées par la présence de carrières souterraines abandonnées. Actuellement, 122 communes de Département du Nord renferment dans leur sous-sol de nombreuses exploitations souterraines dont la grande majorité de ces exploitations (112/122 communes) correspond à des carrières anthropiques, aujourd’hui abandonnées, localement appelées “Catiches” et creusées pour extraire des matériaux tels que la craie.

Suite à la rupture et la chute soudaine des toits de “Catiches”, ces exploitations, peu profondes et de petit diamètre, sont à l’origine de désordres irréversibles, visibles en surface, ayant pour conséquence un affaissement, un effondrement où la formation d’un cratère dont les caractéristiques sont proches d’un fontis (Fig.1).



Figure 1. Exemple d’effondrement d’une cavité souterraine à Lille Hellemmes (Source SDICS/SEISM).

Les cavités souterraines, et leur prise en compte au travers de l'aménagement et de l'urbanisme, constituent donc un problème préoccupant pour de nombreuses communes françaises (Plan National Cavités, 2013). C'est notamment le cas de la ville de Lille qui compte dans son agglomération une forte concentration de carrières (158 carrières de craie ont été recensées par le SEISM : Service d'Expertises et d'Ingénierie des Sols et Matériaux). Certaines surfaces sont d'ailleurs interdites de toute activité tant qu'un comblement intégral des vides souterrains n'est pas réalisé.

De nombreuses techniques de réduction et de suppression de l'aléa fontis sont fréquemment proposées (Tritsch, 2007) : comblement total ou partiel, injection et consolidation, etc. L'exécution de ces solutions se heurte à des conditions techniques et économiques (coût, surface d'intervention, volume et état des cavités), d'où l'importance d'étudier la faisabilité de renforcement du sol par une nappe géosynthétique. Cette solution est attractive du point de vue environnemental, économique et facilité de mise en œuvre. Une expérimentation en vraie grandeur à Lille est prévue en 2017 pour améliorer le dimensionnement des remblais renforcés par géosynthétique sur cavités souterraines.

## 2. Description du site

Le site d'expérimentation se situe sur la commune d'Hellemmes (59) (Fig.2). C'est un terrain de jeux, anciennement sous-cavé par des carrières souterraines de craie blanche, qui a été retenu pour réaliser une expérimentation de pose de géosynthétique au droit d'une tête de catiche.

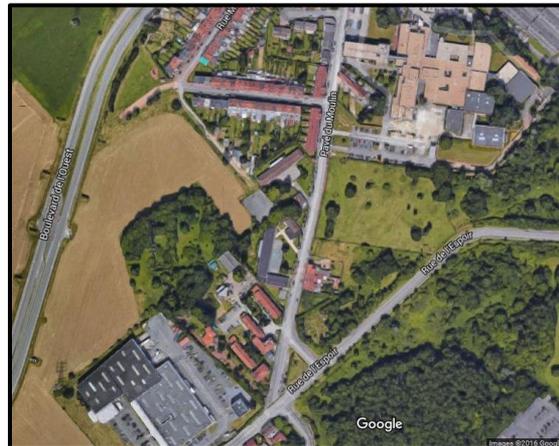


Figure 2. Localisation de la zone retenue contenant des catiches (Hanesse, 2012).

Le site choisi correspond à une exploitation ancienne comprenant des chambres en forme de bouteilles dont la tête est située dans la craie altérée ou le limon et dont le corps est creusé directement dans la craie. Il peut s'agir soit d'excavations isolées, soit d'exploitations constituées de puits adjacents, disposés en lignes plus ou moins régulières (Fig.3). Les puits sont de petit diamètre en surface (2 à 3 m) avant de s'élargir progressivement à la traversée de l'horizon exploitable. À la base des chambres, des galeries, généralement de faible hauteur (2 à 4 m) peuvent relier les catiches entre elles. Après l'exploitation, les puits ont été généralement obturés, soit par des voûtes constituées d'un appareillage de pierres taillées ou bouchon, soit par des voûtes de planches ou de plaques métalliques fichées dans les terrains meubles de couverture. Ces bouchons sont souvent recouverts de remblais déversés depuis la surface.

Les catiches, de par leurs formes et leurs conceptions, sont souvent moins affectées par la fissuration mécanique que leurs systèmes de couverture. C'est pourquoi le risque principal est de voir s'effondrer les moellons en craie disposés en tête (Leonard, 2005).

