

ÉVALUATION DU COMPORTEMENT MECANIQUE DES COLIS DE DECHETS RADIOACTIFS DANS LES OUVRAGES GRAVILLONNES DU CENTRE DE STOCKAGE DE L'AUBE

EVALUATING MECHANICAL BEHAVIOUR OF RADIOACTIVE WASTE CANISTERS IN GRAVELLED STRUCTURES AT THE AUBE DISPOSAL CENTRE

Xuan-Phu NGUYEN¹, Marco CAMUSSO¹, Daniel BILLAUX¹, Antoine PASTEAU²

¹ ITASCA Consultants S.A.S., Écully, France

² Andra, Châtenay-Malabry, France

RÉSUMÉ – Les déchets radioactifs de faible et moyenne activité à vie courte sont envoyés au Centre de Stockage de l'Aube (CSA) qui est exploité par l'Agence Nationale pour la gestion des Déchets Radioactifs (ANDRA). Une partie de ces déchets sont conditionnés dans des conteneurs en béton qui sont empilés les uns sur les autres au sein d'ouvrages gravillonnés. Une évaluation du comportement mécanique de ces ouvrages a été réalisée, avec le logiciel *FLAC3D*, par ITASCA Consultants SAS, en collaboration avec EGIS Industries. Des scénarios représentatifs et « enveloppes » ont ainsi été identifiés. Une approche de changements d'échelles ascendants et descendants a été adoptée afin de comprendre et d'évaluer le comportement mécanique à différents niveaux : colis individuel, piles de colis entourées de gravier, enfin assemblage de piles dans un ouvrage. À l'échelle d'un colis, plusieurs cas de figure ont été analysés pour étudier le transfert de charge (hétérogène) entre 2 colis superposés, en tenant compte de (i) quatre types de conteneurs (un cube et quatre cylindres), (ii) plusieurs mélanges de déchets et (iii) éventuels défauts du couvercle. À l'échelle d'une pile de colis, en plus des variations des colis individuels, différents calculs ont été réalisés pour évaluer les effets induits par une excentricité entre colis superposés. Les propriétés effectives des piles sans le gravier sus-jacent ont ainsi été estimées et utilisées dans les modélisations à l'échelle de l'ouvrage complet de stockage, où divers agencements de piles ont été étudiés. Les efforts les plus critiques transférés sur les piles ont ainsi été identifiés, puis réutilisés pour les modèles des piles pour vérifier leur intégrité. L'étude a permis de confirmer les performances mécaniques des différents assemblages, ceux des colis et des piles, tout en permettant de détecter les configurations les plus défavorables afin d'optimiser les règles de fonctionnement du stockage.

ABSTRACT – Low- and intermediate-level, short-lived radioactive wastes are sent to the Aube Disposal Centre, which is operated by the National Agency for Radioactive Waste management (ANDRA). Part of these wastes are conditioned in concrete canisters, stacked on top of each other in storage structures. Inter-canister voids are then filled by gravel. An evaluation of the mechanical behaviour of the storage structure has been carried out, using *FLAC3D* software, by ITASCA Consultants SAS in collaboration with EGIS Industries, by accounting for representative and enveloping scenarios. Progressive upscaling (individual canisters, then piles of stacked canisters and gravel, and finally assembly of gravelled piles into the storage structure) and downscaling (load on piles calculated back from stress transferred by the storage concrete structure) are used. At the individual canister scale, several cases were analysed to study the load transfer between 2 superposed canisters, considering four container types (a cube and four types of cylinders), several waste mixtures, and eventual lid defects. At the scale of canisters pile, in addition to variations in individual canisters, pile eccentricity was also considered. Effective properties of piles without the overlying gravel were estimated and used for

modelling a representative storage volume, in which various pile arrangements were studied. The most critical efforts transferred onto piles were identified, then used to re-evaluate the pile integrity. The study provided essential elements to confirm mechanical performance of different assemblies, those of canisters and of canister pile, and to detect critical configurations in order to optimise the disposal principles.

