

---

# Utilisation du modèle d'empilement compressible pour la formulation des blocs de béton : détermination de l'indice de serrage et de l'effet de paroi sur un mélange granulaire

Laure Le Brun<sup>1,2</sup>, Eric Garcia Diaz<sup>1</sup>, Patrick Rougeau<sup>2</sup>, Sylvain Dehaut<sup>2</sup>, Kais Mehiri<sup>2</sup>

<sup>1</sup> C2MA, Écoles des Mines d'Alès, rue Jules Renard 30100 Alès, [eric.garcia-diaz@mines-ales.fr](mailto:eric.garcia-diaz@mines-ales.fr)

<sup>2</sup> Centre d'Études et de Recherches de l'Industrie du Béton, rue des longs réages 28230 Épernon, [l.lebrun@cerib.com](mailto:l.lebrun@cerib.com), [p.rougeau@cerib.com](mailto:p.rougeau@cerib.com), [s.dehaut@cerib.com](mailto:s.dehaut@cerib.com), [k.mehiri@cerib.com](mailto:k.mehiri@cerib.com)

---

## RÉSUMÉ.

Le modèle d'empilement compressible est utilisé pour l'optimisation du mélange granulaire et par conséquent la formulation des bétons. Dans le cas des blocs de maçonnerie, réalisés en usine de préfabrication, son application nécessite un calibrage spécifique. Il s'agit de déterminer l'indice de serrage caractérisant l'énergie d'une presse à bloc en fonction des paramètres de vibration. Il est aussi nécessaire d'évaluer la perte de compacité engendrée par l'effet de paroi. Des mesures de compacité à l'aide d'une presse vibrante sur des matériaux modèles ont été réalisées afin de répondre à ces objectifs. Ces travaux ont permis de déterminer des relations pour calculer l'indice de serrage de la mise en place en fonction de la fréquence de vibration et la perte de compacité selon la taille des grains du mélange. Les valeurs théoriques obtenues à partir du modèle d'empilement compressible, adapté aux blocs, ont été comparées à des mesures expérimentales ; l'erreur moyenne constatée est de 0,67 %.

## ABSTRACT.

The compressing packing model is used for optimisation of granular mix and so concrete formulation. In case of blocs, made in precast industry, its application requires a calibration. Especially, it is necessary to determine the compaction index representative of the bloc-making process according to vibration parameters. Moreover, the loss in packing density due to wall effect must be evaluated. Packing density tests were realized using bloc-making process and model materials in order to do this calibration. The results make it possible to calculate compaction index according to vibration frequency and wall effect depending on particles size. Theoretical values calculated using this adaptation of compressing packing model were compared to experimental measures, with an average error around 0.67%.

**MOTS-CLÉS :** modèle d'empilement granulaire, compacité, indice de serrage, effet de paroi, empilement granulaire, bloc

**KEY WORDS:** compressive packing model, packing density, compaction index, wall effect, granular packing, bloc

---

## 1. Introduction

Le modèle d'empilement compressible est un outil permettant l'optimisation des formulations de béton. En effet, il permet de diminuer le volume de pâte en optimisant la compacité du mélange granulaire.



Figure 1 : Blocs

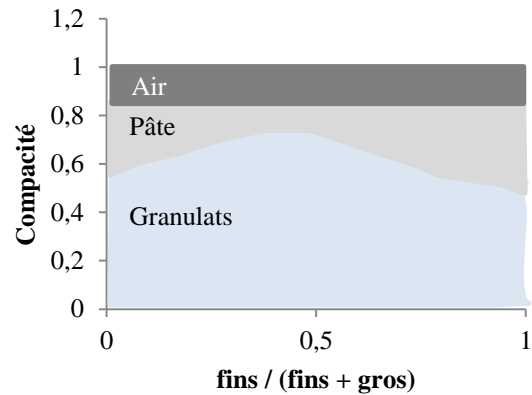


Figure 2 : Principe d'optimisation pour les blocs

La figure 1 illustre différentes géométries de blocs. L'ensemble de ces produits à démoulage immédiat est caractérisé par un volume d'air dans le béton plus important en comparaison avec des bétons à démoulage différé. Le modèle d'empilement compressible peut potentiellement s'extrapoler à ces matériaux comme indiqué sur la figure 2. L'objectif est alors de remplacer la pâte du béton par des granulats à volume d'air constant.

Toutefois, le modèle d'empilement compressible n'est pas destiné à l'origine à ces matériaux et leur mode de production très spécifique (apport d'énergie très élevé pour la mise en place, effet de paroi plus important du fait des alvéoles des blocs).

Les travaux menés visent à étendre le domaine d'utilisation du modèle d'empilement compressible au cas des blocs, en déterminant l'indice de serrage en fonction des paramètres de vibration et la perte de compacité par effet de paroi.

