ESSAIS DE DALLAGES EN BETON FIBRE SUR INCLUSIONS RIGIDES AVEC ET SANS MATELAS DE TRANSFERT DE CHARGES

STEEL FIBER REINFORCED CONCRETE SLAB EXPERIMENTATION ON RIGID COLUMNS WITH AND WITHOUT SOIL MATRESS

Germain AURAY[1], Laurent BRIANÇON[2], Bastien DUPUIS[1], Elena VIDAL SARMIENTO[3]
[1] BEKAERT, Lille, France
[2] INSA, Lyon, France
[3] BEKAERT, Barcelona, Espagne

RÉSUMÉ – Dans le cadre du projet national ASIRI+ nous souhaitons étudier l'impact du matelas de transfert de charges sur le comportement structurel d'un dallage en béton renforcé par fibres métalliques mis en œuvre sur un sol compressible renforcé par inclusions rigides. Dans cet article on présente la mise en œuvre de la planche d'essai et les premiers résultats obtenus.

ABSTRACT – In ASIRI+ French national project we would like to study the design of steel fiber reinforced concrete slabs supported by a soil reinforced by rigid columns. In particular, we will investigate the effect of the top finishing soil granular layer on the steel fiber reinforced concrete slab. In this paper we will present the experimentations and first results.

1. Introduction

Sur une plateforme d'environ 150 m² près de Dourges (département du Nord), 2 dallages d'épaisseur 12 cm, de largeur 6,90 m et de longueur 8,80 m ont été pré-dimensionnés et construits sur un sol compressible renforcé par inclusions rigides de longueur 4 m et de diamètre 27 cm. Le premier dallage est sans plateforme de transfert de charge. Pour le second dallage, les inclusions rigides ont été recépées à 14 cm sous le niveau de la plateforme. Dans les deux cas, une couche de sable de 5 cm et une feuille plastique sont disposées sous le dallage. Pour ces 2 configurations, le dallage, le sol support et les inclusions rigides sont instrumentés par différents capteurs (pression, tassement, jauges de déformations, fibres optiques).

2. Objectifs de l'expérimentation

Les essais consistent à appliquer différents cas de chargement sur les deux dallages. L'objectif est de mesurer les phénomènes qui se produisent dans le système (dallage et sol renforcé) lorsque l'on réduit le matelas de transfert de charges. Ce programme vise à apporter de nouveaux éléments aux recommandations ASIRI (2012) dans le cas de matelas réduits en analysant les phénomènes qui se produisent dans ce cas, en validant un modèle numérique vis-à-vis du comportement réel de l'ouvrage et en proposant une méthode de dimensionnement qui sera intégrée dans les recommandations ASIRI+.

3. Sol renforcé par inclusion rigides

3.1. Paramètres pour le dimensionnement du dallage

Le site bénéficie d'une étude géotechnique qui a été menée pour la réalisation d'un bâtiment logistique à proximité. Nous avons complémenté cette étude avec un essai au pénétromètre statique dans la zone d'essai.

L'entreprise KELLER partenaire du projet ASIRI+ a réalisé les inclusions dans ce sol. A l'aide d'un modèle plaxis 2D et d'un essai de chargement réalisé sur inclusion (autre volet du programme ASIRI+), les paramètres du sol support et les moments complémentaires (figure 1) attendus pour le prédimensionnement initial du dallage ont été déterminés.

Nature du sol	N° couche	Epaisseur	Module oedométrique	Module d Es
[m]	**[-]**	**[m]**	**[MPa]**	**[MPa]**
Matelas	H1	0,19	80,0(*)	50,0
Sol renforcé	H2	4,31	10,9	6,8
Sol d'ancrage	H3	1,00	9,0(*)	5,6

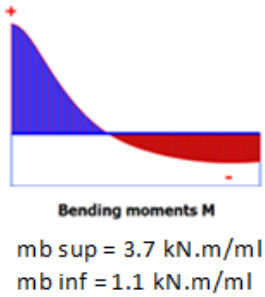


Figure 1. Paramètres de sol et moments complémentaires dans le dallage suivant les recommandations ASIRI (2012)

3.2. Instrumentation du sol renforcé

Les inclusions 8, 9, 10, 11, 15 et 16 (figure 2) sont instrumentées par des extensomètres à cordes vibrantes. Des capteurs de pression totale sont posés sur les têtes des inclusions 8 et 11. Ces capteurs, de même section que celle des inclusions, sont prévus pour mesurer le transfert de charge sur les têtes des inclusions au cours des chargements. Le tassement différentiel sol/inclusion est mesuré par l'intermédiaire de transmetteurs de pression pour mesure de niveau (4-20 mA) de gamme 0,1 bar. Le transmetteur mesure la variation de pression entre sa position et le niveau d'un réservoir situé en dehors de la zone d'essai.

