

La simplicité de la conception, de la production et de la construction

# Dalle Alvéolée Rainurée : une façon simplifiée de réduire significativement la consommation de béton et d'augmenter la productivité

■ Marc Sanabra-Loewe, Université Polytechnique de Catalogne (UPC - Barcelona Tech), Barcelone, Espagne

**Une méthode visant à fabriquer des dalles alvéolées aux extrémités encastrées et permettant une réduction jusqu'à 20% de la hauteur du plancher fini et de la consommation de béton a été développée, éprouvée dans les détails et brevetée par la société d'ingénierie Elastic Potential de Barcelone. La méthode consiste à produire les dalles alvéolées avec de profondes rainures sur leur face supérieure. Une fois sur le chantier, on peut placer directement sur les dalles rainurées des armatures pour résister aux moments négatifs et ensuite couler le béton pour former une table de compression conventionnelle, d'au moins 50 mm d'épaisseur. Les réductions significatives des coûts de production et de transport des dalles permettent à chaque entreprise de préfabrication un rapide amortissement de la machine nécessaire pour produire les dalles rainurées. Actuellement, les principaux fournisseurs ont déjà mis au point des machines pour produire des Dalles Alvéolées Rainurées ou sont en train de les développer (Prensoland, Echo Precast Engineering, UltraSpan, Elematic, Nordimpianti, Spancrete).**

Dans de nombreuses situations courantes, la performance structurelle des planchers est améliorée lorsque les extrémités des dalles sont encastrées au lieu d'être articulées. Il y a 20 ans, pour les planchers réalisés à base de dalles alvéolées, une solution a été développée pour obtenir cet encastrement aux extrémités des dalles. Cette solution consistait à ouvrir les extrémités de certains alvéoles, y placer des armatures pour les moments négatifs, et remplir de béton les alvéoles ouvertes. Cependant, la grande majorité de planchers de dalles alvéolées conçues aujourd'hui le sont encore avec des extrémités articulées. En effet, la solution qui consiste à ouvrir les extrémités des alvéoles est plus compliquée que la solution conventionnelle à base de dalles bi-articulées et a un coût peu compétitif.

## Le concept principal : une performance structurelle supérieure simplifiée

Avec la Dalle alvéolée Rainurée, il existe dorénavant une solution d'encastrement simplifiée des dalles alvéolées, aussi

simple à mettre en œuvre que la solution des dalles bi-articulées et à un coût moindre.

Les planchers à base de Dalles Alvéolées Rainurées ont un coût réduit grâce à la diminution, jusqu'à 20%, de la hauteur des dalles et donc de la consommation de béton. En conséquence, les dalles sont jusqu'à 20% plus légères, et sont plus simples à transporter et à manipuler. L'encastrement des extrémités est efficace grâce à deux modifications par rapport à la pratique courante. D'un côté, les dalles sont conçues avec des rainures profondes sur la face supérieure. Cela nécessite une machine appropriée (voir section « Disponibilité de machines »). D'un autre côté, quand les dalles sont placées sur le chantier, les armatures prévues pour résister aux moments de flexion négatifs se placent directement sur les dalles, sans utiliser de séparateurs, puis une table de compression structurale (d'au moins 50 mm) est bétonnée de façon courante (voir Fig. 1).



Fig. 1 : Plancher de Dalles Alvéolées Rainurées avant de bétonner la table compression. Certains détails sont importants sur le schéma : les barres de renforcement sont placées directement sur la dalle ; les dalles sont correctement séparées de la poutre pour permettre au béton de remplir l'interstice en permettant que les moments négatifs se développent dûment ; des bouchons peuvent être utilisés pour éviter que les alvéoles ne se remplissent de béton.



