Optimisation et fabrication digitale de poutres en béton armé

Workshop DiXite 2022

Sébastien Maitenaz [a,b], Paul Onfroy [b], Nicolas Metge [b], Romain Mesnil [a], Adélaïde Feraille [a], Jean-François Caron [a]

(a) Laboratoire Navier, École des Ponts ParisTech, Université Gustave Eiffel, CNRS, Marne-La-Vallée, France
(b) ISC, Vinci Construction France, Chevilly-Larue, France

Principaux enjeux du secteur de la construction

Usine de préfabrication

PRODUCTIVITÉ

+1.0 % par an sur les 20 dernières années

Chantier

SÉCURITÉ

115 morts en France (2020)

Cimenterie

ENVIRONNEMENT

1/3 des émissions mondiales de GES

Sources

Barbosa, Filipe *et al. Reinventing Construction: A Route to Higher Productivity*, 2017

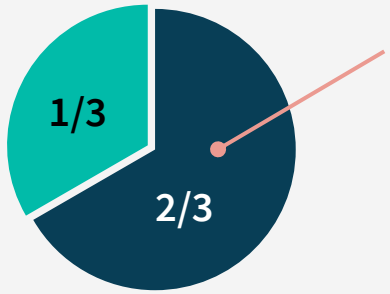
CNAM. *Rapport Annuel 2020 de l'Assurance Maladie – Risques Professionnels Éléments Statistiques et Financiers*, 2020

SBCI, UNEP. *Buildings and Climate Change: Summary for Decision-Makers*, 2009

Enjeux environnementaux liés au béton armé

Utilisation mondiale des matériaux de construction

Part des matériaux utilisés (en masse), [Van Damme, 2018]



≈ 35 milliards de tonnes

- Béton et mortier
- Autres matériaux de construction industriels

Impact of concrete production on climate change

- Ciment : 5% à 8% des émissions de GES mondiales [Boden et al., 2017]
- 25% de la production est dédiée à un usage béton armé [Srivener et al., 2018]
- En France, en 2050, le béton représentera plus de 80% de la consommation de matériaux de construction [Leonardon et al., 2018]

→ Il faut trouver des solutions applicables à court ou moyen terme.

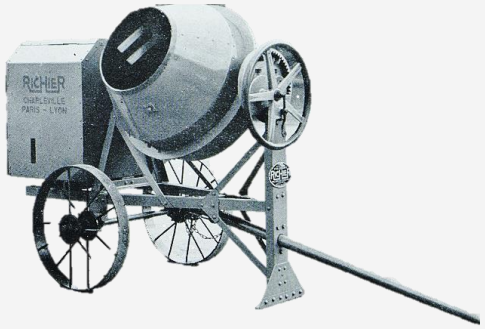
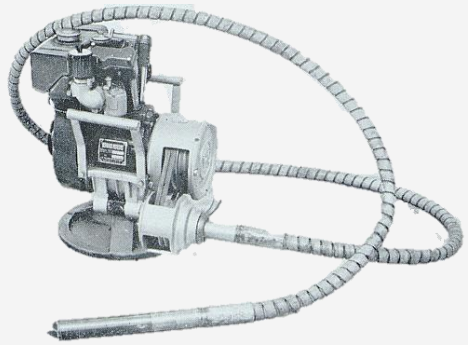
Sources

Van Damme, H. 'Concrete Material Science: Past, Present and Future Innovations.' In: *Cement and Concrete Research*, 2018
Boden, T.A. *et al. Global, Regional, and National Fossil-Fuel CO_2 Emissions*. 2017
Scrivener, K. L. *et al.* 'Eco-Efficient Cements: Potential Economically Viable Solutions for a Low-CO2 Cement-Based Materials Industry' In: *Cement and Concrete Research*, 2018
Leonardon, P. *et al. Prospective de consommation de matériaux pour la construction des bâtiments neufs aux horizons 2035 et 2050*. ADEME, CSTB, 2019.

Le béton : une révolution dans l'art de bâtir

1949*, Dunkerque
Reconstruction de l'écluse Watier
*Date estimée de la photographie

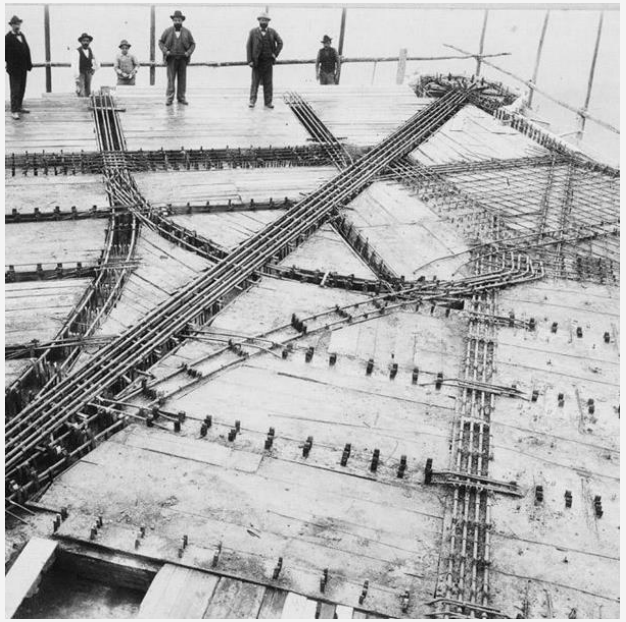
Évolution des outils de production

	Cintreuse à barre	Bétonnière	Aiguille vibrante
1940			
2020			

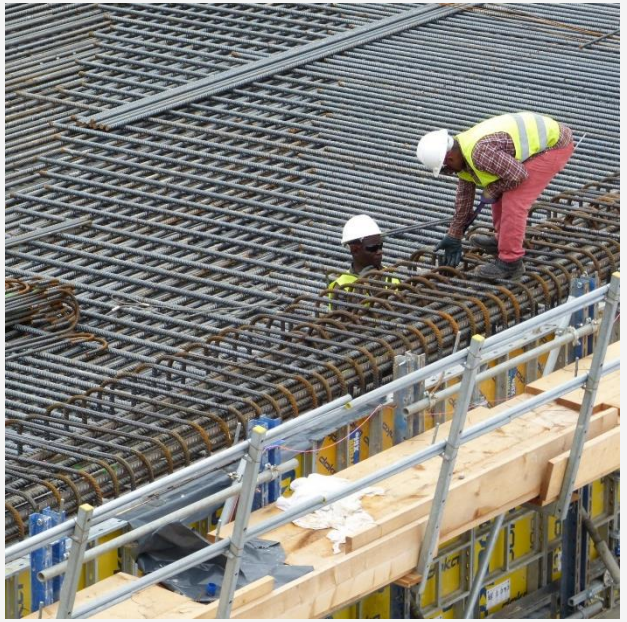
Source

Genouville, P. '1849-1949: Cent Ans de Béton Armé. Le Béton Armé, Son Outillage'. In: *Travaux,* 1949.

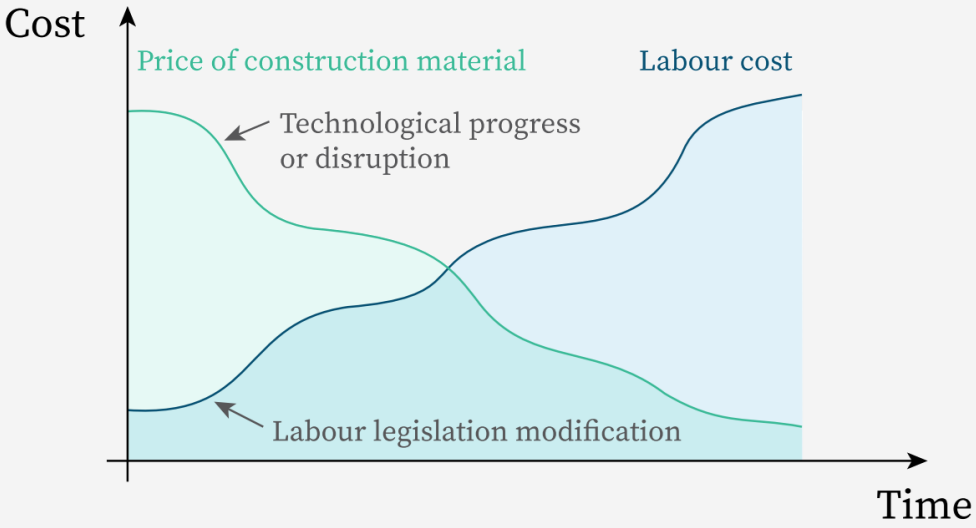
Impact de l'évolution des coûts sur la conception



