

Impression 3D de matériaux cimentaires : optimisation topologique de structure

Berland Yanis
N°23588

2022 - 2023



Sommaire

- 1 Présentation du sujet
- 2 Problématique
- 3 Objectifs du TIPE
- 4 Expériences et Modélisations
 - Méthode destructive
 - Méthode non-destructive
- 5 Conclusion
- 6 Bibliographie

Présentation du sujet

Enjeux sociétaux

- Une croissance urbaine et démographique entraînant un besoin d'infrastructures.



Production :
14 milliards de m³



8 % des émissions
mondiales de CO₂



1/10 de l'eau utilisée dans
l'industrie mondiale

Présentation du sujet

Optimisation topologique :

- Meilleure gestion des ressources en utilisant la matière là où elle est mécaniquement nécessaire
- Liberté structurale novatrice
- Décarbonisation progressive de nos sociétés

Présentation du sujet

Optimisation topologique :

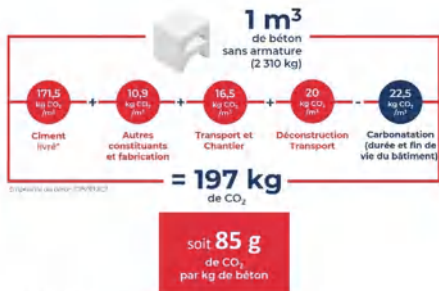
- Meilleure gestion des ressources en utilisant la matière là où elle est mécaniquement nécessaire
- Liberté structurale novatrice
- Décarbonisation progressive de nos sociétés



Présentation du sujet

Optimisation topologique :

- Meilleure gestion des ressources en utilisant la matière là où elle est mécaniquement nécessaire
- Liberté structurale novatrice
- Décarbonation progressive de nos sociétés



Source : SFIC - CIMBéton



Problématique



"En quoi l'optimisation topologique de la structure interne des murs d'un bâtiment fabriqué par impression cimentaire permet-elle de limiter la consommation de ressources tout en conservant des propriétés mécaniques équivalentes à des modes de construction traditionnels ?"

Objectifs du TIPE

- ① Optimisation topologique de la structure interne des murs.
- ② Forme optimale alliant propriétés mécaniques et coût.
- ③ Propriétés mécaniques du béton imprimé.



Objectifs du TIPE

- ① Optimisation topologique de la structure interne des murs.
- ② Forme optimale alliant propriétés mécaniques et coût.
- ③ Propriétés mécaniques du béton imprimé.



Objectifs du TIPE

- ① Optimisation topologique de la structure interne des murs.
- ② Forme optimale alliant propriétés mécaniques et coût.
- ③ Propriétés mécaniques du béton imprimé.



Matériau

Difficulté propre au matériau :

- Prise rapide et contrôlée.



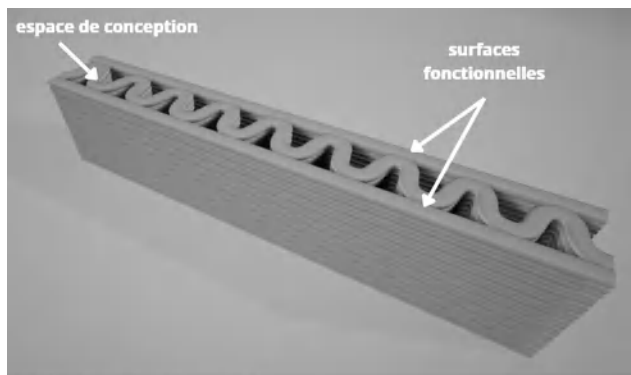
Mélange : eau, ciment prompt et sable fin.