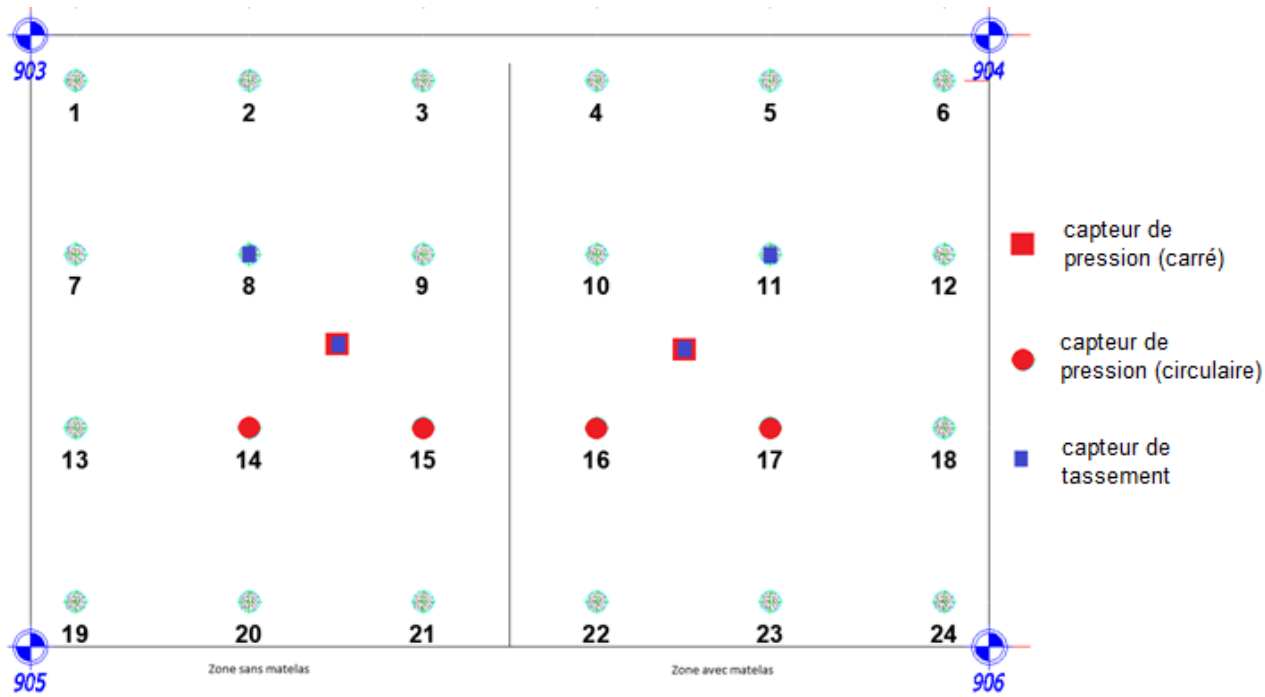


Figure 2. Schématisation des capteurs installés. Sur la partie gauche le dallage est sans matelas de transfert de charge et sur la partie droite il comporte un matelas de transfert de 19 cm (sable inclus). La distance entraxe entre les inclusions est de 2,5 m et le diamètre d'inclusion 27 cm.

4. Dallage en béton renforcé par fibres métalliques

4.1. Chargements réalisés

Sur le site, nous avons procédé à 3 types de chargements (figure3). Le premier type est un chargement réparti avec ilot de palettes. On utilise pour cela des cuves de contenance 1000 L qui nous permettent d'ajuster la valeur de charge en fonction de la quantité d'eau permettant d'appliquer une charge maximale de 2,37 tonnes/m².

Le deuxième type est un chargement par rack. Nous avons utilisé une échelle de rack logistique de 2 étages pour pouvoir effectuer un chargement avec des pieds d'appuis ponctuels. La charge maximale que nous pouvons appliquer est de 0,96 tonnes par pied.

