

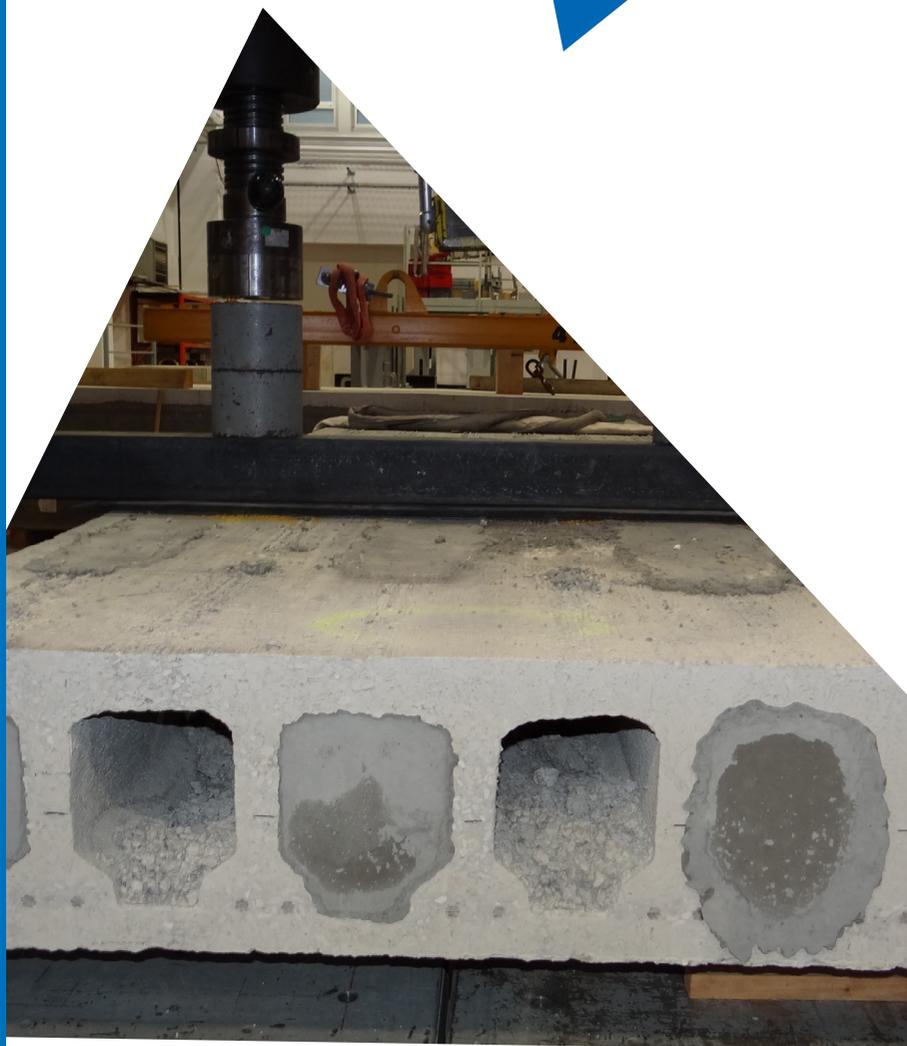
493.E - MARS 2022

ÉTUDES ET RECHERCHES

INFLUENCE DU REMPLISSAGE
DES ALVÉOLES DANS
LA RÉSISTANCE À L'EFFORT
TRANCHANT DES DALLES
ALVÉOLÉES

CAROLINE MORIN - MATTHIEU SCALLIET

CERIB
Expertise concrète



Influence du remplissage des alvéoles dans la résistance à l'effort tranchant des dalles alvéolées

493.E

Avant-propos

Ce rapport est articulé en deux parties :

- la première partie est destinée au lecteur qui souhaite apprécier très rapidement si l'étude évoquée le concerne, et donc si les méthodes proposées ou si les résultats indiqués sont directement utilisables pour son entreprise ;
- la deuxième partie de ce document est plus technique ; on y trouvera donc tout ce qui intéresse directement les techniciens de notre industrie.

© 2022 CERIB – CS 10010 – 28233 Epernon Cedex

ISSN 0249-6224 – EAN 9782857553496

493.E – mars 2022

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction
par tous procédés réservés pour tous pays.

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de son article L. 122-5, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause, est illicite » (article L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon exposant son auteur à des poursuites en dommages et intérêts ainsi qu'aux sanctions pénales prévues à l'article L. 335-2 du Code de la propriété intellectuelle.

Sommaire

1. Synthèse générale de l'étude	5
1.1. Contexte et objectifs	5
1.2. Campagne expérimentale	6
1.3. Principaux résultats	6
1.4. Intérêts et conséquences	6
2. Dossier de l'étude	7
2.1. Contexte normatif	7
2.1.1. Effort tranchant résistant d'une dalle alvéolée précontrainte sans dalle collaborante	7
2.1.2. Effort tranchant résistant d'une dalle alvéolée précontrainte sans dalle collaborante et dont certaines alvéoles sont remplies sur chantier	8
2.2. Objectifs de l'E&R	9
2.3. Campagne expérimentale	10
2.3.1. Démarche expérimentale	10
2.3.2. Description des corps d'épreuve	10
2.3.3. Mode opératoire et dispositif d'essai	17
2.4. Résultats	19
2.4.1. Résultats théoriques	19
2.4.2. Résultats expérimentaux	22
2.4.3. Confrontation : théorie et expérimentation sur la base des caractéristiques réelles des matériaux et des dimensions réelles de la section	25
2.5. Conclusions	28
2.5.1. Résultats des essais	28
2.5.2. Intérêts et perspectives	28
Bibliographie	29
Annexes	30
Annexe 1 - Géométrie de la DAP270	30
Annexe 2 - Relevés dimensionnels réalisés avant essais	31
Annexe 3 - Fiche technique du mortier utilisé	34
Annexe 4 - Matériel d'essais	36
Annexe 5 - Influence de la forme des éprouvettes de contrôle sur les résistances en compression simple et en traction du mortier de remplissage	37
Annexe 6 - Photos des modes de ruine des corps d'épreuve avec remplissage des alvéoles (série A à C)	43
Annexe 7 - Photos des modes de ruines des corps d'épreuve sans remplissage des alvéoles	46

Index des figures	49
Index des tableaux	49
Index des graphiques	51
Index des photos	51

1. Synthèse générale de l'étude

1.1. Contexte et objectifs

La résistance à l'effort tranchant d'une dalle alvéolée précontrainte dans les zones non fissurées à l'ELU est traitée dans la norme produit NF EN 1168+A3 [4] d'Avril 2012 au paragraphe 4.3.3.2.2.

Deux modes opératoires sont proposés :

- Clause 4.3.3.2.2.2 : calcul selon la formule dite avancée (ou formule complexe) ;
- Clause 4.3.3.2.2.3 : calcul selon la formule dite simplifiée, en variante à la méthode avancée.

La norme NF DTU 23.2 [6] d'Août 2008, clause 4.3.2, renvoie à la norme produit et donc à la même méthodologie de dimensionnement.

Il est possible d'augmenter la résistance à l'effort tranchant en zone non fissurée de la dalle alvéolée seule en remplissant sur chantier quelques alvéoles. La prise en compte de la part de résistance à l'effort tranchant apportée par le remplissage de ces alvéoles dans les dalles alvéoles précontraintes est quant à elle traitée de manière différente selon que l'on utilise la norme produit ou le NF DTU :

- Annexe F (informative), F.3 de la norme NF EN 1168+A3 [4] ;
- Clause 4.3.1 de la norme NF DTU 23.2. [6] (nécessité d'utiliser du mortier sans retrait de classe au moins égale à C50/60 et d'assurer une traçabilité du contrôle de la mise en œuvre du remplissage).

On ne traite ici que de dalles alvéolées précontraintes sans dalle rapportée sur chantier. Une seule section transversale de dalle alvéolée précontrainte est étudiée.

Cette étude a pour objectifs :

- De quantifier expérimentalement l'influence du remplissage de quelques alvéoles dans la résistance à l'effort tranchant d'une dalle alvéolée précontrainte ;
- D'évaluer la sécurité apportée par les formules de calcul, de la part d'effort tranchant dû au remplissage des alvéoles de la dalle alvéolée précontrainte sans dalle rapportée sur chantier ;
- De choisir la formule de calcul la plus adaptée pour prédire la résistance à l'effort tranchant d'une dalle alvéolée précontrainte avec alvéoles remplies sur chantier.

Note : cette étude fait suite à une première étude menée au premier semestre 2019 pour laquelle des essais comparatifs sur des dalles alvéolées avaient été réalisés pour évaluer l'influence du remplissage des alvéoles sur l'effort tranchant résistant total. Le remplissage des alvéoles avait été réalisé à l'aide d'un béton courant de classe de résistance C25/30. Ces essais n'avaient pas permis de montrer que l'évaluation par le calcul de l'accroissement de la résistance à l'effort tranchant apportée par les alvéoles remplies était sécuritaire. A l'issue de ces essais, il a donc été demandé au CERIB de mener une autre campagne d'essais d'effort tranchant en utilisant cette fois-ci du mortier sans retrait de classe au moins égale à C50/60 conformément aux recommandations de mise en œuvre de la norme NF DTU 23.2. A noter également que les essais avaient été réalisés sur des dalles alvéolées d'épaisseur totale égale à 36 cm.

1.2. Campagne expérimentale

Pour atteindre les objectifs décrits au § 1.1, une campagne d'essais d'effort tranchant a été menée sur deux séries de 3 dalles alvéolées, à nervures droites, d'épaisseur totale égale à 27 cm et de largeur 1,20 m. Les dalles alvéolées, certifiées NF, ont été fabriquées en usine fixe et livrées au CERIB par le fabricant.

Le paramètre étudié est le remplissage des alvéoles (première série d'essais sur dalles alvéolées précontraintes en configuration standard et seconde série sur dalles alvéolées précontraintes avec 3 alvéoles remplies sur 6).

1.3. Principaux résultats

Les principaux résultats de l'étude sont les suivants (sur la base des dimensions réelles de la section étudiée et des propriétés réelles des matériaux mesurées) :

- Apport d'une résistance supplémentaire avec la présence d'alvéoles remplies ;
- Marge de sécurité plus importante avec la formule de l'effort tranchant résistant total (dalle alvéolée + alvéoles remplies) issue de la norme NF DTU 23.2 [6] d'août 2008 : 1,31 ;
- Marge de sécurité de 1,26 sur la résistance à l'effort tranchant d'une dalle alvéolée précontrainte seule ;
- Marge de sécurité de 1,41 sur la résistance à l'effort tranchant apportée uniquement par le remplissage des alvéoles, avec une limitation de la part de résistance à l'effort tranchant due aux alvéoles à 0,5 fois la résistance à l'effort tranchant d'une dalle alvéolée seule. Un contrôle du remplissage des alvéoles doit être assuré et tracé (minimum de 3 éprouvettes cylindriques normalisées de dimensions $\Phi 160$ mm x H320 mm). Les caractéristiques mécaniques en traction du mortier sont déduites par calcul des résistances en compression simple obtenues sur cylindres ;
- La méthode de calcul de la norme NF EN 1168+A3 n'est pas sécuritaire car la sécurité de la formule est uniquement apportée par la part d'effort tranchant de la dalle alvéolée seule. La part d'effort tranchant due au remplissage des alvéoles est surestimée.

1.4. Intérêts et conséquences

L'étude a montré la pertinence de l'utilisation de la formule de la norme NF DTU 23.2 [6] pour évaluer la résistance à l'effort tranchant d'une dalle alvéolée précontrainte dont certaines alvéoles remplies sur chantier avec du mortier sans retrait de classe au moins égale à C50/60.

2. Dossier de l'étude

Note : dans la suite du document, les dalles alvéolées précontraintes seules (i.e. sans dalle collaborante et sans alvéoles remplies) pourront être nommées « DAP » ou « DAP270 ». Elles sont également décrites en tant que « dalles alvéolées en configuration standard ». Elles ne comportent pas d'ouvertures en partie supérieure.

2.1. Contexte normatif

2.1.1. Effort tranchant résistant d'une dalle alvéolée précontrainte sans dalle collaborante

La résistance à l'effort tranchant d'une dalle alvéolée précontrainte dans les zones non fissurées à l'ELU est traitée dans la norme produit NF EN 1168+A3 [4] d'Avril 2012 au paragraphe 4.3.3.2.2, [4].

Deux modes opératoires sont proposés :

- Clause 4.3.3.2.2.2 : calcul selon la formule dite avancée (ou formule complexe) ;

$$V_{Rdc}(y) = \frac{I b_w(y)}{S_c(y)} \left(\sqrt{(f_{ctd})^2 + \sigma_{cp}(y) f_{ctd}} - \tau_{cp}(y) \right) \quad [\text{Éq. 1}]$$

Se référer à la clause 4.3.3.2.2.2 de la norme NF EN 1168+A3 pour la définition des symboles.

Le point critique est supposé se situer sur une droite inclinée de 35° sur l'horizontale et prenant naissance au droit de l'appui. L'effort résistant correspond à la plus faible valeur calculée sur l'ensemble des points de cette droite.

