

---

# Méthode analytique et simulation numérique pour prédire la pression de béton exercée sur coffrage pendant son processus d'injection par le bas

Mustapha NOURI<sup>1,2</sup>, Mahfoud TAHLAÏTI<sup>1,2</sup>, Mustapha BENAOUICHA<sup>3</sup>,  
Abdelhaq ABDELQATIL<sup>1</sup>, Frédéric GRONDIN<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institut Catholique d'Arts et Métiers, Carquefou, France, mustapha.nouri@icam.fr.

<sup>2</sup> Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique (GeM), UMR 6183, Centrale de Nantes - Université de Nantes - CNRS, NANTES cedex 3, France.

<sup>3</sup> Segula Engineering, Querqueville, France.

---

**RÉSUMÉ.** Le dimensionnement de coffrage est gouverné par la pression latérale exercée par le béton frais. Dans le cas d'injection d'un béton fluide comme le BAP (béton auto-plaçant) par le bas de coffrage, la pression maximale exercée est nettement supérieure à celle appliquée lors d'un coulage conventionnel (par le haut). Cette pression est principalement liée au béton (ses paramètres rhéologiques et sa densité), à la vitesse de coulée et à la longueur de cheminement du béton. Afin de prédire cette pression un modèle analytique a été développé dans le présent travail. Les résultats de ce modèle ont été comparés avec un autre modèle analytique issu de la littérature. De plus, l'évaluation de la surface libre (BAP/air) a été étudiée, cela grâce à des simulations numériques à l'aide du logiciel de mécanique des fluides numérique (CFD) Star CCM+. La méthode analytique développée dans ce travail a présentée des résultats satisfaisants, très proches à ceux des simulations numériques.

**ABSTRACT.** The formwork dimensioning is governed by the lateral pressure exerted by the fresh concrete. In the case of a fluid concrete, such as SCC (self-compacting concrete), injected from bottom, the maximum pressure exerted is higher than that applied during conventional casting. This pressure is mainly related to the concrete (its rheological parameters and its density), to the casting rate and to the routing length of the concrete. In order to predict this pressure, an analytical model has been developed in this work. The results of this model have been compared with another analytical model from the literature. In addition, the free surface evaluation (BAP / air) was studied, this thanks to numerical simulations using the Computational Fluid Dynamics (CFD) software Star CCM+. The analytical method developed in this work has shown satisfactory results, very close to those of numerical simulations.

**MOTS-CLÉS :** Injection, BAP, Rhéologie, CFD, Coffrage.

**KEY WORDS:** Injection, SCC, rheology, CFD, formwork.

---

### Résumé étendu

Dans le cas d'un béton auto-plaçant (BAP) injecté par le bas de coffrage, La pression latérale exercée sur ce dernier est nettement plus importante que celle dans le cas d'un coulage traditionnel: en plus de la pression hydrostatique exercée par le béton frais, il faut aussi tenir compte des pertes de charges linéaires dues au contact fluide/paroi. Il a été également constaté que l'influence positive de la thixotropie (floculation des grains de ciment) n'intervient pas dans ce type de coulage, contrairement aux techniques traditionnelles, précisément sur la partie supérieure à la pipe d'injection [TIC 14] [TIC 15]. Pour éviter l'effondrement du coffrage pendant le coulage du BAP, cette pression devrait être prédite.

