

Impression 3D des bétons par extrusion: potentiel d'application et évaluation environnementale

Romain Mesnil – Charlotte Roux – Adélaïde Feraille

Ecole des Ponts ParisTech – Laboratoire Navier



Sommaire

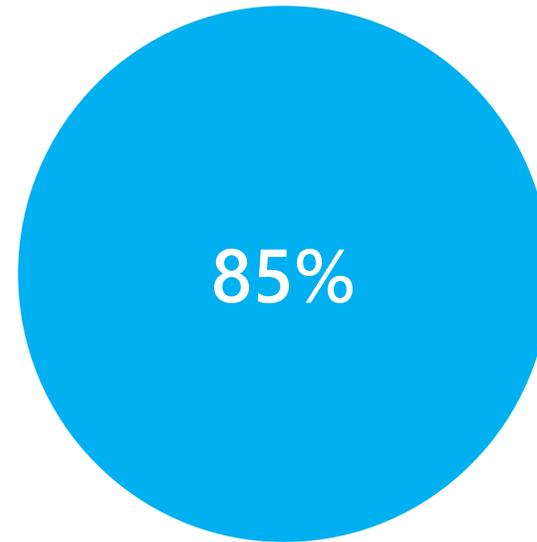
- La promesse de l'impression 3D béton
- Faut-il imprimer des maisons en 3D?
- Particularités du procédé
- Evaluation environnementale par ACV

La promesse de l'impression 3D béton

Quelques chiffres sur le béton et la construction



Production annuelle de béton
au niveau mondial



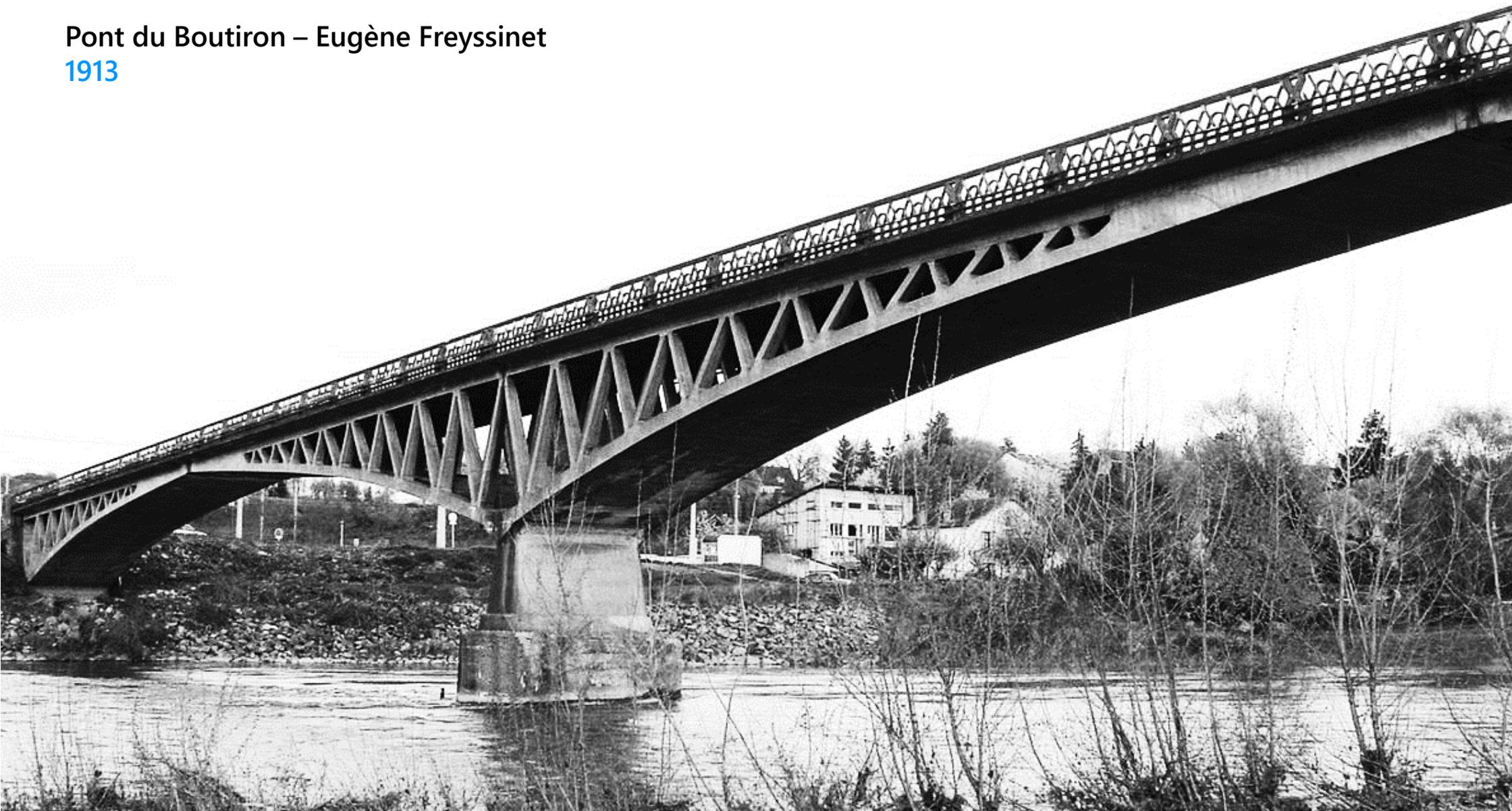
Proportion des bâtiments de 2060 n'existant
pas aujourd'hui (source: ONU)

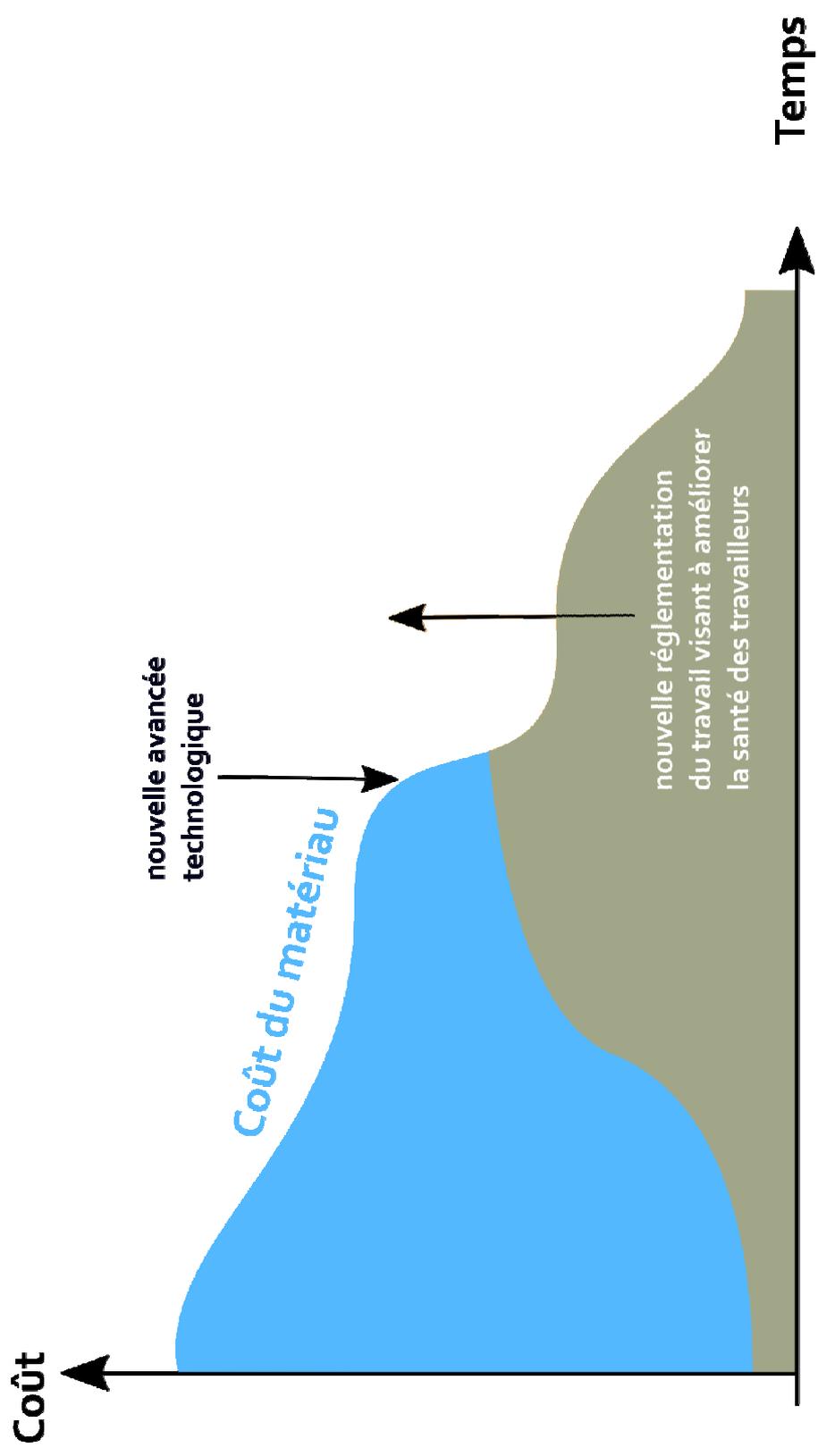
(*) Van Damme, H. (2018). Concrete material science: Past, present, and future innovations. *Cement and Concrete Research*, 112, 5-24.