- Clause 4.3.3.2.2.3 : calcul selon la formule dite simplifiée, en variante à la méthode avancée.

Afin de simplifier l'équation 1 ci-dessus, la norme NF EN 1168+A3 autorise de conserver l'approche de la norme NF EN 1992-1-1 et son annexe nationale (clause 6.2.2 (4), [1][2][3]) en appliquant les coefficients d'abattement suivants, spécifiques aux dalles alvéolées :

- Facteur réducteur φ de 0,8 ;
- Facteur réducteur relatif à la longueur de transmission β de 0,9.

La formule précédente devient :

$$V_{Rdc} = \varphi \frac{I b_w}{S} \sqrt{(f_{ctd})^2 + \beta \alpha_l \sigma_{cp} f_{ctd}} \quad [\text{Éq. 2}]$$

Avec :

- I : l'inertie de la dalle alvéolée précontrainte (section béton seule et sans prise en compte des armatures de précontrainte) ;
- b_w : largeur de la section transversale au centre de gravité ;
- S : moment statique de la surface située au-dessus de l'axe passant par le centre de gravité, par rapport à cet axe ;

α_l : le degré de transmission de la précontrainte (≤ 1) tel que : $\alpha_l = I_x/I_{pt2}$;
 σ_{cp} : la contrainte de compression maximale du béton au centre de gravité de la section ;
 f_{ctd} : la résistance de calcul en traction du béton préfabriqué.

L'abscisse du point de calcul est située à $y_{G,hc}$ du nu de l'appui ($y_{G,hc}$ étant le centre de gravité de la dalle).

Note 1 : Dans le cas d'une dalle seule sans dalle rapportée et avec un profil de section parfaitement symétrique, l'abscisse du point de calcul depuis le nu devient $h_{hc}/2$ (avec h_{hc} l'épaisseur de la dalle alvéolée). On rappelle que le calcul de la résistance à l'effort tranchant n'est pas requis pour les sections droites situées entre l'appui et le point correspondant à l'intersection de la ligne moyenne élastique avec la droite partant du nu de l'appui sous un angle de 45° (clause 6.2.2 (3) de la norme NF EN 1992-1-1 et son annexe nationale, [1], [2] et [3]).

Note 2 : Dans le cas des essais réalisés au CERIB (avec appui rouleau du côté de la charge), l'abscisse du point de calcul est située à une distance $y_{G,hc}$ de l'axe de l'appui.

La norme NF DTU 23.2 [6] d'Août 2008, clause 4.3.2, renvoie à la norme produit et donc à la même méthodologie de dimensionnement.

Dans la suite du document, c'est cette formule simplifiée qui sera utilisée pour déterminer la résistance théorique de calcul d'une dalle alvéolée précontrainte sans dalle collaborante.

2.1.2. Effort tranchant résistant d'une dalle alvéolée précontrainte sans dalle collaborante et dont certaines alvéoles sont remplies sur chantier

2.1.2.1. Calculs selon la norme NF EN 1168+A3, Annexe F

L'annexe F (informative) de la norme produit, paragraphe F.3, traite de la résistance en cisaillement-traction d'une dalle alvéolée dont certaines alvéoles sont remplies.

Lorsque la résistance en cisaillement-traction d'une dalle alvéolée précontrainte seule est égale à l'effort tranchant résistant $V_{Rd,c}$ tel que décrit dans l'équation 2, la résistance à l'effort tranchant d'une dalle alvéolée précontrainte dont n alvéoles sont remplies est égale à :

$$V_{Rd,tot} = V_{Rd,c} + (2/3) \times n \times b_c \times d \times f_{ctd} \quad [\text{Éq. 3}]$$

Avec :

f_{ctd} : la résistance de calcul en traction du béton de remplissage ;
 n : le nombre d'alvéoles remplies ;
 b_c : la largeur des alvéoles de la dalle alvéolée.

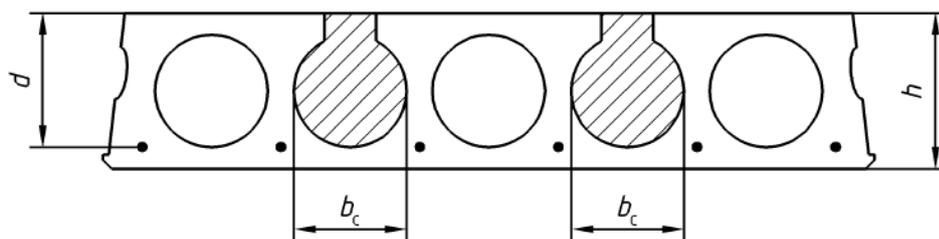


Figure 1 - Dalle alvéolée précontrainte avec alvéoles remplies (selon Figure F.1 de [4]).

Note : le calcul selon l'équation 3 de l'effort tranchant résistant d'une dalle alvéolée dont n alvéoles sont remplies est discutable. En effet, l'effort tranchant est calculé comme étant la somme de deux termes (l'un dû à l'effort tranchant résistant de la dalle alvéolée seule et l'autre dû à l'effort tranchant résistant apporté par les alvéoles) comptabilisés chacun à 100% de la capacité visée. Aucune vérification de compatibilité des déformations n'est considérée.

2.1.2.2. Calculs selon la norme NF DTU 23.2, clause 4.3.1

Il est possible d'augmenter la résistance à l'effort tranchant en zone non fissurée de la dalle alvéolée seule en remplissant sur chantier quelques alvéoles avec du béton constitué de mortier sans retrait de classe au moins égale à C50/60. Ce remplissage doit faire l'objet d'une traçabilité du contrôle de la mise en œuvre.

La résistance à l'effort tranchant d'une dalle alvéolée précontrainte dont n alvéoles sont remplies est égale à :

$$V_{Rd,tot} = V_{Rd,c} + k \times n \times b_c \times d \times f_{ctd} \leq (3/2) \times V_{Rd,c} \quad [\text{Éq. 4}]$$

Avec (se référer également à la Figure 1) :

k : un facteur égal à :

- 0,50 lorsque la résistance minimale du béton (constitué de mortier sans retrait) est vérifiée par des essais sur éprouvettes (≥ 3) ;
- 0,25 dans le cas contraire ;

f_{ctd} : la résistance en traction du béton de remplissage ;

n : le nombre d'alvéoles remplies ;

b_c : la largeur des alvéoles de la dalle alvéolée.

La part d'effort tranchant apportée par le remplissage des alvéolées est limitée à 0,5 fois la résistance à l'effort tranchant de la dalle alvéolée seule.

2.2. Objectifs de l'E&R

Compte tenu de la coexistence de deux formules de calcul pour déterminer la résistance à l'effort tranchant apportée par le remplissage de certaines alvéoles, cette étude a pour objectifs :

- De quantifier expérimentalement l'influence du remplissage de certaines alvéoles dans la résistance à l'effort tranchant d'une dalle alvéolée précontrainte ;
- D'évaluer la sécurité apportée par les formules de calcul, de la part d'effort tranchant dû au remplissage des alvéoles de la dalle alvéolée précontrainte sans dalle rapportée sur chantier (équations 3 et 4 du présent document) ;
- De choisir la formule de calcul la plus adaptée pour prédire sécuritairement la résistance à l'effort tranchant d'une dalle alvéolée précontrainte avec alvéoles remplies sur chantier.

2.3. Campagne expérimentale

2.3.1. Démarche expérimentale

Pour atteindre les objectifs décrits au § 2.2, une campagne d'essais d'effort tranchant a été menée sur deux séries de 3 dalles alvéolées, à nervures droites, d'épaisseur totale nominale égale à 27 cm et de largeur 1,20 m. Les dalles disposent de 6 alvéoles.

Le paramètre étudié est le remplissage des alvéoles :

- Une 1^{ère} série d'essais sur 3 dalles alvéolées précontraintes en configuration standard. Ces dalles constituent la référence. Ces dalles sont numérotées de 1 à 3 ;
- Une 2nde série d'essais sur dalles alvéolées précontraintes avec 3 alvéoles remplies sur 6. Ces dalles sont référencées de A à C.

Les 6 dalles alvéolées précontraintes ont été fabriquées le même jour dans la même usine fixe et conservées dans les mêmes conditions. Elles ont été livrées par le fabricant au CERIB.

Les dalles alvéolées sont certifiées NF.

2.3.2. Description des corps d'épreuve

2.3.2.1. Caractéristiques géométriques et mécaniques des dalles alvéolées précontraintes

Un relevé dimensionnel de la section transversale en about de chaque corps d'épreuve a été réalisé et présenté en Annexe 2 : épaisseur totale, épaisseurs des membrures inférieures et supérieures et largeurs des nervures. Les relevés des épaisseurs de nervure ont été réalisés à 12,9 cm de la fibre inférieure (hauteur du centre de gravité calculée à partir des dimensions nominales de la dalle).

Note : Un calcul affiné sur les dimensions réelles montre un centre de gravité situé à une distance plus grande de la fibre inférieure (à 13,9 cm).

Les profils transversaux de la section béton de chacune des 6 dalles alvéolées testées sont donnés sur la Figure 2 où l'on visualise les 6 alvéoles avec nervures droites au niveau du centre de gravité de la section. Une visualisation plus fine des dimensions des dalles est donnée en Annexe 1. Les dimensions mesurées sur les 6 dalles sont très proches (courbes superposées).

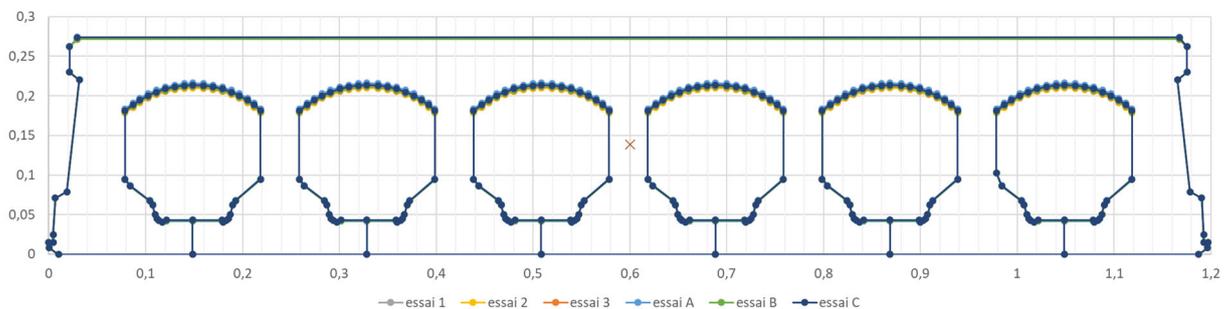


Figure 2 – Géométries transversales des dalles alvéolées précontraintes DAP270 testées

La longueur des dalles alvéolées livrées est de 4,10 m et leur largeur est de 1,20 m. Pour la série d'essais A à C, 3 alvéoles ont été ouvertes en usine sur béton frais en partie supérieure, Photo 1. Comme on peut le voir sur la photo, les 3 alvéoles ne sont pas ouvertes sur toute la longueur. L'ouverture est arrêtée à 30 cm environ de l'about de la dalle alvéolée.



Photo 1 - DAP270 avec 3 alvéoles ouvertes (dalle n° A)

Sur la base des dimensions réelles des dalles alvéolées nous avons calculé les caractéristiques mécaniques des dalles alvéolées en configuration standard (Tableau 1).

N° série	h_{hc}	$y_{G,hc}$	$b_{w,G}$	A	I_G	S_G	$I_G \cdot b_{w,G} / S_G$
[-]	[m]	[m]	[m]	[m ²]	[m ⁴]	[m ³]	[m ²]
1	0,273	0,139	0,309	0,1948	1,73E-03	8,53E-03	6,28E-02
2	0,272	0,138	0,309	0,1943	1,71E-03	8,45E-03	6,24E-02
3	0,274	0,139	0,309	0,1935	1,75E-03	8,53E-03	6,32E-02
A	0,274	0,139	0,309	0,1935	1,75E-03	8,53E-03	6,32E-02
B	0,272	0,139	0,309	0,1941	1,71E-03	8,47E-03	6,26E-02
C	0,274	0,139	0,309	0,1952	1,75E-03	8,58E-03	6,30E-02

Tableau 1 - Caractéristiques mécaniques des dalles alvéolées en configuration standard sur la base des cotes réelles relevées

2.3.2.2. Résistance mécanique du béton préfabriqué à la mise en précontrainte

Les dalles alvéolées ont été confectionnées en Juin 2019. Une série de 9 éprouvettes de contrôle cubiques de 10 cm de côté ont été fabriquées en parallèle en vue de la détension des armatures.