Objet d'étude

Points-clés pour optimiser topologiquement des pièces :

Objet d'étude

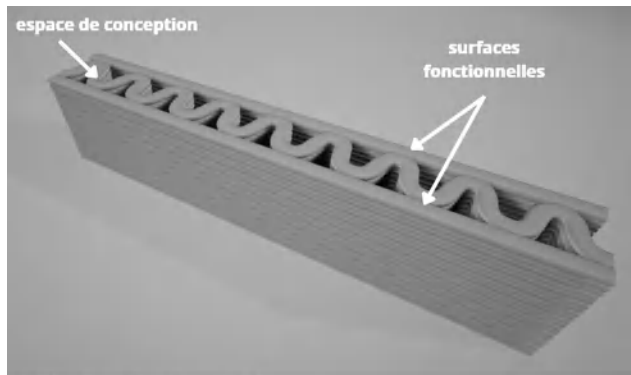
Points-clés pour optimiser topologiquement des pièces :



Modélisation réalisé sur Cura

Objet d'étude

Points-clés pour optimiser topologiquement des pièces :



Modélisation réalisé sur Cura



Éprouvettes cubiques de 10 cm de côté.

4 formes retenues :

- Pleine
- Sinusoïdale
- Triangulaire
- Alvéolaire



Éprouvettes cubiques de 10 cm de côté.

4 formes retenues :

- Pleine
- Sinusoïdale
- Triangulaire
- Alvéolaire



Éprouvettes cubiques de 10 cm de côté.

4 formes retenues :

- Pleine
- Sinusoïdale
- Triangulaire
- Alvéolaire



Éprouvettes cubiques de 10 cm de côté.

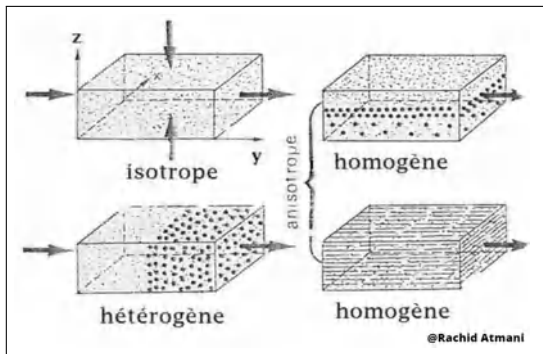
4 formes retenues :

- Pleine
- Sinusoïdale
- Triangulaire
- Alvéolaire



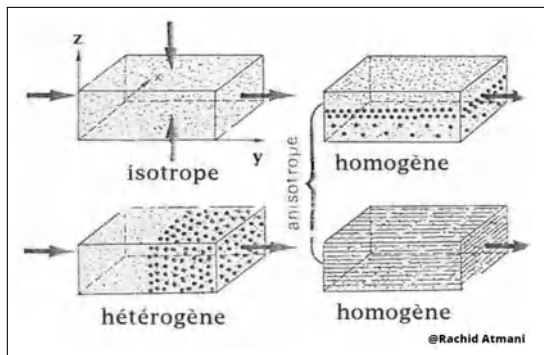
Hypothèses de la résistance des matériaux

- Homogénéité, isotropie et continuité du matériau
- Élasticité et linéarité du matériau



Hypothèses de la résistance des matériaux

- Homogénéité, isotropie et continuité du matériau
- Élasticité et linéarité du matériau

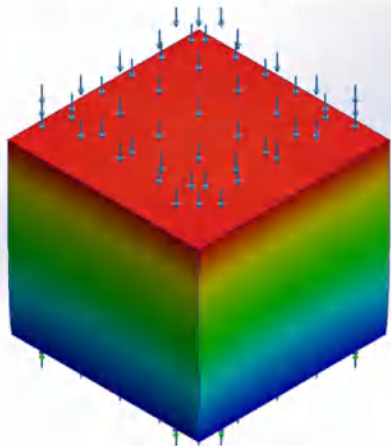


Sommaire

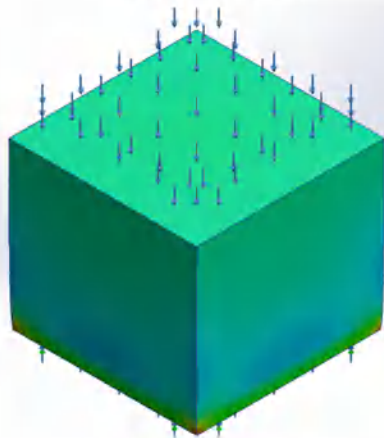
- Présentation du sujet
- Problématique
- Objectifs du TIPE
- **Modélisation**
- Expérience : méthode destructive
- Expérience : méthode non-destructive
- Conclusion