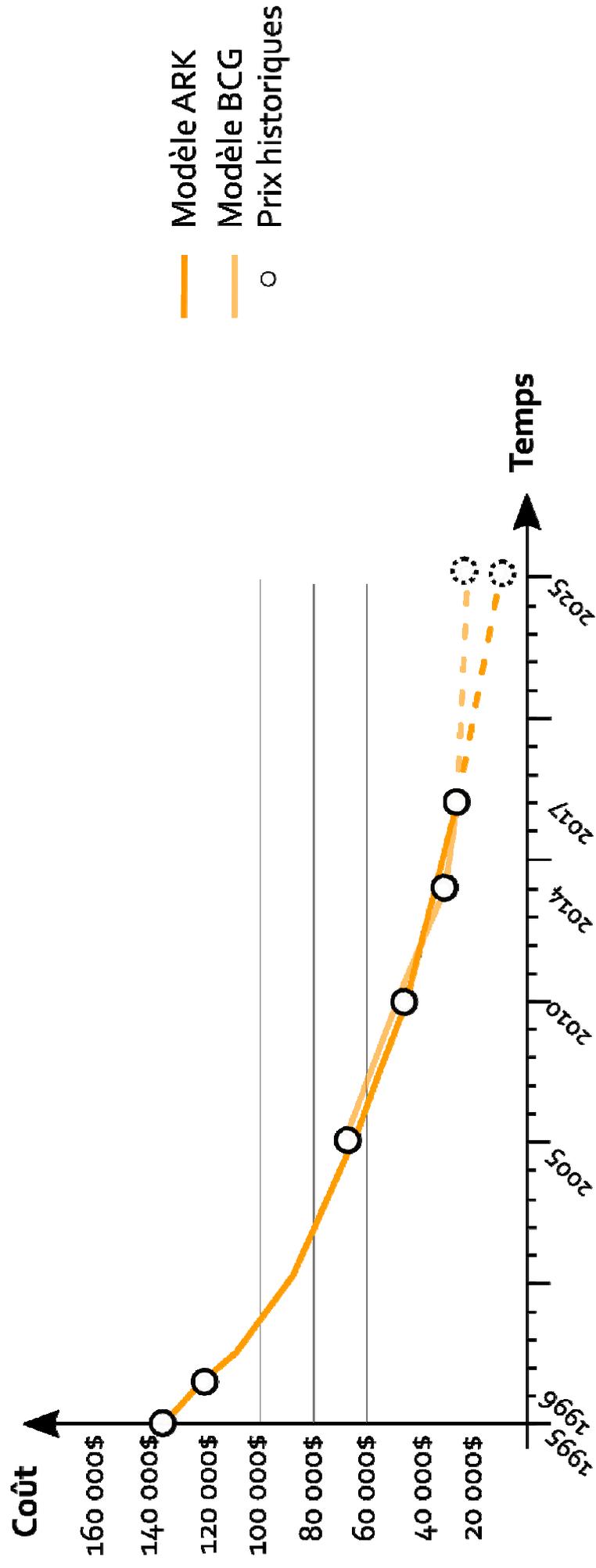
Viaduc de Garabit – Gustave Eiffel
1884

Pont du Boutiron – Eugène Freyssinet
1913



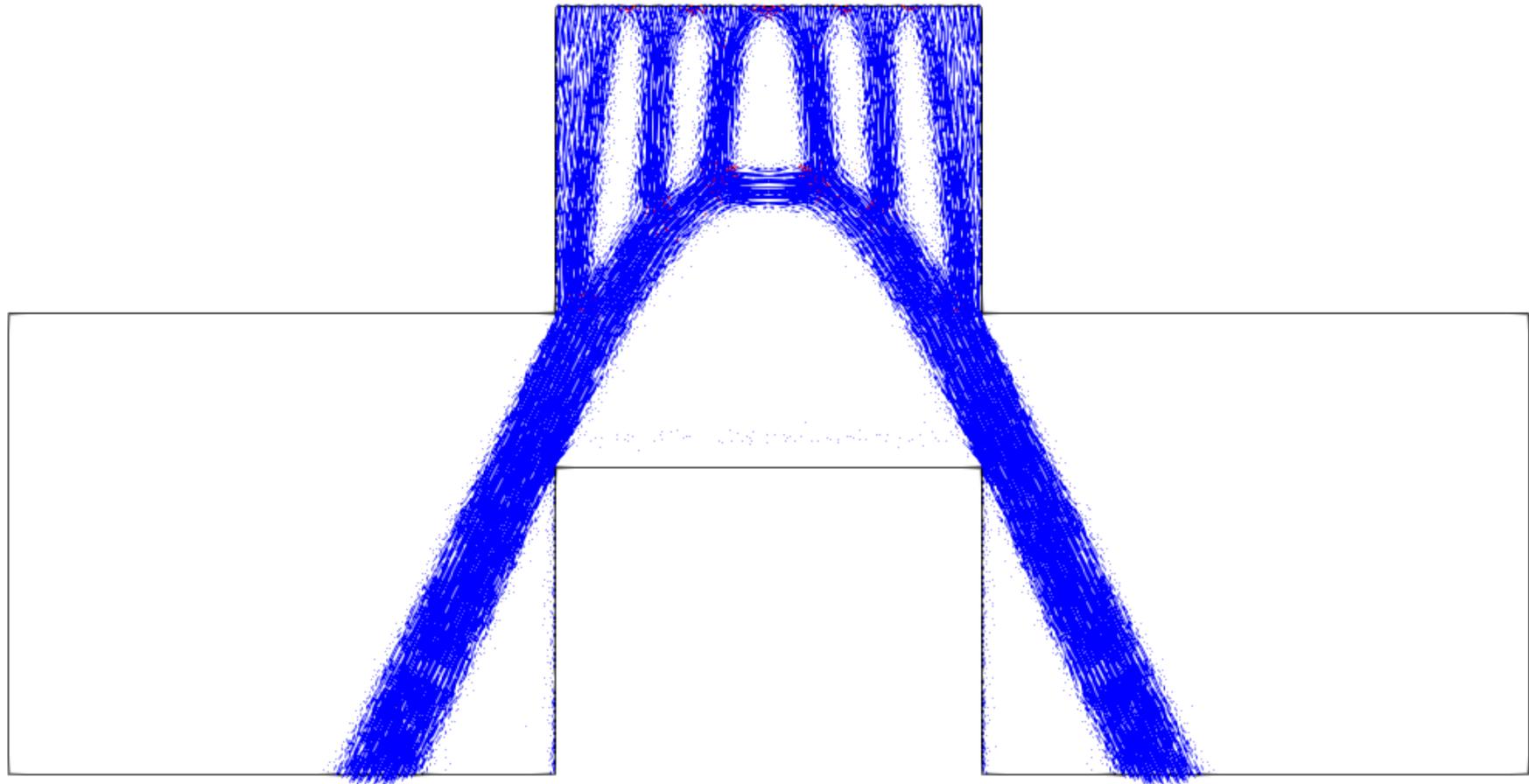


Décroissance du coût des robots industriels (\$ 2017)



Source: ARK Investment Management LLC, 2019 Data from: United Nations Economic Commission for Europe, International Federation of Robotics; Sirkin et al. "How Robots Will Redefin Competitiveness". BCG, 23 Sept. 2015