## 2. Prédire la compacité d'un mélange granulaire

### 1.1. Modèle d'empilement compressible [DEL 99]

#### 1.1.1. Compacité virtuelle

La compacité virtuelle est une caractéristique non physique représentant une mise en place dans un milieu infini avec une énergie infinie. Elle est déterminée par calcul à l'aide du modèle d'empilement compressible, prenant en compte les capacités d'arrangement des granulats utilisés et les interactions entre ceux-ci (effet de paroi et de desserrement).

Pour les mélanges granulaires présentant une grande diversité de tailles de grains, il est possible de réaliser les calculs à l'aide du logiciel René LCPC, développé par De Larrard et Sedran. [DEL 00]

#### 1.1.2. Compacité réelle

La compacité réelle représente la proportion de « plein » dans le mélange granulaire mis en place dans un milieu infini avec une énergie non infinie. Celle-ci est notamment prise en compte à l'aide du coefficient d'indice de serrage,  $k$ .

Les travaux menés ont pour objectif de déterminer l'indice de serrage caractérisant une mise en place par presse vibrante. En particulier, l'influence des paramètres de vibration est étudiée.

### 1.2. Effet de paroi [BEN 70]

Les mélanges granulaires constituant les bétons ne sont pas mis en place en milieu infini et les parois des moules perturbent l'arrangement granulaire. L'effet de paroi développé dépend de la complexité de la géométrie du moule (rapport surface de paroi et volume total) et de la taille des grains. Ben Aim (1970) a ainsi défini un volume perturbé dans le mélange, défini comme l'ensemble des grains se situant à  $d/2$  de la paroi ( $d$  étant le diamètre des grains).

Il est alors possible de déterminer la compacité globale du mélange sec en utilisant un coefficient d'effet de paroi, dont la valeur dépend de la forme des grains. D'après les résultats de De Larrard [DEL 99], l'équation de Ben Aim permet d'obtenir des résultats théoriques fidèles à l'expérience pour des volumes perturbés inférieurs à 40 %. Or, dans le cas des blocs, l'utilisation de grains dont le diamètre est supérieur à 6 mm entraîne un volume perturbé supérieur à 40 %. Les travaux menés ont ainsi cherchés à prendre en compte fidèlement l'effet de paroi produit par un moule de bloc.

### 3. Programme expérimental

#### 3.1. Matériaux utilisés

Les caractéristiques des matériaux utilisés durant les travaux sont présentées dans le tableau 1. La compacité virtuelle des granulats est obtenue à partir du modèle d'empilement compressible et d'essais selon la procédure du LCPC [LPC 04].

Des billes de verre sont utilisées en tant que matériaux modèles dans la calibration du modèle d'empilement compressible, tandis que les granulats sont utilisés pour mesurer la précision du modèle numérique obtenu.

**Tableau 1 :** Caractéristiques des matériaux utilisés

Matériau	Forme	Nature	$d_{\max}$ (mm)	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	Compacité virtuelle
Bille 0,5 mm	Sphère	Verre	0,5	2 500	$\frac{\pi}{3\sqrt{2}}$ (compacité d'un arrangement cubique faces centrées)
Bille 2 mm			2	2 490	
Bille 4 mm			4	2 520	
Bille 6 mm			6	2 570	
Bille 8 mm			8	2 570	
Sable 1	Roulé	Siliceux	4	2 620	81,9 %
Gravillon 1			8	2 613	76,6 %
Sable 2	Concassé	Calcaire	4	2 758	82,7 %
Gravillon 2			10	2 420	60,7 %

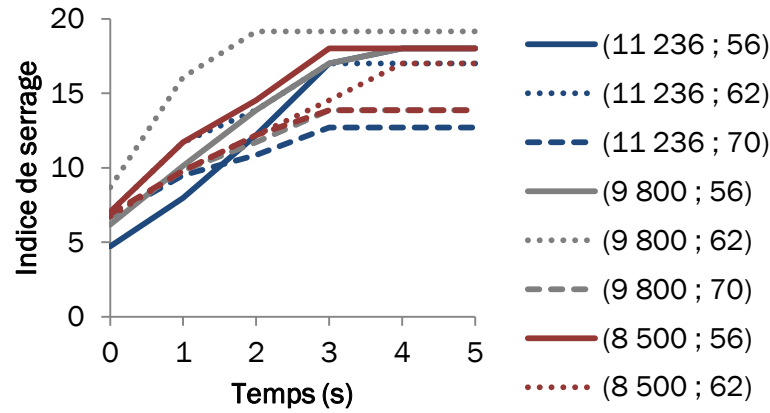
#### 3.2. Essais réalisés

Différentes mesures de compacité ont été réalisées afin de déterminer l'indice de serrage en fonction des paramètres de vibration et la perte de compacité due à l'effet de paroi. Afin de limiter les perturbations des parois du moule lors de la détermination de l'indice de serrage, les essais sont réalisés sur moule de pavé avec des billes de 2 mm (6 % de volume perturbé). Dans un second temps, l'influence des parois du bloc est déterminée à partir de mesures dans le moule de bloc pour différents diamètres de grains (volume perturbé variant entre 3 et 50 %). Pour finir, la précision du modèle numérique développé est évaluée à l'aide du moule de bloc et de granulats secs.