■ Le Dr. Marc Sanabra-Loewe est professeur en Ingénierie Structurale depuis 11 ans à l'Université Polytechnique à Barcelone, en Espagne (UPC-Barcelona Tech). En 2018-2019, il a été professeur en Ingénierie des structures à l'Université de l'Illinois à Urbana-Champaign. Il a également été, pendant 15 ans, directeur de MASA+Arquitectura, un bureau d'études spécialisé en structures à Barcelone. Son Master, comme son Doctorat, avaient pour sujet l'optimisation de planchers préfabriqués en béton. Il est l'inventeur de plusieurs brevets sur les systèmes de planchers optimisés en béton, à présent propriétés de Elastic Potential, S.L., une société espagnole investissant dans la propriété intellectuelle. [msanabra@elastic-potential.com](mailto:msanabra@elastic-potential.com)

Même en considérant la nécessité de bétonner une table de compression, les planchers à Dalles Alvéolées Rainurées peuvent être moins onéreux que les planchers à dalles alvéolées conventionnels articulés sans table de compression

### Qui bénéficie de l'utilisation de ces Dalles Alvéolées Rainurées

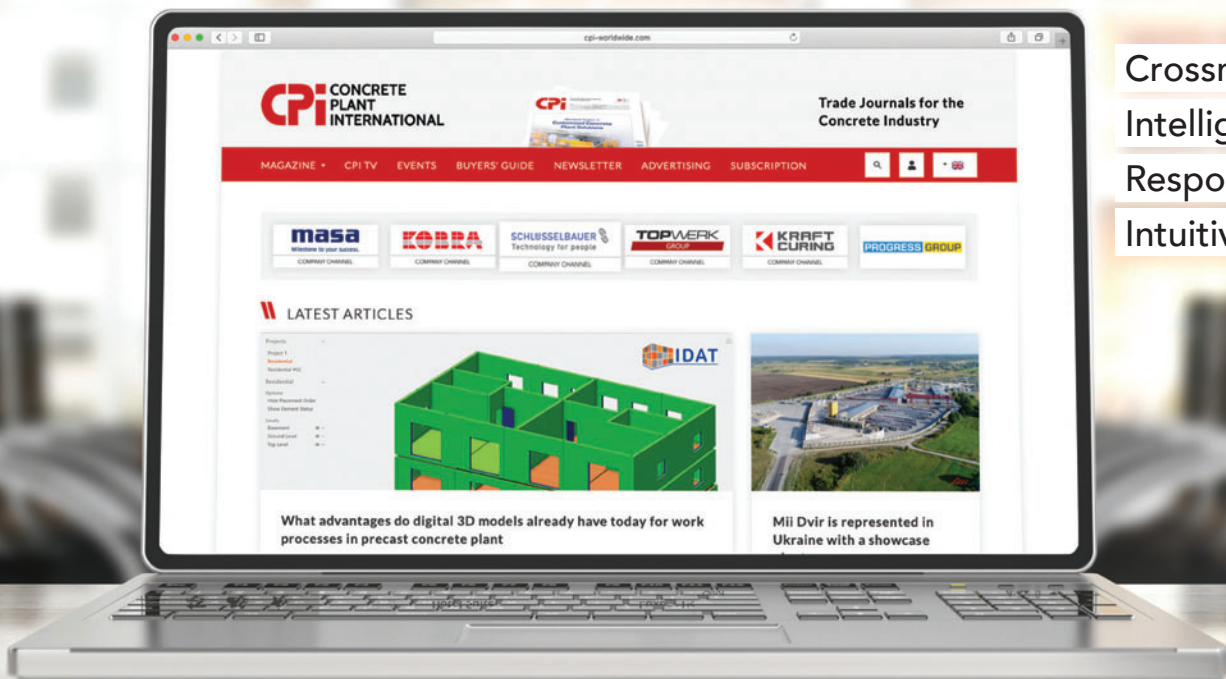
Tous les acteurs de la chaîne de valeur peuvent obtenir de notables avantages et profits dûs à l'utilisation de la Dalle Alvéolée Rainurée.

L'entreprise de préfabrication peut produire les dalles plus fines, qui sont souvent aussi moins renforcées. En moyenne, les dalles peuvent être jusqu'à 20% plus fines que les conventionnelles (en comparaison avec la solution actuelle, avec table de compression) et jusqu'à 25% plus fines que les conventionnelles (en comparaison avec la solution actuelle sans table de compression). La consommation d'acier de pré-

contrainte est diminuée jusqu'à 15% en moyenne. Enfin, puisque les dalles sont entre 20% et 25% plus légères, leur transport est aussi moins cher.