Optimisation pour un matériau sans résistance en traction



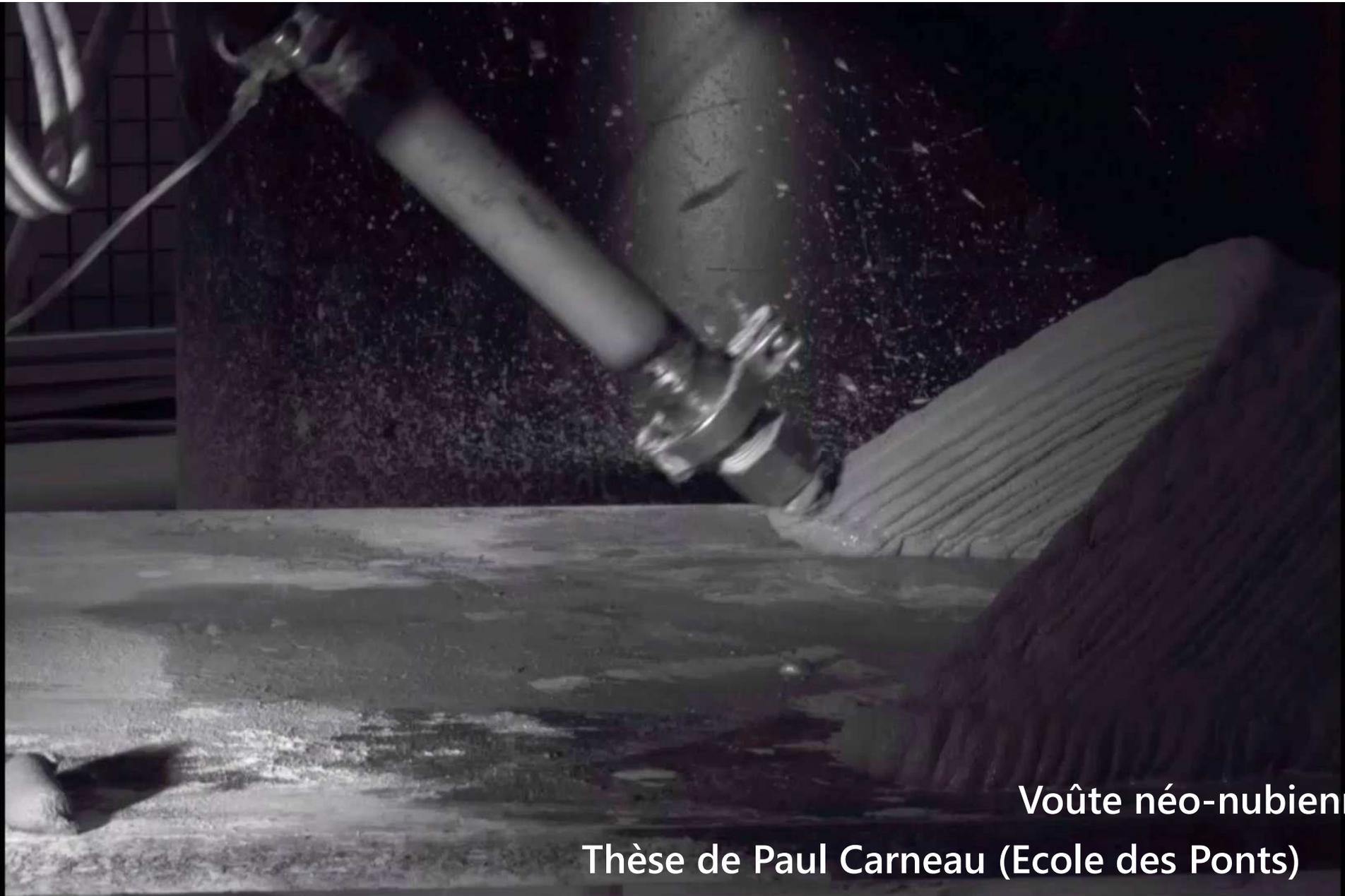
Mourad et al., Topology optimization of load-bearing capacity, Structural and MultiDisciplinary Optimisation, 2021



Façade nord de la Sagrada Família, Antoni Gaudí



Voûte nubienne



Voûte néo-nubienne

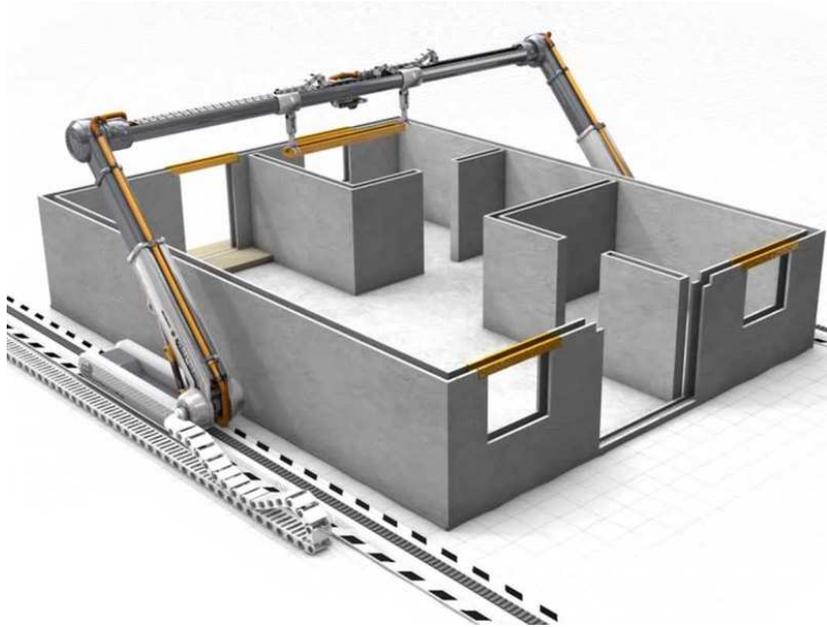
Thèse de Paul Carneau (Ecole des Ponts)

La promesse de l'impression 3D béton

- Matérialisation des structures optimisées...
- Compétitivité économique...
- ... et *in fine* réduction l'impact environnemental des structures béton
- Cette promesse est-elle tenue?

**Faut-il imprimer des maisons
en 3D?**

Faut-il imprimer des maisons en 3D?