Villa Figari (1904)
Dalle renforcée avec le système Hennebique



T3C - Bagneux (2018)
Dalle calculée sur la base de l'Eurocode 2



→ Il faut utiliser des outils de production industriels

Sommaire

I. Optimisation de poutres en béton armé
   1. Procédure d'optimisation conforme à l'EC 2
   2. Validation expérimentale de la méthode d'optimisation des bielles

II. Fabrication numérique de poutres optimisées

III. Conclusion et perspectives

OPTIMISATION

I. Optimisation de poutres en béton armé
   1. Procédure d'optimisation conforme à l'EC 2
   2. Validation expérimentale de la méthode d'optimisation des bielles

II. Fabrication numérique de poutres optimisées

III. Conclusion et perspectives

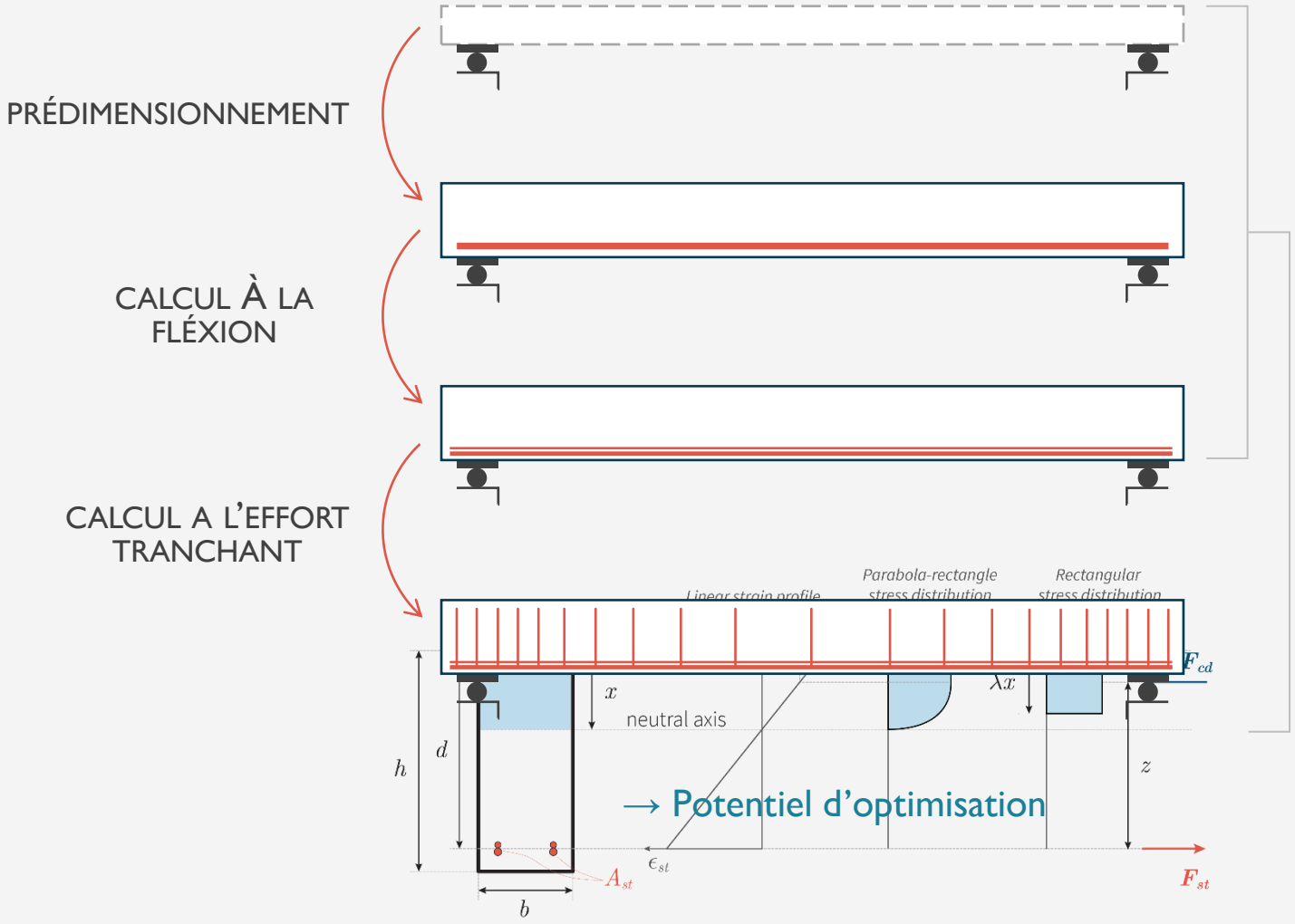
Procédure usuelle de calcul

Variables

- Section de la poutre (h, b)
- Section d'armatures (A_{st})
- Propriétés matériaux (f_{ck})

Objectifs

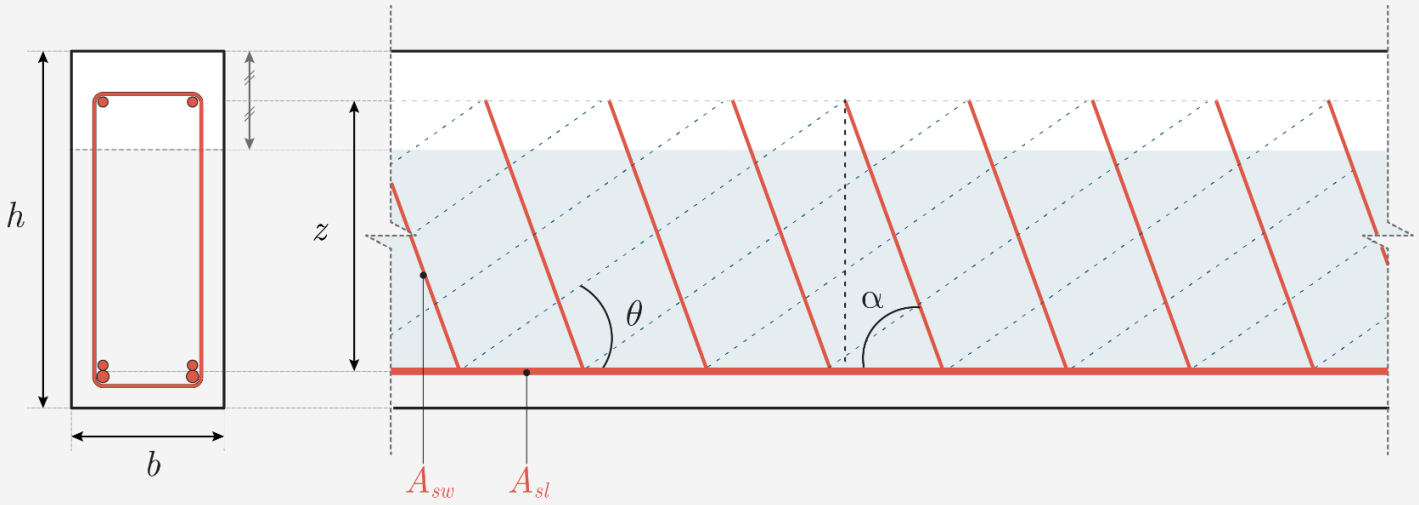
- ELU :
  - Résistance $(X_{Ed} \leq X_{Rd})$
- ELS
  - Contraintes$(\sigma_c \leq k_i f_{cd}, \ldots)$
  - Ouvertures de fissure
  - Déplacement



Procédure usuelle de calcul

Fondement théorique

- Variable Strut Inclination Method (VSIM)
- Analogie treillis
- Basé sur le théorème de la borne inférieure de l'analyse limite