1. Introduction

Au Centre de Stockage de l'Aube (CSA), exploité par l'Agence Nationale pour la gestion des Déchets RADIOactifs (ANDRA), une partie des déchets de faible et moyenne activité, à vie courte est conditionnée dans des conteneurs en béton. Ces colis sont empilés les uns sur les autres au sein d'ouvrages gravillonnés (OG), eux aussi en béton, et enfouillés sous une couverture épaisse d'une dizaine de mètre. Afin d'évaluer les performances mécaniques de ces assemblages, considérablement hétérogènes, et d'optimiser le stockage, leurs comportements mécaniques est étudié à différentes échelles.

L'étude décrit dans cette communication vise à apporter des réponses en termes de :

- L'optimisation de la conception de l'ouvrage de stockage : la dalle étant dimensionné comme autoportante sous son poids propre, il faut assurer que la plupart de la charge de la couverture est reportée sur les voiles et le remplissage ;
- La justification de certaines exigences dans les spécifications d'acceptation des colis, telles que celles en termes des systèmes de fermeture des colis (couvercle, clavage, bouchons), des taux de vides internes dont le vide apical ;
- L'impact des colis défailants ayant été stockés dans les OG, tels qu'une surépaisseur des bouchons ou des aspérités sur les couvercles.

Ces objectifs ont été étudiés à 3 échelles avec :

- La simulation de colis individuels de béton, soumis au poids des colis supérieurs ainsi qu'à celui de la couverture définitive, tenant en compte de leur typologie (C1, C4, CBF-C1, CBF-C2 et CBF-K), de leur remplissage (blocage des déchets, taux de vide, présence d'un vide apical), et de leurs éventuels défauts.
- La simulation de piles de colis de béton, avant fermeture (chargement propre de la pile) et après fermeture de l'ouvrage (chargement par le poids propre de la pile et sous le poids de la future couverture définitive) avec une caractérisation de leur comportement mécanique effectif.
- Vérification du dimensionnement et optimisation de l'ouvrage (dalle et voiles).

Toutes les simulations sont réalisées avec le logiciel FLAC3D (ITASCA, 2012). Vue le nombre considérable des cas étudiés, seuls quelques résultats typiques pour chaque échelle seront succinctement présentés.

2. Matériaux

Le mélange de déchets contenu dans les colis consiste en des déchets bloqués ou non-bloqués, vides (à cœur) et mortier d'enrobage. Le vide apical, entre le niveau supérieur du mélange de déchets et la face inférieure du couvercle, est limité par les exigences de l'Andra à 3% de la hauteur extérieure du colis. Les caractéristiques statistiques des déchets stockés en ouvrages gravillonnés sont reprise de celles des ouvrages bétonnés du CSA qui ont fait l'objet d'une précédente étude (Henry & Erlicher, 2012). De fait, trois cas de remplissage en mortier correspondant à trois types de matériaux de déchets - PVC, Aluminium ou Titane – sont prise en compte (cf. Figure 2) et représentés par un modèle élastique. Les déchets non-bloqués sont, par simplicité, représenté eux aussi par un modèle élastique de faible module d'Young (100 MPa).

Le béton de colis et le mortier d'enrobage de déchets sont modélisés avec un modèle de comportement élastoplastique de type Mohr-Coulomb avec différents comportements post-pic, notamment en traction (Figure 1). Le mortier est ainsi représenté par un modèle « fragile » tandis que le béton de colis par un modèle radoucissant, avec une diminution progressive de la résistance avec le développement de la déformation plastique. Pour ce dernier, le calage des paramètres de la loi radoucissante a été fait sur la base des résultats d'essais de traction uniaxiale (RILEM TC 162-TDF, 2002).