500 kg of concrete/m²



180 kg of concrete/m²



> 250kg of concrete/m²

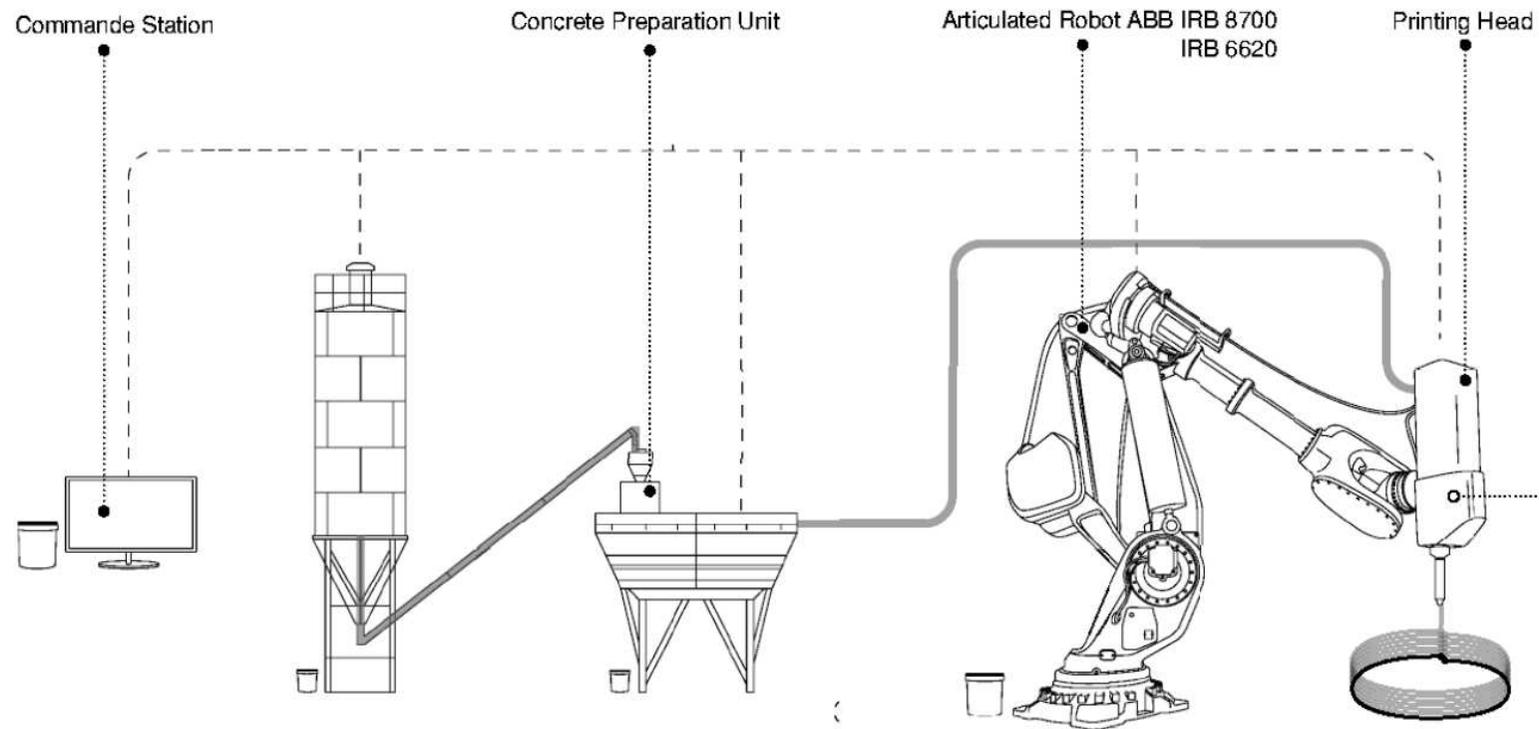


50 kg of concrete/m²

Duballet et al. (2019), Duballet et al. (2020), Kuzmenko (2021)

Le procédé d'impression béton

Le procédé d'impression 3D



Source : XTree



Cellule d'impression 3D béton à l'Ecole des Ponts

Paramètres d'impression

- Type de robot
- Vitesse du robot
- Débit des pompes
- Diamètre du tuyau
- Composition du matériau
- Etc.
- Robot 6 axes
- ~100-200mm/s
- ~1-2L/min
- D=20mm
- **Divers...**

Le béton (ou mortier) imprimé

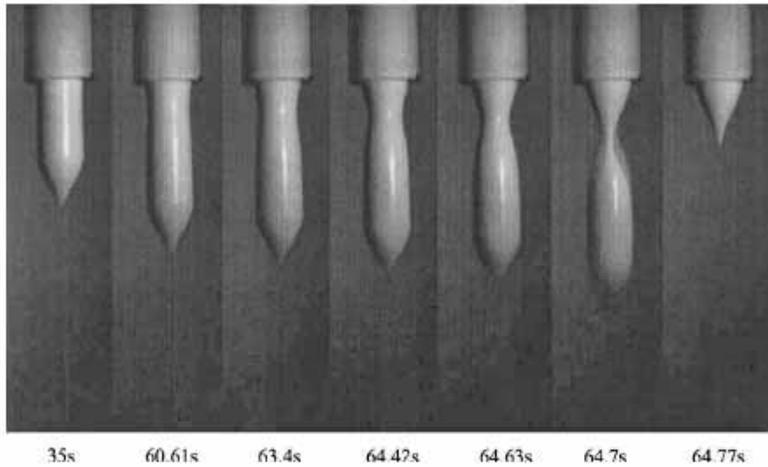
- **Composition**

- Liant (ciment, laitiers de haut fourneau, fumée de silice)
- Eau
- Charge granulaire (sable, granulats, etc.)
- Eventuellement superplastifiants, agents augmentant la viscosité, accélérateurs de prise

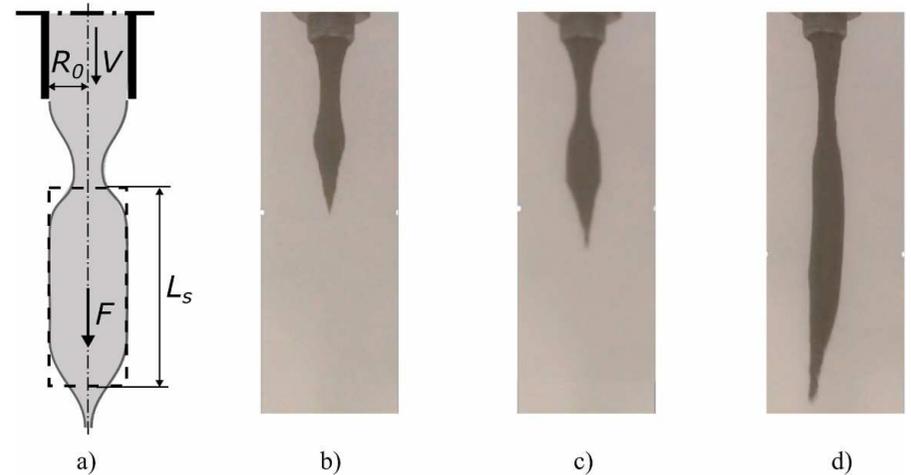
- **Objectifs**

- Limiter les problèmes de consolidation (**optimisation de la compacité**, cf. Perrot)
- **Maitrise du rapport eau/ciment** (résistance, et impact sur le réchauffement climatique du liant)
- Contrôler la viscosité (problèmes de ségrégation)
- Limiter le retrait...

Le béton frais, un fluide à seuil?



Mayonnaise (Cousot)

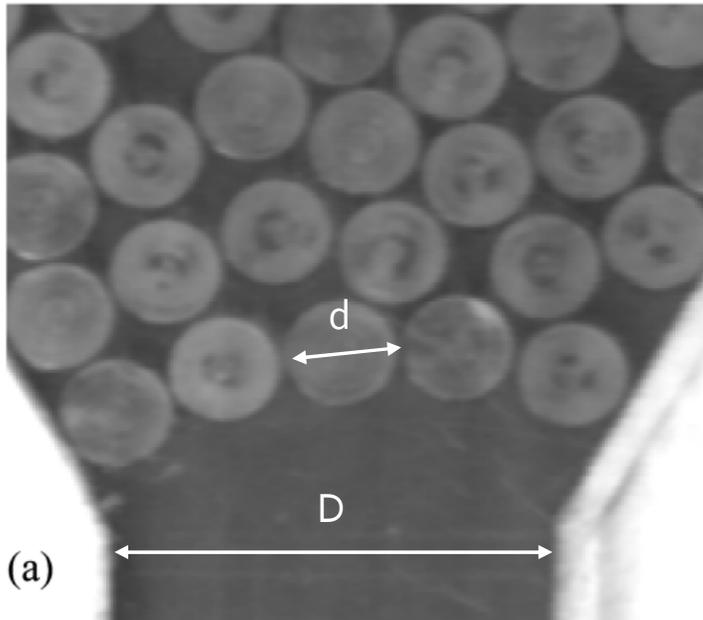


Mortier imprimé (Ducoulombier et al.)

Ducoulombier, N., Mesnil, R., Carneau, P., Demont, L., Bessaies-Bey, H., Caron, J. F., & Roussel, N. (2021). The "Slugs-test" for extrusion-based additive manufacturing: Protocol, analysis and practical limits. *Cement and Concrete Composites*, 121, 104074.



Ou un matériau granulaire?