Paramètres

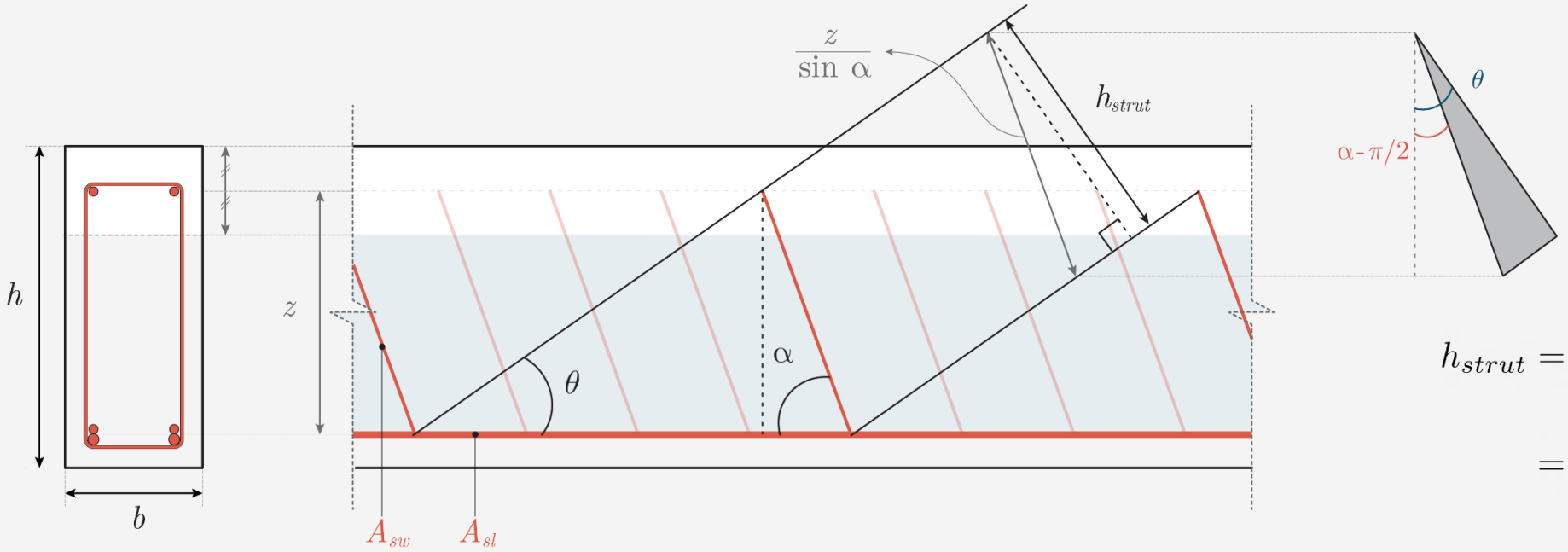
- Angle d'inclinaison des bielles (θ)
- Angle d'inclinaison des tirants (α)

Résistance à l'effort tranchant: $V_{Rd} = \min\left(V_{Rd,s}; V_{Rd,max}\right)$

Résistance des tirants ↓

↑ Critère d'écrasement des bielles

Relation entre la résistance des bielles et la géométrie



$$h_{strut} = \frac{z}{\sin\alpha}\cos\left[\theta - \left(\alpha - \frac{\pi}{2}\right)\right] = z\frac{sin(\alpha+\theta)}{\sin\alpha}$$

Développement trigonométrique

$$V_{Rd,max} = \alpha_{cw}\nu_1 bz f_{cd}\frac{\cot\theta + \cot\alpha}{1+\cot^2\theta} = \underbrace{\alpha_{cw}\nu_1 f_{cd}}_{\text{Contrainte max.}}\ \underbrace{bz\frac{\sin(\alpha+\theta)}{\sin\alpha}}_{\text{Largeur et hauteur de la bielle}}\sin\theta \longrightarrow h_{strut} = \frac{V_{Rd,max}}{f_{strut}b_{strut}\sin\theta}$$

Optimisation de la section des bielles

Objectif :

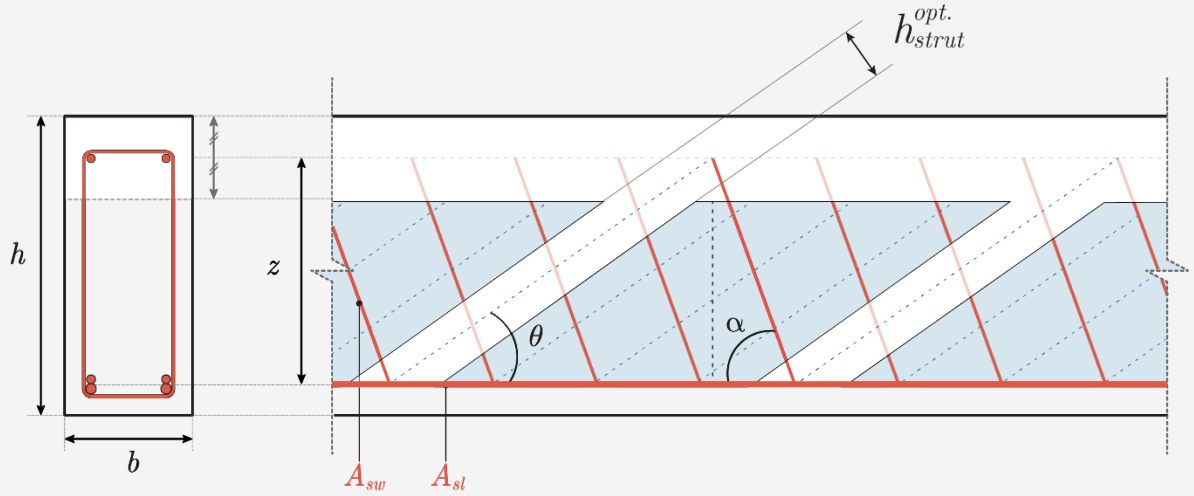
Trouver la géométrie de bielles avec le plus faible volume de béton, et qui supporte un chargement donné.

$$\min_{\substack{b_{strut} \\ h_{strut}}} \quad f(b_{strut}, h_{strut})$$

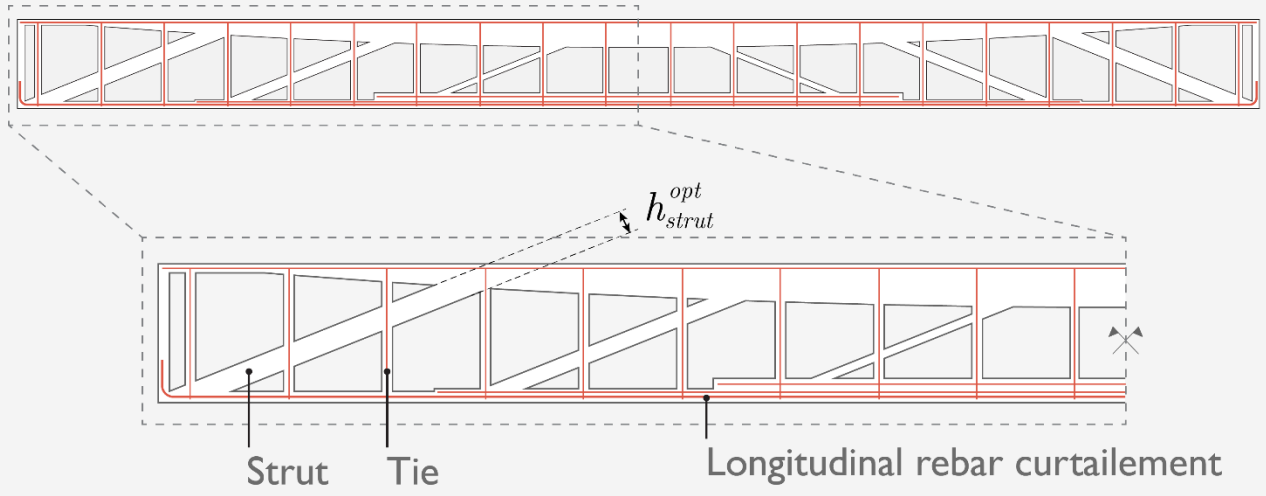
$$\text{s.t.} \quad V_{Ed} \leq V_{Rd,max}(b_{strut}, h_{strut})$$
$$b_{strut} \in [0, b_w]$$
$$h_{strut} \in [0, h_{strut}^{max}]$$