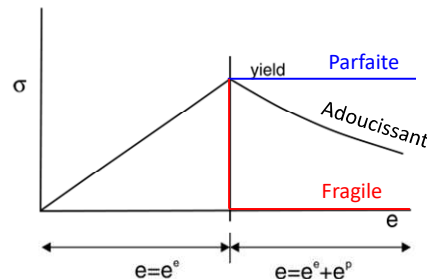


Figure 1. Illustration des modèles de comportement élastoplastiques en traction uniaxiale

Tableau 1. Propriétés mécaniques du béton de colis et du mortier d'enrobage

Propriété	Symbole	Unité	Béton de colis	Mortier d'enrobage
Module d'Young	E	GPa	30	7,4
Coeff. de Poisson	ν	-	0,25	0,25
Angle de frottement interne	ϕ	°	38	38
Cohésion	c	MPa	12,19	1,95
Masse volumique	ρ	kg/m ³	2400	2290
Résistance en compression simple	R _c	MPa	50	8
Résistance en traction	R _t	MPa	4,5	2,5

3. Comportement des colis individuel

La charge spécifique sur les colis en pied de pile est d'environ 0,35 MPa. Sa distribution n'est cependant pas uniforme, mais dépend de l'interaction avec le fond du colis sus-jacent. Une analyse réaliste du transfert de charge au niveau du couvercle nécessite ainsi la modélisation de deux colis superposés (Figure 2a). Dans ce cas, la charge uniforme est appliquée en sommité du colis supérieure, dont la valeur permet de retrouver une pression moyenne de 0,35MPa au niveau du couvercle du colis inférieur.

Le maillage d'un colis CBF-K est montré sur la Figure 2. Les différents constituants du mélange de déchets, suivant les taux de remplissage en mortier sont distribués de façon aléatoire. D'éventuels défauts sur le couvercle d'un colis CBF-K sont représenté : les 5 mm de surépaisseurs des bouchons et du béton de clavage.

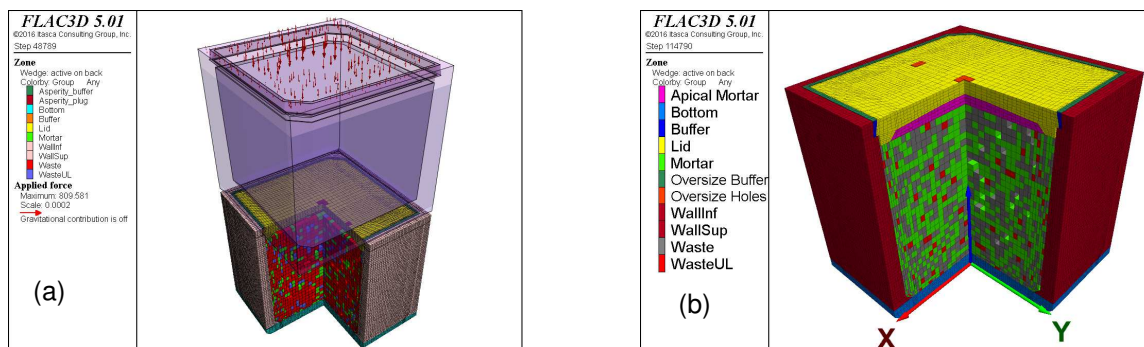


Figure 2. Colis CBF-K : (a) remplissage minimal en mortier, chargement via un colis supplémentaire ; (b) remplissage médian en mortier

La Figure 3 montre l'effet du contenu sur la distribution de pression au niveau du couvercle et sur les contraintes principales mineures et majeures pour un colis CBF-K

sain (sans défaut). Le bilan des forces verticales transférées via les différentes parties de la surface supérieure du colis est donné en Tableau 2. Pour les remplissages médian et maximal, la plupart des charges reprises par le couvercle sont transférées au contenu (Figure 3-2b). Pour le remplissage minimal, ce sont les voiles qui reprennent l'essentiel des charges. Cette hétérogénéité de la distribution des charges confirme l'intérêt de l'approche de chargement utilisé. Avec le remplissage médian, le couvercle repose principalement sur le contenu (via les renforts), plus que sur les voiles, alors qu'avec le remplissage minimal, c'est l'inverse (Figure 3b). Par conséquent, les contraintes principales majeures – contraintes les plus en traction – dans les fibres inférieures du couvercle sont moins importantes dans le premier cas que dans le deuxième (Figure 3c).