Arches stables dans un milieu non-cohésif
(To et al. 2001 , Guo and Zou, 2013)

$$D/d \sim 5-7$$

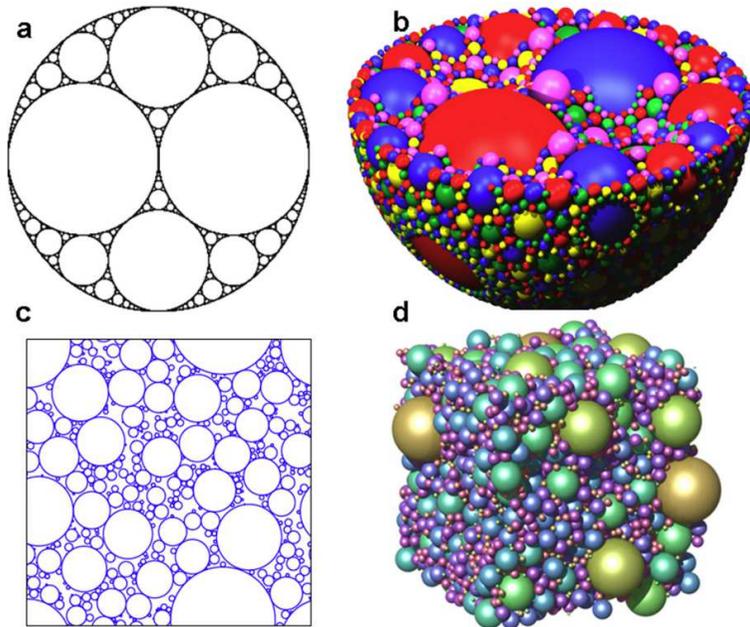
En impression 3D, $D \sim 20\text{mm}$

$$d_{\text{max}} \sim 3-4\text{mm}$$

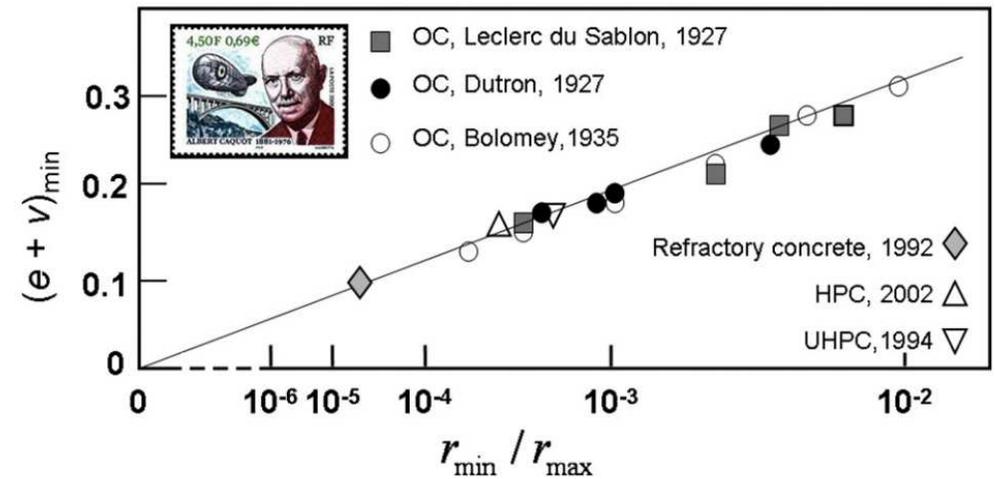
To, K., Lai, P. Y., & Pak, H. K. (2001). Jamming of granular flow in a two-dimensional hopper. *Physical review letters*, 86(1), 71.

Guo, P., & Zhou, S. (2013). Arch in granular materials as a free surface problem. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 37(9), 1048-1065.

Quelle influence sur la compacité?