Pour l'ensemble des essais, le protocole consiste à verser manuellement l'échantillon (de billes ou de granulats) dans le moule jusqu'au remplissage de celui-ci et à mesurer sa hauteur après vibration. Afin de mesurer l'influence des paramètres de vibration sur l'énergie, neuf couples force/fréquence ont été étudiés et les mesures ont été effectuées toutes les secondes durant 5 secondes. Pour l'évaluation de l'effet de paroi et de la précision du modèle, un couple (fréquence/force) moyen (fréquence de 55,86 Hz / force de 11 236 daN) est utilisé et les mesures sont effectuées après 6 s de vibration.

### 4. Détermination de l'indice de serrage

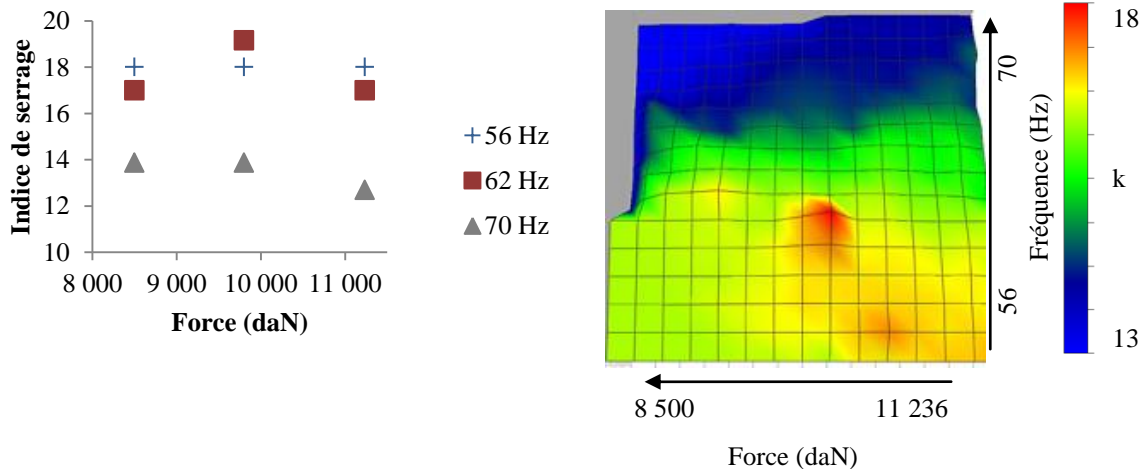
Les essais menés mettent en évidence l'influence des paramètres de vibration sur l'indice de serrage. En effet, la figure 3 présente les résultats obtenus. Il est possible de constater un temps critique de vibration, autour de 3 s, à partir duquel le coefficient d'énergie de mise en place est constant.



**Figure 3 :** Variation de l'indice de serrage en fonction des paramètres de vibration (force en daN / fréquence en Hz)

Par ailleurs, dans le cas d'un mélange sec (sans pate) et dans les gammes de vibration étudiées et usuelles d'utilisation de la machine, aucune tendance définitive ne peut être obtenue. La figure 4 met en évidence ce phénomène. Deux hypothèses peuvent être établies :

- Dans cette gamme de vibration, la force n'a pas d'influence sensible sur l'indice de serrage, tandis qu'une augmentation de la fréquence entraîne une diminution de l'énergie ;
- Il existe des couples de vibration en mode propre pour lesquels l'indice de serrage ne suit plus cette tendance mais augmente fortement.



**Figure 4 :** Influence des paramètres de vibration sur l'indice de serrage

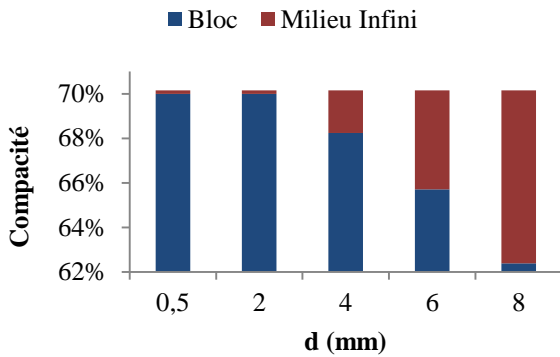
Les résultats mettent en avant un indice de serrage élevé pour la presse, quels que soient les paramètres de vibration. D'après l'équation déterminée par De Larrard [DEL 99], dans cette gamme, l'influence de l'augmentation de l'indice de serrage sur la compacité est faible. Ainsi, l'augmentation de la compacité en passant d'indices 15 à 20 est inférieure à 1 %.