Contrairement au calcul analytique, Le calcul numérique est très couteux en terme de temps, et nécessite des moyens et des connaissances spécifiques sur la modélisation numérique. Il existe Peu de travaux dans la littérature qui s'intéresse au développement des modèles analytiques pour prédire la pression latérale maximale exercée sur le coffrage. Tichko et all [TIC 15] avaient proposé un modèle analytique pour prédire cette pression, cela en se basant sur la loi de Bernoulli généralisée, la loi de Darcy-Weisbach et le modèle rhéologique de Herschel-Bulkley, tout en supposant que l'écoulement est laminaire et le fluide est viscoplastique. En outre, ce modèle prend en compte, à la fois, du diamètre hydraulique, pour représenter la section du coffrage, ainsi que du débit d'injection, pour prédire la vitesse moyenne du coulage qui est un élément essentiel pour calculer la pression due aux pertes de charges linéaires. Cependant, en se basant sur ces derniers paramètres, le diamètre hydraulique et le débit, on est en train de supposer, de manière indirect, que la vitesse moyenne d'écoulement dans des coffrages qui ayant des sections différentes mais des diamètres hydrauliques égaux est la même, à titre d'exemple, un coffrage avec une section carré ( $X \times X$ ) et un autre coffrage avec une section circulaire ( $D=X$ ) ont le même diamètre hydraulique ( $D_{eq}=X$ ), voir équation (3), cela fait que leur vitesse moyenne calculée à partir de ces paramètres, le débit et le diamètre hydraulique, est la même, et donc la pression due aux pertes de charges linéaires est la même.

Le présent travail propose un modèle analytique qui s'appuie sur les mêmes hypothèses que celles du modèle de Tichko et all [TIC 15], néanmoins, la vitesse du fluide a été représentée en s'appuyant sur un profil de vitesse d'un fluide viscoplastique. Ce profil de vitesse a été décrit par Esmael [ESM 08] pour une conduite cylindrique avec un écoulement laminaire, stationnaire et unidirectionnel. La pression maximale en bas du coffrage pourrait être exprimée par la relation suivante:

$$\frac{P_{max}}{\rho g h} = \frac{1}{2} \left( \frac{V_m}{V_{lim}} \right)^2 + \frac{1}{2} \left( \frac{V_m}{V_{lim}} \right) + \frac{1}{2} \left( \frac{V_m}{V_{lim}} \right)^n \left( \frac{L}{D_{eq}} \right)^m \left( \frac{1}{D_{eq}} \right)^n \left( \frac{1}{V_m} \right)^n \left( \frac{1}{\rho g h} \right)^n \quad [1]$$

Où : [ 2 ]

$$\frac{V_m}{V_{lim}} = \frac{V_m}{V_{lim}} \quad [3]$$

la masse volumique du BAP ( $\text{kg/m}^3$ ), l'accélération de la pesanteur ( $\text{m.s}^{-2}$ ),  $R_{eq}$ : le rayon équivalent du coffrage (m),  $S$ : la surface transversale du coffrage ( $\text{m}^2$ ),  $P$ : le périmètre du coffrage (m), le coefficient de consistance ( $\text{Pa.s}^n$ ),  $n_{HB}$ : l'indice de fluidité (-) et : le seuil de cisaillement (Pa),  $L$ : la distance entre la conduite d'injection et la surface de contact air/ béton dans le coffrage (surface libre) (m),  $h$ : la hauteur de coffrage (m), la hauteur de conduite d'injection de béton (m) et : vitesse moyenne du béton pendant le coulage (m/s).

La simulation numérique du processus de coulage a été établie à l'aide de logiciel de volume fini Star CCM+. Le modèle physique eulérien multi-phase a été utilisé en supposant le fluide incompressible et l'écoulement laminaire. Afin de capter l'évolution de l'interface entre le BAP et l'air pendant le processus de coulage, la méthode Volume of Fluid (VOF) a été utilisée. Le BAP a été défini en utilisant le modèle rhéologique de Herschel-Bulkley. La vitesse moyenne du BAP entrant et la pression atmosphérique ont été imposées, respectivement, à l'entrée et à la sortie du fluide. Au niveau des parois du coffrage, la condition de non-glissement a été supposée.

Neuf cas d'études (voir tableau 1), neufs éléments verticaux, ont été sélectionnés afin d'examiner l'influence de chaque paramètre (la géométrie et la hauteur du coffrage, les paramètres rhéologiques et le débit) sur le modèle analytique développé. De plus, un cas de coulage d'une piscine par le bas a été également étudié (voir tableau 1). Pour ce dernier cas le BAP a été introduit par 4 entrées d'un diamètre de 10 cm avec une épaisseur des parois de 20 cm. Les paramètres rhéologiques du béton ont été tirés à partir de la littérature [TIC 15].