L'éprouvette de référence étant le cylindre 160 mm x 320 mm, un coefficient de passage entre la résistance à la compression sur cube $f_{c,cube}$ et la résistance à la compression sur cylindre f_c , donné dans le tronc commun aux référentiels NF Planchers ossatures, paragraphe 2.5.5.2.5, [7], a été utilisé :

$$f_c = 0,83f_{c,cube}$$

[Éq. 5]

Le passage de la résistance à la compression sur cylindre f_c à la résistance à la traction f_{ct} est mené conformément à la section J.5 de la norme NF EN 1168+A3 [4] :

$$f_{ctm} = 0,3 f_c^{2/3} \quad \text{pour les classes de béton } \leq \text{C50/60} \quad [\text{Éq. 6}]$$

$$f_{ctm} = 2,12 \ln[1 + (f_c + 8)/10] \quad \text{pour les classes de béton } > \text{C50/60} \quad [\text{Éq. 7}]$$

$$f_{ct} = 0,8 f_{ctm} \quad [\text{Éq. 8}]$$

Note : dans les calculs théoriques, la résistance à la compression réelle f_c est utilisée à la place de f_{ck} et, la résistance à la traction réelle f_{ct} est utilisée à la place de f_{ctd} . La résistance à la traction réelle f_{ct} peut être mesurée directement par essais ou être déduite par corrélations du tableau 3.1 de la norme NF EN 1992-1-1 et son annexe nationale où f_{ck} est remplacée par f_c et f_{ctk} par f_{ct} .

Les résultats des essais de compression simple sur le béton préfabriqué à la mise en précontrainte réalisés dans l'usine du fabricant sont donnés dans le Tableau 2.

	Eprouvette	$f_{c,cube}$	f_c	f_{ctm}	f_{ct}
		[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
1/4 de la piste	1	39,99	33,19	3,10	2,48
	2	43,73	36,30	3,29	2,63
	3	44,58	37,00	3,33	2,66
1/2 de la piste	4	37,76	31,34	2,98	2,39
	5	44,87	37,24	3,35	2,68
	6	47,82	39,69	3,49	2,79
3/4 de la piste	7	47,78	39,66	3,49	2,79
	8	39,71	32,96	3,08	2,47
	9	41,82	34,71	3,19	2,55
Moyenne		43,12	35,79	3,26	2,60

Tableau 2 – Résultats des essais de compression sur cubes à la détension du béton préfabriqué et déduction de la résistance en traction

2.3.2.3. Résistance mécanique du béton préfabriqué au jour des essais

Aucune éprouvette de contrôle n'ayant été livrée au CERIB par le fournisseur de dalles alvéolées précontraintes, des carottes d'élançement 2 (hauteur de 80 mm et diamètre de 40 mm) ont donc été prélevées dans une dalle alvéolée confectionnée avec le même béton que les dalles alvéolées visées dans ce document. Cette dalle avait été livrée au CERIB dans le cadre d'une autre étude et recherche, Photo 2.



Photo 2 - Carottage dans la dalle alvéolée

Les carottes ont été soumises à des essais de compression simple au CERIB au jour des essais d'effort tranchant. Le matériel d'essai est décrit en Annexe 4.

Les résultats sont donnés dans le Tableau 3.

			Numéro éprouvette		
			1	2	3
Dimensions	Diamètre 1	[mm]	43,72	44,58	44,22
	Diamètre 2	[mm]	43,91	44,13	43,79
	Diamètre moyen	[mm]	43,82	44,36	44,01
Résistance	Effort à la rupture F_c	[kN]	86,80	87,20	78,90
	Résistance f_c	[MPa]	57,57	56,43	51,88
	$f_{c,moy}$	[MPa]	55,29		

Tableau 3 - Résultats des essais de compression sur carottes en béton préfabriqué le jour des essais

Les résultats des essais de compression simple sont ensuite exploités pour en déduire la résistance en traction de calcul du béton préfabriqué au jour des essais et à utiliser dans les formules de calcul (Tableau 4).

Eprouvette	f_c	f_{ctm}	f_{ct}
	[MPa]	[MPa]	[MPa]
1	57,57	4,29	3,43
2	56,43	4,26	3,40
3	51,88	4,12	3,30
Moyenne	55,29	4,22	3,38

Tableau 4 - Calcul de la résistance à la traction du béton préfabriqué le jour des essais

2.3.2.4. Armatures de précontrainte

Les caractéristiques des armatures de précontrainte mises en place dans les dalles alvéolées sont données dans le Tableau 5. Les unités de précontrainte sont des torons T12.5-1860 disposées sur un même lit à une distance à l'axe de la fibre inférieure mesurée en moyenne égale à 47 mm.

Y_{pt}	A_p	$n.A_p$	Φ	$F_{p0,1k}$	F_{pk}
[m]	[m ²]	[m ²]	[mm]	[kN]	[kN]
0,047	$9,30.10^{-5}$	$111,6.10^{-5}$	12,5	154	179

Tableau 5 – Caractéristiques principales des armatures de précontrainte dans la DAP270

Les pertes de précontrainte ont été précisées par le fournisseur des dalles alvéolées, Tableau 6 :

- A la détension : 11,3 % ;
- A un temps infini : 17,6 %.

Par simplification, nous avons considéré dans les calculs un pourcentage de pertes égal à 17,6 % pour les dalles alvéolées âgées de plus de 2 mois. Une estimation autour de 14% aurait pu aussi être prise en compte.

		Etat initial	A la détension	Au jour des essais
Pourcentage de pertes	[%]	0	11,3 %	17,6 %
Contrainte	[MPa]	1309	1161	1078

Tableau 6 – Contrainte dans les armatures de précontrainte dans la DAP270 (à la détension et au jour des essais) due à la précontrainte seule

Dans les calculs à venir, on considèrera ces hypothèses de calcul :

- Coefficient η_{p1} de 3,2 (tient compte du type d'armature et des conditions d'adhérence au relâchement) ;
- Coefficient η_1 de 1 (bonnes conditions d'adhérence) ;
- Coefficient α_1 de 1 (relâchement progressif des armatures de précontrainte) ;
- Coefficient α_2 de 0,19 (armatures de type torons).

2.3.2.5. Résistance mécanique du mortier sans retrait

Dans le cas de la série de DAP numérotées A à C (dalles alvéolées dont 3 alvéoles sont remplies), du mortier a été coulé dans les alvéoles ouvertes.

Afin de respecter les prescriptions de la norme NF DTU 23.2, un mortier sans retrait (dit à retrait compensé) a été sélectionné : produit PAREXLANKO, 709 Clavexpress MB. La fiche technique est fournie en Annexe 3.

Le produit est livré en sac de 25 kg sous forme de poudre. Le mortier a été confectionné au CERIB, à la bétonnière, par adjonction d'eau à la poudre de façon à obtenir une consistance plastique.

Le mortier a été mis en place à l'aiguille vibrante, Photo 3. Trois éprouvettes de contrôle parallélépipédiques de dimensions 40 mm x 40 mm x 160 mm ont été confectionnées en parallèle.



Photo 3 – Remplissage des alvéoles ouvertes des dalles alvéolées de la série A à C



Photo 4 – Visualisation de la section transversale des dalles alvéolées de la série A à C après remplissage des 3 alvéoles

Ces éprouvettes ont été soumises à essais selon la norme NF EN 196-1 [8] le jour des essais d'effort tranchant :

- Essai de flexion 3 points (portée de 100 mm avec charge ponctuelle à mi-travée) sur le prisme de 40 mm x 40 mm x 160 mm, Figure 3 ;

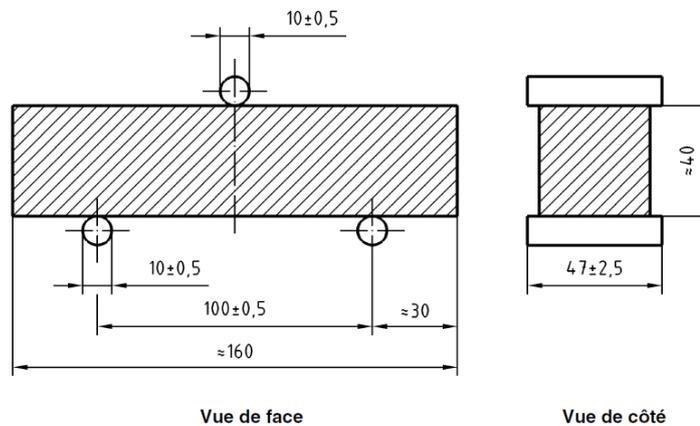


Figure 3 – Disposition de la charge pour la détermination de la résistance à la flexion (selon Figure 5 de [8]).

- Essai de compression simple (après l'essai de flexion) sur des cubes de 40 mm de côté environ (issus de l'essai de flexion mené à rupture).

Les résultats des essais mécaniques sur les éprouvettes de mortier sont donnés dans le Tableau 7 pour les essais de compression simple sur cubes de 40 mm de côté et, dans le Tableau 8 pour les essais de flexion 3 points.

Note : Le coefficient de passage entre la résistance à la compression sur cube $f_{c,cube}$ de 40 mm de côté et la résistance à la compression sur cylindre f_c a été pris égal à 0,96 (voir Annexe 5).

Dans le Tableau 8, la résistance en traction f_{ct} est déduite de la résistance en flexion issue de l'essai en la multipliant par 0,6.

Eprouvette	$f_{c,cube}$	f_c	f_{ctm}	f_{ct}
	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
1	95,8	92,1	5,09	4,07
1bis	95,9	92,2	5,09	4,07
2	99,6	95,8	5,16	4,12
2bis	99,1	95,3	5,15	4,12
3	98,7	94,9	5,14	4,11
3bis	90,2	86,7	4,98	3,98
Moyenne	96,5	92,85	5,10	4,08

Tableau 7 – Résultats des essais de compression simple sur éprouvettes de mortier à retrait compensé

Eprouvette	R_f	f_{ct}
	[MPa]	[MPa]
1	10,1	6,05
2	10,3	6,20
2	11,6	6,98
Moyenne	10,7	6,41

Tableau 8 – Résultats des essais de flexion 3 points sur éprouvettes de mortier à retrait compensé

A noter que la détermination de la résistance en traction du mortier de remplissage à partir de la résistance en traction par flexion conduit à une valeur plus élevée que celle déduite des essais de compression simple (avec l'utilisation des formules classiques de la norme NF EN 1992-1-1 pour les relations entre résistance en compression et résistance en traction).

Note : dans l'exemple étudié, cette différence n'a pas d'influence car dans le cas de trois alvéoles remplies, la limitation introduite dans la norme NF DTU 23.2 ($0,5.V_{Rd,c}$) sur la contribution à l'effort tranchant des alvéoles remplies est dominante.

Dans la suite du document, suite à une étude menée en parallèle des essais et présentée en Annexe 5, on a retenu pour la valeur de calcul en traction du mortier la valeur de 4,08 MPa déterminée à partir de la résistance en compression simple obtenue sur cubes après les essais de flexion 3 points et à partir des formules du tableau 3.1 de la NF EN 1992-1-1 et son annexe nationale où f_{ck} est remplacée par f_c (voir équations 6 à 8 du présent document en 2.3.2.2).

2.3.2.6. Observations sur les dalles alvéolées livrées au CERIB

A la livraison des dalles alvéolées, nous avons noté pour les dalles destinées à être remplies de mortier :

- Dalle A : un trait de scie proche de l'about et une tige d'ancrage dépassante à 30 cm de l'about (Photo 1) ;
- Dalle B : un trait de scie est présent à 30 cm de l'about (Photo 5) ;
- Dalle C : le coin de la dalle est endommagé sur 29 cm (Photo 5).



Photo 5 – Endommagement des abouts des dalles alvéolées B et C

2.3.3. Mode opératoire et dispositif d'essai

Le protocole expérimental des essais d'effort tranchant est repris de l'Annexe J (normative) de la norme NF EN 1168+A3 (essais en vraie grandeur), [4].

Une charge ponctuelle est appliquée à une distance de $2,5 h_{hc}$ de l'appui (distance entre axes) sans toutefois être inférieure à 0,60 m (h_{hc} étant la hauteur de la dalle alvéolée). La portée de la dalle doit être égale à la plus grande des deux valeurs suivantes : 4 m ou $12 h_{hc}$, avec une tolérance de +/- 100 mm, soit une portée égale à 4 m. La longueur des dalles alvéolées livrées permet de respecter ce critère (longueur livrée de 4,10 m).

Compte tenu des abouts endommagés de quelques dalles alvéolées, le schéma statique de la norme a dû être modifié pour s'affranchir des faiblesses aux abouts côté chargement :

- L'axe d'appui du côté de la charge a été déplacé vers la travée (distance axe d'appui/about de la DAP égale à 0,32 m) ;
- La charge a quant à elle été disposée à 0,87 m de l'about de la dalle soit à 0,55 m de l'axe d'appui, à l'extrémité des alvéoles remplies ;
- La portée d'essai a été réduite à 3,73 m au lieu de 4 m ;
- La portée d'effort tranchant notée $a_{tranchant}$ passe donc de 675 mm ($2,5 h_{hc}$) à 550 mm ($\approx 2 h_{hc}$ ou $\approx 2,3d$ avec d la hauteur utile nominale de la section égale à 230 mm). Voir Tableau 9.

Note : le changement de schéma statique n'a pas d'incidence car il ne s'agit ici pas d'essais de caractérisation mais d'essais comparatifs entre deux configurations de corps d'épreuve.

Le schéma statique est le même pour tous les corps d'épreuve, Figure 4.