Si ces dalles plus fines se vendent au même prix (voire légèrement moins cher) que les dalles actuelles bi-articulées (à performance équivalente), l'entreprise de préfabrication peut obtenir d'importantes marges additionnelles, et améliorer significativement sa rentabilité. Ces marges accrues prennent déjà en compte le fait que les Dalles Alvéolées Rainurées (plus fines) peuvent être vendues à un prix légèrement en-dessous des dalles bi-articulées équivalentes (plus épaisses), pour compenser le coût additionnel que l'entrepreneur peut avoir sur le chantier lors de la disposition des armatures destinés aux moments négatifs. L'entrepreneur, à son tour, va bénéficier non seulement du prix moins élevé des dalles alvéolées mais aussi du fait que les dalles sont plus légères : les poutres, les piliers et les fondations peuvent être réduits. De plus, les dalles étant plus fines (les poutres peuvent aussi avoir une réduction de hauteur), toute la structure du plancher peut être réduite entre 5 et 15 cm, y compris donc la hauteur de chaque étage du bâtiment. Ceci entraîne une diminution de la surface en façade, permettant à son tour une réduction additionnelle des coûts de construction. Selon les études menées en Europe, en considérant un coût total de construction du bâtiment entre 500 €/m<sup>2</sup> et 1000 €/m<sup>2</sup>, l'entrepreneur peut obtenir des réductions de coûts totales entre 2 €/m<sup>2</sup> et 6 €/m<sup>2</sup> (environ un 0,5% du coût total de la construction). Les réductions de coûts réels pour l'entrepreneur dépendent surtout de la réduction de l'épaisseur de la structure du plancher, du type de fondations (pieux ou semelles) et du prix de la façade par m<sup>2</sup>.

Check out our new homepage:  
[www.cpi-worldwide.com](http://www.cpi-worldwide.com)



Crossmedia  
Intelligent  
Responsive  
Intuitive

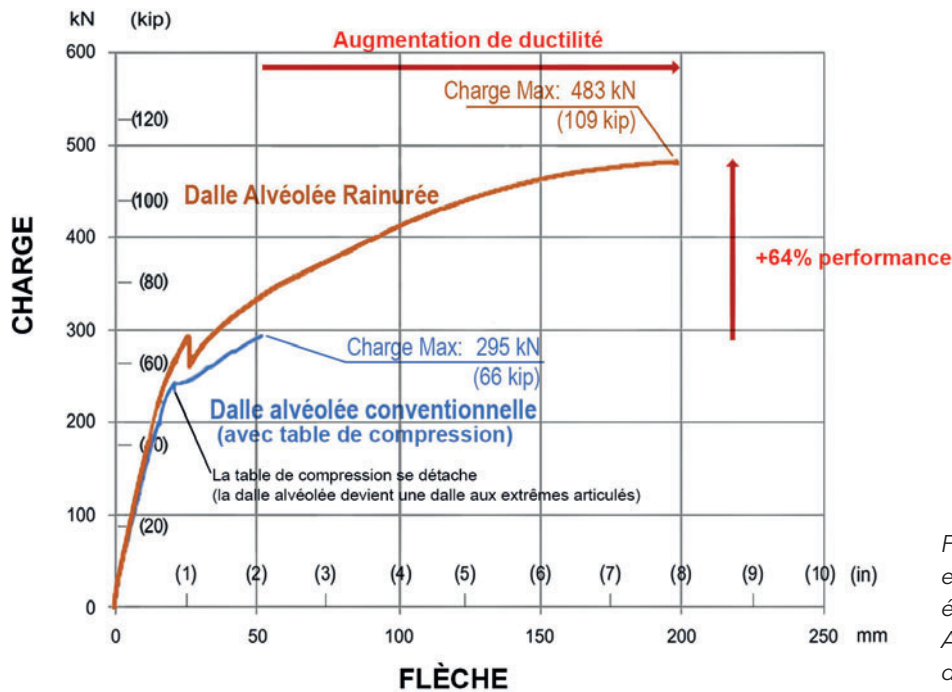


Fig. 2 : Diagramme charge-flèche, d'un essai où deux planchers identiques ont été chargés - l'un qui utilise des Dalles Alvéolées Rainurées et l'autre qui utilise des dalles alvéolées conventionnelles.