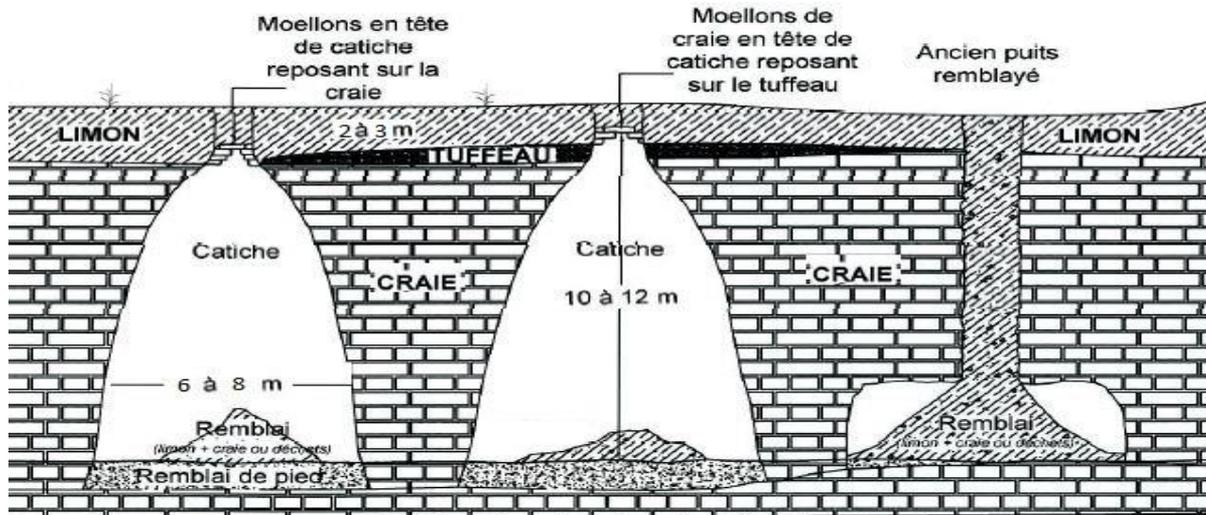


Figure 3. Carrières de craie typiques de la région de Lille – les catiches (Lambert, 2012).

### 3. Analyse du comportement d'un remblai cohésif renforcé au-dessus d'une cavité

Les méthodes de dimensionnement analytiques actuellement utilisées pour le dimensionnement des remblais renforcés sur cavité ne sont, dans la majorité des cas, pas adaptées aux remblais cohésifs. Les récents développements dans ce domaine font suite à des expérimentations en vraie grandeur réalisées dans le cadre de la thèse de A. Huckert ayant débouché sur la mise au point d'une méthode de dimensionnement simplifiée applicable aux remblais cohésifs (Huckert *et al.*, 2015).

L'évaluation de ce modèle de dimensionnement est au cœur de cette communication pour laquelle des essais expérimentaux à échelle réduite (1/10) ont été réalisés en laboratoire en utilisant un dispositif permettant de simuler, par abaissement d'une trappe positionnée à la base du remblai renforcé, la formation d'une cavité. Les objectifs principaux de ces expérimentations sont :

- décrire les mécanismes de rupture de la couche cohésive argileuse lors du déplacement de la trappe ;
- déterminer l'intensité et la géométrie de la distribution de la charge agissant sur la nappe géosynthétique suite à la rupture de la couche argileuse ;
- mesurer les déformations et déplacements du renfort géosynthétique ;
- tester la validité de la méthode de dimensionnement.

#### 3.1. Tests d'effondrement à échelle réduite réalisés en laboratoire

Les expériences à échelle réduite ont été menées avec le dispositif expérimental présenté sur la Figure 4, qui permet de simuler un effondrement. Ce dispositif comprend une cuve parallélépipédique constituée sur le pourtour de panneaux en bois d'épaisseur 12 mm et munie sur la face avant d'une plaque transparente de plexiglas de 5 mm d'épaisseur. Le fond de la cuve est constitué d'un panneau d'une longueur de 1 m et d'une largeur de 0,40 m. En son centre, une trappe de 0,20 x 0,40 m peut se déplacer verticalement à une vitesse constante de 1 mm/min pour simuler un effondrement.

Des photos de la face avant sont prises par une caméra numérique à intervalles réguliers. La technique de corrélation d'images (DIC) est utilisée pour étudier la cinématique d'effondrement de la couche argileuse et le comportement du géosynthétique de renforcement. Le sol mis en œuvre est de l'argile compacté manuellement dont les propriétés mécaniques sont données dans le Tableau 1. Le renfort géosynthétique est une membrane élastique souple de 2 mm d'épaisseur constituée de caoutchouc dont les caractéristiques principales sont données dans le Tableau 2. Un mouchetis projeté sur la tranche de la membrane permet de suivre les déplacements en tous points de la nappe par la technique de corrélation d'images.