Le vérin est piloté en force selon la procédure suivante :

- Premier cycle :
 - de 0 à 70 % de la charge de ruine calculée, durée 2 minutes, puis décharge.
- Second cycle pour obtenir l'effort tranchant résistant à la ruine :
 - de 0 à 50 % de la charge de ruine calculée, durée 1 minute ;
 - de 50 % à 75 % de la charge de ruine calculée, durée 1 minute ;
 - de 75 % à la ruine du corps d'épreuve, vitesse maximale de 10 % de la charge de ruine calculée en 1 minute (pour les essais, la vitesse a été prise égale à 5 % de la charge de ruine calculée).

Le calcul de cette charge est présenté au § 2.4.1.

La charge est appliquée au corps d'épreuve via un profilé métallique plein reposant sur un élastomère et via deux masses superposées entre le profilé et le vérin (représente un effort de 1,66 kN) :

- Masse du profilé plein : 118 kg ;
- Masses supplémentaires : 4*12,07 kg.



Photo 7 - Dispositif de chargement

2.4. Résultats

2.4.1. Résultats théoriques

Les résultats théoriques présentés ci-après sont fondés sur les propriétés réelles des matériaux et sur les cotes réelles. Ils ont notamment pour but de fixer les niveaux de chargement à appliquer sur les dalles.

2.4.1.1. Résistance de la dalle alvéolaire seule sans dalle collaborante

Les formules théoriques ont été présentées au § 2.1.1.

L'effort tranchant ultime calculé est évalué à l'aide du modèle de calcul présenté équation n° 2 avec les paramètres réels de l'acier, avec les paramètres réels du béton et en considérant les coefficients suivants : $\alpha_{cc}=\alpha_{ct}=1$ et $\gamma_c=\gamma_p=1$. Les calculs sont ici menés sur la base des cotes réelles de la dalle.

On rappelle, à titre d'illustration, la section réduite de la dalle préfabriquée prise en compte dans les calculs à la hauteur y (y étant égale à la hauteur du centre de gravité de la section). Les autres caractéristiques mécaniques sont données dans le Tableau 1.

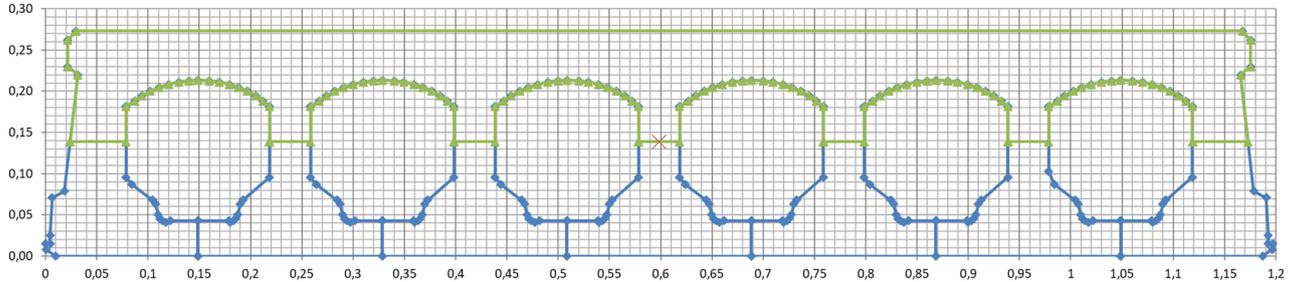


Figure 5 – Section réduite (en vert) au centre de gravité de la dalle alvéolée précontrainte DAP270

L'abscisse de calcul est située à une distance égale à y_{hc} de l'axe d'appui soit à une distance à l'about de la dalle alvéolée notée l_x égale à 0,459 m (0,32 m + 0,139 m).

Pour le calcul de la longueur de transfert, on considère les hypothèses suivantes :

- Le relâchement des torons T12,5 est progressif ;
- Les conditions d'adhérence sont bonnes ;
- La contrainte dans les armatures au relâchement est de 1161 MPa (Tableau 6) ;
- La résistance de calcul en traction du béton préfabriqué au relâchement est de 2,60 MPa.

La longueur de transfert l_{pt} est donc égale à 0,331 m selon l'équation 8.16 de la norme NF EN 1992-1-1 et son annexe nationale [1], [2] et [3]. La précontrainte est donc établie à l'abscisse de calcul considérée ($\alpha_i=1$) car la distance à l'about de la dalle de la section de calcul notée l_x est supérieure à la longueur de transfert de la dalle.

La contrainte de compression maximale du béton au centre de gravité au jour des essais est de 6,87 MPa.

Pour chacune des dalles testées, on mène l'application numérique de l'effort tranchant résistant théorique calculé $V_{Rd,c,théorique}$ sur la base des cotes réelles de la section transversale en configuration standard (Tableau 10).

N° série	ϕ	β	$l_{G.b_w,G}/S_G$	f_{ctd}	α_i	σ_{cp}	$(f_{ctd}^2 + \beta \alpha_i \sigma_{cp} \cdot f_{ctd})^{0,5}$	$V_{Rd,c}$	$V_{Rd,c,moy}$
[-]	[-]	[-]	[m ²]	[MPa]	[-]	[MPa]	[MPa]	[kN]	[kN]
1	0,8	0,9	6,28E-02	3,38	1	6,18	5,50	276	276
2	0,8	0,9	6,24E-02	3,38	1	6,19	5,50	275	
3	0,8	0,9	6,32E-02	3,38	1	6,22	5,51	278	
A	0,8	0,9	6,32E-02	3,38	1	6,22	5,51	278	277
B	0,8	0,9	6,26E-02	3,38	1	6,20	5,50	275	
C	0,8	0,9	6,30E-02	3,38	1	6,17	5,49	277	

Tableau 10 – Hypothèses des calculs pour l'application numérique de la résistance à l'effort tranchant théorique des dalles alvéolées dans leur configuration standard sur la base des cotes réelles

De ces efforts tranchants résistants, il est possible de déterminer la charge totale à appliquer lors des essais d'effort tranchant. Il est tenu compte des charges appliquées par le profilé et des masses intermédiaires (cf. § 2.3.3) et, du poids propre à la distance l_x de l'about de la dalle alvéolée.

Note : L'effort tranchant maximal est obtenu avec la formule suivante :

$$V_{essai} = F_{essai} \frac{(L_{travée} - a_{tranchant})}{L_{travée}} + V_g(y_{hc}) \quad [\text{Éq. 9}]$$

Avec :

- V_g : l'effort tranchant engendré par le poids propre du plancher à une distance y_{hc} du nu de l'appui ;
- F_{essai} : l'effort ponctuel appliqué au corps d'épreuve ;
- $a_{tranchant}$: la portée d'effort tranchant ;
- $L_{travée}$: la portée d'essais.

2.4.1.2. Résistance au tranchant apportée par les alvéoles remplies

Les formules théoriques ont été présentées au § 2.1.2 et l'application numérique est menée avec les hypothèses de calcul suivantes (Tableau 11) :

- Largeur des alvéoles = largeur moyenne mesurée sur le corps d'épreuve ;
- Hauteur utile des armatures de précontrainte déduite des relevés des enrobages des armatures de précontrainte ;
- Nombre d'alvéoles remplies : 3 ;
- Résistance de calcul en traction du béton de remplissage : $f_{ctd} = 4,08$ MPa ;
- Coefficient k :
 - $k=2/3$ d'après la norme NF EN 1168+A3 (2012) ;
 - $k=0,50$ car le mortier de remplissage a été caractérisé par essais d'après la norme NF DTU 23.2 (2008).
- Calcul en considérant la configuration standard et la configuration non standard.

		NF EN 1168+A3 (2012)	NF DTU 23.2 (2008)			
		N° série	$V_{Rd,alvéoles}$	$V_{Rd,alvéoles}$	$0,5.V_{Rd,c}$	$V_{Rd,alvéoles}$
		[-]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]
$V_{Rd,c}$ calculé sur configuration standard	A	257	193	139	139	
	B	255	191	138	138	
	C	257	193	138	138	

Tableau 11 – Effort tranchant théorique apporté par les alvéoles selon les deux approches de calcul (européenne ou française) sur la base des propriétés réelles des matériaux et des cotes réelles

En moyenne, on calcule un apport de résistance à l'effort tranchant par les alvéoles égal à :

- NF EN 1168+A3 : 256 kN ;
- NF DTU 23.2 : 138 kN.

2.4.1.3. Résistance totale de la dalle alvéolée sans dalle collaborante avec alvéoles remplies

Les efforts tranchants résistants totaux {DAP+ 3 alvéoles remplies} calculés sur la base des propriétés matériaux réelles et des cotes réelles des dalles sont donnés dans le Tableau 12.

	N° série	NF EN 1168+A3 (2012)			NF DTU 23.2 (2008)			
		$V_{Rd,c}$	$V_{Rd,alvéoles}$	$V_{Rd,total}$	$V_{Rd,c}$	$V_{Rd,alvéoles}$	$0,5.V_{Rd,c}$	$V_{Rd,total}$
		[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]
$V_{Rd,c}$ calculé sur configuration standard	A	278	257	536	278	193	139	418
	B	275	255	530	275	191	138	413
	C	277	257	534	277	193	138	415

Tableau 12 – Effort tranchant total théorique apporté par les alvéoles selon les deux approches de calcul (européenne ou française) sur la base des propriétés réelles des matériaux et des cotes réelles

En moyenne, on calcule une résistance à l'effort tranchant total :

- NF EN 1168+A3 : 533 kN ;
- NF DTU 23.2 : 415 kN.

2.4.2. Résultats expérimentaux

2.4.2.1. Déroulement des essais d'effort tranchant

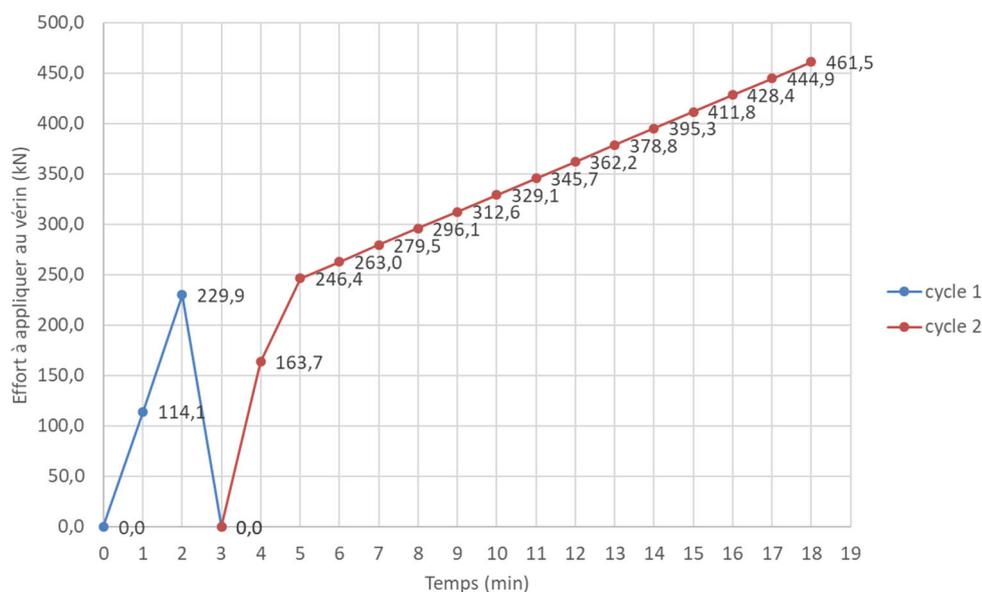
Les essais ont été réalisés dans l'ordre suivant sur 2 jours (12/09 et 13/09/2019) au-delà de 28 jours :

- Série A à C (avec alvéoles remplies) en première : B - C - A ;
- Série 1 à 3 en seconde : 1 - 2 - 3.

Dans un premier temps, on applique sur le corps d'épreuve un premier cycle de chargement à 70% de la charge nominale de ruine (calculée sur la base des cotes nominales de la dalle et des propriétés réelles des matériaux).

Note : sur la base des propriétés réelles des matériaux et des cotes nominales, l'effort tranchant résistant de la dalle alvéolée dans sa configuration standard est de 289 kN. La charge totale à appliquer lors des essais d'effort tranchant est donc égale à 330,81 kN dont 329,15 kN par les deux vérins et 1,66 kN par le profilé et les masses intermédiaires). Il est tenu compte également de l'effort tranchant dû au poids propre à la distance l_x de l'about de la dalle alvéolée (pris égal à 4,29 kN/m).

Aucune fissuration n'a été observée lors de cette phase. Le comportement des dalles alvéolées reste élastique linéaire ; aucune flèche résiduelle significative n'est observée après décharge. Après décharge, la charge est augmentée de nouveau jusqu'à la ruine du corps d'épreuve. Le cycle de chargement est présenté sur le Graphique 1.



Graphique 1 – Cycle de chargement appliqué à tous les essais d'effort tranchant

2.4.2.2. Relevés dimensionnels : pesée et dimensions de la section transversale

Un relevé dimensionnel de chaque corps d'épreuve a été réalisé (voir § 2.3.2.1).