En outre, en utilisant les Dalles Alvéolées Rainurées, le promoteur du bâtiment et les concepteurs du bâtiment (architecte, ingénieur) peuvent aussi obtenir de nombreux avantages. Les Dalles Alvéolées Rainurées de la même hauteur que des dalles alvéolées bi-articulées conventionnelles sont capables de supporter jusqu'à 25% de charge en plus (voir Fig. 2), ou leur portée peut être de 25% supérieure. La liberté de conception s'accroît aussi : les porte-à-faux sont maintenant possibles, et les grandes ouvertures dans les dalles sont aussi plus facilement réalisables car les dalles coupées à moitié de la travée peuvent fonctionner en porte-à-faux, encastées aux supports de l'extrémité appuyée.

Les Dalles Alvéolées Rainurées, typiquement plus légères, sont aussi avantageuses en situation de séisme grâce à leur masse réduite et grâce à la ductilité augmentée de la jonction poutre-plancher qui réduit le risque d'effondrement progressif. En outre, comme dans tous les planchers à continuité, le fait d'avoir une partie significative de l'acier de renforcement (15% à 50%) placé à la face supérieure du plancher permet une performance améliorée en conditions d'incendie. Ceci est dû au fait que les armatures de la face supérieure sont beaucoup moins exposées à la chaleur causée par le feu, typiquement venant du bas [1].

Enfin, l'utilisation de Dalles Alvéolées Rainurées permet de construire des planchers en émettant 10 à 15% en moins de CO<sub>2</sub>. Ceci est le résultat d'une réduction de consommation de béton jusqu'à 20% et d'une légère augmentation de la quantité d'acier nécessaire. Cette augmentation d'acier est due au remplacement d'une partie de l'acier de précontrainte par de l'acier placé sur le chantier, qui typiquement a une résistance inférieure comparée à l'acier de précontrainte.

### Compatibilité avec les codes structurels actuels

La majorité de codes structurels, y compris l'Eurocode (EC-2) [2] et le PCI Manual for the Design of Hollow Core [1], acceptent que les planchers à dalles alvéolées puissent être

conçus de manière encastree. Ceci est dû au fait que cette solution d'encastrement existe depuis longtemps. En conséquence, la nouvelle solution de Dalles Alvéolées Rainurées est souvent compatible avec les codes actuels.

Le principe sur lequel se basent les Dalles Alvéolées Rainurées est la résistance au cisaillement horizontal de la jonction béton-sur-béton (table de compression-sur-dalle). À nouveau, de nombreux codes (EC-2 [2] ; ACI.318 [3]) contiennent des articles qui peuvent être considérés compatibles avec ces principes : ceux pour établir la résistance au cisaillement de la surface de reprise béton-sur-béton.

### La Dalle Alvéolée Rainurée devient une réalité

#### Une technologie développée après un programme d'essais approfondi

La solution ici présentée a été développée après un programme d'essais complet effectué durant 18 mois à l'Universidad Politécnica de Valencia (UPV) en 2016 et 2017, en Espagne (voir Fig. 3). Ces essais furent dirigés par le Dr. Pedro Miguel Sosa, Professeur Titulaire en Génie Civil, et le Dr. Luíís Pallarés Rubio, Professeur Agrégé de Génie Civil, sous la supervision de Elastic Potential (la société propriétaire des brevets).

Le principal objectif du programme d'essais était de trouver une solution fiable pour garantir une bonne connexion entre la dalle alvéolée et la table de compression. Le programme a inclus des essais sur des spécimens à petite et moyenne échelle, puis de grande nature. Les principales variables étudiées furent : la géométrie et la rugosité de la surface de reprise, les âges des deux bétons (du préfabriqué et de la table de compression), et les dimensions des spécimens. Une des principales conclusions de cette recherche est que la différence de vitesse et la magnitude du retrait du béton de la dalle alvéolée et du béton de la table de compression, connue comme retrait différentiel, réduit significativement la