Modèles déterministes et stochastiques d'empilement sphériques

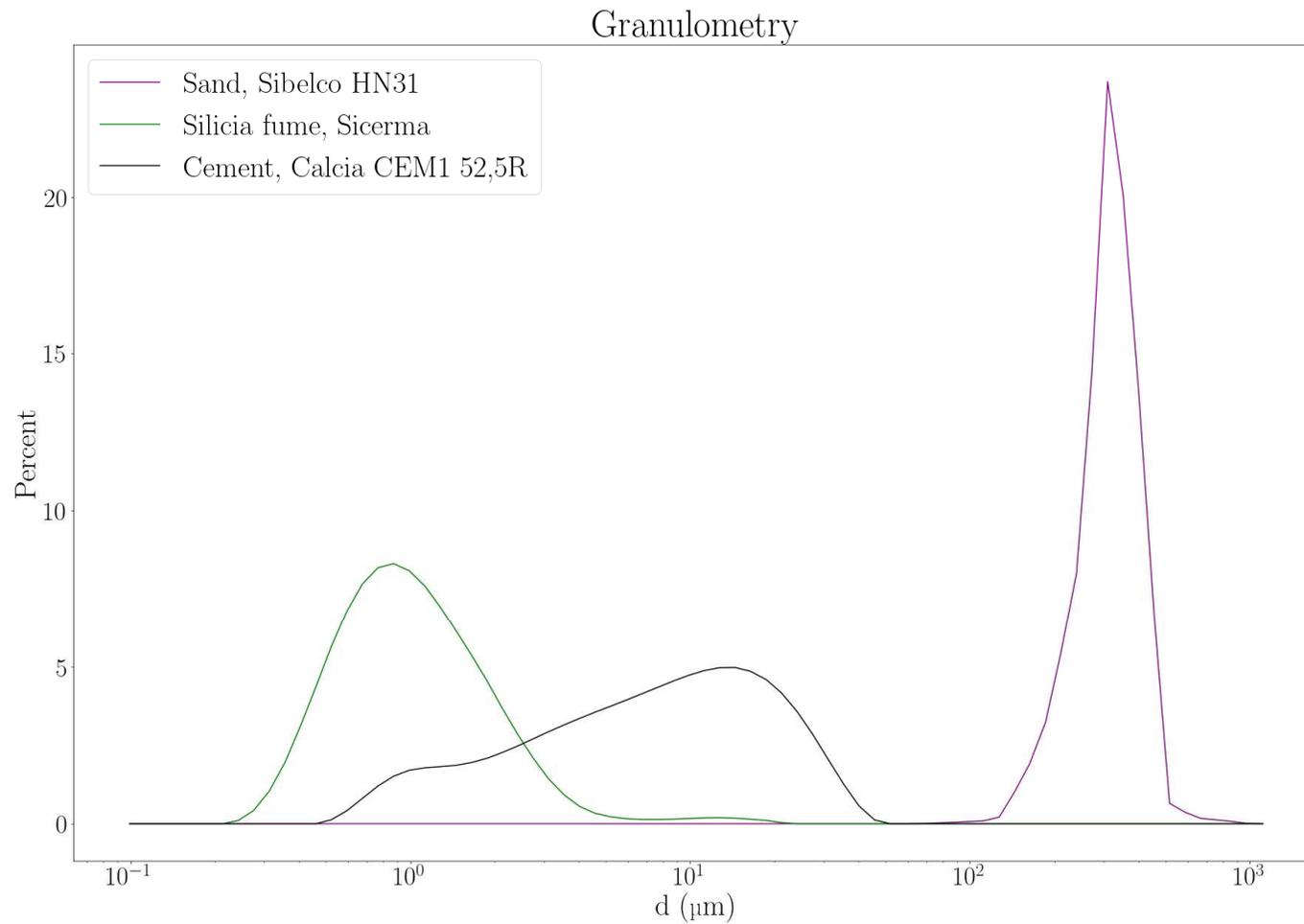


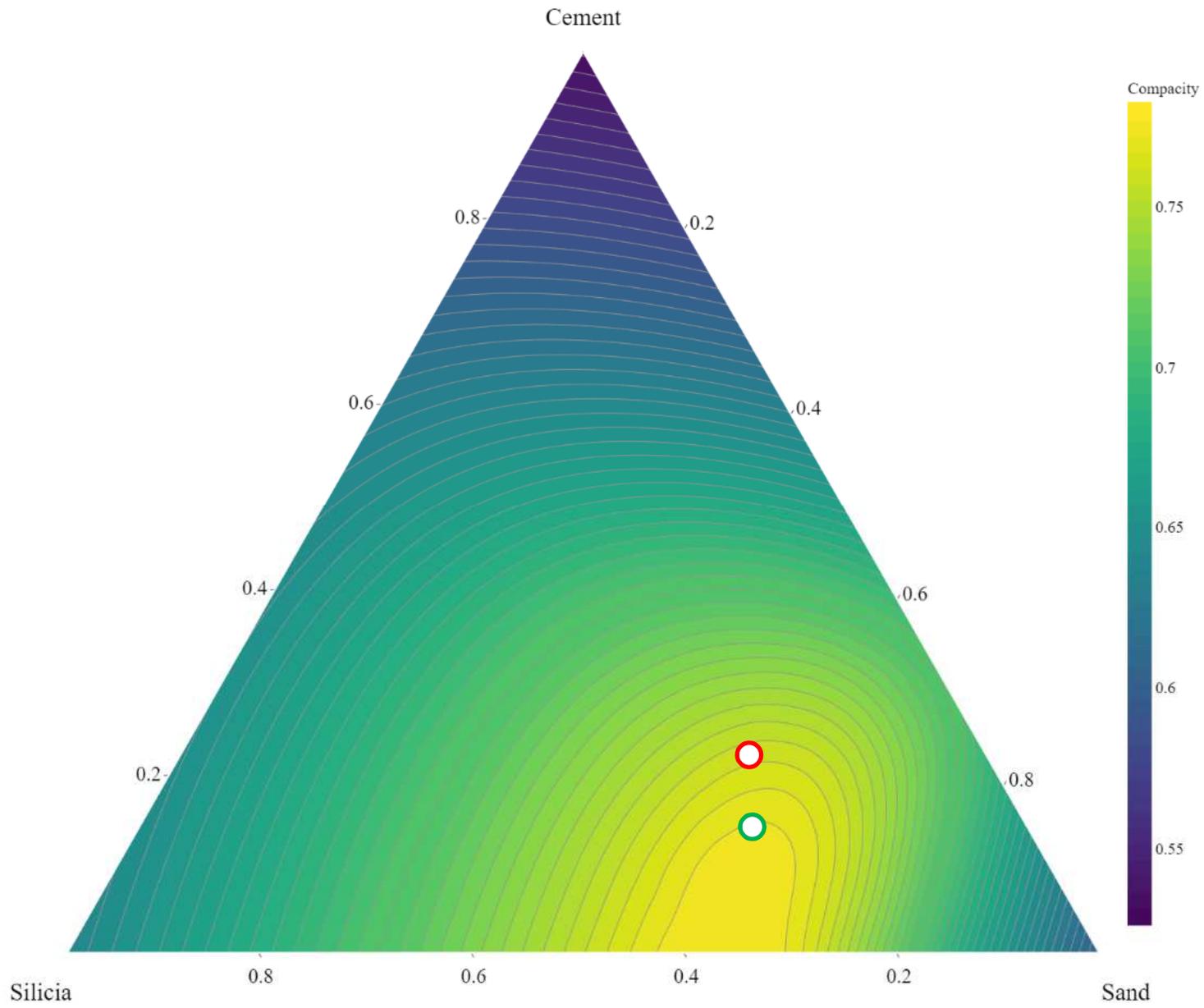
Evolution de la porosité minimale en fonction du ratio entre plus gros et plus petit granulat (Van Damme, Caquot)

de Larrard, F., & Sedran, T. (1994). Optimization of ultra-high-performance concrete by the use of a packing model. *Cement and concrete research*, 24(6), 997-1009.

Van Damme, H. (2018). Concrete material science: Past, present, and future innovations. *Cement and Concrete Research*, 112, 5-24.

Un exemple de formulation





- Formulation étudiée, $f_{ck}=110\text{MPa}$
- Dosage en ciment « classique »

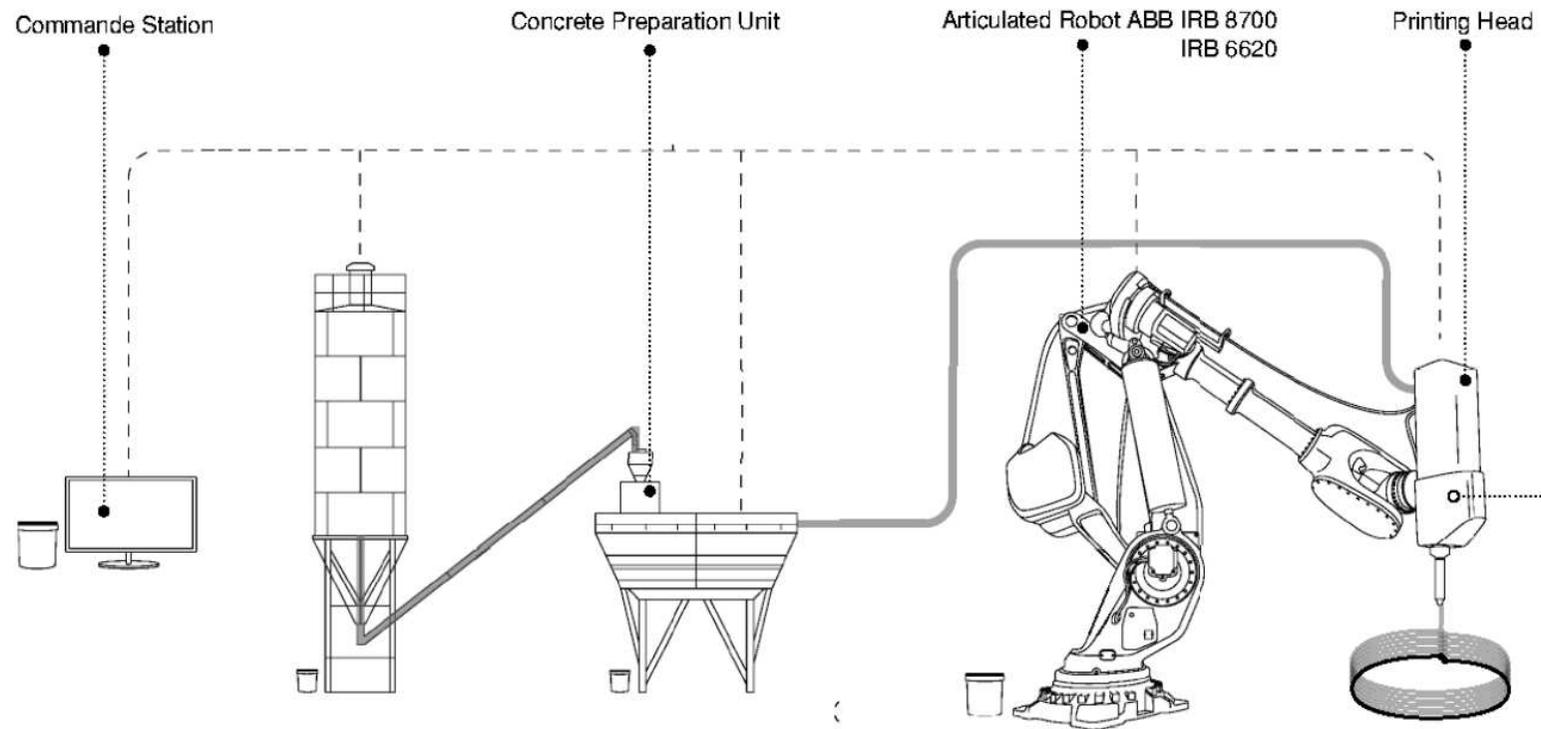
Une première conclusion

- Beaucoup de paramètres procédé et matériaux
- Des couplages entre ces paramètres...
- Des possibilités d'applications très diverses, allant du très léger au très lourd...
- Un modèle générique d'analyse du cycle de vie est indispensable

L 'évaluation environnementale de l'impression 3D

Basé sur le travail de K. Kuzmenko et C. Roux

Evaluation environnementale - ACV



Source : XTree

Evaluation environnementale - ACV

- Objectif :
 - Modèle de référence -> impression 3D de béton par extrusion
 - Domaine de pertinence environnementale de la technologie
- Evaluation environnementale du procédé complet, sur l'ensemble du cycle de vie

Robot	Unité de préparation du béton	Station de commande	Béton
<ul style="list-style-type: none">• corps• tête d'impression• électricité• fin de vie du robot	<ul style="list-style-type: none">• malaxage,• pompage,• électricité• etc.	<ul style="list-style-type: none">• armoire électronique,• poste informatique,• électricité• Etc.	<ul style="list-style-type: none">• formule spécifique au procédé