Enfin nous utilisons un chariot élévateur à pneu pour manipuler les charges sur chantier, ce chariot nous permet aussi de réaliser un chargement par charge essieu. La charge maximale que nous pouvons appliquer est de 4,4 tonnes/roue.

Figure 3. Schématisation des types de chargements

4.2. Prédimensionnement du dallage

L'épaisseur du dallage a été déterminée pour permettre d'observer des déformations suffisantes au sein de la structure de dallage en fonction de ces charges (contraintes de flexion approchant de 3 MPa avec des déplacements de l'ordre de grandeur 4 mm). Pour cela, trois types de dimensionnements ont été réalisés :

- un calcul dans le cadre réglementaire français en se basant sur le DTU 13.3. (AFNOR, 2021) (calcul élastique linéaire) incluant les moments complémentaires des recommandations ASIRI (2012),
- un calcul avec la méthode des lignes de ruptures de Losberg (1961) (calcul moment plastique), méthode la plus utilisée à l'échelle mondiale pour réaliser des dimensionnements de dallages en béton renforcés par fibres métalliques,
- un modèle numérique élastique linéaire en éléments finis réalisé avec le logiciel SCIA Engineer.

Les paramètres d'entrée sont déterminés en fonction des éléments fournis dans la note de calcul des inclusions rigides et pour les cas de charges définis au paragraphe 4.1. Le bureau d'étude Monofloor France spécialisé dans le dimensionnement des dallages a été consulté pour relecture des hypothèses et résultats.

Afin de pouvoir observer des phénomènes mesurables dans la structure de dallage ces méthodes convergent vers un *dallage en béton C30/37 d'épaisseur 12 cm renforcé par 25 kg/m3 de fibres Dramix® 5D 65/60BG*.

4.3. Réalisation du dallage

Pour la mise en œuvre nous nous sommes conformés en tous points au DTU 13.3. (AFNOR, 2021) et au Document Technique d'Application 3.3/21-1036_V1 (CSTB, 2021) de l'entreprise Bekaert sur les dallages en béton de fibres métalliques. Simplement le type de fibre est spécifique. En effet en réduisant le matelas de transfert de charge les efforts appliqués dans le dallage seront plus importants et si l'on veut reprendre convenablement ces efforts avec des épaisseurs adaptées il était nécessaire d'utiliser des fibres métalliques plus performantes et structurelles que les fibres métalliques traditionnelles des dallages industriels en France.

Nous avons confié la réalisation du dallage (figure 4) à l'entreprise spécialisée PLACEO Nord, agence Nord de la filiale française PLACEO du groupe RCR qui est accréditée pour ce type d'ouvrages.

Figure 4. Photos de préparation de la plateforme et coulage

4.4. Instrumentation du dallage

On utilise 2 typologies de capteurs : des jauges de déformations et des fibres optiques. Afin de correctement positionner les capteurs dans le cœur du béton nous utilisons des cales et seulement une barre de diamètre 6 mm. L'enrobage moyen mesuré est de 2,5 cm vis-à-vis de la face supérieure et 3,5 cm vis-à-vis de la face inférieure. La barre étant seule et de petit diamètre elle exercera une faible influence sur le comportement général de la section de béton, mais elle permet d'assurer l'ancrage des capteurs avec la matrice afin de confirmer la bonne mesure du profil de déformation.

Les jauges de déformation sont collées directement sur les aciers ou le béton face supérieure de dallage et les fibres optiques sont attachées sur les aciers et noyées dans le béton (figure 5). La technologie de mesure fibre optique choisie est la technologie Brillouin. Les mesures fibre optique ont été réalisées par l'Université Gustave Eiffel partenaire du projet ASIRI+.