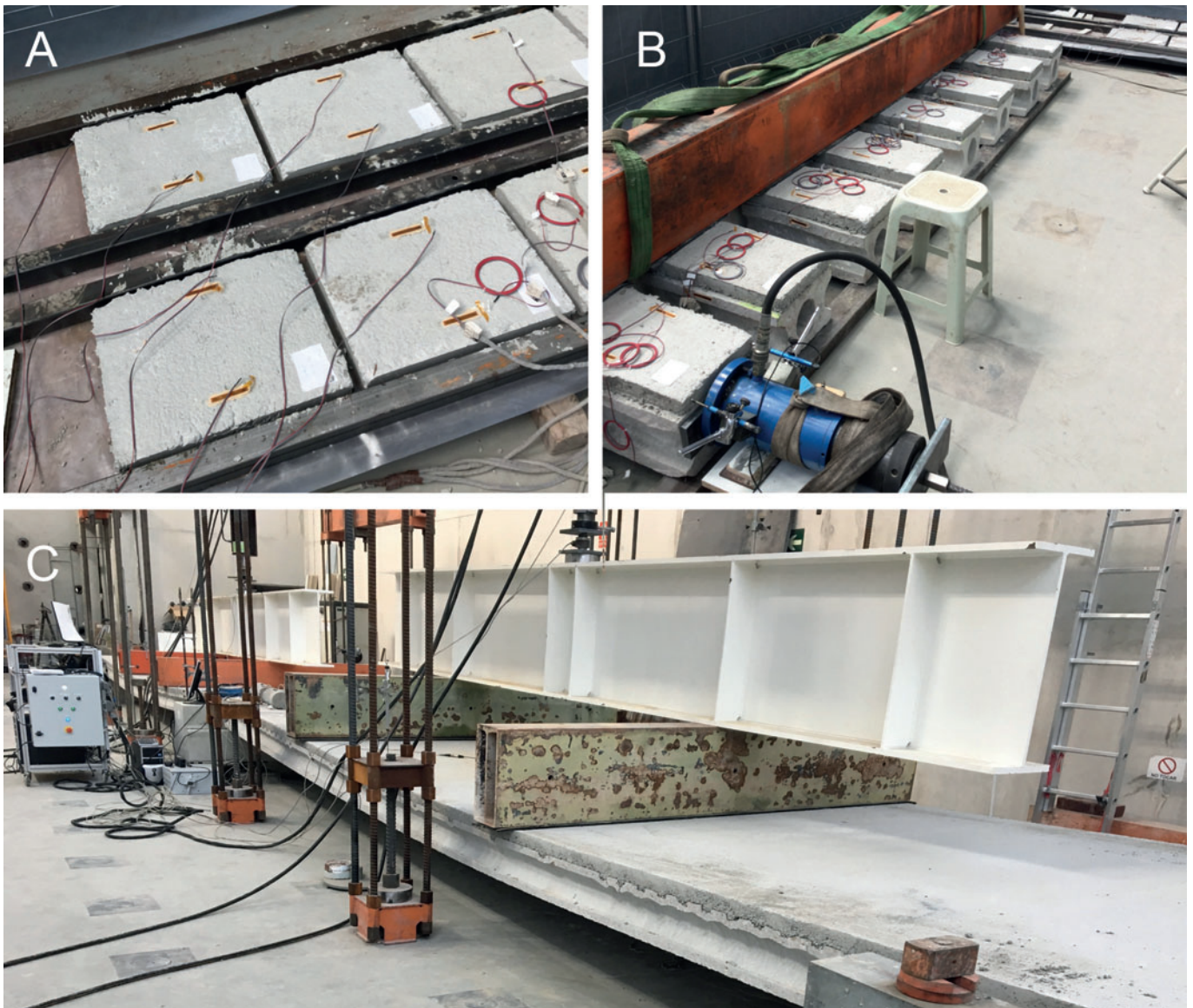


Fig. 3 : A. Essais de retrait libre sur bétons de différentes compositions ; B. Essais de résistance au cisaillement à la surface de reprise sur des spécimens petits ; C. Essai à grandeur nature (sous intense charge) d'un plancher à deux travées en utilisant des Dalles Alvéolées Rainurées.

résistance au cisaillement horizontal de la surface de reprise. Cet effet peut mener à un détachement prématuré de la table de compression. Cela se passe généralement quand les taux de retrait sont élevés sur la dalle (par exemple quand les dalles sont âgées de plusieurs mois au moment de bétonner la table de compression) ou quand le béton de la table de compression a un retrait important (par exemple, une haute relation eau/ciment dans la dalle de compression, une intense insolation ou chaleur, etc.). Ces résultats sont cohérents avec des résultats obtenus et les conclusions atteintes par d'autres auteurs [4, 5, 6].