Tableau 1. Propriétés physiques, mécaniques et géométriques de la couche de sol cohésif

Densité volumique sèche	$\gamma = 13,8 \text{ kN/m}^3$
Angle de frottement interne	$\varphi = 35 \text{ degrés}$
Cohésion	$c = 5,5 \text{ kPa}$
Teneur en eau	$w = 15 \%$
Hauteur du remblai	$H = 0,05 \text{ m}$

Tableau 2. Caractéristiques de la membrane élastique

Résistance maximale à la traction	$T_{max} > 1200 \text{ N/m}$
Déformation maximale	$\varepsilon_{max} > 20 \%$
Raideur en traction à 2% de déformation	$J = 9800 \text{ N/m}$

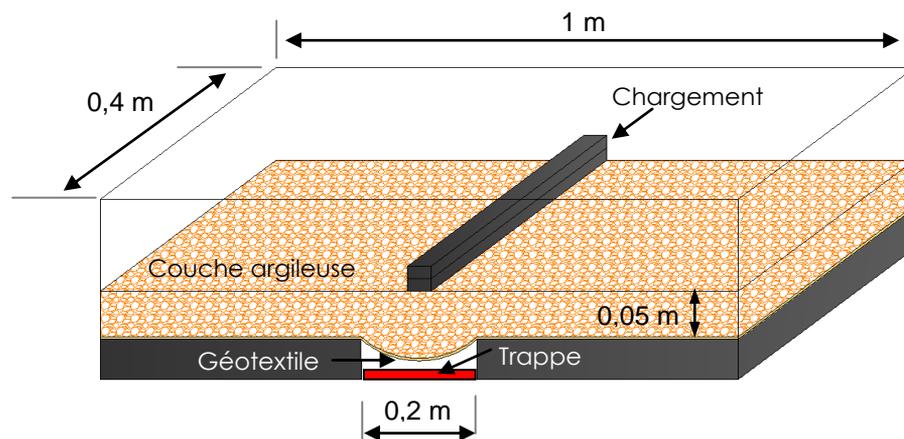


Figure.4 Dispositif expérimental permettant de simuler un effondrement sous remblai.

Des essais avec une couche argileuse de 0,05 m renforcée ou non par une membrane élastique en caoutchouc, considérée équivalente à un géotextile de renforcement, ont été réalisés. Pour les essais avec un renforcement, la membrane élastique de dimensions identiques au fond de la cuve est simplement maintenue par le frottement généré par le poids de la couche de sol. Le remblai cohésif est mis en œuvre au-dessus de la membrane puis compacté manuellement. Quel que soit le type d'essai réalisé, une fois la trappe abaissée, la couche de sol cohésif perd rapidement le contact avec la trappe et assure sa propre stabilité grâce à sa cohésion. Dans ce cas, la couche cohésive se comporte comme une dalle rigide sollicitée en flexion; aucune fissure n'apparait, ni sur les bords, ni au centre de la cavité (Fig.5a).

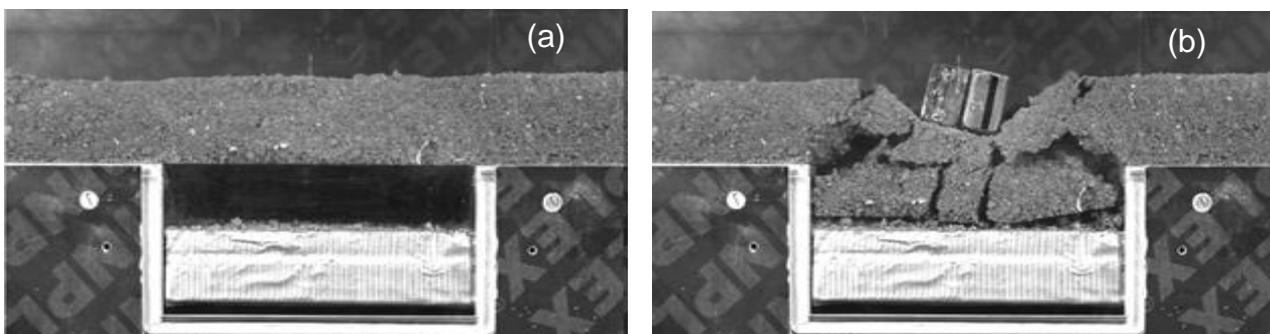


Figure 5. (a) Couche argileuse stable sous poids propre, (b) Rupture de la couche argileuse non renforcée sous chargement.

Pour provoquer la rupture de la couche cohésive, des surcharges (barres métalliques de 0,4 m de longueur, de 25 mm de largeur, de 40 mm de hauteur et de masse 2,3 kg) sont appliquées en surface. Après effondrement de la couche argileuse, on constate (Figures 5 et 6) que les géométries des blocs effondrés sont assez différentes d'un cas à l'autre (couches non renforcées et couches renforcées).