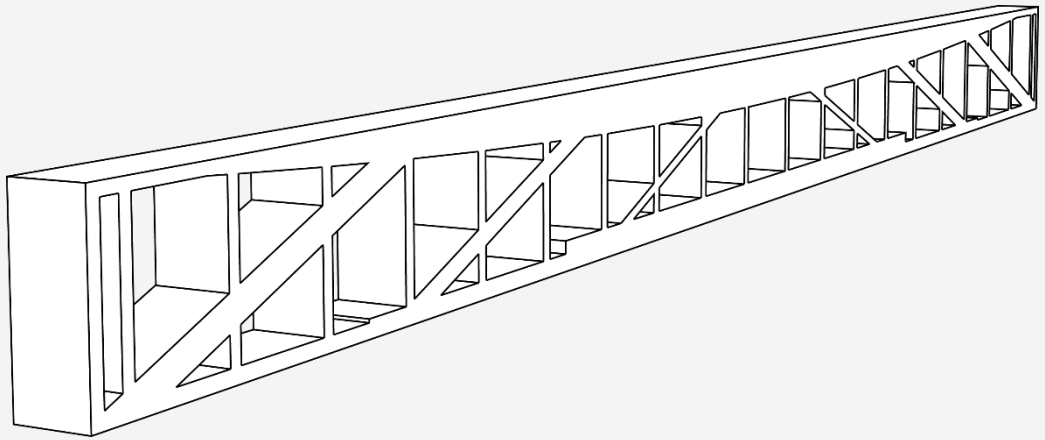
avec :

- $f(b_{strut}, h_{strut}) = b_{strut}\, h_{strut}$ → Optimisation de la hauteur
- $h_{strut}^{max} = z \dfrac{\sin(\alpha + \theta)}{\sin \alpha}$



Optimisation de la section des bielles





Résultat de la méthode d'optimisation des bielles (SOM)

- Poutre de type treillis (formalisation des bielles)
- Cage d'armature classique

Avantages

- Poutres allégées

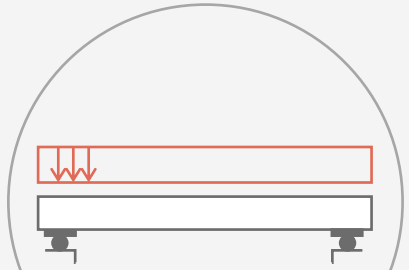
→ Optimisation du reste de la structure possible

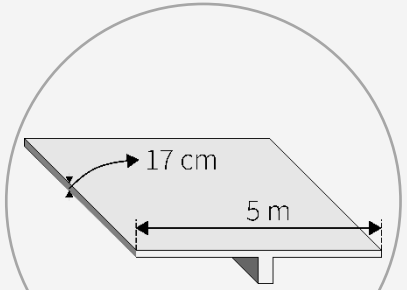
- Gain de hauteur structurelle

Estimation des gains de béton potentiels

Étude paramétrique

- Poutres simplement appuyées
- Charges uniformes
- Portée : 6 à 15 m
- Élancement : L/10 à L/16
- Largeur fixée à h/2





Poids propre [g]
Béton: 2500 kg/m^3

Charges variables [q]
Logement: 150 kg/m2

ELU
1,35.g + 1,5.q

ELS
g + q
g + 0,3.q

Poutre conventionnelle (M_{tr})

Poutre optimisée (M_o)

Estimation des gains de béton potentiels

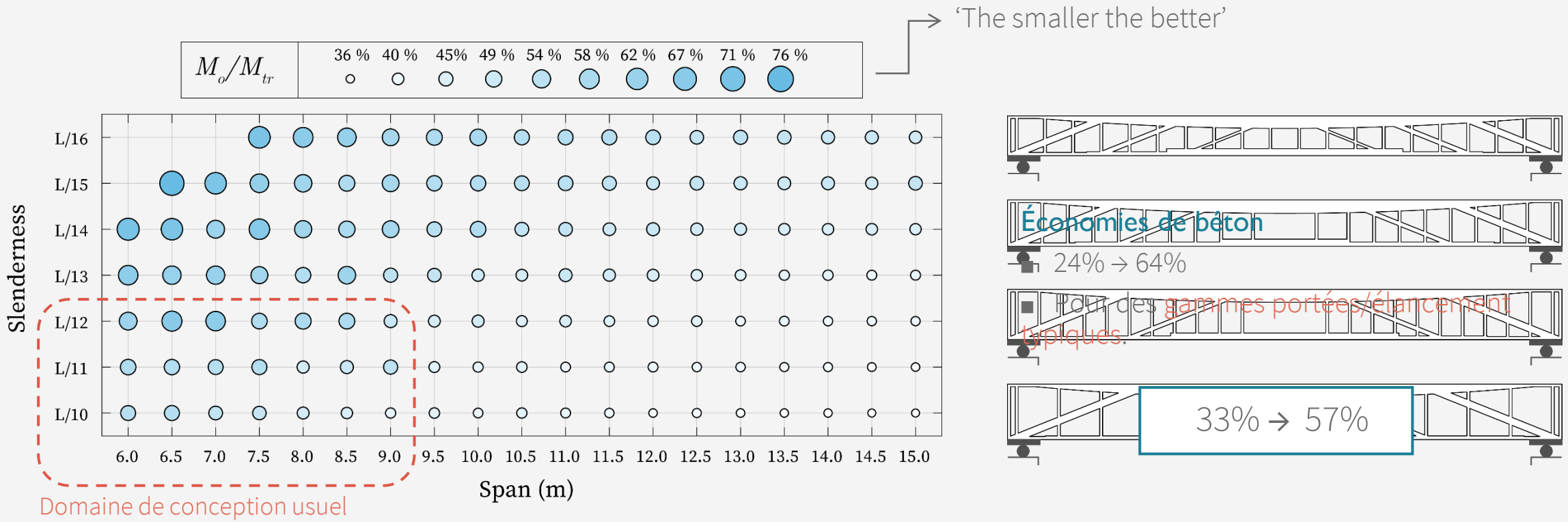


Fig. | Evolution du gain de masse avec la portée et l'élancement

OPTIMISATION

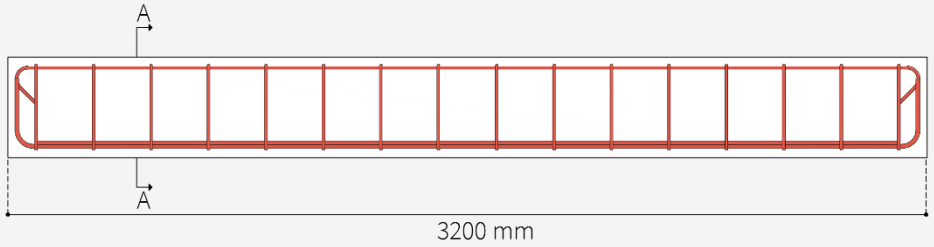
I. Optimisation de poutres en béton armé
   1. Procédure d'optimisation conforme à l'EC 2
   2. Validation expérimentale de la méthode d'optimisation des bielles

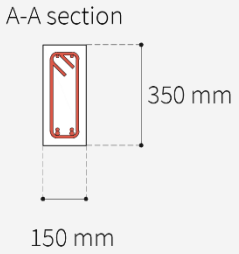
II. Fabrication numérique de poutres optimisées

III. Conclusion et perspectives

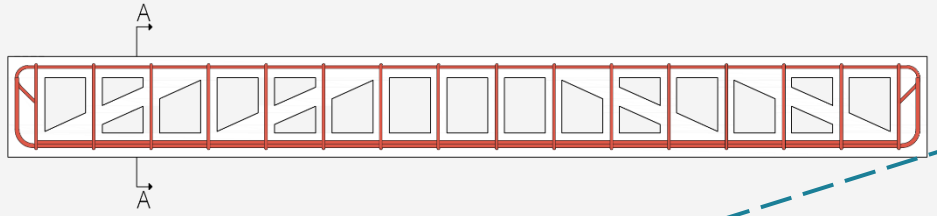
Conception des prototypes

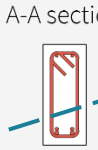
P1 - Reference beam
Concrete : 0,168 m^3
Steel mass : 16 kg
f_c = 50.3 MPa
P_{Ed} = 85 kN