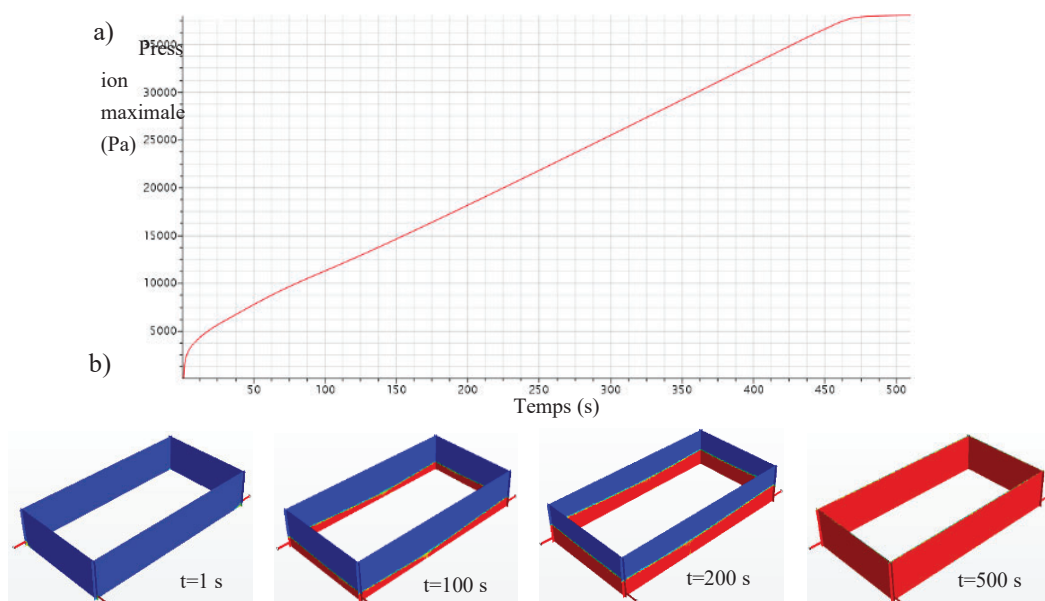
Tableau 1. Cas d'études sélectionnés pour comparer les méthodes analytiques avec la simulation numérique.

Cas	(Kg/m <sup>3</sup> )	(Pa)	K <sub>HB</sub> (Pa.s <sup>n</sup> )	n <sub>HB</sub> (-)	Q <sub>HB</sub> (m <sup>3</sup> /s)	h (m)	Largeur (m)	Longueur (m)	h <sub>inlet</sub> (m)	
Eléments verticaux	1	2273	76.73	11.45	1.6	0.002	2	0.2	0.2	0.10
	2	2273	76.73	11.45	1.6	0.002	2	0.2 (Rayon)		0.10
	3	2273	76.73	11.45	1.6	0.002	2	0.2	1	0.10
	4	2273	76.73	11.45	1.6	0.002	1	0.2	0.2	0.10
	5	2273	76.73	11.45	1.6	0.002	3	0.2	0.2	0.10
	6	2273	123.75	6.29	1.8	0.002	2	0.2	0.2	0.10
	7	2273	207.7	33.63	1.16	0.002	2	0.2	0.2	0.10
	8	2273	76.73	11.45	1.6	0.004	2	0.2	0.2	0.10
	9	2273	76.73	11.45	1.6	0.006	2	0.2	0.2	0.10
Piscine	2273	76.73	11.45	1.6	-	1.6	4	8	0.20	

Une comparaison entre les résultats des modèles analytiques, modèle développé dans ce travail et celui de Tichko [TIC 15], a été faite, cela en se référant aux résultats des simulations numériques CFD (voir l'équation 4).

[ 4 ]

La figures 1-a représente la courbe d'évolution de la pression maximale, en pied du coffrage, en fonction du temps de coulage pour le cas de la piscine. La Figures 1-b montre l'évolution de l'interface BAP-air au cours du processus de coulage.