### 5. Prise en compte de l'effet de paroi

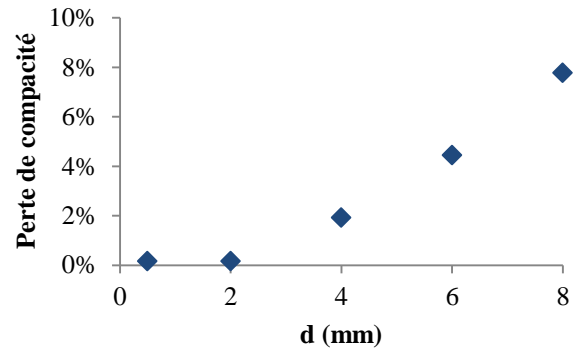
Les résultats précédents permettent d'utiliser le modèle d'empilement compressible pour déterminer la compacité réelle en milieu infini lors d'une mise en place par presse vibrante. Les figures 5 et 6 mettent en évidence la perte de compacité dans un bloc en fonction de la dimension des grains. Il est possible de constater que l'utilisation de granulats, dont le diamètre  $d$  est inférieur à 2 mm, n'entraîne pas de diminution de la compacité. Puis, la relation est linéaire avec la dimension des grains, tel qu'indiqué dans l'équation [1].

$$\text{Compacité réelle} = \text{Compacité virtuelle} - (a * d) + 0,4 \quad [1]$$

Pour les billes,  $a$  vaut 0,146 et l'équation [2] présente une erreur moyenne de 0,2 %.



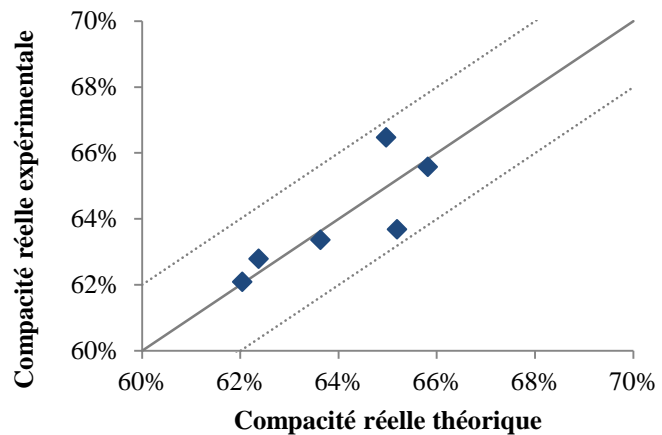
**Figure 5 :** Différences de compacité entre milieu infini et bloc en fonction du diamètre des grains



**Figure 6 :** Perte de compacité par effet de paroi en fonction du diamètre des grains

### 6. Précision du modèle d'empilement compressible adapté aux blocs

Les résultats des travaux permettent de calculer la compacité théorique d'un mélange granulaire sec mis en place à l'aide d'une presse vibrante dans un moule de bloc. Les essais réalisés pour vérifier la fidélité du modèle avec l'expérience ont montré une erreur moyenne de 0,67 % (figure 7). Par ailleurs, ils ont permis de définir le coefficient d'effet de paroi,  $\alpha$ , en fonction de la nature des grains : 0,032 pour des concassés et 0,035 pour des roulés.



**Figure 7 :** Fidélité du modèle d'empilement compressible adapté aux blocs

### 7. Conclusion

À partir des résultats des travaux menés et de la calibration du modèle compressible réalisée, il semble possible de prédire la compacité des mélanges granulaires secs mis en place à l'aide d'une presse à bloc. Dans l'optique d'une optimisation de la formulation des bétons de bloc, son utilisation doit être complétée par des relations permettant de déterminer la quantité et la composition de la pâte.

Les travaux réalisés peuvent également être utilisés afin d'étendre le domaine d'application du modèle d'empilement compressible à d'autres produits à démoulage immédiat.

### 8. Bibliographie

- [BEN 70] BEN AIM R., Étude de la texture des empilements de grains. Application à la détermination de la perméabilité des mélanges binaires en régime moléculaire intermédiaire et laminaire, Thèse de doctorat, Université de Nancy, 1970.
- [DEL 99] DE LARRARD F., *Structures granulaires et formulation des bétons*, Études et recherches des laboratoires des Ponts et Chaussées, 1999.
- [DEL 00] DE LARRARD F., SEDRAN T., Manuel d'utilisation du logiciel René LCPC, 2000.
- [LPC 04] LABORATOIRE CENTRAL DES PONTS ET CHAUSSÉES, Méthode d'essai des lpc n°61, Essai de compacité des fractions granulaires à la table à secousses, 2004.