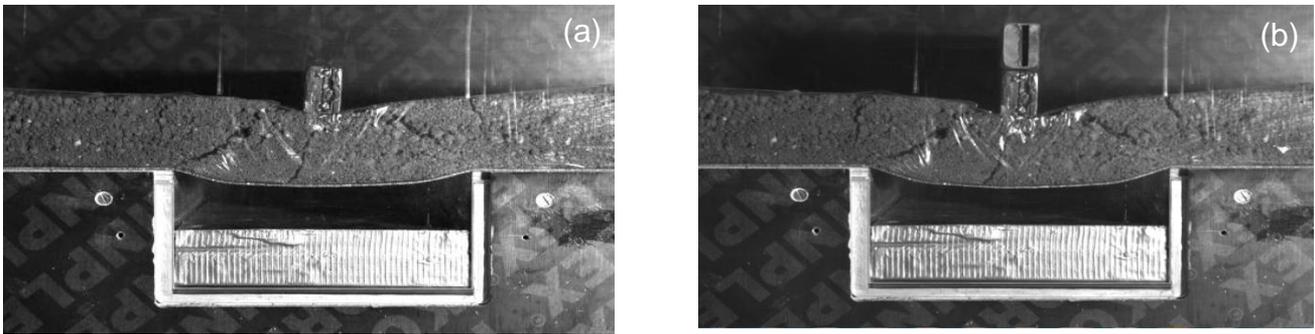


Figure 6. (a) Couche argileuse renforcée sollicitée par une barre de 2,3 kg, (b) Couche argileuse renforcée sollicitée par deux barres de 2,3 kg.

Les photos prises à intervalles réguliers ont permis, grâce au mouchetis appliqué sur la tranche de la membrane, de déterminer les déformations de la nappe en considérant les positions des différents points de la nappe avant et après application des surcharges (Equation 1).

$$\varepsilon_{i,i+1} = \sqrt{\frac{(x'_{i+1} - x'_i)^2 + (y'_{i+1} - y'_i)^2}{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2}} - 1 \quad (1)$$

où :

- $i$  et  $i+1$  sont deux points consécutifs de la membrane élastique,
- $x_i$  et  $y_i$  est le couple des coordonnées initiales du point  $i$ ,
- $x'_i$  et  $y'_i$  est le couple des coordonnées du point  $i$  après déplacement.

La Figure 7 présente l'allure des déformations obtenues après l'application d'une ou deux surcharges. On constate sur cette figure que l'allure de la déformation est relativement constante dans la partie centrale de la nappe située au-dessus de la trappe avec des valeurs maximales près des deux bords ( $x = \pm 100 \text{ mm}$ ).

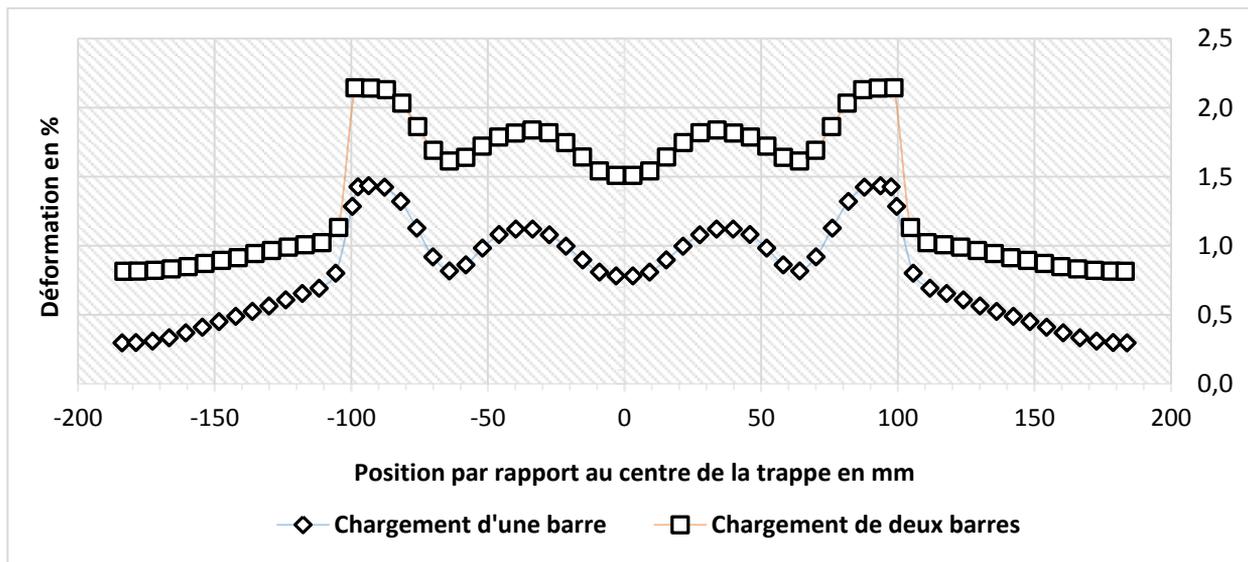


Figure 7. Déformation de la membrane élastique pour les deux types de chargement.

Les tensions horizontales  $T_H$ , verticales  $T_V$  et totales  $T$  sont définies en tout point de la nappe par :

$$T = J * \varepsilon \quad (2)$$

$$T_H = T * \cos \theta \quad (3)$$

$$T_V = T * \sin \theta \quad (4)$$

$$\tan \theta = \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (5)$$

La contrainte verticale  $q$ , agissant en tout point de la nappe et résultant de l'effondrement des blocs de la couche argileuse sur la nappe, est obtenue grâce à la relation :

$$q = \frac{\Delta T_v}{\Delta x} \quad (6)$$

Il est alors possible de définir la géométrie de la distribution de la contrainte sur la membrane après l'effondrement de la couche argileuse (Figure 8). On constate une forte concentration des contraintes près des bords de la cavité ( $x = \pm 75 \text{ mm}$ ) liée à l'effondrement en blocs de la couche argileuse sur la membrane et ce pour les deux valeurs de la surcharge. En revanche, la contrainte est très faible dans la partie centrale de la nappe située au-dessus de la cavité pour le chargement avec une seule barre alors que celle-ci est plus importante lors du chargement par deux barres. Par sommation des efforts verticaux appliqués sur la portion de nappe située au-dessus de la cavité, on peut en déduire la force totale et le taux de chargement de la nappe après application des surcharges (respectivement 36 N et 70 N avec une ou deux surcharges, soit 58 % et 80 % de la charge totale appliquée - poids propre de la couche + surcharge).