Chaque corps d'épreuve a été pesé avant essai. Ces données sont nécessaires pour le calcul des sollicitations apportées par le poids propre du corps d'épreuve. Les opérations de pesage ont été réalisées de la manière suivante :

- Etape 1 : pesée des dalles 1 à 3 non destinées à être remplies par du mortier. La masse moyenne des dalles alvéolées livrées est de 1759 kg ;
- Etape 2 : coffrage des dalles A à C ;
- Etape 3 : le coffrage des dalles A à C ayant été réalisé avant la pesée de ces dalles, on ne dispose pas des poids des dalles alvéolées avec alvéoles ouvertes non remplies ;
- Etape 4 : pesée des dalles A à C avec alvéoles remplies. Dans les calculs, la masse apportée par le remplissage est donc déduite de la masse mesurée sur le corps d'épreuve avec alvéoles remplies et de la masse moyenne représentative d'une dalle alvéolée seule (étape 1).

		DAP avec alvéoles remplies			DAP seule (configuration standard)		
		A	B	C	1	2	3
Masse totale	[kg]	1878	1903	1872	1762	1766	1748
Masse totale moyenne	[kg]				1579		
Masse alvéoles pleines	[kg]	119	144	113	sans objet		
Poids propre DAP seule	[kN/m]	4,29	4,29	4,29	4,30	4,31	4,26
Poids réparti le long des alvéoles remplies sur 80 cm	[kN/m]	1,49	1,80	1,41	sans objet		

Tableau 13 – Masses des corps d'épreuve avant essais d'effort tranchant

2.4.2.3. Observations du mécanisme de ruine

Les photos de la ruine des corps d'épreuve sont données en Annexe 6 et en Annexe 7. Pour tous les essais, on a observé une fissure inclinée d'effort tranchant partant de l'appui à la charge ; le mécanisme de ruine s'apparente à une ruine par cisaillement-traction. Deux exemples sont donnés sur la Photo 8.



DAP seule (essai 1)



DAP + 3 alvéoles remplies (essai A)

Photo 8 – Faciès de rupture par effort tranchant (fissure inclinée sur les flancs latéraux) : exemples

Des fissures longitudinales (i.e. perpendiculaires au plan de la section transversale) ont été observées pour les corps d'épreuve de la série A à C dont certaines alvéoles étaient remplies (Annexe 6, page 43).

2.4.2.4. Résultats expérimentaux issus des essais d'effort tranchant

On présente dans le Tableau 14 les résultats des essais d'effort tranchant pour les deux séries de corps d'épreuve.

Note 1 : la force F_{essai} intègre la force relevée au vérin et les poids du profilé et éléments intermédiaires.

Note 2 : l'effort tranchant résistant tient compte du poids propre de la dalle alvéolée et de la charge ponctuelle appliquée.

Le ratio moyen entre les capacités résistantes à l'effort tranchant des dalles avec alvéoles remplies et des dalles en configuration standard est de 1,55, proche du ratio théorique déterminé selon la norme NF DTU 23.2 (Tableau 12).

	N°	F _{essai}	F _{essai,moy}	σ _{Fessai,moy}	COV	V _{Rd,essai}	V _{Rd,essai,moy}
	[-]	[kN]	[kN]	[kN]	[%]	[kN]	[kN]
DAP seule	1	366	402	44	11	320	350
	2	389				339	
	3	451				392	
Alvéoles remplies	A	604	632	70	11	523	545
	B	581				503	
	C	711				614	
Synthèse	$V_{Rd,essai,moy(A,B,C)} / V_{Rd,essai,moy(1,2,3)}$						545/350 = 1,55

Tableau 14 – Résultats des essais d'effort tranchant

Note : COV pour coefficient de variation égal au rapport de l'écart-type sur la moyenne.

2.4.3. Confrontation : théorie et expérimentation sur la base des caractéristiques réelles des matériaux et des dimensions réelles de la section

Les résultats théoriques calculés sur la base des caractéristiques réelles des matériaux et des dimensions réelles de la section sont comparés avec les résultats expérimentaux.

2.4.3.1. Confrontation : théorie/expérimentation sur les dalles alvéolées en configuration standard

La fiabilité du modèle de calcul de l'effort tranchant résistant de la dalle alvéolée seule est vérifiée (Tableau 15) :

- On vérifie bien pour chaque essai : $V_{Rd,c,essai,individuel} / V_{Rd,c,theorie} \geq 0,95$;
- On vérifie bien pour la moyenne des trois essais : $moyenne\{V_{Rd,c,essai,individuel} / V_{Rd,c,theorie}\} \geq 1$.

On calcule un coefficient de sécurité sur la valeur de l'effort tranchant résistant de la dalle seule de 1,27.

		V _{Rd,c,essai}	Moyenne	V _{Rd,c,theorie}	V _{Rd,c,essai} /V _{Rd,c,theorie}
		[kN]	[kN]	[kN]	[kN]
DAP seule	1	320	350	278	1,15 > 0,95
	2	339		275	1,23 > 0,95
	3	392		277	1,42 > 0,95
Moyenne				277	1,27 > 1

Tableau 15 – Confrontation : expérimentation/théorie (sur la base des cotes réelles) pour l'effort tranchant résistant de la dalle alvéolée seule (série d'essais 1 à 3)

2.4.3.2. Confrontation : théorie/expérimentation sur les dalles alvéolées dont certaines alvéoles sont remplies

	Expérimentation (DAP seule + alvéoles remplies)			Théorie DTU 23.2 (2008)		Théorie NF EN 1168+A3 (2012)	
	F _{essai} [kN]	V _{Rd,essai} [kN]	V _{Rd,essai,moy} [kN]	V _{Rd,théo} [kN]	V _{Rd,essai} /V _{Rd,théo} [kN]	V _{Rd,théo} [kN]	V _{Rd,essai} /V _{Rd,théo} [kN]
Essais	A	604	523	418=278+139	1,25	536=278+257	0,97
	B	581	503	545 = 350+195	1,22	530=275+255	0,94
	C	711	614		1,47	534=277+257	1,15
Exploitation des résultats d'essais	$V_{Rd,essai,moy(A,B,C)}/V_{Rd,essai,moy(1,2,3)}$			545/350 =1,55	-	-	-
	sécurité apportée par le code de calcul sur la résistance totale {DAP+alvéoles}			$V_{Rd,essai,moy(A,B,C)}/V_{Rd,théo} =$	545/415 =1,31	545/533 =1,02	
	sécurité apportée par le code de calcul sur la résistance due aux alvéoles remplies			$V_{Rd,alvéoles,essai,moy(A,B,C)}/V_{Rd,alvéoles,théo} =$	195/138 =1,41	195/256 =0,76	
sécurité apportée par le code de calcul sur la résistance totale de la DAP seule			$V_{Rd,essai,moy(1,2,3)}/V_{Rd,c,théo} =$	350/277 =1,26			

Tableau 16 – Confrontation : théorie/expérimentation (sur la base des cotes réelles) pour l'effort tranchant résistant de la dalle alvéolée dont certaines alvéoles sont remplies (série d'essais A à C)

La méthode de calcul décrite dans la norme NF EN 1168+A3 apparaît donc ici non sécuritaire car la sécurité est uniquement apportée par la résistance de la dalle alvéolée seule, Tableau 17.

Référentiel	Sécurité apportée par la méthode de calcul
NF EN 1168+A3 (2012) [Éq. 10]	$1,02 \times V_{Rd,total,theorique}$ $= 1,26 \times V_{Rd,c,theorique} + 0,76 \times V_{Rd,alvéoles,theorique}$
NF DTU 23.2 (2008) [Éq. 11]	$1,31 \times V_{Rd,total,theorique}$ $= 1,26 \times V_{Rd,c,theorique} + 1,41 \times V_{Rd,alvéoles,theorique}$

Tableau 17 – Sécurité apportée par les formules de calcul de l'effort tranchant résistant d'une dalle alvéolée précontrainte comportant n alvéoles remplies sur chantier (calculs théoriques effectués sur la base des cotes réelles de la section transversale et des propriétés réelles des matériaux)

Avec :

- $V_{Rd,total,theorique}$: l'effort tranchant résistant total théorique de la dalle alvéolée avec n alvéoles remplies ;
- $V_{Rd,c,theorique}$: l'effort tranchant résistant théorique de la dalle alvéolée seule sans dalle rapportée (configuration standard de la dalle alvéolée) ;
- $V_{Rd,alvéoles,theorique}$: l'effort tranchant résistant théorique apportée par le remplissage des n alvéoles.

2.5. Conclusions

2.5.1. Résultats des essais

La confrontation de la théorie (selon l'approche européenne avec la NF EN 1168+A3 ou française avec la NF DTU 23.2) avec l'expérimentation menée sur deux séries d'essais d'effort tranchant au CERIB (sans et avec alvéoles remplies) sur un seul profil de dalle alvéolée sans dalle collaborante (hauteur de 27 cm) met en avant les principaux résultats suivants :

- Apport d'une résistance supplémentaire avec la présence d'alvéoles remplies ;
- Marge de sécurité plus importante avec la formule de l'effort tranchant résistant total (dalle alvéolée + alvéoles remplies) issue de la norme NF DTU 23.2 d'Août 2008 : 1,31 contre 1,02 ;
- Marge de sécurité de 1,26 sur la résistance à l'effort tranchant d'une dalle alvéolée précontrainte seule ;
- Marge de sécurité de 1,41 sur la résistance à l'effort tranchant apportée uniquement par le remplissage des alvéoles, avec une limitation de la part de résistance à l'effort tranchant due aux alvéoles à 0,5 fois la résistance à l'effort tranchant d'une dalle alvéolée seule (NF DTU 23.2). Cette limitation permet de borner l'apport de la résistance apportée par les alvéoles remplies de telle manière que cette part d'effort tranchant ne représente pas la part la plus importante dans la résistance totale du plancher. Un contrôle du matériau de remplissage des alvéoles doit être assuré et tracé (minimum de 3 éprouvettes cylindriques normalisées de dimensions $\Phi 160$ mm x H320 mm). Les caractéristiques mécaniques en traction du mortier sont déduites des résistances en compression simple obtenues sur cylindres (voir Annexe 5) ;
- La méthode de calcul de la norme NF EN 1168+A3 (2012) surestime la part d'effort tranchant due au remplissage des alvéoles.

A noter que ces conclusions sont issues d'une confrontation entre des résultats d'essais et des résultats théoriques fondés sur les caractéristiques réelles des matériaux et sur les dimensions réelles des sections transversales.

2.5.2. Intérêts et perspectives

L'étude a montré la pertinence de l'utilisation de la formule de la norme NF DTU 23.2 (2008) pour évaluer la résistance à l'effort tranchant d'une dalle alvéolée précontrainte dont certaines alvéoles sont remplies sur chantier avec du mortier sans retrait de classe au moins égale à C50/60 devant faire l'objet d'une traçabilité du contrôle du remplissage à la mise en œuvre. Pour bénéficier d'un facteur k avantageux dans le calcul de la part d'effort tranchant apportée par le remplissage des alvéoles, il est nécessaire de procéder à la confection au minimum de de trois éprouvettes cylindriques normalisées $\Phi 160$ mm x H320 mm.