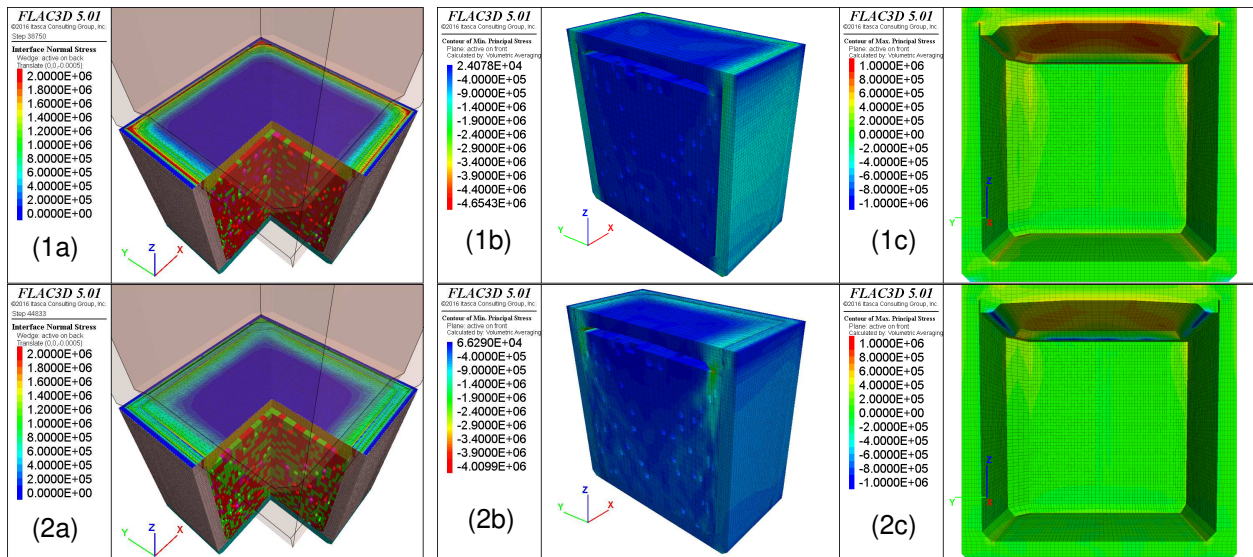


Figure 3. Colis CBF-K sain avec remplissage minimal (1) et médian (2) en mortier : champs de pression sur l'interface avec le colis de chargement (a), de contraintes principales (b, c)

Tableau 2. Bilan des pressions la surface supérieure d'un colis CBF-K sain

Remplissage	Effort	Couvercle	Voiles	Clavage
Minimal	Force F_n (kN)	318	523	169
	Pourcentage (%)	31	52	17
	Contrainte moyenne σ_n (kPa)	148	913	953
Médian	Force F_n (kN)	628	277	107
	Pourcentage (%)	62	27	11
	Contrainte moyenne σ_n (kPa)	293	484	600
Maximal	Force F_n (kN)	580	315	118
	Pourcentage (%)	57	31	12
	Contrainte moyenne σ_n (kPa)	271	550	662

4. Comportement des piles de colis

La hauteur d'exploitation des piles, constituée de colis et du gravier, est près de 8 m. Les colis dans une même pile étant de même type, le nombre de colis et l'épaisseur du gravier sus-jacent varient suivant le type de colis de la pile. La charge sur une pile, d'environ 0,2 MPa, est appliquée uniformément sur la surface supérieure. L'espace entre les piles adjacentes, d'environ 10 cm d'épaisseur, est remplie de gravier, représenté par un modèle élastoplastique du type Mohr-Coulomb. On présent ici le cas d'une pile de colis CBF-K avec l'ensemble des défauts considérés (Figure 4a) : surépaisseurs sur les 2 bouchons du couvercle (seulement sur le colis du bas), remplissage minimal en mortier avec vide apical, et 2 excentrement de 10 cm entre les 2 colis inférieurs. L'épaisseur du

gravier sus-jacent est de 1,08 m. Les surfaces latérales des colis supérieurs qui ne sont pas en contact avec le gravier sont supposées libres : le contact avec les autres piles avoisinantes n'est alors pas pris en compte.