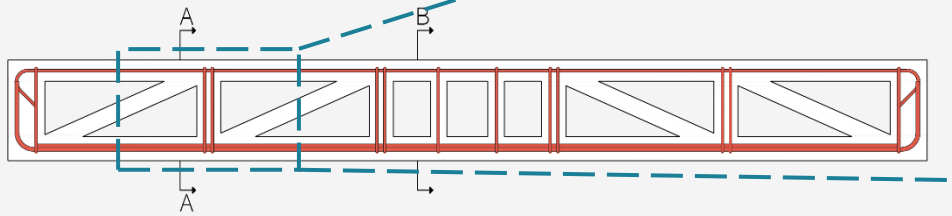


P2 & P3 - SOM trusses
Concrete : 119 m^3 (-29%)
Steel mass : 16 kg
f_c = 50.5/51.5 MPa
P_{Ed} = 85 kN





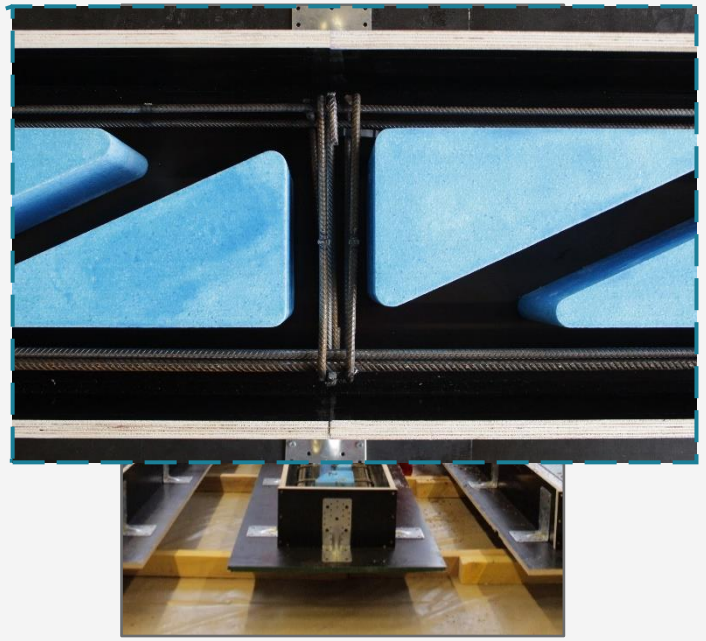
P4 - Howe truss
Concrete : 114 m^3 (-32%)
Steel mass : 16 kg
f_c = 51.4MPa
P_{Ed} = 85 kN



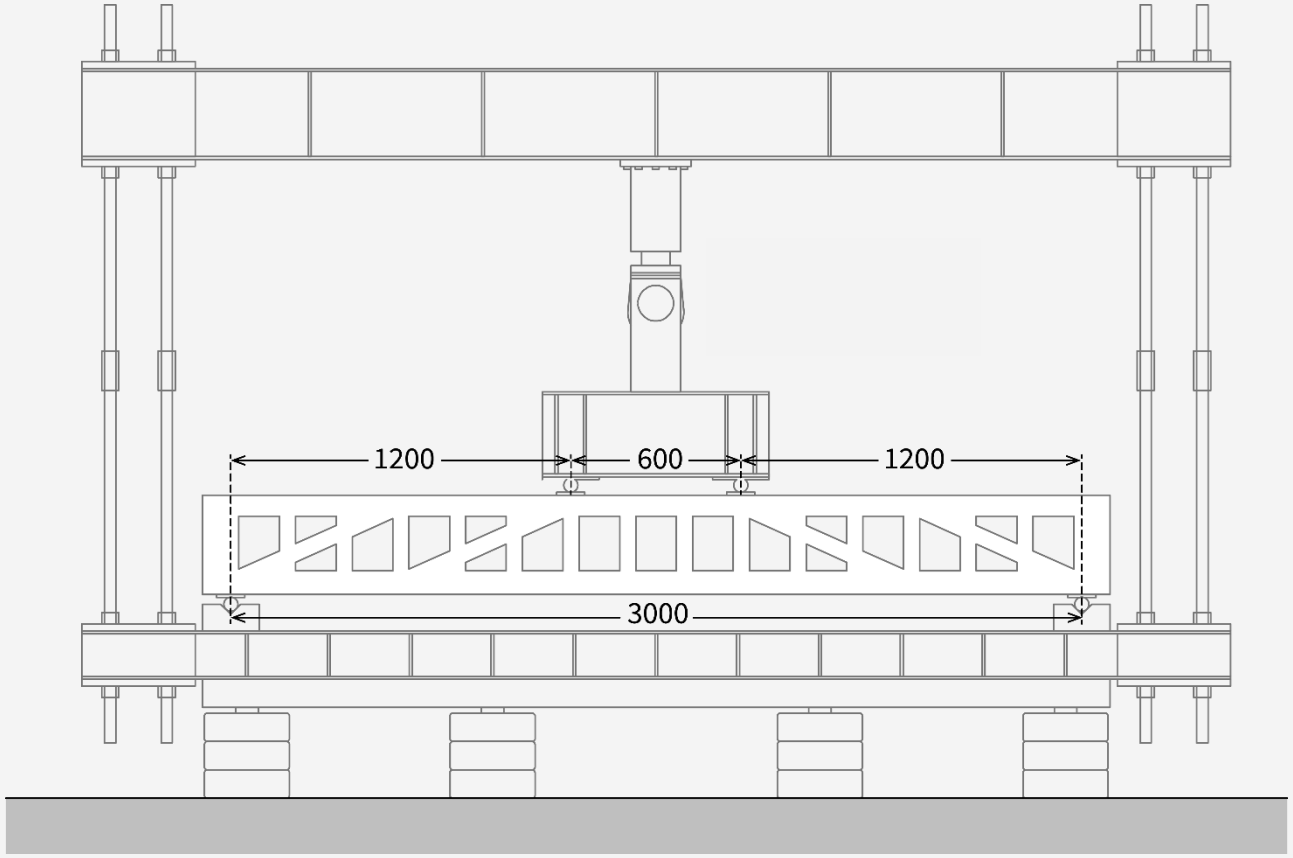
* Les poutres optimisées ont initialement été conçues pour que les résistances ultimes à la flexion et à l' effort tranchant soient atteintes simultanément