Modélisation via SOLIDWORKS

Déplacement

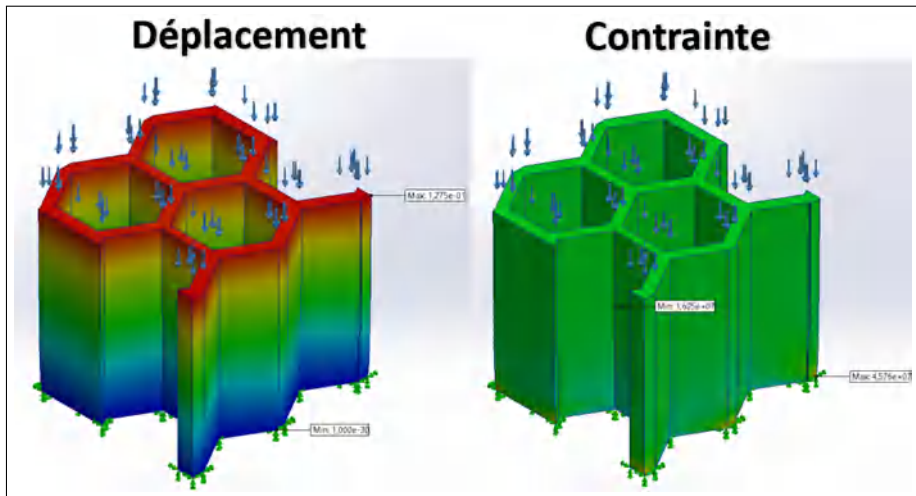


Contrainte



Charge : 30 MPa équivalent à 30 tonnes sur 10 cm^2

Modélisation via SOLIDWORKS



Charge : 30 MPa

Résultats de la modélisation

FORME	Déplacement en mm (max et moy)	Contrainte en N/m^2 (max et moy)
Cubique pleine	4	4
Sinusoïdale	2	2
Triangulaire	3	3
Alvéolaire	1	1

Sommaire

- Présentation du sujet
- Problématique
- Objectifs du TIPE
- Modélisation
- **Expérience : méthode destructive**
- Expérience : méthode non-destructive
- Conclusion

Première expérience : méthode destructive

Essai de compression (NF-EN-12390-3)

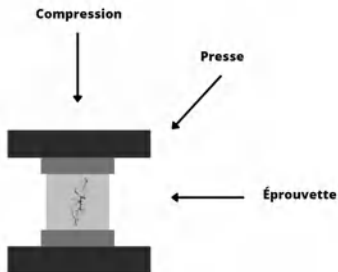
- Force de pression homogène et linéaire : $r = \frac{F}{S}$



Première expérience : méthode destructive

Essai de compression (NF-EN-12390-3)

- Force de pression homogène et linéaire : $r = \frac{F}{S}$



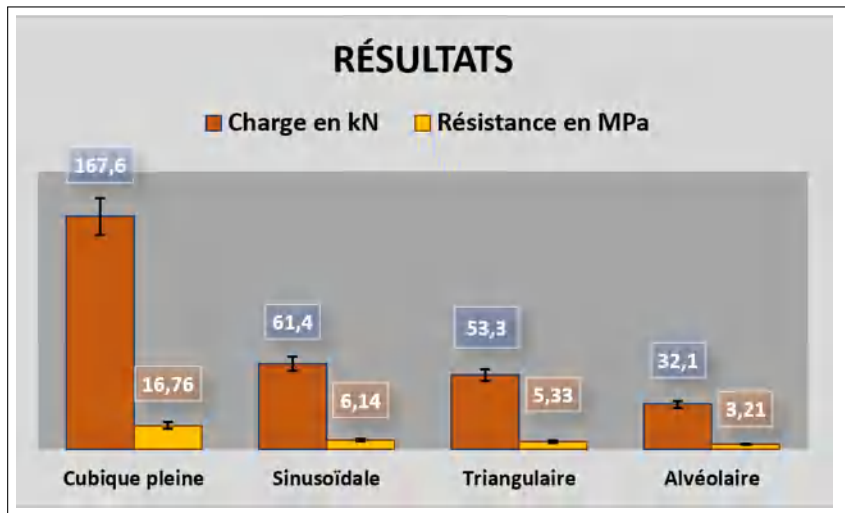
Référence pour un béton de classe C 25/30