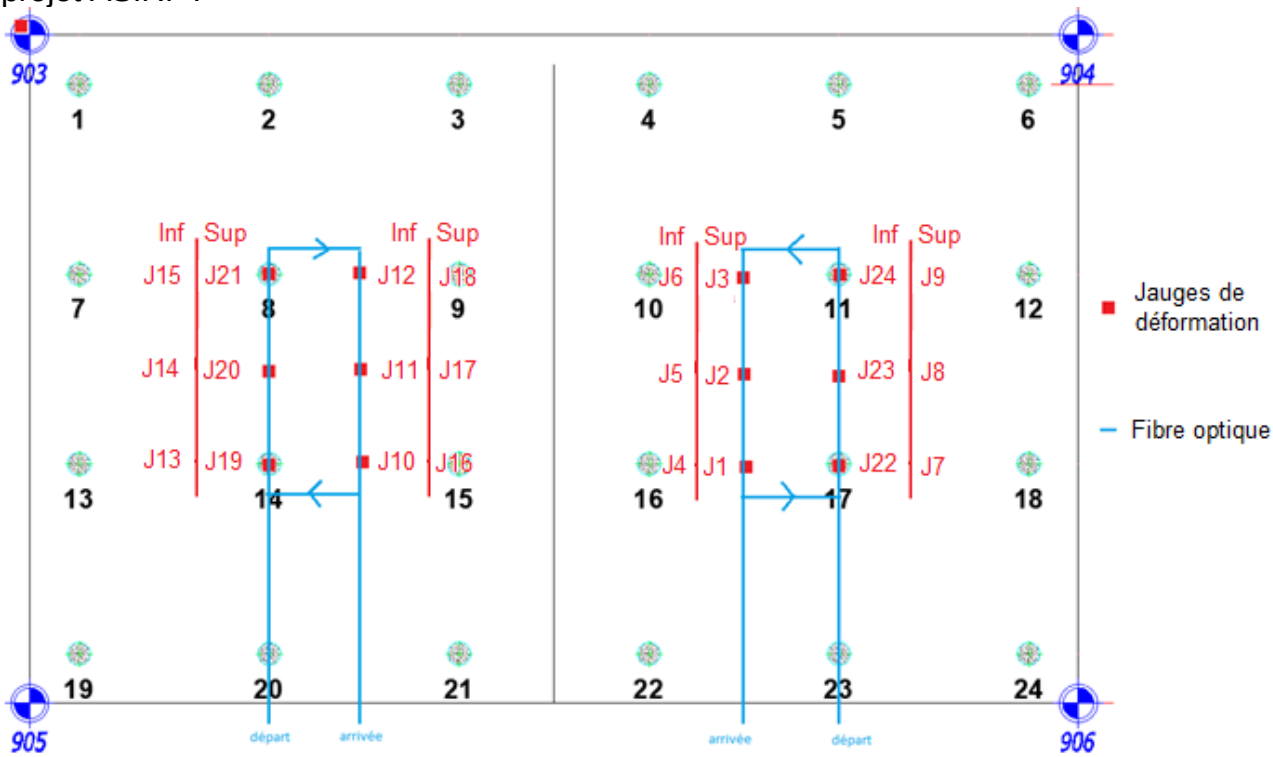


Figure 5. Schématisation des capteurs installés au sein de la dalle en béton fibré.

5. Premiers résultats

5.1. Dans le sol compressible

Afin de bien mettre en place l'expérimentation, en accord avec les discussions lors des réunions du projet ASIRI+ nous avons effectué 3 mois après le coulage un chargement longue durée pendant 1 mois de valeur 1 tonne/m² centré sur les dallages avec le maximum de surface que pouvait nous donner les cuves pour cette charge.

Toutefois, le poids propre du dallage complété avec ce pré-chargement n'ont pas permis de créer un tassement d'ensemble suffisant pour engendrer des déformations significatives au niveau des équipements de mesure du sol compressible (paragraphe 3.2). C'est dommage sur le principe mais cela ne remet pas en cause les mesures du premier projet national ASIRI (2012). Le poinçonnement général et les moments complémentaires s'appliquent tels que définis dans les recommandations. Nous n'avons simplement pas pu compléter ces éléments avec une nouvelle mesure.

5.2. Dans le dallage

Nous faisons à nouveau face à un problème de mesure. La technologie sélectionnée pour les fibres optiques est précise dans l'absolu mais s'avère inadaptée au cas de notre dallage. En effet les rallonges, l'impact thermique et les courbures engendrent un bruit de fond trop important perturbant la précision d'analyse des zones souhaitées. L'utilisation d'une technologie d'analyse plus courte distance (Bragg – Raman – Rayleigh) aurait pu être bénéfique mais n'était pas disponible au moment voulu dans le projet ASIRI+. Reste l'exploitation des jauges de déformation décrite ci-après.