Fabrication

- BAP (C30/37 commandé)
- Utilisation de moules en polystyrène



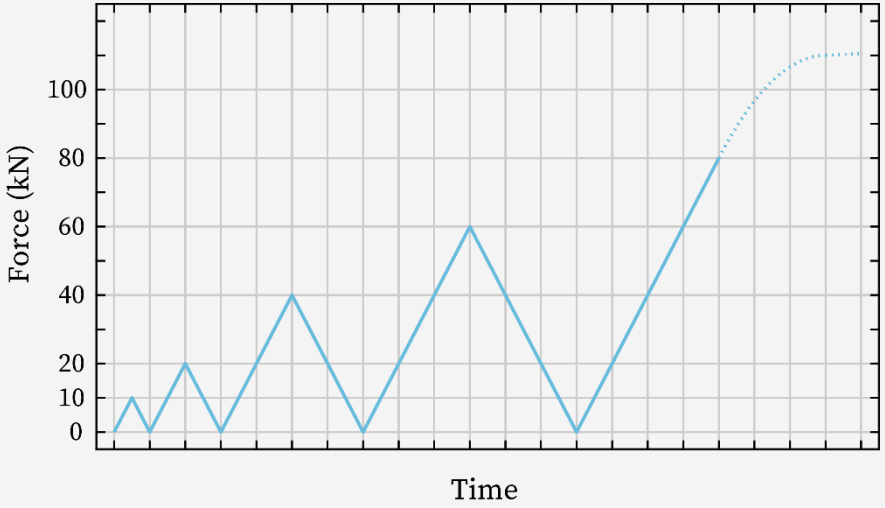
Protocole expérimental



Conditions de chargement

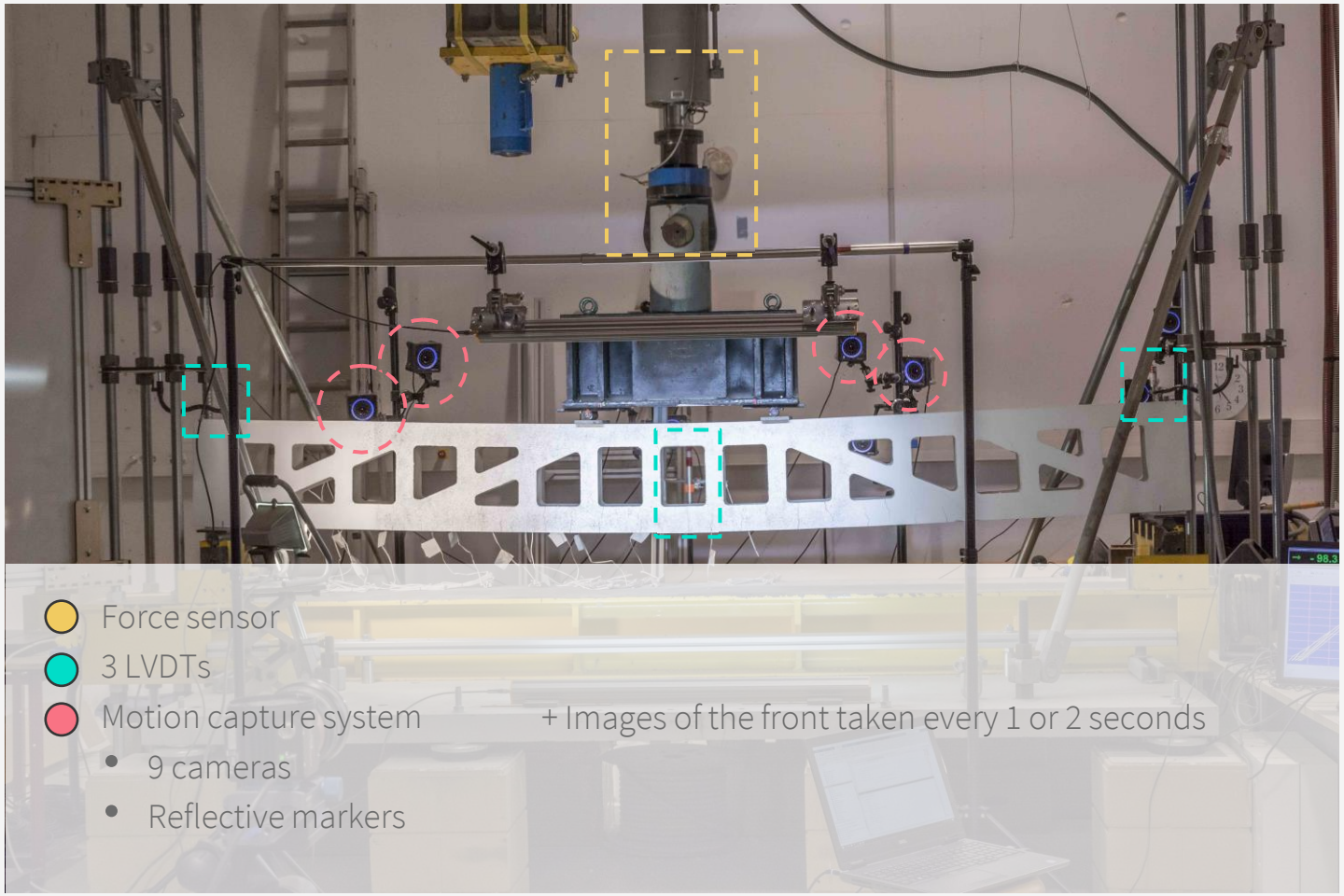
- Flexion 4 points
- Piloté en déplacement
- Vérin hydraulique
  - Capacité : 450 kN
  - Course : 0 – 145 mm

Cycles de chargement



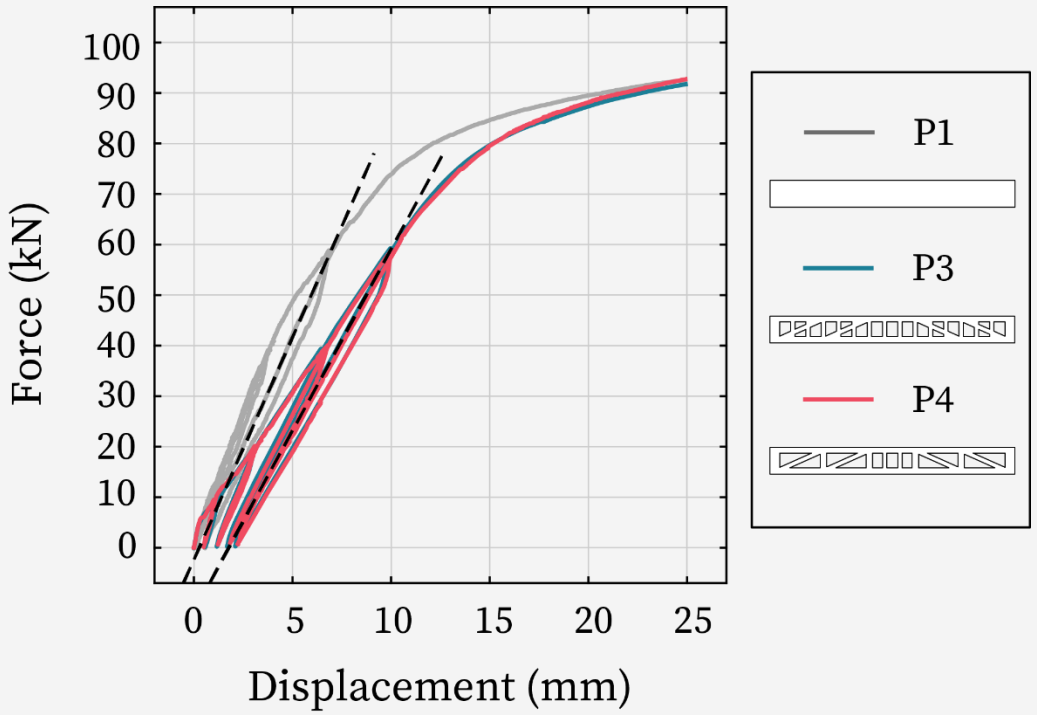
Dispositif expérimental

Back of the beam



Front of the beam

Observations sur la raideur et l'endommagement



Comportement structurel aux ELS (< 60kN)

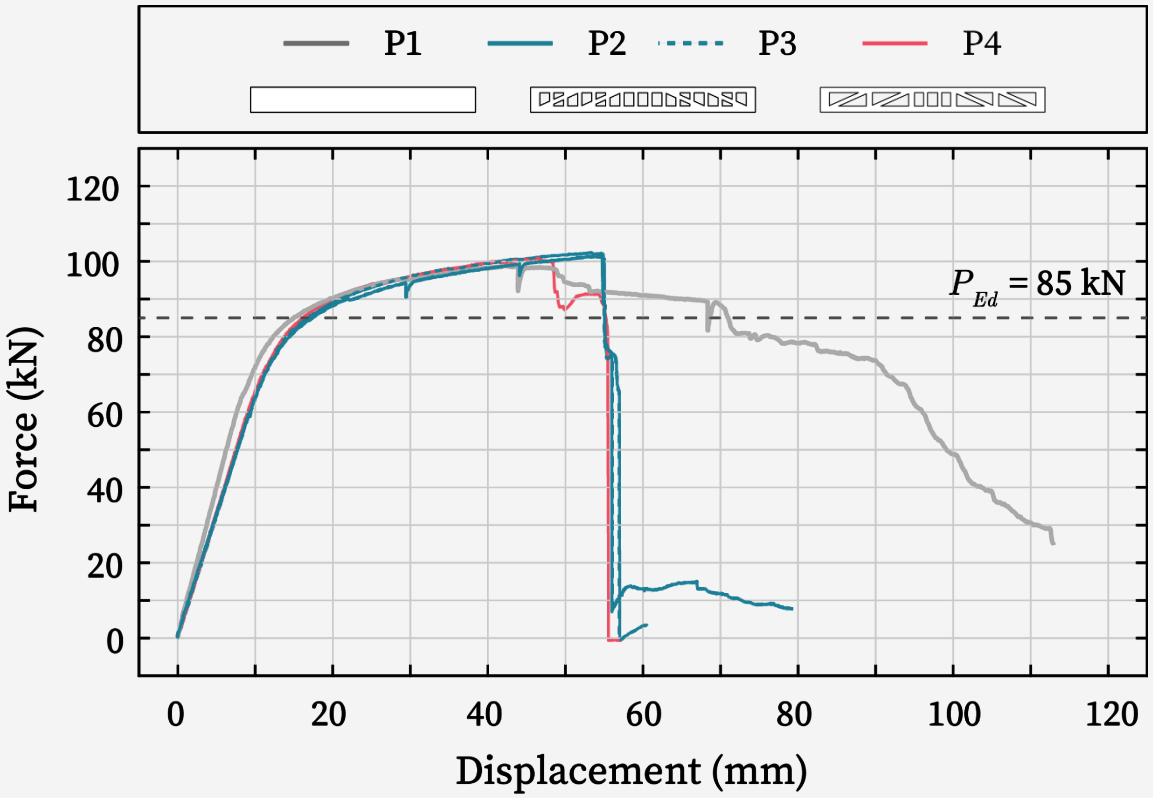
Poutre	EI_{eq} (kN/mm)		Déplacements résiduels (mm) 10 kN	20 kN	40 kN	60 kN
P1	8,8		0,0	0,0	0,1	0,6
P3	7,2	(-19%)	0,6	1,2	1,7	2,1
P4	7,2	(-19%)	0,5	1,2	1,8	2,2