Éprouvette cubique pleine de 10 cm (28 jours de séchage) :

- E allant de 20 000 à 50 000 MPa
- Coefficient de Poisson $\nu = 0.20$
- Résistance $r = 30$ MPa



Première expérience :



Barres d'erreur : incertitude de type A

Première expérience :

Sources de différence avec la modélisation

- État de surface (non réellement homogène et idéal)
- Composition
- Incertitude humaine (conception)



Première expérience :

Sources de différence avec la modélisation

- État de surface (non réellement homogène et idéal)
- Composition
- Incertitude humaine (conception)



Première expérience :

Sources de différence avec la modélisation

- État de surface (non réellement homogène et idéal)
- Composition
- Incertitude humaine (conception)



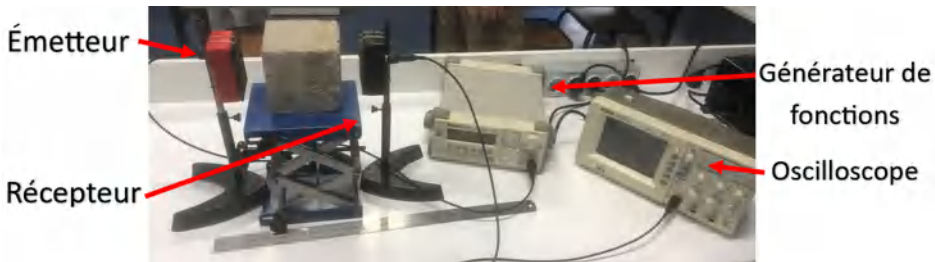
Sommaire

- Présentation et contextualisation du sujet
- Problématique
- Objectifs du TIPE
- Modélisation
- Expérience : méthode destructive
- **Expérience : méthode non-destructive**
- Conclusion

Deuxième expérience : méthode non-destructive

Par Ultrasons (fréquence de 40 kHz) :

- Déterminer la vitesse de propagation d'ondes longitudinales à travers un élément en béton.



Deuxième expérience :

Formules

On admet que dans un milieu homogène et isotrope, la célérité est liée à E par :

$$E = V^2 \frac{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}{1-\nu}$$

E : Module d'élasticité dynamique en MPa

V : Vitesse des ondes en m/s

$\rho = 2300 \text{ kg/m}^3$ la masse volumique } Béton
 $\nu = 0.20$ le coefficient de Poisson }

Relation vitesse des ondes - résistance en compression du béton :

$$r = 16.7 \times \text{Exp}\left(\frac{E}{122500}\right)$$

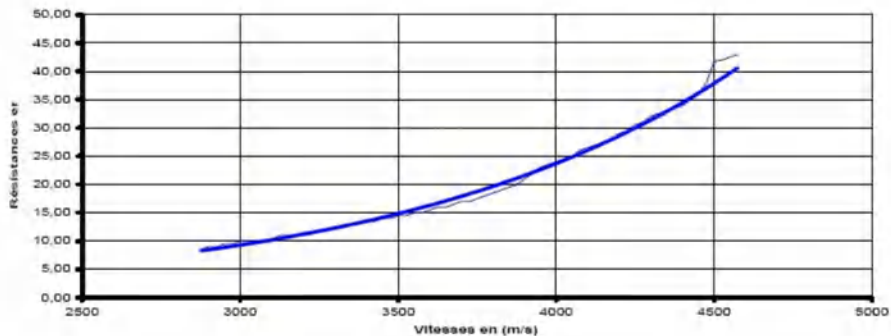
Deuxième expérience

Pour un béton classique :

$$V = 3\,503.5 \text{ m/s}$$

QUALITÉ DU BÉTON	Vitesse de propagation en m/s
Faible résistance	2500 - 3200
Moyenne résistance	3200 - 3700
Haute résistance	3700 - 4200
Très haute résistance	> 4200