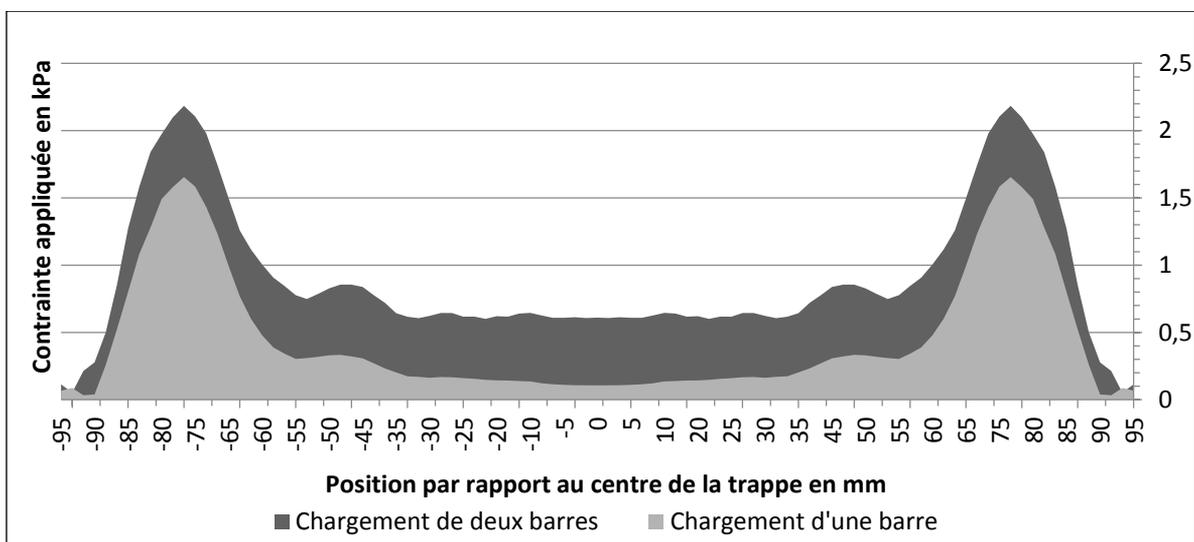


Figure 8. Répartition de la contrainte sur la membrane élastique pour une et deux barres.

### 3.2. Approche de dimensionnement et comparaison avec les résultats expérimentaux

L'approche analytique utilisée, proposée par Huckert (2014), suppose un effondrement en blocs de la couche de sol cohésive lors de l'application d'une charge ponctuelle en surface. Le principe de ce modèle est alors de faire porter le poids des blocs de sol effondré sur la nappe géosynthétique par le biais de deux forces ponctuelles verticales  $2P$  définies par mètre de largeur de la nappe (Figure 9). Le bloc effondré est alors considéré rigide et indéformable.

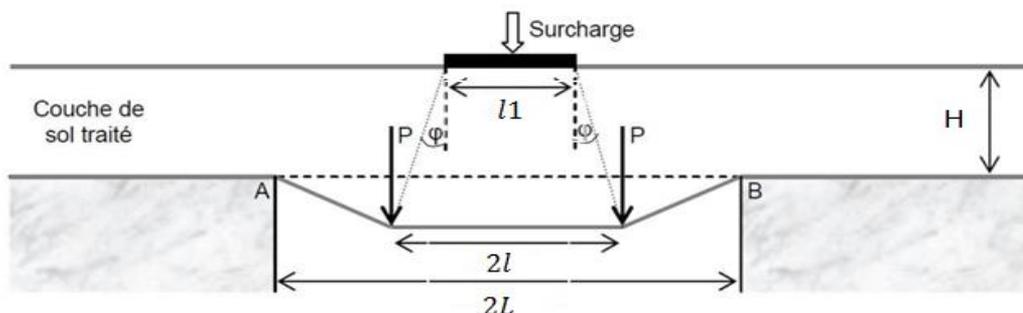


Figure 9. Mécanisme d'effondrement proposé par A. Huckert (Huckert *et al.*, 2015).