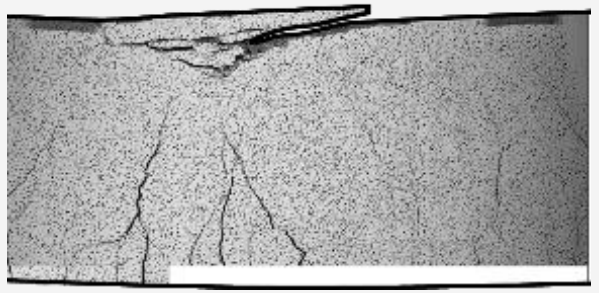
Fig. | Raideur en flexion (en kN/mm) et déplacement résiduels (en mm)

- Perte de raideur liée aux évidements
- Poutre de référence → Comportement linéaire élastique avant 60 kN
- Poutres optimisées → Phénomène d'endommagement
  - Probablement lié à la présence de fissures de retrait

→ Des analyses sont à poursuivre

Comportement aux ELU





P1

P3

P4

Comportement structurel aux ELU

- Poutre de référence → Ductile
- Poutres optimisées → Comportement plastique-fragile
  - Pas de réserve de capacité
  - Palier plastique important

- Même charge à la rupture → **Validation de la méthode SOM**

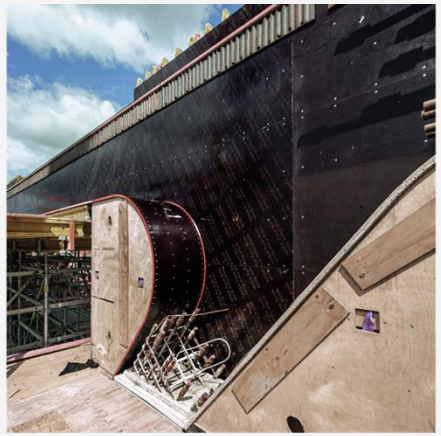
FABRICATION

I. Optimisation de poutres en béton armé
   1. Procédure d'optimisation conforme à l'EC 2
   2. Validation expérimentale de la méthode d'optimisation des bielles

II. Fabrication numérique de poutres optimisées

III. Conclusion et perspectives

Méthodes conventionnelles pour coffrer des poutres optimisées



Limites des méthodes conventionnelles

- Faible taux de réutilisation → Grande quantité de déchets produits
- Travail manuel → Questions en termes de qualité et de productivité

- Quel procédé peut permettre la fabrication de poutres sur mesure sans générer d'impacts qui viennent limiter les bénéfices liées aux économies de matière ?

Plateforme de recherche pour la fabrication digitale

Equipements pour la robotique collaborative

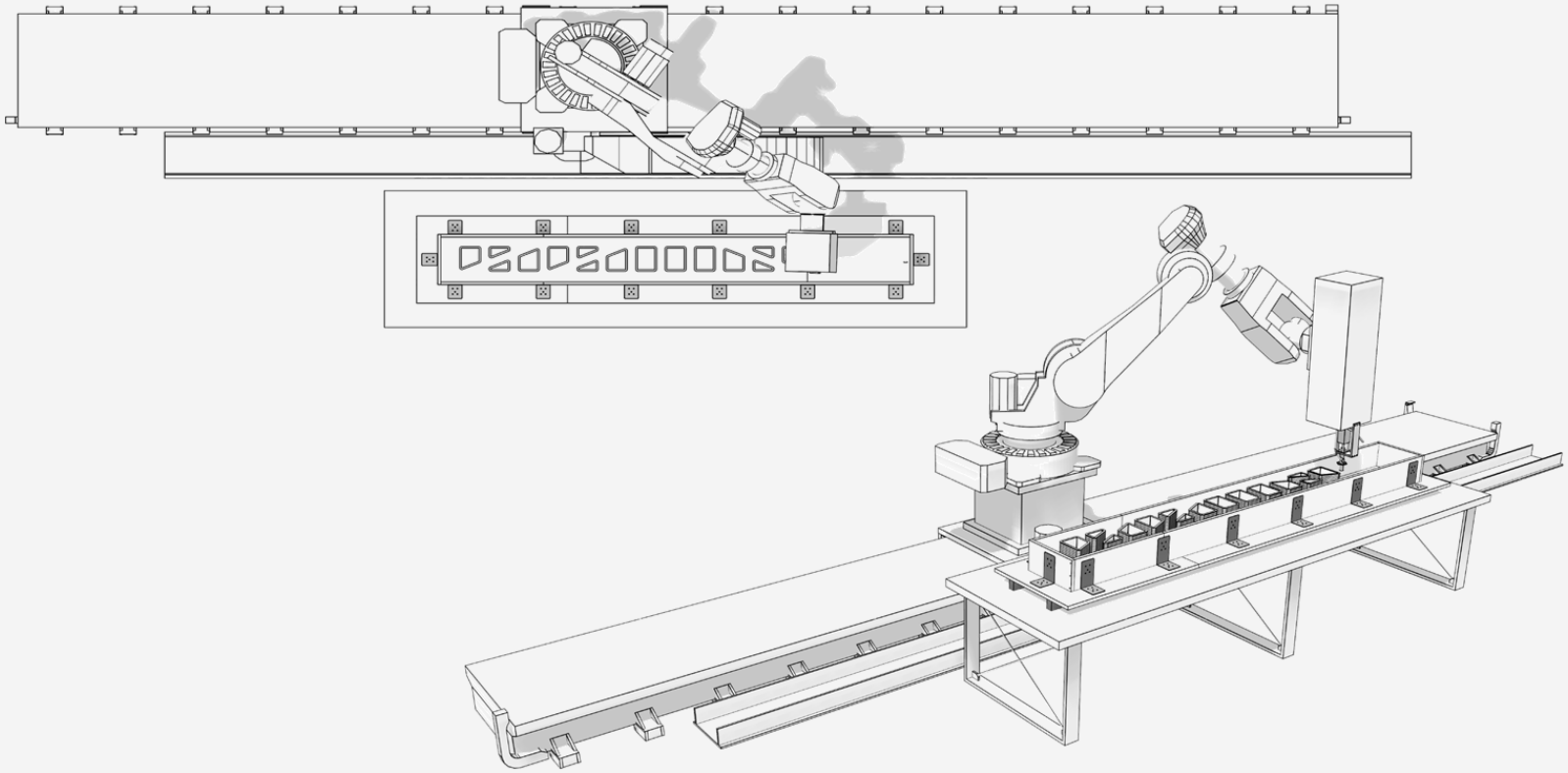
Equipements pour l'impression 3D à grande échelle