Deuxième expérience



Courbe Résistance - Vitesse [6]

Deuxième expérience



Absence de réponse enregistrée par le récepteur à travers le béton.

Deuxième expérience



Réponse enregistrée par le récepteur dans l'air.

Deuxième expérience :

Résultats

L'onde n'arrive pas à traverser le bloc plein de béton.

Éléments de réponse :

- Phénomène d'atténuation : forte densité du béton (composition)
- Appareils utilisés
- Fissures
- Conditions d'humidité
- Âge du béton

Deuxième expérience :

Résultats

L'onde n'arrive pas à traverser le bloc plein de béton.

Éléments de réponse :

- Phénomène d'atténuation : forte densité du béton (composition)
- Appareils utilisés
- Fissures
- Conditions d'humidité
- Âge du béton

Deuxième expérience :

Résultats

L'onde n'arrive pas à traverser le bloc plein de béton.

Éléments de réponse :

- Phénomène d'atténuation : forte densité du béton (composition)
- Appareils utilisés
- Fissures
- Conditions d'humidité
- Âge du béton

Deuxième expérience :

Résultats

L'onde n'arrive pas à traverser le bloc plein de béton.

Éléments de réponse :

- Phénomène d'atténuation : forte densité du béton (composition)
- Appareils utilisés
- Fissures
- Conditions d'humidité
- Âge du béton

Deuxième expérience :

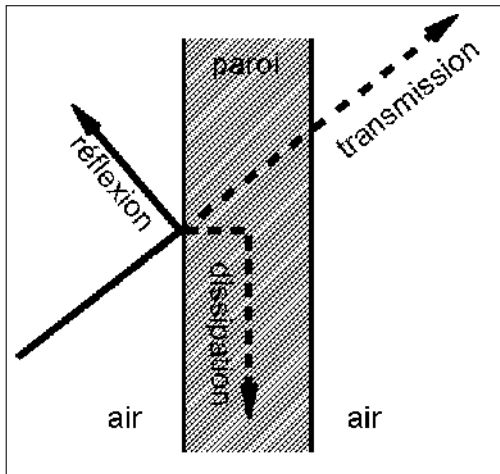
Résultats

L'onde n'arrive pas à traverser le bloc plein de béton.

Éléments de réponse :

- Phénomène d'atténuation : forte densité du béton (composition)
- Appareils utilisés
- Fissures
- Conditions d'humidité
- Âge du béton

Pour les éprouvettes creuses se rajoutent des phénomènes de réflexion, et de diffraction.



Sommaire

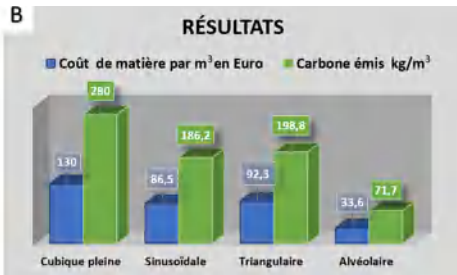
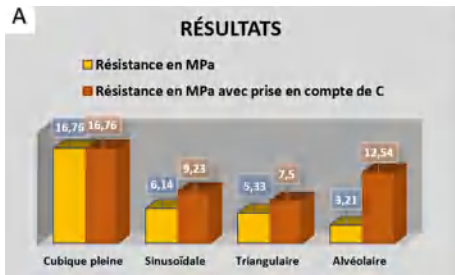
- Présentation du sujet
- Problématique
- Objectifs du TIPE
- Modélisation
- Expérience : méthode destructive
- Expérience : méthode non-destructive
- **Conclusion**

Conclusion

Avec
$$C = \frac{V_{forme}}{V_{pleine}}$$

A : Résistance avec et sans prise en compte de C avec $\frac{r}{C}$.