Lors de la superposition des colis, des rotations sont engendrées au niveau du 2^e colis à partir du bas par rapport au centre de sa base (Figure 4b). Ces rotations sont dues à la présence et à la disposition des défauts du couvercle du colis inférieur, ainsi qu'à l'excentrement de la pile. Comme le montre la Figure 5a, une fois le calcul terminé, le 2^e colis repose sur le colis inférieur en seulement 3 « points » : les deux surépaisseurs et un contact supplémentaire créé par la rotation au niveau d'un coin (coin entouré par le cercle vert sur la même figure).

Une fois l'empilage de colis terminé, le gravillonnage latéral est modélisé en 10 étapes, et le gravillonnage supérieur en 2 étapes. La poussée du gravier, de dizaines de kPa (cf. Figure 6c) amène à une rotation supplémentaire de la pile. Le contact au niveau du coin entre les deux colis inférieures est ainsi étendu à toute la longueur de l'arête. Le bilan des forces sur les zones de contact entre ces 2 colis (Figure 5b) montre que les charges transférées via le bouchon excentré et les voiles augmentent avec le gravillonnage, et deviennent dominantes.

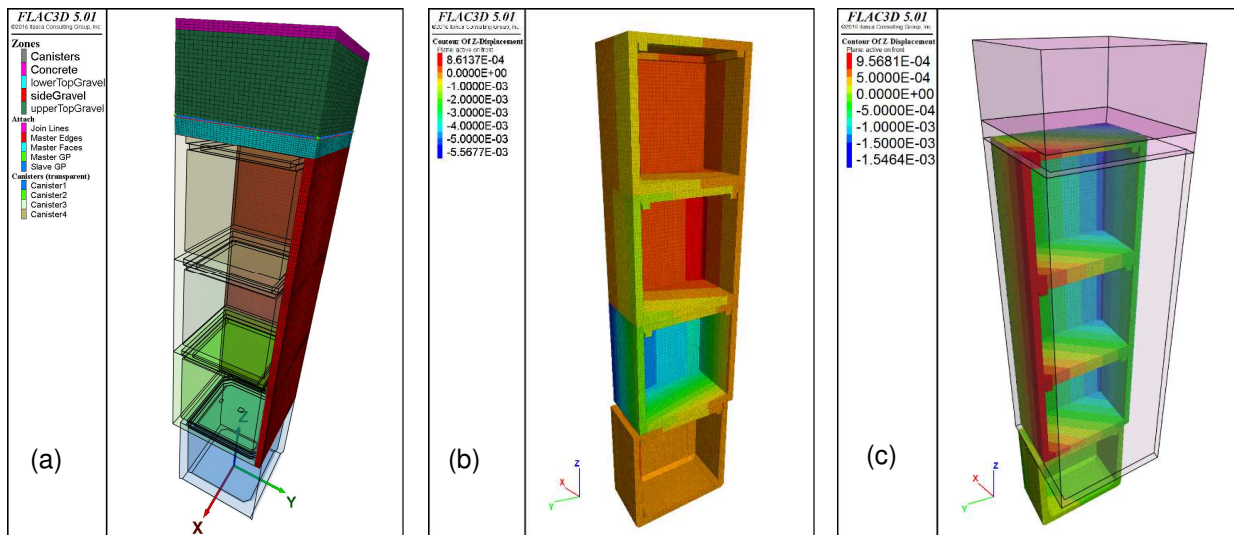


Figure 4. Pile de colis CBF-K avec tous les défauts : (a) maillage du gravier ; champs de déplacement vertical à la fin de la superposition des colis (b) et du gravillonnage (c)