BUILD'IN
CO-INNOVATION LAB

Cadre de recherche

Build'in : plateforme de recherche pour la construction robotisée

Recy(clay)ble Formworks



Concept

Fabrication additive de moules :

- Doit permettre le sur-mesure
- Les moules doivent être collaborant ou recyclables

Principe du procédé

1. Préparation d'un coffrage traditionnel
2. Impression des moules
3. Préparation et placement de la cage d'armature
4. Coulage

HALLE FREYSSINET

Fabrication d'un prototype de 3m de long

1. Impression 3D des moules en argile

2. Placement de la cage et remplissage des moules avec du sable

3. Coulage du béton

4. Décoffrage

Quelques problèmes rencontrés

- Placement de la cage complexe
- Effets de la pression du béton sont visibles

Source

Archez, J. 'Strategy to shape, on a half-meter scale, a geopolymer composite structure by additive manufacturing'. In: *Open Ceramics*, 2021

FABRICATION

Fabrication d’un prototype de 3m de long

CONCLUSION

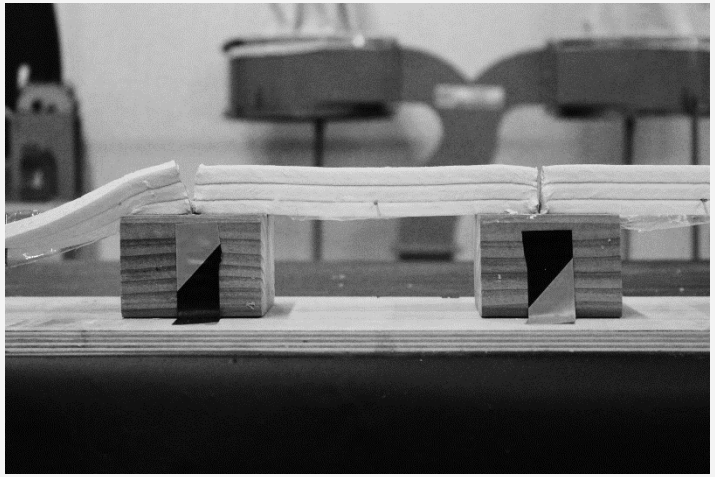
I. Optimisation de poutres en béton armé
   1. Procédure d'optimisation conforme à l'EC 2
   2. Validation expérimentale de la méthode d'optimisation des bielles

II. Fabrication numérique de poutres optimisées

III. Conclusion et perspectives

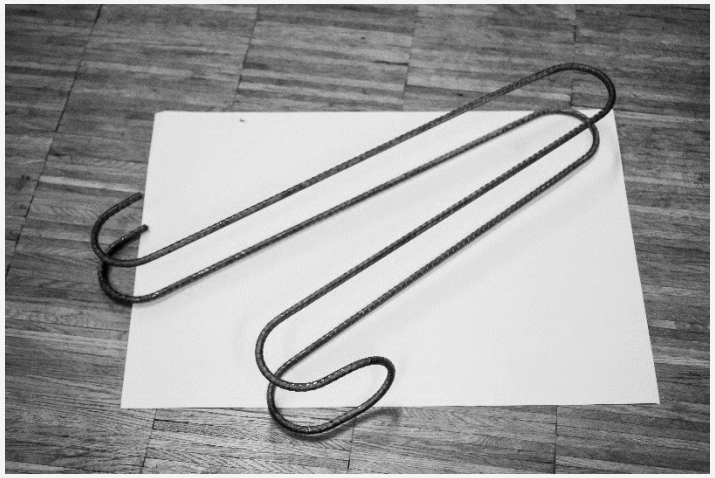
Comportement structurel des poutres optimisées

- Tests à poursuivre pour étendre les conclusions à d'autres modes de ruine
- Analyse du phénomène d'endommagement



Procédé de fabrication

- Améliorer le système de moule (travail en cours)
- Automatiser l'assemblage des cages d'armatures
- Adapter le procédé à la fabrication sur chantier

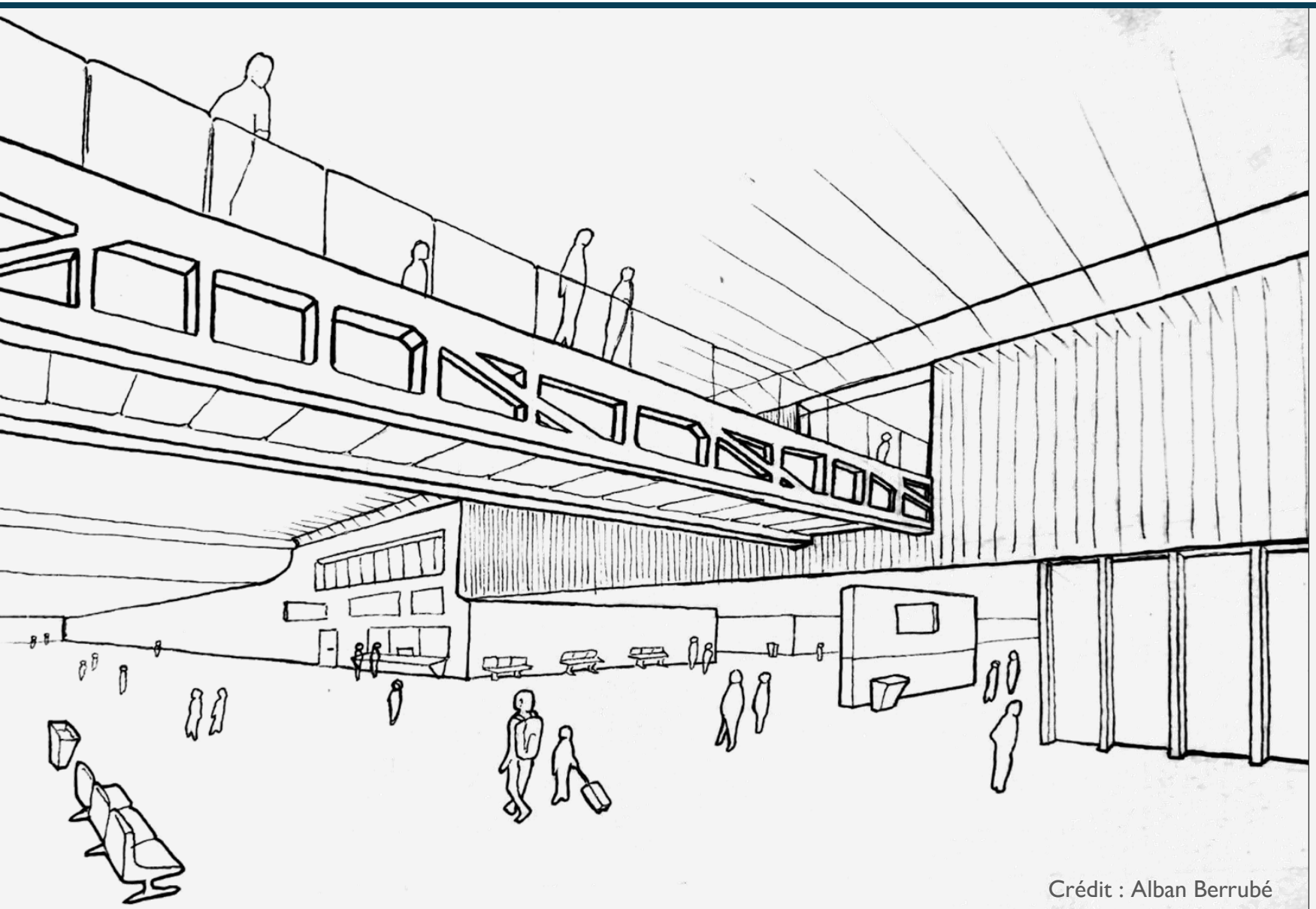


Vers un système constructif complet …

Nouvelle thèse en cours sur l'optimisation des dalles

LABORATOIRE NAVIER

ISC



Crédit : Alban Berrubé

Projets d’application

- Construction de deux poutres pour un parking
- Lauréat d’un appel à projet de la SGP

Construction d’une passerelle piétonne de 10m dans la gare de Palaiseau (L18) en janvier 2023

Société du Grand Paris

Merci de votre attention.