5.2.1. Déformations thermiques et de retrait du béton

Entre la mesure d'initialisation des capteurs (avant pré-chargement paragraphe 5.1.) et le début des essais (paragraphe 4.1.) 3 mois plus tard nous avons pu mesurer sur l'ensemble des jauges de déformation une déformation uniforme hors chargement de l'ordre de 1300 à 1400 µdef. Si l'on reprend les principes du DTU 13.3. (AFNOR, 2021) au niveau du retrait des dallages et des déformations thermiques donnés en annexe C on obtiendrait les résultats présentés dans le tableau 1.

Tableau 1. Estimation simplifiée des déformations hors chargement

RETRAIT

Déformation retrait béton (µm/m)	300
Longueur retrait (m)	4,4
Déformation en centre (µdef)	1320

DEFORMATION THERMIQUE

Longueur sollicitée (m)	8,8
Coefficient thermique	0,00001
Variation température (°C)	15
Déformation thermique (µm)	1320

Il est difficile de déterminer avec précision le niveau de température, la longueur de retrait effective en fonction du frottement et la valeur de retrait béton (non mesurée pour ce béton bien qu'une valeur de 300 µm/m soit par expérience souvent atteinte pour des bétons de dallage). Malgré cela, au niveau des ordres de grandeur, il apparaît assez plausible qu'une combinaison de ces facteurs ai pu engendrer cet état initial avant mesure de l'effet des surcharges.

5.2.2. Exemples d'un cas de charge réparti sans matelas de transfert de charge

La figure 6 présente les résultats numériques et les mesures réelles du cas de charge ilot de palette à mi-portée de 1,975 tonnes/m² sans matelas de transfert. Nous comparons les contraintes estimées par le modèle numérique initial de prédimensionnement (partie

haute de la figure) à celles mesurées (en partie basse de la figure converties à partir des déformations). Pour les mesures, les croix signifient que la jauge n'a pas donné de réponse lisible lors de cette lecture. Les cercles au-dessus des positions réelles des jauges estiment les parties plutôt comprimées ou plutôt tendues suivant si on observe les faces inférieures ou supérieures du dallage. Plus le cercle est grand plus la contrainte est élevée. La couleur représente la valeur suivant l'échelle. Les cercles plus larges en transparence donnent un effet d'interprétation de surfaces « plutôt tendues » ou « plutôt comprimées ». Nous constatons que les valeurs varient qualitativement dans le même sens pour le modèle numérique et les mesures. Les valeurs absolues doivent toutefois être recalées car les variations de mise en œuvre (par exemple épaisseur réelle du dallage) et les effets des adaptations pratiques (cas de charges réalisables sur site) nous imposent maintenant d'ajuster plus précisément les paramètres de l'étude numérique.