Le Model Code [7] de la Fédération Internationale du Béton (fib) mentionne également que, dans la conception de certaines structures, le retrait différentiel doit possiblement être considéré pour garantir la résistance au cisaillement des surfaces de reprise. Compte tenu des résultats, des essais ont été réalisés avec une variété de finitions de la surface supérieure des dalles alvéolées : modérément lisse (comme produit par la machine de préfabrication), brossée, en effectuant

des ouvertures profondes mais isolées sur la dalle et, enfin en réalisant des rainures de différentes profondeurs sur la surface de la dalle. Une seule solution a réussi à résister aux effets du retrait différentiel et donner une résistance fiable et prédictible : une solution dans laquelle les rainures profondes (20 mm) sont placées sur la surface supérieure de la dalle transversalement à la direction de production de la dalle. Cette solution a donné une connexion fiable de la dalle avec la table de compression. Cette fiabilité a été démontrée par le fait que la rupture de la jonction se produisait quand le béton de la dalle défailait ou quand le béton de la table de compression défailait sous la contrainte de cisaillement. C'est un mode de défaillance prédictible, qui dépend d'un nombre réduit de variables : géométrie et résistance du béton. Avec les autres jonctions testées, le béton de la table de compression se détachait simplement du béton de la dalle de compression. C'est une défaillance à la surface de reprise, qui est bien moins fiable, parce qu'elle est beaucoup plus difficile à prédire puisqu'elle dépend d'un nombre beaucoup plus

important de facteurs (ex., la présence d'humidité, d'eau ou de poussière sur le joint, le retrait différentiel, la vitesse de durcissement, etc.). Les résultats de ces essais sont en train d'être rédigés afin d'être publiés dans des journaux scientifiques.

### La réaction des entreprises de préfabrication

Ces derniers mois, Elastic Potential a présenté cette technologie individuellement à 20 entreprises de préfabrication en Europe (Espagne, Italie, France, Belgique) et aux États Unis. La grande majorité des entreprises de préfabrication ont montré un véritable intérêt pour cette technologie, ayant compris qu'elle semblait très simple à utiliser et qu'elle peut conduire à augmenter leur productivité de manières significatives. Parmi ces entreprises, 2 sur 3 ont décidé de vérifier en détail si les réductions de coûts de production mentionnées ci-dessus sont réalistes pour leur cas particulier. Pour ce faire, elles ont choisi des projets qu'elles ont conçus et construits récemment, et ont demandé à Elastic Potential de les concevoir de nouveau avec les Dalles Alvéolées Rainurées afin d'évaluer la différence. Tous les projets qui ont été reconçus ont confirmé les réductions de coûts mentionnés plus haut. Par exemple, pour des projets réels étudiés en Europe, en considérant le prix 'une dalle estimée entre 25 et 40 €/m<sup>2</sup>, les réductions de coûts obtenus se situent entre 3 €/m<sup>2</sup> (pour des portées et des charges faibles) et 10 €/m<sup>2</sup> (pour des portées longues et des charges intenses). La charge et la portée ont une influence significative sur le résultat : plus la charge et la portée sont élevées, plus les réductions de coûts de production possibles le sont également. Finalement, 90% des entreprises qui ont étudié certains de leurs projets en détail ont demandé des devis de machines pour évaluer s'ils feront l'investissement. En ce qui concerne le prix des machines, les études d'amortissement réalisées ont toutes confirmé une durée d'amortissement inférieure à 1 année.