La démarche du dimensionnement consiste à résoudre par un processus itératif l'équation (7) où l'inconnue est la tension horizontale  $T_H$  dans la nappe :

$$U_A + \left[ \sqrt{1 + \left(\frac{P}{T_H}\right)^2} - 1 \right] (L - l) = \frac{T_H}{J} \left[ \left(1 + \left(\frac{P}{T_H}\right)^2\right) (L - l) + l \right] \quad (7)$$

où :

- $U_A$ , est le déplacement horizontal de la nappe géosynthétique au bord de la cavité,
- $2L$ , la largeur de la cavité,
- $2l$ , la largeur de la zone de diffusion des efforts définie par  $2l = (l_1 + 2H * \tan \varphi)$  (Huckert, 2014),
- $l_1$ , la largeur définissant la base supérieure du bloc effondré,
- $\varphi$ , l'angle de frottement interne du sol de remblai.

Les caractéristiques principales du comportement mécanique du géosynthétique au droit de la cavité, se déduisent des expressions suivantes donnant la flèche au centre de la portion de nappe au-dessus de la cavité  $f$  ainsi que les tensions  $T_A$  et  $T_B$  et les déformations  $\varepsilon_A$  et  $\varepsilon_B$  aux points A et B :

$$f = \frac{P}{T_H} (L - l) \quad (8)$$

$$T_A = T_B = T_H \sqrt{1 + \left(\frac{P}{T_H}\right)^2} \quad (9)$$

$$\varepsilon_A = \frac{T_A}{J} \quad \text{et} \quad \varepsilon_B = \frac{T_B}{J} \quad (10)$$

Les confrontations entre les résultats analytiques et les résultats expérimentaux pour les deux phases de chargement sont présentées dans le Tab.3. Les paramètres de calcul sont (Fig.10) :  $L = 0,1$  m,  $L_1 = 0,05$  m,  $H = 0,05$  m,  $U_A = -1$  mm et  $-2$  mm,  $2P = 156,6$  N/m et  $214,2$  N/m respectivement et  $\varphi = 35^\circ$ .

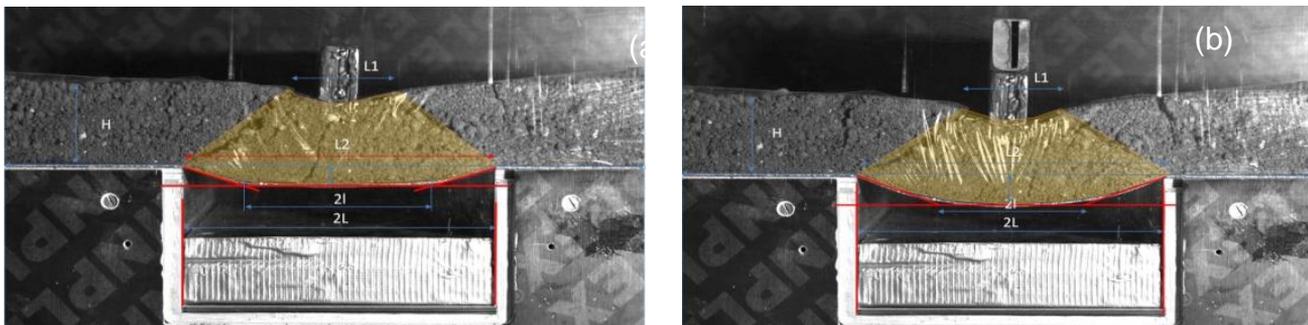


Figure 10. Géométries de la zone effondrée lors de la rupture de la couche argileuse, (a) en présence d'une surcharge, (b) en présence des deux surcharges.

Tableau 3. Confrontation entre les résultats expérimentaux et analytiques.

Résultats	Chargement par une seule barre			Chargement avec deux barres		
	$f$ mm	$\varepsilon_A, \varepsilon_B$ %	$T_A, T_B$ kN/m	$f$ mm	$\varepsilon_A, \varepsilon_B$ %	$T_A, T_B$ kN/m
Expérimental	14	1,50	0,145	22,3	2,15	0,210
Analytique	16,1	2,15	0,210	19,5	2,50	0,245
Ecart absolu	2,1	0,65	0,065	2,8	0,35	0,035

Malgré sa simplicité, l'approche analytique utilisée permet d'approcher de façon raisonnable les résultats expérimentaux notamment dans l'évaluation de la flèche maximale du géosynthétique. Les hypothèses fortes émises sur la géométrie de la nappe déformée (segments de droite) expliquent les différences obtenues sur les déformations de la nappe qui présente dans l'expérimentation une légère courbure. L'application du chargement sous la forme de deux charges ponctuelles peut également être remise en cause notamment lorsque l'intensité de la surcharge appliquée en surface devient prépondérante devant le poids des blocs de sol effondrés. A défaut d'autres méthodes, ce modèle analytique sera utilisé et adapté au pré-dimensionnement de l'expérimentation en vraie grandeur qui sera menée sur un site de l'agglomération lilloise à Hellemmes (59).