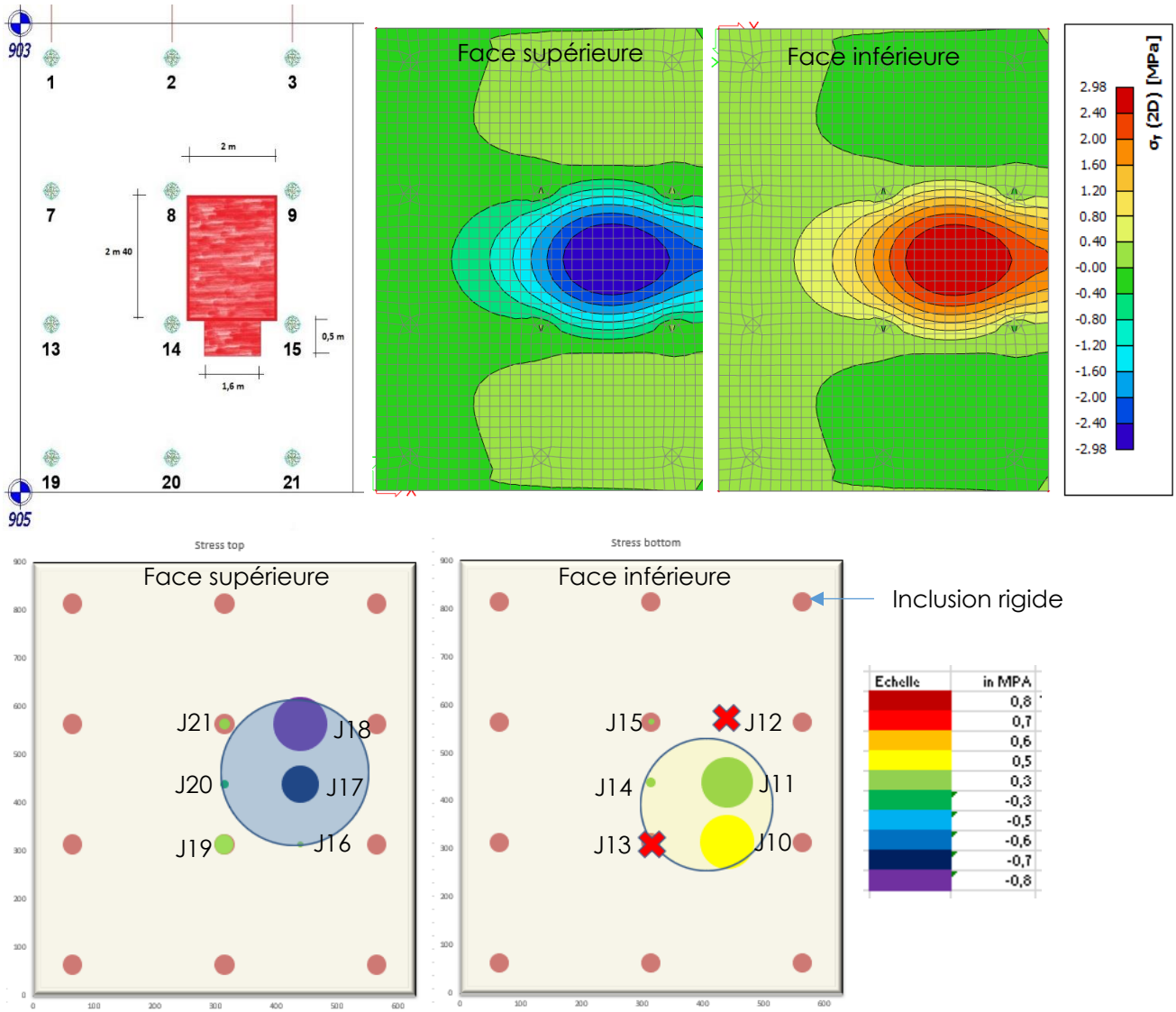


Figure 6. Présentation des résultats du chargement ilot palettes mi-portée sans matelas

La figure 7 présente les mêmes résultats pour le cas de charge ilot de palette à mi-portée étendu et recentré avec 0,78 tonnes/m². Nous constatons bien un déplacement des charges vers les capteurs concernés avec une diminutions des contraintes générales. Toutefois les valeurs de chargements restent trop faibles pour vraiment matérialiser l'impact du poinçonnement des inclusions même si une légère compression en partie inférieure sur la jauge 13 est visible. Cela va dans le sens du modèle numérique qui de plus avait lors du prédimensionnement des valeurs de charges 2 fois plus élevées que réalisables sur site.