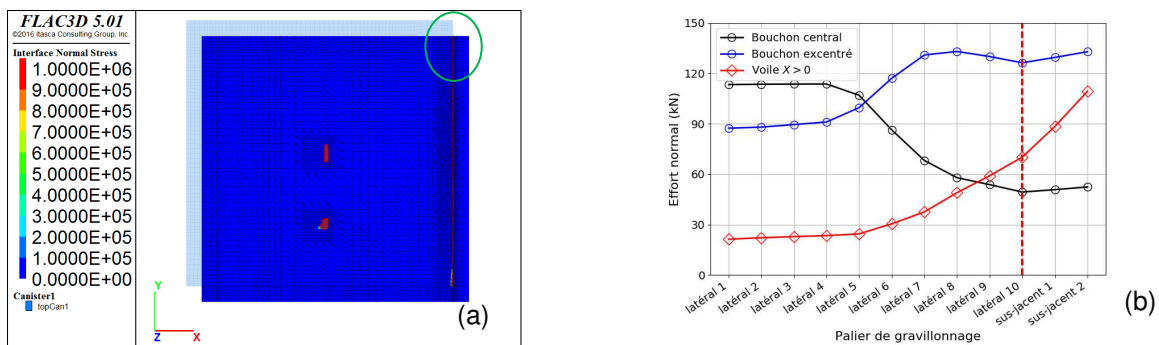


Figure 5. Pile de colis CBF-K avec tous les défauts lors du gravillonnage : (a) les surface de contact entre les 2 colis inférieurs ; (b) variations des forces de contact

Sous le chargement en tête de la pile, comme le côté en $X > 0$ du 2^e colis du bas est « bloqué » par le voile du colis de pied, les colis supérieurs se penchent vers le côté en $X < 0$ (Figure 6a). L'essentiel de la charge appliquée est repris par ce voile du colis inférieur. Sous les charges concentrées transmises au niveau des bouchons, le couvercle du colis inférieur se plastifie (au niveau des fibres inférieures), ce qui entraîne la diminution de sa

résistance en traction (Figure 6b). Les contraintes principales mineures dans le gravier supérieur sont comparables à la charge appliquée, soit environ 250 kPa (Figure 6c). Mais dans le gravier latéral, en raison de la faible épaisseur (10 cm) par rapport à la hauteur (> 5 m), ces contraintes chutent significativement, à quelques dizaines de kPa. Le couvercle du colis de tête est en flexion sous charge uniforme (Figure 6d). Pour le cas d'un remplissage minimal en mortier, les contraintes approchent de la résistance en traction, et la flèche est d'environ 1 mm. Comparé au couvercle d'un colis sain en bas de pile (Figure 3-3), le couvercle d'un colis de tête est donc plus critique.

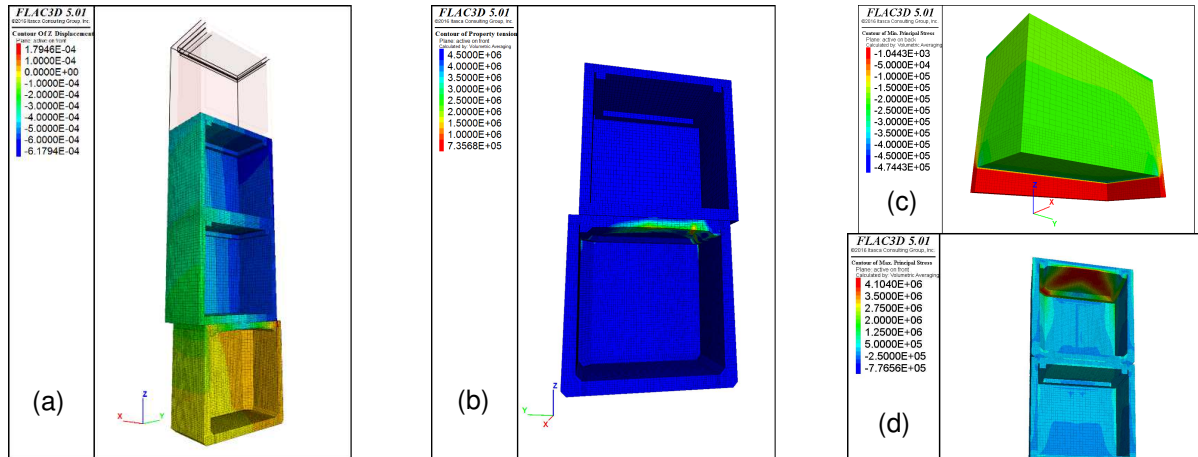


Figure 6. Pile de colis CBF-K avec tous les défauts sous chargement : (a) déplacement vertical ; (b) résistance en traction résiduelle ; (c) contrainte principale mineure dans le gravier ; et (d) contrainte principale majeure dans les conteneurs supérieurs

A partir de ces modèles, les propriétés élastiques équivalentes des piles sont estimées en considérant les piles jusqu'à l'arase du colis de tête et jusqu'à la surface supérieure du gravier (rigidité globale). Dû au fort contraste entre le béton des conteneurs et le gravier, la rigidité globale dépend exclusivement de l'épaisseur du gravier supérieur, qui varie de 8 (pile C1) à 108 cm (pile CBF-K).