## 4. Mise en application de la méthode de dimensionnement au site de Hellemmes (59)

### 4.1 Données géotechniques et dimensionnelles

Une campagne de reconnaissance sur le site de Hellemmes a permis de localiser avec précision la position et le diamètre des catiches. Parmi celles qui ont été recensées, l'une d'elle (Figure 11), d'environ 2 m de diamètre, a été retenue pour l'expérimentation compte tenu de son accessibilité par le fond. La tête de catiche se trouve à environ 2 m de la surface et est recouverte de bas en haut par une couche limoneuse, une couche de tout venant et une couche végétale. Le toit de la catiche est constitué de moellons de craie dont l'assemblage peut être potentiellement destabilisé par une surcharge ponctuelle appliquée en surface. Les principales données géotechniques et dimensionnelles recueillies sur le site sont présentées dans le Tableau 4.

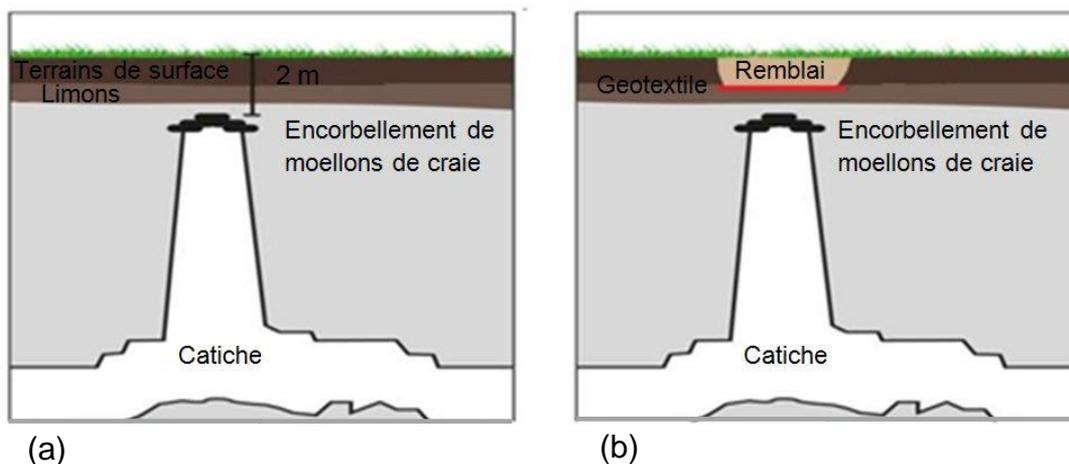


Figure 11. (a) Configuration actuelle, (b) solution de renforcement proposée

Tableau 4. Caractéristiques principales de la couche cohésive

Poids volumique	$\gamma = 19 \text{ kN/m}^3$
Cohésion	$C = 5 \text{ kPa}$
Angle de frottement	$\varphi = 25^\circ$
Épaisseur	$H = 0.5 \text{ m}$

### 4.2 Solution de renforcement retenue et instrumentation

La solution de confortement retenue pour ponter la tête de catiche est un renforcement géosynthétique uni-axial ancré par simple recouvrement de part et d'autre de la cavité. La nappe sera positionnée à 1,5 m au-dessus de la tête de catiche et recouverte par un remblai cohésif d'épaisseur 0,5 m. Les critères et hypothèses retenus pour le dimensionnement de l'expérimentation sont :

- une cavité d'ouverture carrée de 2 m de large,
- une surcharge en surface de 20 kN (2 tonnes) appliquée sur une plaque carrée de 0,5 m x 0,5 m,
- un tassement admissible en surface de 15 cm,
- une géométrie du bloc de sol effondré sur la nappe parallélépipédique (épaisseur 0,5 m, largeur en partie haute 0,5 m et largeur en partie basse 1 m) dont le poids est de 16,6 kN,
- angles de frottement aux interfaces inférieur et supérieur sol/géosynthétique  $\delta_i = \delta_s = 20^\circ$ .

Les paramètres de calcul sont :  $L = 1 \text{ m}$ ,  $L_1 = 0,5 \text{ m}$ ,  $H = 0,5 \text{ m}$ ,  $U_A = 0 \text{ mm}$ ,  $2P = 18,3 \text{ kN/m}$  et  $\varphi = 25$  degrés. La longueur d'ancrage  $L_a$  est calculée grâce à la formule suivante en considérant le frottement des interfaces inférieure et supérieure  $\delta_i$  et  $\delta_s$  de la nappe géosynthétique avec le sol du site :

$$L_a = T_H / [\gamma H (\tan \delta_i + \tan \delta_s)] \quad (11)$$

L'influence de la raideur du géosynthétique a été testée (Tableau 5) à des fins comparatives. Le dimensionnement conduit à une nappe géosynthétique monodirectionnelle (Villard et al., 2000) de 1550 kN/m de raideur en traction et à une longueur d'ancrage de part et d'autre de la cavité d'au moins 4,5 m.

Tableau 5. Résultats du dimensionnement pour différentes valeurs de J.