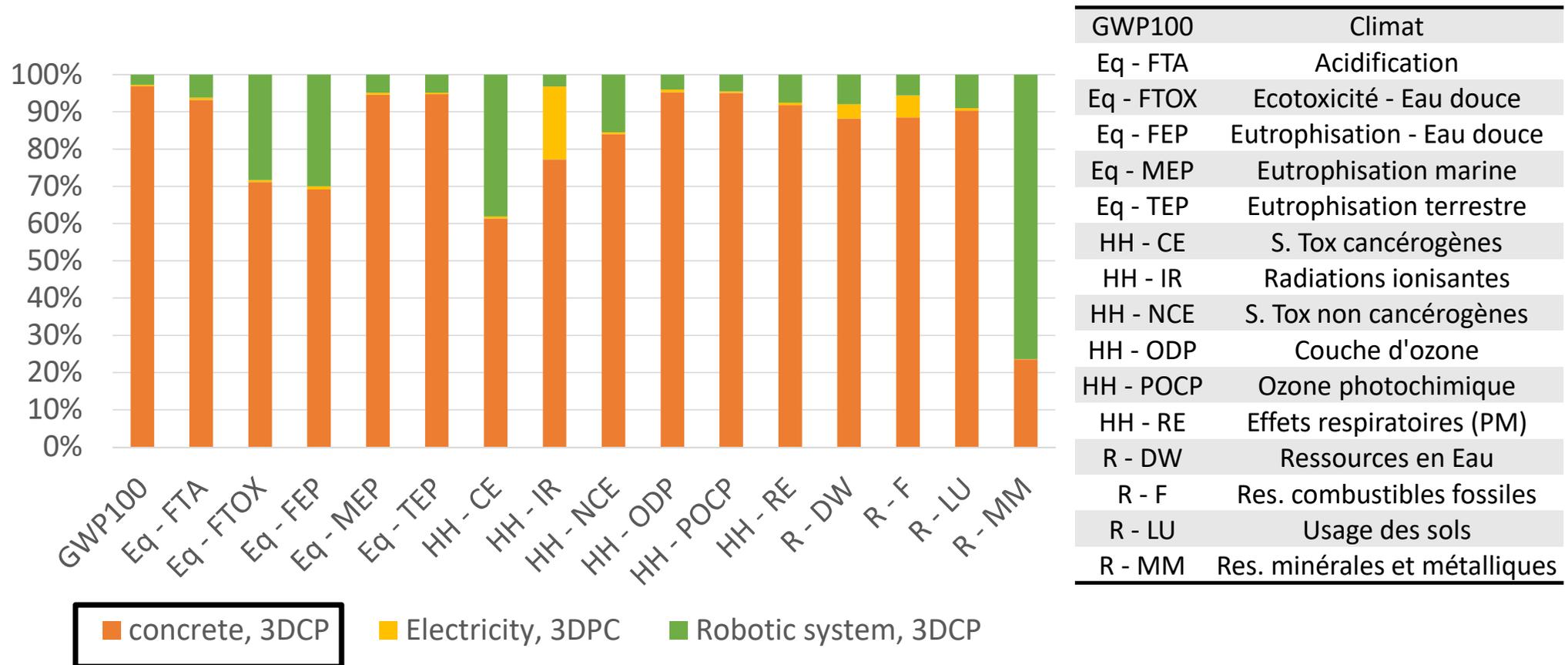
- Evaluation multi-critère: méthode EF3.0 (16 indicateurs)
- Unité fonctionnelle : imprimer un filament de 1m de long / imprimer 1 m³ de béton 3D

Evaluation environnementale - ACV

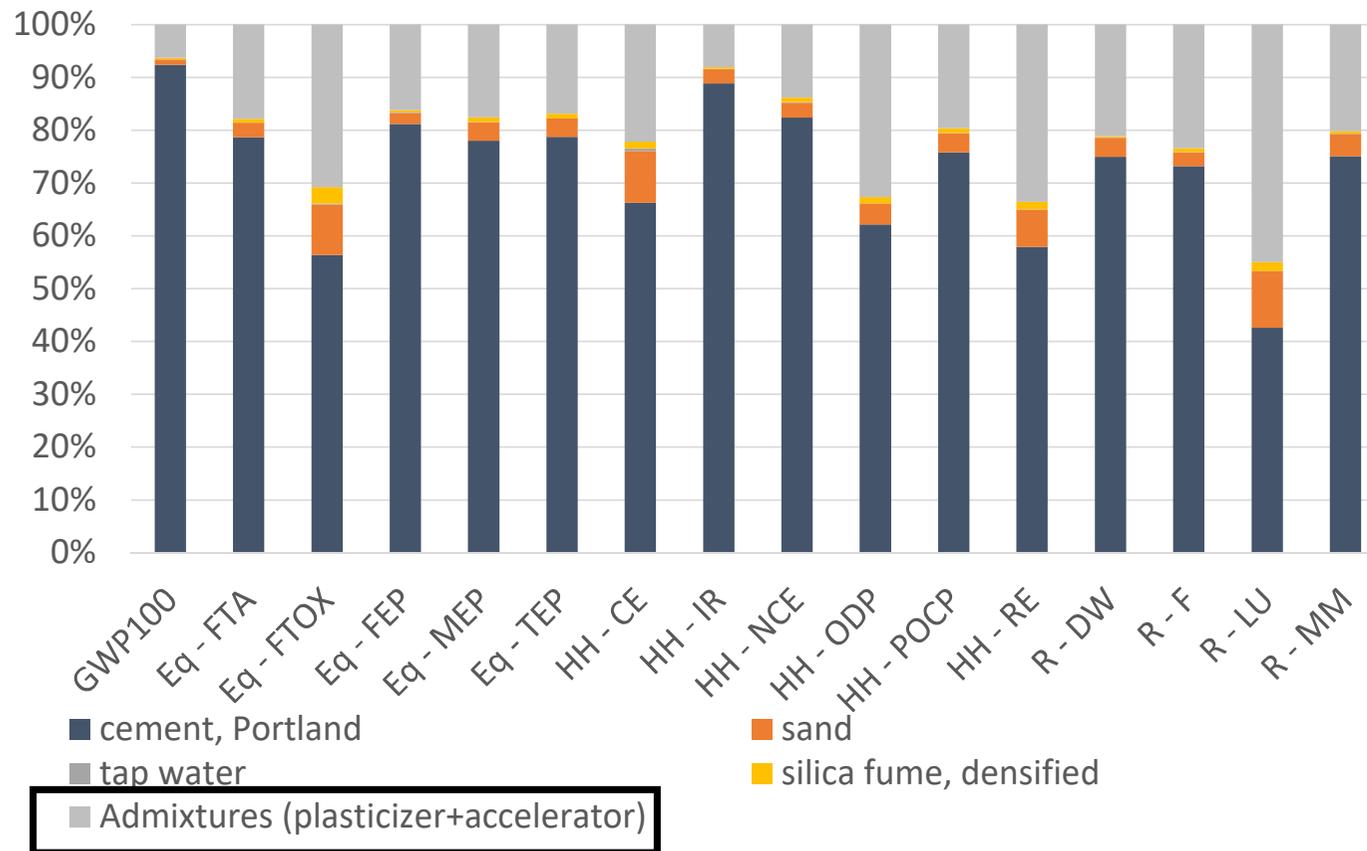
- Hypothèses
 - Formulation du béton spécifique
 - Section de référence : 4cm^2 (c'est petit)
 - Vitesse d'impression : $200\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$
 - Consommation électricité : 4kW (valeur conservatrice)
 - Durée de vie du robot : $30\ 000\text{ h}$ ($12\ 000 - 47\ 000$)
 - Pas de fin de vie prise en compte pour le matériau béton

Formulation du béton 3D	Qté (kg/m ³)
Sable	1033
Cement CEM1	540
Fumée de silice	480
Eau	212
Plastifiant	8.8
Accélérateur	6