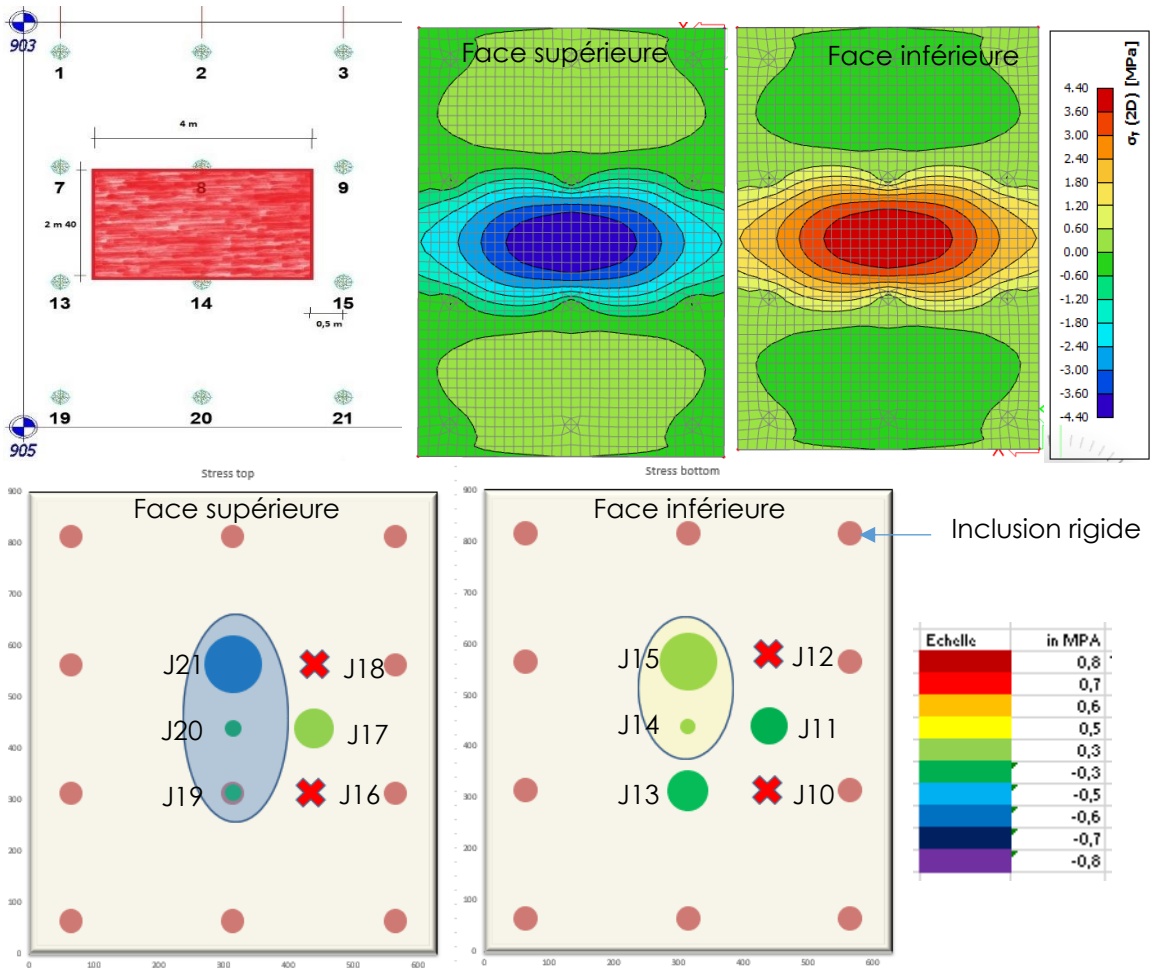
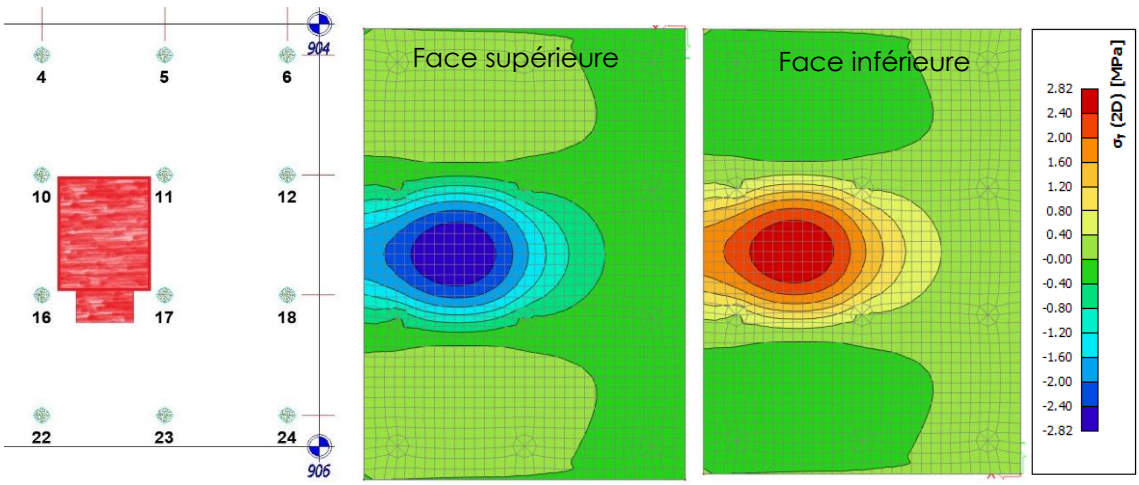


Figure 7. Présentation des résultats du chargement ilot palettes mi-portée, étendu, recentré sans matelas

5.2.3. Exemples de cas de charge réparti avec matelas de transfert de charge

La figure 8 présente à nouveau les mêmes résultats pour le cas de charge ilot de palette à mi-portée 1,975 tonnes/m² mais avec matelas de transfert de charges. Nous constatons que les valeurs de contraintes sont très réduites tout en semblant aller dans le sens attendu. De manière générale (tous cas de charge) l'utilisation du matelas montre une réduction des déformations du dallage qui se comporte plus comme un cas de dallage sur terre-plein ce qui confirme les principes de dimensionnements proposés dans les recommandations ASIRI soit un effet inclusions rigides modélisé par moments complémentaires sous tassement se cumulant au dimensionnement classique de dallage sur terre-plein.