**Figure 1.** a) courbe d'évolution de la pression maximale, en pied du coffrage, en fonction du temps de coulage pour le cas de la piscine. b) représentation de l'évolution de l'interface BAP-air au cours du processus de coulage.

La figure 2 montre les valeurs de la différence entre les résultats des modèles analytiques et ceux des simulations numériques (e). La méthode analytique développée dans ce travail a présenté des résultats satisfaisants, très proches à ceux des simulations numériques, dont une valeur maximale de « e » de 2.7% a été trouvée sur l'ensemble des cas étudiés.

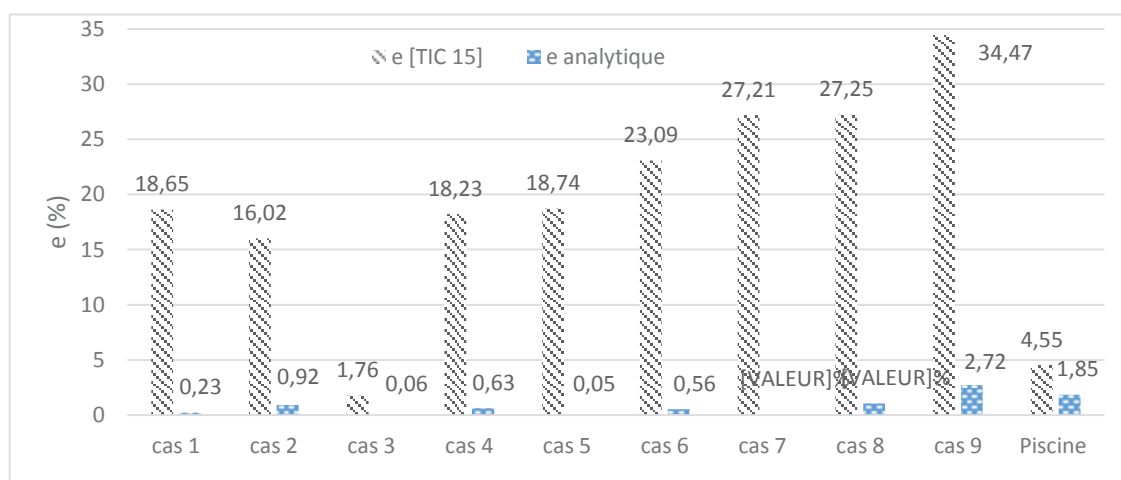


Figure 2. Valeurs de « e » pour les différentes cas d'étude.

Dans ce processus de coulage, il a été avéré que la pression maximale exercée par le béton est plus importante que la pression hydrostatique, dont la valeur des pertes de charges est importante. Cette dernière dépend principalement de la viscosité du béton, la vitesse de coulée et la longueur de cheminement du béton. De plus, il a été observé que la variation de la pression est linéaire en fonction de la hauteur.

La méthode VOF a été révélée efficace pour capturer l'évolution de l'interface BAP-air (surface libre) en fonction du temps pendant le processus de coulage. En utilisant cette méthode, il est possible, grâce à la simulation, d'optimiser le processus de remplissage du coffrage pendant la phase de conception. Le nombre d'entrées et leurs positionnements sur le coffrage peuvent être déterminés afin d'éviter la création de poches d'air indésirables pendant ce processus.

## 1. Bibliographie

- [ESM 08] ESMAEL A., Transition vers la turbulence pour un fluide à seuil en écoulement dans une conduite cylindrique. Thèse de doctorat. Mécanique. Université Henri Poincaré – Nancy1, 2008.
- [TIC 14] Tichko, S., De Maele, J., Vanmassenhove, N., De Schutter, G., Vierendeels, V., Verhoeven, R., Troch, P., « Numerical simulation of formwork pressure while pumping self-compacting concrete bottom-up ». *Engineering Structures*. n°70, 2014, 218–233.
- [TIC 15] Tichko S., De Schutter G., Troch P., Vierendeels J., Verhoeven R., Lesage K., Cauberg N., « Influence of the viscosity of self-compacting concrete and the presence of rebars on the formwork pressure while filling bottom-up » *Engineering Structures* 101, 2015, 698–714.