Analyse de contribution



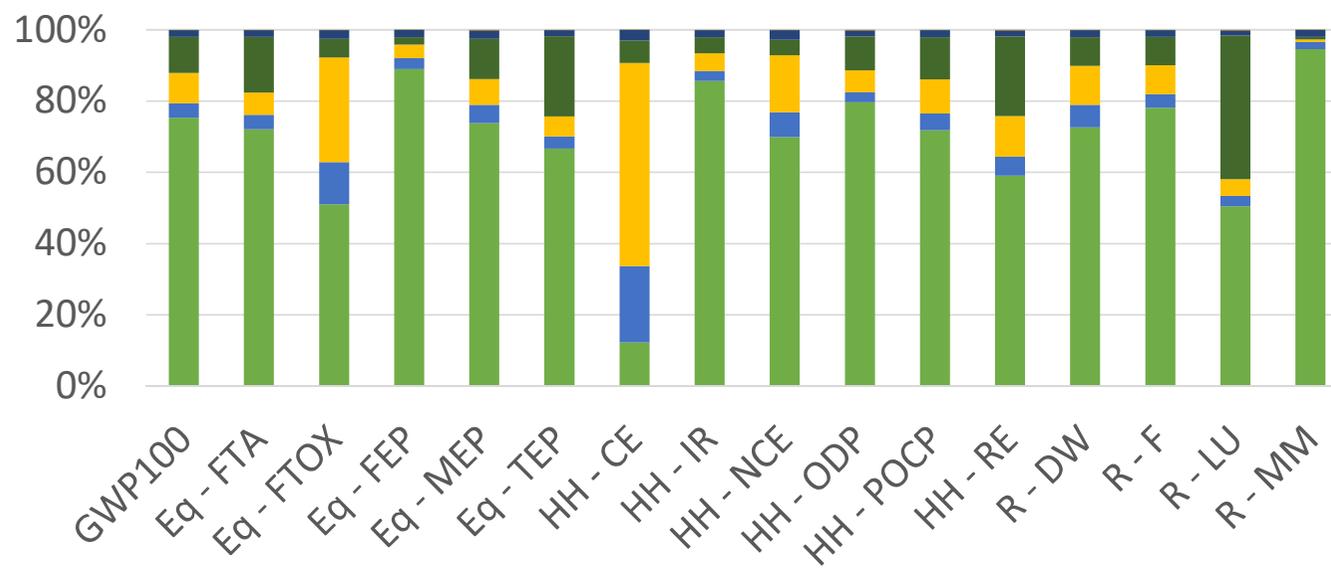
Analyse de contribution : béton 3D



GWP100	Climat
Eq - FTA	Acidification
Eq - FTOX	Ecotoxicité - Eau douce
Eq - FEP	Eutrophisation - Eau douce
Eq - MEP	Eutrophisation marine
Eq - TEP	Eutrophisation terrestre
HH - CE	S. Tox cancérogènes
HH - IR	Radiations ionisantes
HH - NCE	S. Tox non cancérogènes
HH - ODP	Couche d'ozone
HH - POCP	Ozone photochimique
HH - RE	Effets respiratoires (PM)
R - DW	Ressources en Eau
R - F	Res. combustibles fossiles
R - LU	Usage des sols
R - MM	Res. minérales et métalliques

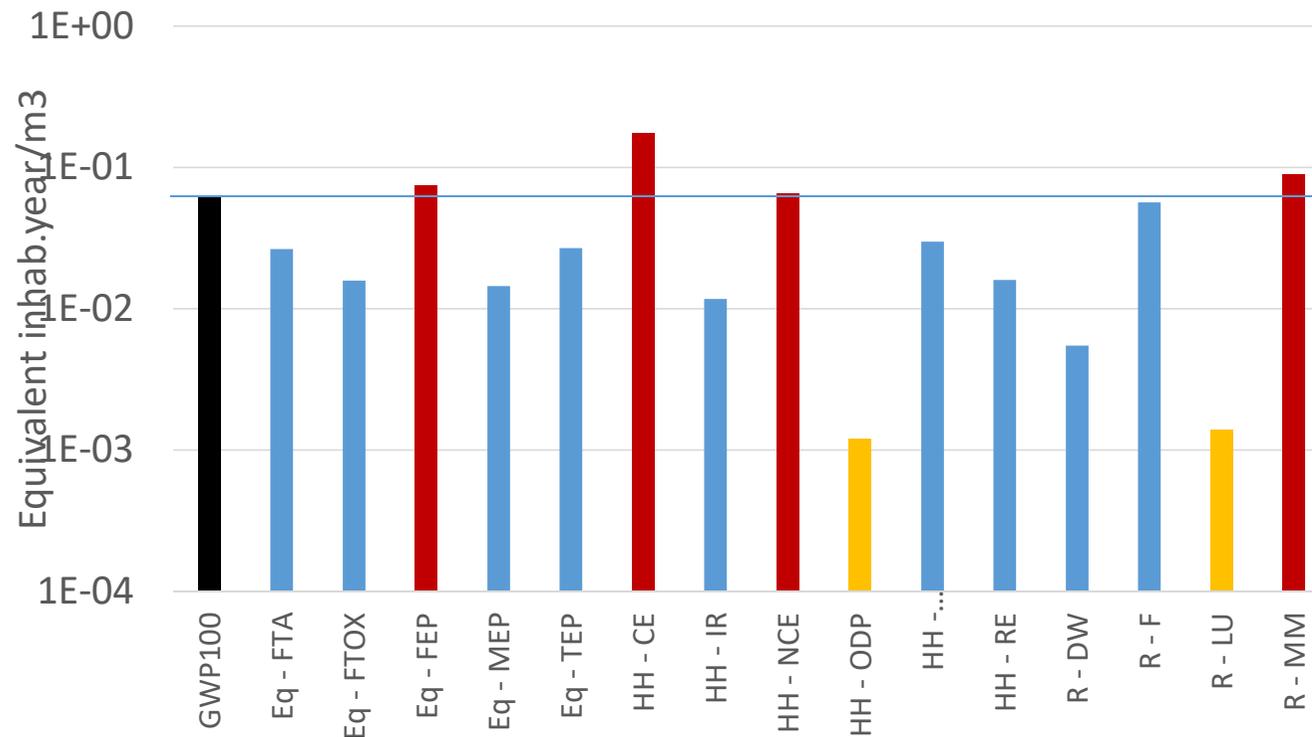
Plastifiant : polyméamine sulfonate - Accélérateur : nitrate de calcium

Analyse de contribution : système robotique



GWP100	Climat
Eq - FTA	Acidification
Eq - FTOX	Ecotoxicité - Eau douce
Eq - FEP	Eutrophisation - Eau douce
Eq - MEP	Eutrophisation marine
Eq - TEP	Eutrophisation terrestre
HH - CE	S. Tox cancérogènes
HH - IR	Radiations ionisantes
HH - NCE	S. Tox non cancérogènes
HH - ODP	Couche d'ozone
HH - POCP	Ozone photochimique
HH - RE	Effets respiratoires (PM)
R - DW	Ressources en Eau
R - F	Res. combustibles fossiles
R - LU	Usage des sols
R - MM	Res. minérales et métalliques

Résultats normalisés



GWP100	Climat
Eq - FTA	Acidification
Eq - FTOX	Ecotoxicité - Eau douce
Eq - FEP	Eutrophisation - Eau douce
Eq - MEP	Eutrophisation marine
Eq - TEP	Eutrophisation terrestre
HH - CE	S. Tox cancérogènes
HH - IR	Radiations ionisantes
HH - NCE	S. Tox non cancérogènes
HH - ODP	Couche d'ozone
HH - POCP	Ozone photochimique
HH - RE	Effets respiratoires (PM)
R - DW	Ressources en Eau
R - F	Res. combustibles fossiles
R - LU	Usage des sols
R - MM	Res. minérales et métalliques

Conclusion

- Proposition d'un cadre générique mais à consolider (évaluation d'autres systèmes proches)
- Ne pas regarder que le changement climatique
- Approfondir les adjuvants béton
- Domaine de pertinence environnementale de la technologie encore à définir -> lien avec les économies de matières possibles et les équivalents fonctionnels conventionnels

Références

- Kuzmenko K (2021) Performance environnementale dans la construction : Cas d'étude de l'impression 3D béton. Modélisation et caractérisation des Impacts. Application aux structures Architecturées. Thèse. Laboratoire Navier
- Kuzmenko K, Ducoulombier N, Feraille A, Roussel N (2022) Environmental impact of extrusion-based additive manufacturing - generic model, power measurements and influence of printing resolution. *Cem Concr Res*
- Kuzmenko K, Gaudillière N, Feraille A, et al (2020a) Assessing the Environmental Viability of 3D Concrete Printing Technology. In: Gengnagel C, Baverel O, Burry J, et al. (eds) *Impact: Design With All Senses*. Springer International Publishing, Cham, pp 517–528
- Kuzmenko K, Roux C, Feraille A, Baverel O (2020b) Assessing environmental impact of digital fabrication and reuse of constructive systems. *Structures* S2352012420302472. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.05.035>

Références

- Duballet, R., Baverel, O., & Dirrenberger, J. (2019, April). Space truss masonry walls with robotic mortar extrusion. In *Structures* (Vol. 18, pp. 41-47). Elsevier.
- Duballet, R., Mesnil, R., Ducoulombier, N., Carneau, P., Demont, L., Motamedi, M., ... & Dirrenberger, J. (2020, July). Free deposition printing for space truss structures. In *RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication* (pp. 873-882). Springer, Cham.