5. Comportement d'un ouvrage monobloc

Un OG monobloc fait environ 20 m de longueur et largeur sur 8 m de hauteur. Les épaisseurs du radier et des voiles sont de 40 cm, tandis que celle de la dalle de fermeture de 25 cm. Deux piles de rigidités globales extrêmes – maximale (pile C1) et minimale (pile CBF-K) – sont considérées pour le remplissage des OG. Dans le modèle de l'OG monobloc, les piles sont modélisées avec un matériau équivalent, dont les caractéristiques élastiques tiennent compte de la raideur équivalente jusqu'à l'arase du colis de tête (Tableau 3). Ces piles sont ensuite recouvertes par une épaisseur de gravier (8 et 108 cm, respectivement pour les piles C1 et CBF-K), puis par le béton de protection biologique (20cm) et par la dalle de l'ouvrage (Figure 7a). Une charge de la couverture (144 kPa, correspondant à 8 m de sol) est appliquée sur la dalle. On note de faibles valeurs du coefficient de Poisson des matériaux équivalents des piles par rapport à celle du gravier ($\nu = 0.25$).

Tableau 3. Propriétés équivalentes des piles de colis de raideurs minimale et maximale

Matériau	Piles de colis CBF-K de raideur équivalente minimale	Pile de colis C1 de raideur équivalente maximale
Masse volumique ρ (kg/m ³)	1573	1721
Module d'Young E (GPa)	1,20	5,61
Coefficient de Poisson ν (-)	0,034	0,018

On présente ici des résultats pour un OG avec une concentration des piles C1 comme montrée sur la Figure 7a, la restante partie étant constituée de piles CBF-K. Cette configuration est défavorable du point de vue de la tenue et de la flèche de la dalle de couverture, et aussi de la charge sur les piles C1. La Figure 7b montre que le plus grand déplacement correspond au tassement du gravier au-dessus des piles CBF-K. Par conséquent, les contraintes de traction les plus importantes se trouvent sur les bords intérieurs des voiles de l'ouvrage et des bords du bloc des piles C1 (Figure 7c). Les pressions sur l'arase des piles sont présentées sur la Figure 7d. Le profile horizontal de ces pressions (dont la position est indiquée par des points rouges) est présenté sur la Figure 7e. Un saut de pression, entre 500 et 50 kPa, est clairement observé au droit de la limite entre les deux domaines de piles, au vu de la différence d'épaisseur de gravier de recouvrement. Les piles CBF-K à proximité des piles C1 et des voiles présentent logiquement des pressions nettement moins élevées. Sur les voiles, la poussée latérale exercée par le gravier est plus grande à proximité des piles C1, à cause des efforts verticaux plus importants transférés sur ces piles. Au niveau du gravier sus-jacent les piles CBF-K, la poussée maximale est plus importante (30 kPa) du fait d'un coefficient de Poisson de 0,25 et d'une épaisseur de plus de 1 m.