Bibliographie

- [1] NF EN 1992-1-1
Eurocode 2 : Calcul des structures en béton. Partie 1-1 : Règles générales et règles pour les bâtiments
Octobre 2005

- [2] NF EN 1992-1-1/A1
Eurocode 2 : Calcul des structures en béton. Partie 1-1 : Règles générales et règles pour les bâtiments
Février 2015

- [3] NF EN 1992-1-1/NA
Eurocode 2 : Calcul des structures en béton. Partie 1-1 : Règles générales et règles pour les bâtiments. Annexe Nationale à la NF EN 1992-1-1 :2005.
Février 2015

- [4] NF EN 1168+A3
Produits préfabriqués en béton – Dalles alvéolées
Avril 2012

- [5] NF EN 206/CN
Béton – Spécifications, performance, production et conformité – Complément national à la norme NF EN 206
Décembre 2014

- [6] NF DTU 23.2
Travaux de bâtiment – Planchers à dalles alvéolées préfabriquées en béton – Partie 1-1 : cahier des clauses techniques types – Partie 1-2 : critères généraux de choix des matériaux (CGM) – Partie 2 : cahier des clauses administratives spéciales types – Partie 3 : règles de calculs.
Avril 2008

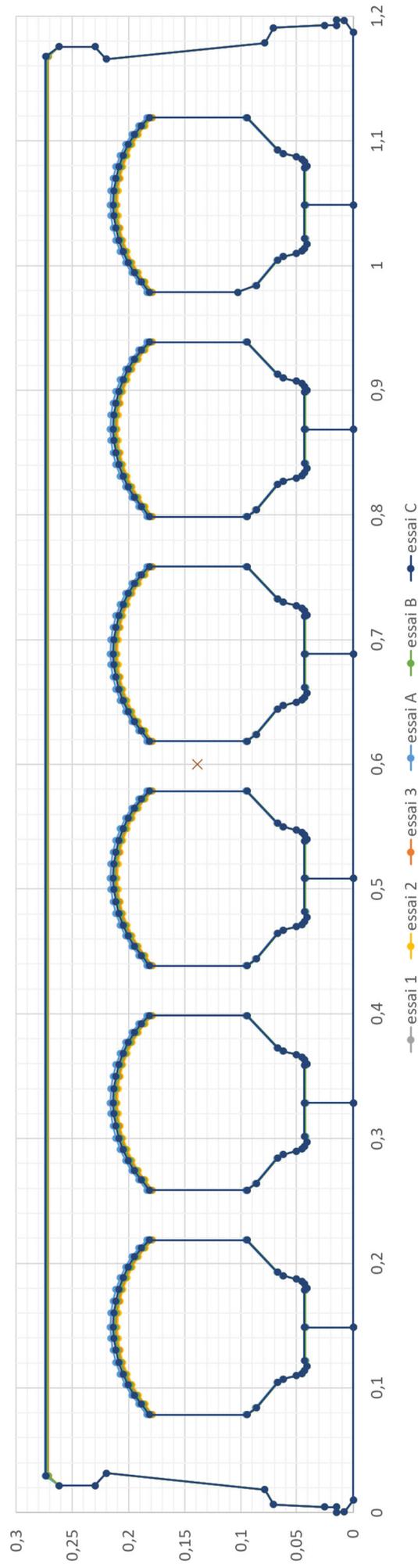
- [7] Tronc commun aux référentiels NF Planchers Ossatures.
CERIB-CSTB
Septembre 2016

- [8] NF EN 196-1
Méthodes d'essais des ciments. Partie 1 : détermination des résistances.
Avril 2017

- [9] FprEN 13791
Evaluation de la résistance à la compression sur site des structures et des éléments préfabriqués en béton.
Avril 2019

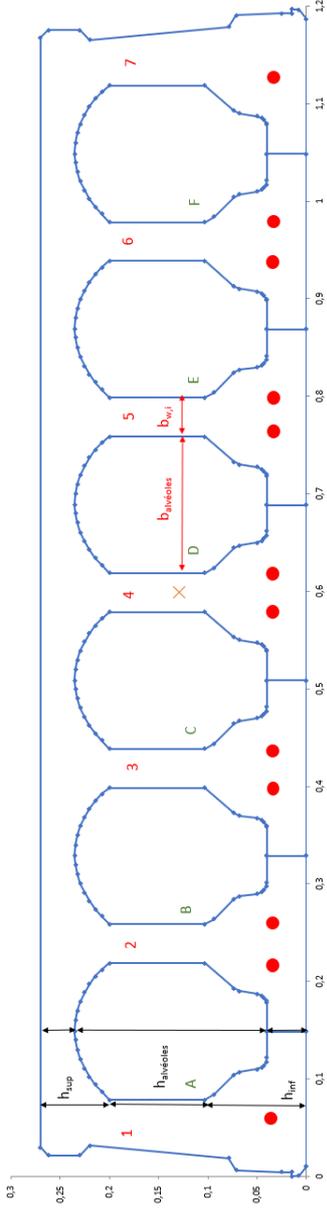
Annexes

Annexe 1 - Géométrie de la DAP270



Graphique 2 - Dimensions réelles des DAP testées

Annexe 2 - Relevés dimensionnels réalisés avant essais



Hauteur nominale de la DAP270 = 270 mm
 Position à l'axe nominale des armatures de précontrainte : 40 mm
 Hauteur utile nominale de la DAP270 = 230 mm

	CE1	CE2	CE3	CEA	CEB	CEC
	DAP seule					
Enrobage moyen mesuré [mm]	41	41	42	42	42	42
Hauteur totale [mm]	273	272	272	274	272	274
Hauteur utile déduite [mm]	226	225	224	226	224	226
Ecart par rapport à la hauteur utile nominale [mm]	-4	-12	-6	-4	-6	-4
	DAP + 3 alvéoles remplies					
Enrobage moyen mesuré [mm]	41	41	42	42	42	42
Hauteur totale [mm]	273	272	272	274	272	274
Hauteur utile déduite [mm]	226	225	224	226	224	226
Ecart par rapport à la hauteur utile nominale [mm]	-4	-12	-6	-4	-6	-4

Tableau 18 - Relevé dimensionnel de la position des armatures de précontrainte dans la DAP270

	1	A	2	B	3	C	4	D	5	E	6	F	7
	b_{wext}	$b_{alvéole}$	b_{wi}	$b_{alvéole}$	b_{wext}								
A	52	142	41	139	41	138	44	138	40	138	47	140	52
B	51	142	42	139	41	139	41	140	41	137	47	140	53
C	52	141	43	137	43	139	45	135	41	138	46	141	55
1	48	142	41	141	40	140	43	139	40	136	47	141	52
2	50	141	41	140	43	139	44	136	39	139	45	143	50
3	50	142	32	150	41	139	43	138	40	140	45	140	52

Tableau 19 – Relevé dimensionnel de la largeur des nervures et des alvéoles

	1	A	2	B	3	C	4	D	5	E	6	F	7	Moyenne	Valeur nominale	Écart
		mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
A	h_{tot}	275	273	274	273	274	273	275	276	277	275	270	275	274	270	4
	h_{sup}	75	68	52	68	54	69	55	72	57	72	45	70	53	35	18
	$h_{alvéole}$	102	110	181	110	179	110	176	111	178	107	183	108	180	195	-16
B	h_{inf}	98	95	41	95	41	94	44	93	42	96	42	97	42	40	2
	h_{tot}	270	273	270	272	270	272	272	273	273	275	272	272	272	270	2
	h_{sup}	75	69	53	70	58	69	57	78	48	72	52	70	53	35	18
C	$h_{alvéole}$	100	109	173	108	170	110	170	100	185	110	180	107	176	195	-19
	h_{inf}	95	95	44	94	42	93	45	95	40	93	40	95	42	40	2
	h_{tot}	273	274	272	273	273	275	273	274	275	276	-	-	274	270	4
1	h_{sup}	76	76	52	71	54	73	49	71	55	71	-	-	53	35	18
	$h_{alvéole}$	104	104	175	104	177	106	179	110	179	110	43	94	177	195	-18
	h_{inf}	93	94	45	98	42	96	45	93	41	95	43	94	43	40	3
2	h_{tot}	275	272,5	274	273	270	275	271	274	274	274	274	275	273	270	3
	h_{sup}	73	68,5	54	70	53	70	53	71	50	70	56	70	52	35	17
	$h_{alvéole}$	102	109	176	108	175	110	174	109	182	109	176	110	177	195	-18
3	h_{inf}	100	95	44	95	42	95	44	94	42	95	42	95	43	40	3
	h_{tot}	273	272	272	271	272	270	270	272	273	273	272	273	272	270	2
	h_{sup}	73	67	55	69	56	70	55	68	51	69	57	71	54	35	19
3	$h_{alvéole}$	105	110	172	107	174	107	172	109	181	109	173	107	174	195	-21
	h_{inf}	95	95	45	95	42	93	43	95	41	95	42	95	43	40	3
	h_{tot}	272	273	270	271	270	272	273	272	270	273	273	273	271	270	1
3	h_{sup}	72	68	52	71	55	69	57	68	48	72	53	68	53	35	18
	$h_{alvéole}$	105	110	173	105	173	108	172	109	182	106	176	110	175	195	-20
	h_{inf}	95	95	45	95	42	95	44	95	40	95	44	95	42	40	2

Tableau 20 – Relevé dimensionnel des hauteurs (de la section et des membrures inférieure et supérieure) de la DAP270

Annexe 3 - Fiche technique du mortier utilisé

709 CLAVEXPRESS MB

1/2

SCELLEMENT


LES «PLUS» PRODUIT

- Prise rapide
- Retrait compensé
- Marque NF 030 "Produits de scellement"
- Hautes résistances mécaniques
- Conforme à la norme NF EN 1504-6



▼ MICRO-BÉTON DE SCELLEMENT À RETRAIT COMPENSÉ Prise et durcissement rapides

PROPRIÉTÉS

Micro-béton prêt à mouler constitué de gravillons, de sables, de ciment spécial et d'additifs.

DOMAINES D'APPLICATION

- Assemblage d'éléments préfabriqués en béton
- Jointoiement, clavage de joints de largeur importante
- Confection de massifs d'ancrages
- Réalisation de micro-pieux
- Matage inférieur des appuis de pont
- Scellement d'équipement industriel de poteaux de construction, de fers à béton, de boulons d'ancrage

CARACTÉRISTIQUES

- Constituants actifs à base de liant hydraulique, sans chlorure
- Poudre grise prête à mouler
- Granulométrie : 0-10 mm
- Densité pâte : 2,2
- D.P.U. à 20°C : 20 min

Résistance à l'arrachement à 7 jours

Selon norme NF EN 1881 (position plancher)

- Trou diamètre de forage : 40 mm
- Profondeur d'ancrage : 150 mm
- Barre d'acier H.A. : Ø 16 mm
- Déplacement : sous effort de traction de 75 kN < 0,6 mm
- Force de traction limite : 100 kN

Temps de prise ⁽¹⁾

Température	+5°C	+20°C	+30°C
Début de prise	3 h	0 h 50	0 h 35
Fin de prise	5 h	1 h 05	0 h 45

Résistances Mécaniques (MPa) ⁽²⁾

Plastique (scellement)

Echéances	1 jour	7 jours	28 jours
Flexion 3 pts	6	10	14
Compression	35	60	75

MODE D'EMPLOI

Préparation des supports

- Supports sains, propres, cohésifs, résistants et débarrassés de toutes parties non adhérentes.
- Saturer d'eau le support plusieurs heures avant mise en place.
- Évacuer totalement l'eau résiduelle.

Préparation du produit

- Le micro-béton s'obtient par gâchage du 709 CLAVEXPRESS MB avec de l'eau propre.
- Le malaxage se fait à consistance fluide ou plastique à l'aide :
- d'un malaxeur électrique/ pneumatique ou d'une bétonnière pour les petites quantités (sacs),
- Temps de malaxage (sacs) : 3 min minimum.
- Temps de malaxage (big bag) : 5 min minimum après l'insertion du dernier big bag dans la cuve.
- Respecter l'ordre d'introduction eau puis poudre.

Application du produit

- Nettoyer la réservation du scellement et humidifier abondamment.
- Les armatures des zones de clavage ou les tiges à sceller auront été préalablement positionnées et calées pour éviter leur déplacement pendant les opérations de coulage.
- La mise en œuvre du 709 CLAVEXPRESS MB pour le remplissage des réservations préalablement préparées se fait par déversement progressif et continu.
- Prévoir un dispositif d'évents pour chasser l'air et l'eau, lors du remplissage d'éléments situés en milieu confiné ou immergé.
- Au moment du début de prise, appliquer le produit de cure 742 LANKOCURING.

(1) Valeurs moyennes de laboratoire données à titre indicatif. (2) Compression : essais réalisés sur cubes 10 x 10, conservés à +20°C et 90% d'humidité. Valeurs de laboratoire données à titre indicatif. Flexion : essais réalisés sur prisme 10 x 10 x 40, conservés à +20°C et 90% d'humidité. Valeurs moyennes de laboratoire données à titre indicatif.

ASSISTANCE TECHNIQUE : La Société ParexGroup S.A. assure l'information et l'aide aux entreprises qui en font la demande pour le démarrage d'un chantier afin de préciser les dispositions spécifiques de mise en œuvre du produit (ou procédé). Cette assistance ne peut être assimilée ni à la conception de l'ouvrage, ni à la réception des supports, ni à un contrôle des règles de mise en œuvre.

Documentation Technique 2015 - La présente fiche technique a pour but d'informer sur les propriétés du produit. Les renseignements qui y figurent sont basés sur nos connaissances actuelles. Il appartient à l'utilisateur de s'informer sur l'adaptation du produit à l'usage désiré et de vérifier si cette fiche n'a pas été remplacée par une édition plus récente - Mise à jour consultable sur www.parexlanko.com.

ParexGroup S.A. / Département Mortiers Spéciaux - 19 place de la Résistance - CS 50053 - 92445 Issy les Moulineaux Cedex
Tél. (33) 01 41 17 20 00 - Renseignements techniques : 0 826 08 68 78

709 CLAVEXPRESS MB

2/2

SCELLEMENT

Dosage en eau / Rendement

709 CLAVEXPRESS MB peut être utilisé dans une fourchette de dosage en eau allant de 8 à 10 % soit de 2 à 2,5 litres d'eau propre par sac.

Rendement

Consistance plastique (Marque NF 030 «Produit de scellement»)

709 CLAVEXPRESS MB

Quantité	1 sac de 25 kg
Eau	2 litres
Volume en place	11 litres

Consistance coulante)

709 CLAVEXPRESS MB

Quantité	1 sac de 25 kg
Eau	2,3 litres
Volume en place	11,5 litres

PRÉCAUTIONS D'EMPLOI

- Température limite d'utilisation : +5°C à +30°C.
- Protection de la surface à l'air libre au début de la prise avec **742 LANKOCURING**.
- L'ajout de liant hydraulique, agrégats ou adjuvant est interdit.
- Ne pas utiliser sur support gelé ou en cours de dégel.
- Consulter la Fiche de Données de Sécurité.