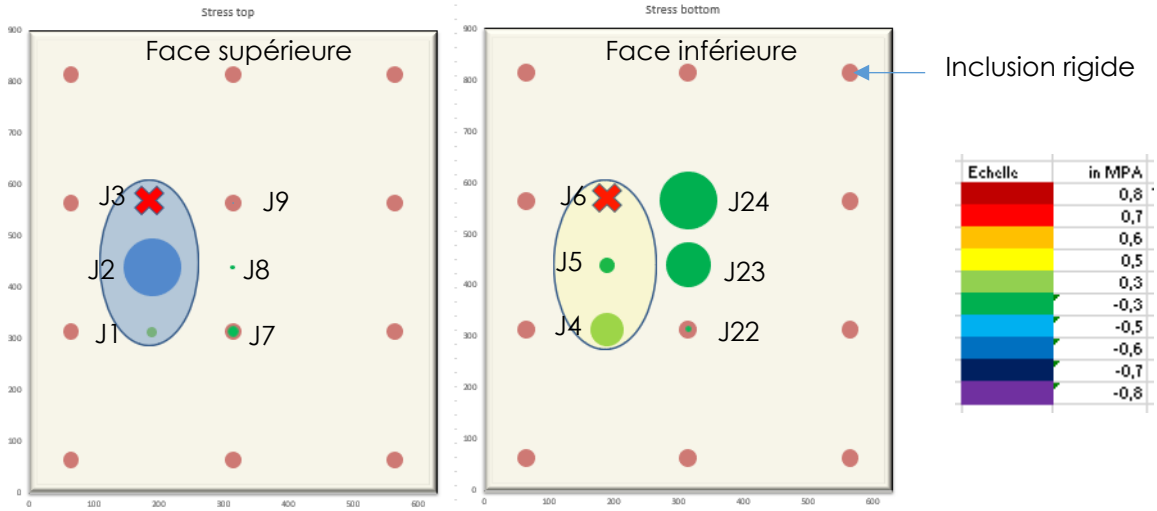


Figure 8. Présentation des résultats du chargement ilot palettes mi-portée avec matelas

6. Conclusion

L'objectif de cet article était de présenter l'expérimentation dans son ensemble et d'observer les premiers résultats obtenus. En premier lieu notons qu'il est difficile de faire tasser l'ensemble de l'ouvrage, même avec un sol de mauvaise qualité et un dallage de faible épaisseur. Les mesures qui ont été prises permettent toutefois d'apprécier convenablement l'effet d'un matelas de transfert de charge sur le comportement en déformation du dallage. Nous avons réalisé en tout une dizaine de cas de charges par dallage (avec et sans matelas) à partir des charges décrites en 4.1. Ces résultats encourageant nous amènent vers la deuxième phase d'analyse en cours pour laquelle nous allons recaler le modèle numérique à partir des hypothèses réelles mesurées sur site (épaisseur du dallage, résistance mécanique du béton fibré, etc…) et les cas de charges concrètement réalisés. En fonction de ces résultats nous espérons pouvoir proposer une méthode de dimensionnement des dallages avec fibres métalliques lorsque le matelas de transfert de charge est réduit à son minimum.

7. Références bibliographiques

ASIRi, (2012). Recommandations pour la conception, le calcul, l'exécution et le contrôle des ouvrages sur sols améliorés par inclusions rigides verticales (Recommandations Projet National ASIRi), PressePont. IREX. Paris ISBN9782-85978-462-1. 360p.

Auray G., Briançon L., ASIRI+, (2020). Livrable T04-03cTr1-2020.

Auray G., Dupuis B., Briançon L., Laveder E., (2020). Livrable T04-06aTr1-2020.

Document Technique d'Application Référence 3.3/21-1036_V1, 2021 Dallage en béton de fibres métalliques BEKAERT France SAS, CSTB.

Losberg A., (1961). Design method for structurally reinforced concrete pavements, Bulletin n°250, Chalmers University of Technology, Göteborg Sweden.

NF DTU 13.3, (2021). Travaux de dallages, Conception, calcul et exécution, AFNOR.