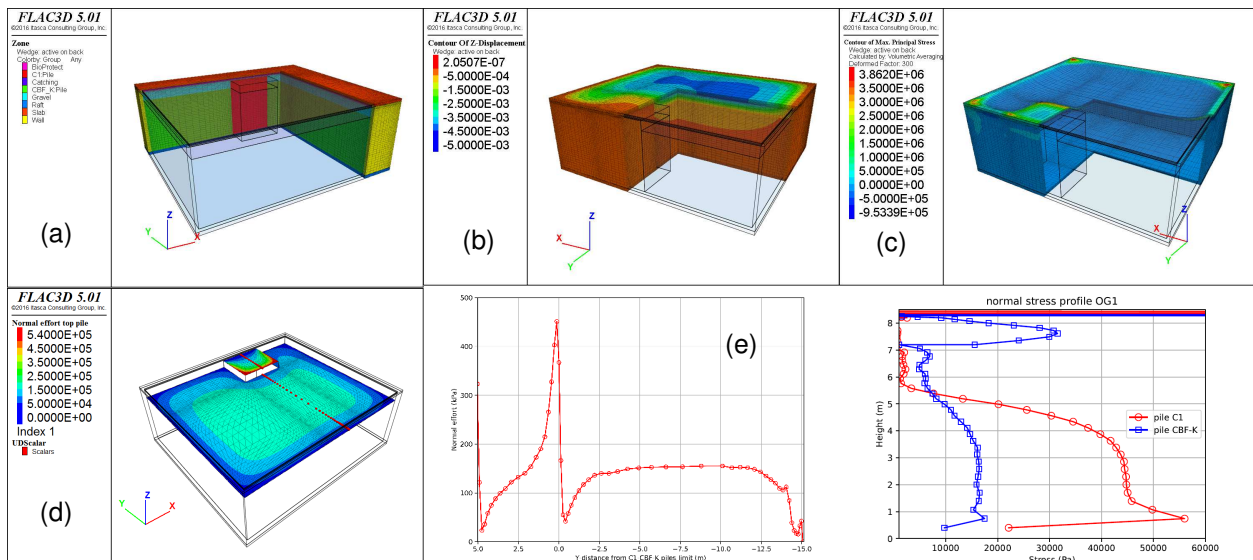


Figure 7. (a) configuration d'un OG ; (b) déplacement vertical ; (c) contrainte principale majeure dans le béton de l'OG ; (d, e) pression sur les piles de colis ; (f) pression sur les voiles

6. Conclusions

Les performances mécaniques des ouvrages gravillonnés ont été évaluée à différentes échelles en tenant compte de plusieurs scénarios. Les points saillants du comportement mécanique de ces assemblages sont :

- En absence de défaut, le transfert de charge entre les colis se réalise essentiellement via les voiles. Le béton des conteneurs ne plastifie pas, sauf dans le couvercle du colis CBF-K en tête de pile du fait de sa flexion amplifiée par le caractère uniforme du chargement qu'il subit. La couche plastifiée est cependant mince et non traversante.
- La combinaison d'un vide apical et d'un défaut (de type surépaisseur plurimillimétrique) sur le couvercle d'un colis en bas de pile engendre un endommagement significatif, se traduisant par des bandes de plastification (fissuration) traversant l'épaisseur du béton des colis.
- Les défauts considérés sur le couvercle du colis en bas de pile peuvent provoquer de légères rotations et/ou translations des colis sus-jacents (déplacements horizontaux de quelques mm) sans engendrer d'efforts complémentaires significatifs. Par ailleurs,

l'effet d'un excentrement de 10 cm sur le comportement des colis et des piles de colis considérés est limité, en particulier en termes de plastification éventuelle.

- Le fort contraste de rigidité entre le gravier de remplissage et le béton des colis a trois conséquences principales :
 - o Le gravier situé entre les piles de colis est très peu confiné, d'où la faible poussée latérale du contenu des ouvrages sur les voiles, et il n'a qu'une influence marginale sur le comportement des piles ;
 - o La rigidité globale des piles, en incluant le gravier sus-jacent, est exclusivement pilotée par l'épaisseur de la couche de gravier ;
 - o Aux limites entre deux domaines de piles de colis recouverts par des épaisseurs différentes de gravier, les efforts se concentrent sur les piles plus rigides et peuvent atteindre localement le double de la valeur nominale.

7. Références

- Henry, J.-C., & Erlicher, S. (2012). *Evaluation du comportement mécanique des ouvrages bétonnés du CSFMA* (Rapport No. 012R-012A). ITASCA.
- ITASCA. (2012). *FLAC3D V5. Fast Lagrangian Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions. Constitutive models*. (S.l.) : (s.n.).
- RILEM TC 162-TDF. (2002). Bending test. Final Recommendation. *Materials and Structures/Matériaux et Constructions*, 35, 579-582.