B : Coût et carbone émis par m^3 de béton.



Ouverture

Ce type de construction peut permettre :

- Une possible colonisation spatiale



ESA : Lunar base made with 3D printing

Bibliographie

- [1] A. Benamara. Impression 3D de matériaux dédiés à la construction : De la définition des encres, maîtrise de l'impression à la performance des produits imprimés. *CY Cergy Paris Université*, 2021.
- [2] S. Villeneuve. Statique et résistance des matériaux. *chapitre 6 (compression et déformation)*
- [3] A. Perrot. Impression 3D du béton : état de l'art et challenges de la révolution de la construction digitale. *Génie civil et géomécanique ISTE éditions*
- [4] Pierre-Thomas Doutre, Thanh Hoang Vo, Philippe René Marin, Franck Pourroy, Guy Prudhomme. Optimisation topologique : outil clé pour la conception des pièces produites par fabrication additive ? *14ème Colloque National AIP PRIMECA*, Mar 2015.
- [5] Developments in construction-scale additive manufacturing processes. *Automation in Construction*. *Automation in Construction*, 21 (1), pp. 262-268.
- [6] A. Aouata et F. Ourougaa. Détermination de la résistance du béton par l'essai ultrasonique (Effet de la fréquence) *Université de Guelma Faculté des Sciences et de la Technologie, Département de Génie Civil*, Juin 2015

Évaluation de type A d'une incertitude-type (répétabilité)

Si une grandeur X est estimée à partir de N observations indépendantes x_1, x_2, \dots, x_N alors :

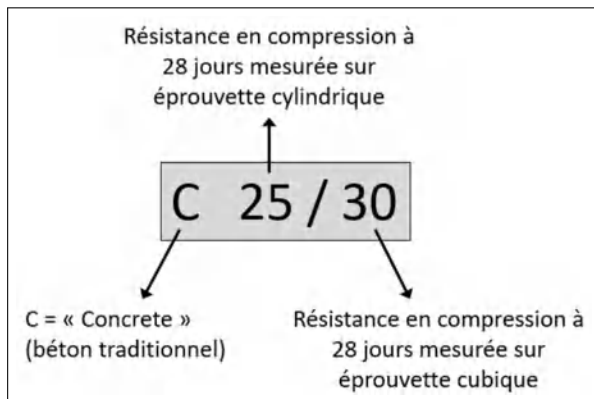
- Son estimation est la valeur moyenne : $\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$

- Incertitude type : $u(X) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{(N-1)}} \frac{1}{\sqrt{N}}$

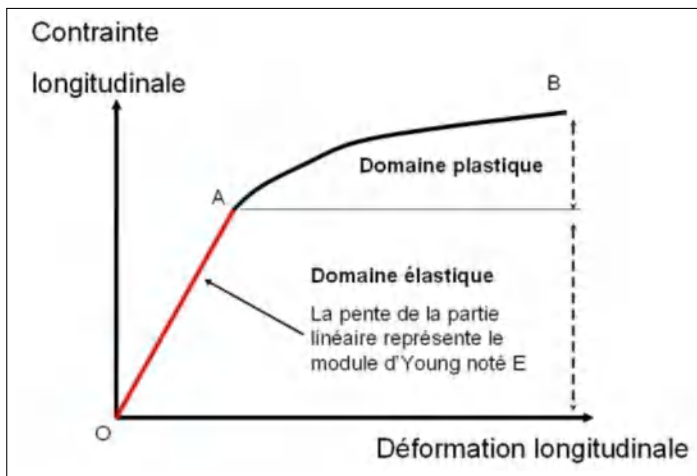
Dans notre cas : $\begin{cases} N = 5 \\ X = \text{Résistance de l'éprouvette testée} \end{cases}$

Annexe

Classe C 25/30 du béton



Annexe



Courbe contrainte - déformation