12	
709 CLAVEXPRESS MB - Déclaration des Performances n° 75849	
PAREXGROUP S.A. 19, place de la Résistance - 92445 Issy-les-Moulineaux cedex 0 826 08 68 78* *0,15 € TTC/min	
EN 1504-6 : 2006 Produit d'ancrage de type CC pour le renforcement du béton en installant des armatures en acier (barres) dans les bâtiments et les ouvrages de génie civil	
Résistance à l'arrachement :	Déplacement \leq 0,6 mm pour une charge de 75 kN
Teneur en ions chlorure :	\leq 0,05 %
Substances dangereuses :	Conforme à 5.3
Réaction au feu :	Euroclasse A1

CONDITIONNEMENT

- Sac de 25 kg.
- Big bag de 1200 kg.

CONSERVATION

12 mois à partir de la date de fabrication, en emballage d'origine non ouvert et stocké à l'abri de l'humidité.

GARANTIE

- R.P. fabricant.

DOCUMENTS DE RÉFÉRENCE

- Déclaration des Performances CE
- Produit de collage structural selon référentiel NF030 AFNOR CERTIFICATION
11, av. Francis de Pressensé
93571 SAINT DENIS LA PLAINE Cedex
www.marque-nf.com

ASSISTANCE TECHNIQUE : La Société ParexGroup S.A. assure l'information et l'aide aux entreprises qui en font la demande pour le démarrage d'un chantier afin de préciser les dispositions spécifiques de mise en œuvre du produit (ou procédé). Cette assistance ne peut être assimilée ni à la conception de l'ouvrage, ni à la réception des supports, ni à un contrôle des règles de mise en œuvre.

Documentation Technique 2015 - La présente fiche technique a pour but d'informer sur les propriétés du produit. Les renseignements qui y figurent sont basés sur nos connaissances actuelles. Il appartient à l'utilisateur de s'informer sur l'adaptation du produit à l'usage désiré et de vérifier si cette fiche n'a pas été remplacée par une édition plus récente - Mise à jour consultable sur www.parexanko.com.

ParexGroup S.A. / Département Mortiers Spéciaux - 19 place de la Résistance - CS 50053 - 92445 Issy les Moulineaux Cedex
Tél. (33) 01 41 17 20 00 - Renseignements techniques : 0 826 08 68 78



Annexe 4 - Matériel d'essais

Vérin pour l'application du chargement

2 vérins Perrier 500 kN étalonnés le 01/02/2019 (PV d'étalonnage M_JH190093), avec un groupe hydraulique WALTER & BAI PA1010 n° 175 afficheur SRG 500 n° 295.

Machine pour les essais de compression sur éprouvettes de contrôle

Marque	3R
Type	RP 3000 TCT
N°	9808 F5K 36
Vérifiée le	21/01/2019
N° PV	M_JH190057

Matériel de mesure pour les relevés dimensionnels

Mètre ruban "STANLEY" n° 8917 d'une longueur de 5 m au millimètre près (PV n° M_JH180645 vérifié le 06/09/2018) ;

Annexe 5 - Influence de la forme des éprouvettes de contrôle sur les résistances en compression simple et en traction du mortier de remplissage

Contexte

Les formules de calcul de l'effort tranchant d'une dalle alvéolée précontrainte dont n alvéoles sont remplies (voir [Éq. 3] et [Éq. 4] du présent document) font intervenir un terme « f_{ctd} » relatif à la résistance de calcul en traction du matériau de remplissage des alvéoles. Dans la présente étude, il s'agit d'un mortier sans retrait (PAREXLANKO, 709 Clavexpress MB dont la fiche technique est fournie en Annexe 3).

Pour la détermination de cette résistance de calcul en traction f_{ctd} , deux possibilités sont offertes :

- La résistance en traction est calculée à partir de l'exploitation d'essais de traction (par fendage ou par flexion 3 points). La résistance à la traction réelle f_{ct} ainsi obtenue est utilisée à la place de f_{ctd} dans les calculs de [Éq. 3] et [Éq. 4] ;
- La résistance en traction f_{ct} est calculée en utilisant les formules de l'Annexe J faisant référence aux corrélations compression/traction de la norme NF EN 1992-1-1 et son annexe nationale (tableau 3.1). Cela suppose que les corrélations établies dans le cadre des bétons de granulats courants s'appliquent au mortier étudié. Dans les formules, la résistance en compression simple caractéristique f_{ck} est remplacée par la résistance en compression simple réelle f_c .

Problématique

Généralement, les mortiers sont caractérisés en compression simple et en traction à partir d'éprouvettes parallélépipédiques de dimensions 40 mm x 40 mm x 160 mm selon la norme NF EN 196-1 à 28 jours d'âge.

Le coefficient de passage entre cubes de 40 mm de côté et éprouvettes cylindriques normalisées n'est pas connu pour ce mortier.

Note : on sait que la résistance en compression varie suivant la taille des éprouvettes essayées. Plus celles-ci sont petites et plus les résistances sont élevées.

De même, la résistance en traction via des essais de flexion trois points, est-elle du même ordre de grandeur que celle qui serait calculée à partir d'essais de fendage sur éprouvettes normalisées ? Enfin, ces résistances en traction ainsi obtenues, sont-elles proches de celle qui serait calculée à partir des essais de compression ?

Campagne d'essais réalisée

Dans ce contexte, une campagne d'essais a été menée en parallèle des essais d'effort tranchant :

- Réalisation d'essais de compression simple :
 - Confection de 3 éprouvettes normalisées $\Phi 16$ cm x H32 cm. L'avantage de cette dimension réside dans le fait que le résultat brut obtenu à l'essai est celui à considérer ;
Note : La conformité des cylindres 160 mm/320 mm à la norme NF EN 12390-1 découle de la tolérance de 10 % sur les dimensions nominales qui s'applique aux cylindres 150 mm/300 mm [5].
 - Confection de 3 éprouvettes normalisées cubiques de 15 cm de côté. L'avantage de cette dimension réside dans le fait que le résultat brut obtenu à l'essai est celui à considérer ;

- Confection de 6 parallélépipèdes 4 cm x 4cm x 16 cm (soit 12 cubes de 4 cm de côté après la réalisation de l'essai de flexion) ;
- Réalisation d'essais de traction :
 - Confection de 5 éprouvettes normalisées $\Phi 16$ cm x H32 cm pour des essais de fendage ;
 - Confection de 6 parallélépipèdes 4 cm x 4 cm x 16 cm pour des essais de flexion 3 points.

Le coulage des éprouvettes a eu lieu le 31/01/2020 et les essais ont été réalisés le 28/02/2020.



Photo 9 – Epreuves de contrôle de différentes formes

Résultats des essais de compression simple

N° éprouvette	H ₁	H ₂	H ₃	Φ_1	Φ_2	Φ_3	H _{moy}	Φ_{moy}	F _c	R _{ccyl,J}
-	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	kN	MPa
1	317,10	317,19	317,15	159,31	159,27	159,37	317,1	159,3	1256,1	63,0
2	314,48	314,65	314,57	155,55	156,71	158,12	314,6	156,8	1291,3	66,9
3	318,15	317,92	317,80	161,18	157,17	159,42	318,0	159,3	1273,5	63,9
									moyenne	64,6
									écart-type	2,02

Tableau 21 – Résultats des essais de compression simple sur éprouvettes cylindriques normalisées $\Phi 16$ cm x H32 cm

N° éprouvette	a ₁	a ₂	a ₃	a ₄	a _{moy}	F _c	R _{ccube,J}
-	mm	mm	mm	mm	mm	kN	MPa
1	149,75	150,19	151,46	149,87	150,3	1622,7	71,8
2	149,92	150,06	149,13	149,26	149,6	1421,7	63,5
3	149,90	150,13	150,09	150,47	150,1	1607,8	71,3
						moyenne	68,9
						écart-type	4,65

Tableau 22 – Résultats des essais de compression simple sur éprouvettes cubiques normalisées de 15 cm de côté

N° éprouvette	a ₁	a ₂	a _{moy}	F _c	f _{ccube}
-	mm	mm	mm	kN	MPa
1	40,40	40,10	40,3	117,3	72,4
1bis	40,40	40,10	40,3	111,4	68,8
2	40,16	40,45	40,3	114,1	70,2
2bis	40,16	40,45	40,3	110,9	68,3
3	40,20	40,68	40,4	108,2	66,2
3bis	40,20	40,68	40,4	107,1	65,5
4	39,89	40,69	40,3	111,0	68,4
4bis	39,89	40,69	40,3	108,0	66,5
5	40,04	40,27	40,2	108,7	67,4
5bis	40,04	40,27	40,2	104,3	64,7
6	40,01	41,21	40,6	102,2	62,0
6bis	40,01	41,21	40,6	108,6	65,9
moyenne					67,2
écart-type					2,72

Tableau 23 – Résultats des essais de compression simple sur éprouvettes cubiques de 4 cm de côté

Une comparaison des résultats des différents essais de compression simple réalisés montre (Tableau 16) :

- Un coefficient de passage des cubes de 15 cm de côté vers les cylindres $\Phi 16$ cm x 32 cm de 0,94 ;
- Un coefficient de passage des cubes de 4 cm de côté vers les cylindres $\Phi 16$ cm x 32 cm de 0,96.

Résistance	f _{c,cyl}	f _{c,cube15}	ratio	f _{c,cube4}	ratio
Dimensions éprouvettes	$\Phi 16\text{cm} \times \text{H}32\text{cm}$	15 cm	f _{c,cyl} /f _{c,cube15}	4 cm	f _{c,cyl} /f _{c,cube4}
Valeur moyenne	64,6 MPa	68,89 MPa	0,94	67,18 MPa	0,96
Écart-type	2,02 MPa	4,65 MPa		2,72 MPa	
Coefficient de variation	3%	7%		4%	

Tableau 24 – Synthèse des essais de compression simple et coefficient d'équivalence cube/cylindre

Résultats des essais de traction

N° éprouvette	a ₁	A ₂	H ₁	a _{moy}	F _t	f _{ct,fl}	f _{ct}	
-	mm	mm	mm	mm	kN	MPa	MPa	
1	40,40	40,10	161,27	40,3	3,93	9,0	5,42	
2	40,16	40,45	160,95	40,3	3,81	8,7	5,24	
3	40,20	40,68	160,48	40,4	3,43	7,8	4,67	
4	39,89	40,69	160,00	40,3	4,05	9,3	5,57	
5	40,04	40,27	160,09	40,2	3,39	7,9	4,71	
6	40,01	41,21	160,28	40,6	3,63	8,1	4,88	
						moyenne	8,5	5,1
						écart-type	0,64	0,38

Tableau 25 – Résultats des essais de flexion 3 points sur éprouvettes parallélépipédiques 4 cm x 4 cm x 16 cm

N°	H ₁	H ₂	H ₃	Φ ₁	Φ ₂	Φ ₃	H _{moy}	Φ _{moy}	F _t	f _{ct,sp,j}	f _{ct}	
-	mm	mm	kN	MPa	MPa							
1	317,90	318,89	319,12	159,04	159,05	159,02	318,6	159,0	289,6	3,64	3,27	
2	317,60	317,25	317,92	159,56	159,10	159,42	317,6	159,4	273,1	3,44	3,09	
3	319,82	320,90	321,15	159,46	159,25	159,33	320,6	159,3	335,6	4,18	3,76	
4	320,50	318,70	319,45	159,96	159,90	159,69	319,6	159,9	317,2	3,95	3,56	
5	315,46	314,97	314,58	159,92	159,24	159,47	315,0	159,5	288,8	3,66	3,29	
										moyenne	3,77	3,40
										écart-type	0,29	0,26

Tableau 26 – Résultats des essais de fendage sur éprouvettes Φ16 cm x H32 cm

A partir de la résistance sur cube de 4 cm de côté et du coefficient d'équivalence de 0,96, on calcule la résistance en compression équivalente sur cylindre et la résistance en traction réelle correspondante à partir des corrélations du tableau 3.1 de la norme NF EN 1992-1-1 et son annexe nationale.