$J$ (kN/m)	750	1000	<b>1550</b>	2000	3000
$T_H$ (kN/m)	24,5	27,1	<b>31,6</b>	34,5	39,7
$T_A$ et $T_B$ (kN/m)	26,1	28,6	<b>32,9</b>	35,7	40,7
$\varepsilon_A$ et $\varepsilon_B$ (%)	3,48	2,86	<b>2,12</b>	1,79	1,36
$f$ (m)	0,19	0,17	<b>0,15</b>	0,14	0,12
$L_a$ (m)	3,54	3,92	<b>4,56</b>	4,99	5,74

Différents systèmes d'instrumentation et de suivi sont prévus pour suivre le comportement de la tête de catiche, du sol en surface et du géosynthétique :

- mesure des mouvements et déplacements en tête de catiche pour détecter la chute des blocs. Les dispositifs seront installés dans la catiche avant la mise en place du géotextile et permettront un suivi en continu des mouvements,
- mesures ponctuelles des déformations du géotextile,
- mesure des mouvements et déplacements de surface qui permettent de détecter les mouvements en surface, notamment au fond de la cuvette en cas de mouvement induit par l'instabilité de la tête de catiche,
- scan laser réalisé par l'INERIS avant, pendant et après la pose du renforcement géosynthétique,
- mesures de nivellement topographique en surface.

L'ensemble de mesures seront analysées en détails et permettront une confrontation avec les prédictions du modèle analytique. Une amélioration du modèle pourra par la suite être proposée pour une meilleure adaptation à un problème 3D d'une cavité de forme pratiquement circulaire, vu que les formules analytiques de dimensionnement appliquées sont issues d'une expérimentation sur une tranche en 2D.

## 5. Conclusions

Bien que peu développée faute des recommandations techniques adaptées, l'utilisation des géosynthétiques de renforcement pour la sécurisation et la réduction de l'aléa « fontis » associé aux exploitations souterraines à faible profondeur, est une solution techniquement et économiquement intéressante. Pour pallier à ce manque, une expérimentation en vraie grandeur doit prochainement être mise en œuvre dans l'agglomération de Lille.

Le pré-dimensionnement de cette expérimentation a été effectué sur la base des connaissances actuelles et en fonction des méthodes de dimensionnement existantes dont le fondement repose sur des hypothèses fortes qu'il convient toujours de valider ou d'améliorer.

C'est dans cette optique que des expérimentations à échelle réduite permettant de simuler la formation d'une cavité sous une couche de sol cohésif ont été réalisées. Les résultats expérimentaux obtenus ont montré que lors de son effondrement sur la nappe géosynthétique, la couche argileuse se rompt en blocs de différentes tailles dont l'action peut raisonnablement être assimilée à des forces ponctuelles verticales comme spécifié dans le modèle analytique proposé par A. Huckert (2014). Malgré sa simplicité, cette approche analytique permet d'approcher raisonnablement les résultats expérimentaux et d'estimer avec une précision relative certaines grandeurs telles que la flèche du géosynthétique.

Malgré une confrontation entre les résultats analytiques et les expérimentations sur modèles réduits encourageante, il convient de valider ces premiers résultats par des études complémentaires. L'expérimentation prévue dans l'agglomération Lilloise en est une contribution mais il est également prévu de compléter ces études par des modélisations numériques afin d'explorer à moindre coût l'influence des nombreux paramètres (géométrie du remblai, dimension de la cavité, caractéristiques du géosynthétique, modes de chargement et type d'effondrement).

## 6. Références bibliographiques

- Direction générale de la prévention des risques (2013) Plan national pour la prévention des risques liés aux effondrements de cavités souterraines. Ministères de l'Ecologie, du développement durable et de l'Energie.
- Hanesse M. P (2012). Carrières souterraines sur le territoire de Lille, Hellemmes, Lomme (59). Rapport d'étude INERIS DRS-11-123081-10891A.
- Huckert A. (2014). Approches expérimentale et numérique du dimensionnement de renforcements géosynthétiques sur cavités et inclusions rigides. Thèse de doctorat, Université de Grenoble, 224 pages.
- Huckert A., Villard P., Briçon L., Auray G. (2015). Approche expérimentale du dimensionnement d'une couche de sol traité renforcé par géosynthétique sur cavités potentielles. 10<sup>ème</sup> Rencontres géosynthétiques -24-26 mars 2015, La Rochelle.
- Lambert C. (2012). Mise en sécurité d'effondrement de cavités souterraines situé en domaine privé dans le département du Nord (59). Rapport d'étude INERIS DRS-12-128945-07936A.
- Leonard C. (2005). Évaluation et gestion des risques liés aux carrières souterraines abandonnées. Séminaire de restitution et de valorisation des travaux INERIS – Réseau des LPC, École nationale des ponts et chaussées, Paris, 11 mai 2005.
- Tritsch J-J. (2007). Mise en sécurité des cavités souterraines d'origine anthropique Surveillance – Traitement, Rapport d'étude INERIS-DRS-07-86042-02484A.
- Villard P., Gourc J.P., Giraud H. (2000). A geosynthetic reinforcement solution to prevent the formation of localised sinkholes. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 37, pp 987-999.