### Disponibilité des machines de fabrication

Elastic Potential a compris l'intérêt d'avoir des machines capables de produire ces dalles et en a fait sa priorité. Ainsi, actuellement, Elastic Potential travaille avec les principaux fournisseurs mondiaux de machines, qui ont compris également que les Dalles Alvéolées Rainurées peuvent être une option intéressante pour leurs clients. Le fournisseur de machines Prensoland propose aujourd'hui des machines nouvelles destinées à la fabrication des Dalles Alvéolées Rainurées ou des modifications sur leurs machines existantes pour permettre la production de Dalles Alvéolées Rainurées d'après les spécifications de Elastic Potential.

Echo Precast Engineering et UltraSpan (de Progress Group) réalisent des prototypes et études de conception de nouvelles machines qui devraient être disponibles dans les premiers mois de 2020.

Elematic possède déjà une machine capable de réaliser des rainures sur des dalles alvéolées, et travaille actuellement sur la modification de celle-ci pour produire des Dalles Alvéolées Rainurées (livraison prévue début de 2020). D'un autre côté, Elematic considèrera le développement d'une machine qui extrude les dalles avec les rainures (tout d'une seule fois) si

un client le leur demande. Nordimpianti propose une machine capable de faire des rainures sur des dalles alvéolées fabriquées avec une extrudeuse, par une slipformer ou par une flowformer. Nordimpianti prévoit de faire les modifications nécessaires sur leurs machines dès qu'ils recevront une commande Dalles Alvéolées Rainurées..

Spancrete, évalue actuellement l'intérêt que les Dalles Alvéolées Rainurées peuvent susciter chez leurs clients, et proposent des modifications à leurs machines

Elastic Potential demande, à chaque fournisseur de machines prêt à produire des Dalles Alvéolées Rainurées, de passer un procès de validation de leur machine. Ce procès est une série d'essais réalisés en laboratoire sur les dalles produites par leur machine. Ces essais attestent que les dalles produites possèdent les qualités nécessaires pour être acceptées comme des Dalles Alvéolées Rainurées.

### Quel est le processus pour commencer à utiliser des Dalles Alvéolées Rainurées

En premier lieu, une entreprise de préfabrication devra vérifier si les économies revendiquées ci-dessus s'appliquent à son cas. Pour vérifier cela, il suffit de contacter Elastic Potential, de choisir 2 ou 3 projets et de les étudier. Elastic Potential développera une nouvelle conception de ces projets (gratuitement) afin que l'entreprise de préfabrication évalue les réductions de coûts dans la production et le transport, et bien évidemment le potentiel de marge additionnelle. D'un autre côté, pour réaliser l'étude d'amortissement, le préfabricant devra demander à son fournisseur de machines un devis.

Une fois qu'une entreprise de préfabrication a décidé de commencer à utiliser les Dalles Alvéolées Rainurées, elle a besoin de trois éléments :

- Apprendre à concevoir (calculer) et construire avec ces nouvelles dalles (en suivant un manuel donné par Elastic Potential) ;
- obtenir un accord avec Elastic Potential pour utiliser la technologie (qui inclut le brevet [8]) ;
- acheter une machine validée à son fournisseur de préférence.

### Références

- Precast/Prestressed Concrete Institute: PCI Manual for the Design of Hollow Core Slabs and Walls (MNL-126-15E), Third Edition, 2015, Edited by S. K. Ghosh, ISBN 978-0-9968021-0-9.
- European Committee for Standardization (CEN): Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings, Brussels, 2004.
- ACI Committee 318: Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-14) and Commentary, 2014, Farmington Hills: American Concrete Institute.
- Beushausen, Hans-Dieter: Long-term performance of bonded concrete overlays subjected to differential shrinkage, PhD Thesis, 2006.
- Beuhausen, H.; Alexander, M.G.: Localized strain and stress in bonded concrete overlays subjected to differential shrinkage, Materials and Structures, March 2007, Volume 40, Issue 2; pp. 189-199.
- Santos, Pedro M. D.; Júlio, Eduardo N. B. S.: Interface Shear Transfer on Composite Members, ACI Structural Journal, January-February, 2014; 113-121.
- Fédération internationale du béton (fib): Model Code 2010, final draft. fib Bulletin Nos. 65/66, Lausanne, 2012.
- Sanabra, Marc: Prefabricated floor element, structure comprising prefabricated floor elements and installation for obtaining the prefabricated floor element, EP 3486392, Filed: 12.03.2018, Published: 22.05.2019.