N° éprouvette	$f_{ccyl,éq}$	f_{actum}	f_{ct}
-	MPa	MPa	MPa
1	69,63	4,60	3,68
1bis	66,13	4,52	3,61
2	67,55	4,55	3,64
2bis	65,65	4,50	3,60
3	63,63	4,45	3,56
3bis	62,98	4,43	3,55
4	65,76	4,51	3,60
4bis	63,98	4,46	3,57
5	64,83	4,48	3,59
5bis	62,21	4,41	3,53
6	59,60	4,34	3,48
6bis	63,33	4,44	3,55
moyenne	64,6	4,48	3,58
écart-type	2,61	0,07	0,05

Tableau 27 – Calculs de la résistance à la traction à partir des résistances équivalentes sur cylindres et des corrélations entre compression/traction données dans l'Annexe J de la norme NF EN 1168+A3

Résistance	$f_{ct,sp}$	$f_{ct}=0,9*f_{ct,sp}$	$f_{ct,fl}$	$f_{ct}=0,6*f_{ct,fl}$	$f_{ct,calcul}$
Dimensions éprouvettes	Φ16cmxH32cm fendage		4cmx4cmx16cm flexion 3 pts		calcul Annexe J/J5 à partir de $f_{c,éq}$ du Tableau 16
Valeur moyenne	3,8 MPa	3,40 MPa	8,5 MPa	5,08 MPa	3,58 MPa
Écart-type	0,29 MPa		0,64 MPa		0,05
Coefficient de variation	8%		8%		1%

Tableau 28 – Synthèse des essais de traction

Conclusions

En synthèse, on retient :

- Un coefficient de passage entre cubes de 4 cm de côté et éprouvettes cylindriques normalisées de 0,96 ;
- Une résistance en traction de :
 - A partir des essais de fendage : 3,40 MPa ;
 - A partir des essais de flexion 3 points : 5,1 MPa ;
 - A partir du tableau 3.1 de la norme NF EN 1992-1-1 : 3,58 MPa.

La résistance en traction déterminée à partir du tableau 3.1 est plus proche des essais de fendage que celle obtenue lors des essais de flexion 3 points.

On retient donc la démarche suivante dans la caractérisation du mortier de remplissage :

- Confection au minimum de 3 éprouvettes cylindriques normalisées et réalisation d'essais de compression simple :
 - Détermination de la résistance en compression simple ;
 - Déduction par les formules du Tableau 3.1 de la norme NF EN 1992-1-1 de la résistance en traction.

Annexe 6 - Photos des modes de ruine des corps d'épreuve avec remplissage des alvéoles (série A à C)

Essai B

Note d'information : Présence d'un trait de scie à 29 cm de l'about environ côté droit, avant l'axe d'appui rouleau.



Côté droit



Côté gauche

Photo 10 – Faciès de rupture par effort tranchant (fissure inclinée sur les flancs) - Essai B



Au droit des nervures vides



Visible sur face supérieure

Photo 11 – Autres fissures – Essai B

Essai C

Note d'information : Présence d'un about de DAP endommagé sur 30 cm environ côté droit.



Côté droit



Côté gauche

Photo 12 – Faciès de rupture par effort tranchant (fissure inclinée sur les flancs) - Essai C



Au droit des nervures vides
(ici à l'about)



Visible sur face supérieure

Photo 13 – Autres fissures - Essai C

Essai A

Note d'information : Présence d'une tige d'ancrage en acier dépassante avant l'appui rouleau.



Non visible

Côté droit

Côté gauche

Photo 14 – Faciès de rupture par effort tranchant (fissure inclinée sur les flancs) - Essai A



Au droit des nervures vides



Visible sur face supérieure

Photo 15 – Autres fissures - Essai A

Annexe 7 - Photos des modes de ruines des corps d'épreuve sans remplissage des alvéoles

Essai 1

Note d'information : Présence d'un trait de scie à 50 mm de l'about de la DAP



Côté droit



Côté gauche

Photo 16 – Faciès de rupture par effort tranchant (fissure inclinée sur les flancs) - Essai 1

Essai 2



Côté droit



Côté gauche

Photo 17 – Faciès de rupture par effort tranchant (fissure inclinée sur les flancs) - Essai 2

Essai 3



Côté droit



Côté gauche

Photo 18 – Faciès de rupture par effort tranchant (fissure inclinée sur les flancs) - Essai 3



Photo 19 – Autres fissures - Essai 3

Index des figures

Figure 1 – Dalle alvéolée précontrainte avec alvéoles remplies (selon Figure F.1 de [4]).	8
Figure 2 – Géométries transversales des dalles alvéolées précontraintes DAP270 testées.	10
Figure 3 – Disposition de la charge pour la détermination de la résistance à la flexion (selon Figure 5 de [8]).	15
Figure 4 – Configuration d’essai d’effort tranchant retenue pour tous les essais.	18
Figure 5 – Section réduite (en vert) au centre de gravité de la dalle alvéolée précontrainte DAP270.	20

Index des tableaux

Tableau 1 – Caractéristiques mécaniques des dalles alvéolées en configuration standard sur la base des cotes réelles relevées.	11
Tableau 2 – Résultats des essais de compression sur cubes à la détension du béton préfabriqué et déduction de la résistance en traction.	12
Tableau 3 – Résultats des essais de compression sur carottes en béton préfabriqué le jour des essais.	13
Tableau 4 – Calcul de la résistance à la traction du béton préfabriqué le jour des essais.	13
Tableau 5 – Caractéristiques principales des armatures de précontrainte dans la DAP270.	14
Tableau 6 – Contrainte dans les armatures de précontrainte dans la DAP270 (à la détension et au jour des essais) due à la précontrainte seule.	14
Tableau 7 – Résultats des essais de compression simple sur éprouvettes de mortier à retrait compensé.	16
Tableau 8 – Résultats des essais de flexion 3 points sur éprouvettes de mortier à retrait compensé.	16
Tableau 9 – Caractéristiques de la configuration d’essai d’effort tranchant adoptée dans l’étude.	18
Tableau 10 – Hypothèses des calculs pour l’application numérique de la résistance à l’effort tranchant théorique des dalles alvéolées dans leur configuration standard sur la base des cotes réelles.	20
Tableau 11 – Effort tranchant théorique apporté par les alvéoles selon les deux approches de calcul (européenne ou française) sur la base des propriétés réelles des matériaux et des cotes réelles.	21
Tableau 12 – Effort tranchant total théorique apporté par les alvéoles selon les deux approches de calcul (européenne ou française) sur la base des propriétés réelles des matériaux et des cotes réelles.	22
Tableau 13 – Masses des corps d’épreuve avant essais d’effort tranchant.	23
Tableau 14 – Résultats des essais d’effort tranchant.	25
Tableau 15 – Confrontation : expérimentation/théorie (sur la base des cotes réelles) pour l’effort tranchant résistant de la dalle alvéolée seule (série d’essais 1 à 3).	25
Tableau 16 – Confrontation : théorie/expérimentation (sur la base des cotes réelles) pour l’effort tranchant résistant de la dalle alvéolée dont certaines alvéoles sont remplies (série d’essais A à C).	26
Tableau 17 – Sécurité apportée par les formules de calcul de l’effort tranchant résistant d’une dalle alvéolée précontrainte comportant n alvéoles remplies sur chantier (calculs théoriques effectués sur la base des cotes réelles de la section transversale et des propriétés réelles des matériaux).	27
Tableau 18 – Relevé dimensionnel de la position des armatures de précontrainte dans la DAP270.	31
Tableau 19 – Relevé dimensionnel de la largeur des nervures et des alvéoles.	32
Tableau 20 – Relevé dimensionnel des hauteurs (de la section et des membrures inférieure et supérieure) de la DAP270.	33
Tableau 21 – Résultats des essais de compression simple sur éprouvettes cylindriques normalisées $\Phi 16$ cm x H32 cm.	38
Tableau 22 – Résultats des essais de compression simple sur éprouvettes cubiques normalisées de 15 cm de côté.	38
Tableau 23 – Résultats des essais de compression simple sur éprouvettes cubiques de 4 cm de côté.	39
Tableau 24 – Synthèse des essais de compression simple et coefficient d’équivalence cube/cylindre.	39

Tableau 25 – Résultats des essais de flexion 3 points sur éprouvettes parallélépipédiques 4 cm x 4 cm x 16 cm	40
Tableau 26 – Résultats des essais de fendage sur éprouvettes $\Phi 16$ cm x H32 cm.....	40
Tableau 27 – Calculs de la résistance à la traction à partir des résistances équivalentes sur cylindres et des corrélations entre compression/traction données dans l'Annexe J de la norme NF EN 1168+A3.....	41
Tableau 28 – Synthèse des essais de traction.....	41

Index des graphiques

Graphique 1 – Cycle de chargement appliqué à tous les essais d’effort tranchant	23
Graphique 2 – Dimensions réelles des DAP testées.....	30

Index des photos

Photo 1 – DAP270 avec 3 alvéoles ouvertes (dalle n°A)	11
Photo 2 – Carottage dans la dalle alvéolée	13
Photo 3 – Remplissage des alvéoles ouvertes des dalles alvéolées de la série A à C	15
Photo 4 – Visualisation de la section transversale des dalles alvéolées de la série A à C après remplissage des 3 alvéoles	15
Photo 5 – Endommagement des abouts des dalles alvéolées B et C.....	17
Photo 6 – Dispositif d’appuis des corps d’épreuve (rotule à gauche côté chargement et, appui rouleau à droite)	18
Photo 7 – Dispositif de chargement.....	19
Photo 8 – Faciès de rupture par effort tranchant (fissure inclinée sur les flancs latéraux) : exemples	24
Photo 9 – Eprouvettes de contrôle de différentes formes.....	38
Photo 10 – Faciès de rupture par effort tranchant (fissure inclinée sur les flancs) - Essai B	43
Photo 11 – Autres fissures – Essai B.....	43
Photo 12 – Faciès de rupture par effort tranchant (fissure inclinée sur les flancs) - Essai C	44
Photo 13 – Autres fissures - Essai C	44
Photo 14 – Faciès de rupture par effort tranchant (fissure inclinée sur les flancs) - Essai A.....	45
Photo 15 – Autres fissures - Essai A.....	45
Photo 16 – Faciès de rupture par effort tranchant (fissure inclinée sur les flancs) - Essai 1	46
Photo 17 – Faciès de rupture par effort tranchant (fissure inclinée sur les flancs) - Essai 2	46
Photo 18 – Faciès de rupture par effort tranchant (fissure inclinée sur les flancs) - Essai 3	47
Photo 19 – Autres fissures - Essai 3	47

RAPPORT

ÉTUDES ET RECHERCHES

DIMENSIONNEMENT DES STRUCTURES

CAROLINE MORIN
MATTHIEU SCALLIET



/ Cerib - CS 10010
28233 Épernon cedex

/ 02 37 18 48 00
cerib@cerib.com

INFLUENCE DU REMPLISSAGE DES ALVÉOLES DANS LA RÉSISTANCE À L'EFFORT TRANCHANT DES DALLES ALVÉOLÉES

La résistance à l'effort tranchant d'une dalle alvéolée précontrainte seule, dans les zones non fissurées à l'ELU, est traitée dans la norme produit NF EN 1168+A3 d'Avril 2012 au paragraphe 4.3.3.2.2. La norme NF DTU 23.2 d'Août 2008, clause 4.3.2, renvoie quant à elle à la norme produit. Il est par ailleurs possible d'augmenter cette résistance à l'effort tranchant en remplissant sur chantier quelques alvéoles. La prise en compte de la part de résistance à l'effort tranchant apportée par le remplissage de ces alvéoles dans les dalles alvéolées précontraintes est quant à elle traitée de manière différente selon que l'on utilise la norme produit ou la norme NF DTU 23.2.

Cette étude a permis de quantifier expérimentalement l'influence du remplissage de quelques alvéoles dans la résistance à l'effort tranchant d'un profil donné de dalle alvéolée précontrainte sans dalle rapportée et, d'évaluer la sécurité apportée par les formules de calcul de la part d'effort tranchant dû au remplissage des alvéoles en fonction du référentiel considéré. L'étude a montré la pertinence de l'utilisation de la formule de la norme NF DTU 23.2 pour évaluer la résistance à l'effort tranchant d'une dalle alvéolée précontrainte dont certaines alvéoles sont remplies (en l'occurrence dans le cas étudié, 3 alvéoles sur 6 remplies) sur chantier avec du mortier sans retrait de classe au moins égale à C50/60. Le remplissage doit faire l'objet d'une traçabilité du contrôle de la mise en œuvre.

À noter que la norme produit NF EN 1168+A3 surestime la résistance à l'effort tranchant apportée par les alvéoles remplies dans le cas du profil de dalle testé dans le présent document.

INFLUENCE OF CORE FILLING IN THE SHEAR-TENSION CAPACITY OF PRESTRESSED HOLLOW-CORE SLABS

The shear strength of a prestressed hollow-core slabs, in uncracked sections in the ultimate limit state, is covered in the product standard NF EN 1168+A3 (2012) in clause 4.3.3.2.2. The french national NF DTU 23.2 (2008), clause 4.3.2, refers to the product standard. It is possible to increase this shear strength by filling in some voids on site. The part of the shear strength provided by the filling of some voids in prestressed hollow-core slabs is treated differently depending on whether the product standard or the NF DTU 23.2 standard is used.

This study quantified experimentally the influence of the filling of some voids in the shear strength of a given profile of prestressed hollow-core slab without a topping and evaluated the security provided by the formulas according to the standard considered.

The study showed the relevance of using the formula of the NF DTU 23.2 standard to evaluate the shear strength of a prestressed hollow-core slab in which some voids are filled (in this study, 3 cells out of 6 were filled) on site with a non-shrink mortar of class at least equals to C50/60. The filling of some voids must be subject to traceability of the erection control.

It should be underlined that the product standard NF EN 1168+A3 (2012) overestimates the shear-strength provided by the filled voids in this configuration of hollow-core cross-section tested.