

Le béton dans l'ère de la construction durable

Journée d'Etude des Routes et Infrastructures JERI 2022

Elise Berodier

Freyssinet SA, Moudon

Sustainable technology

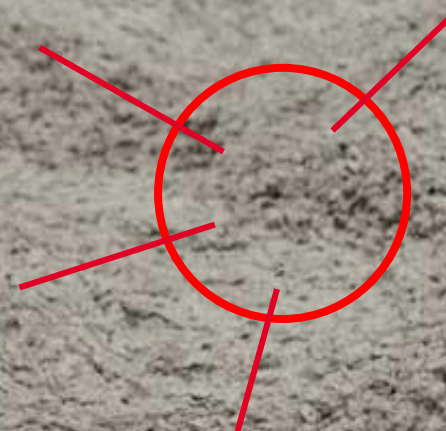


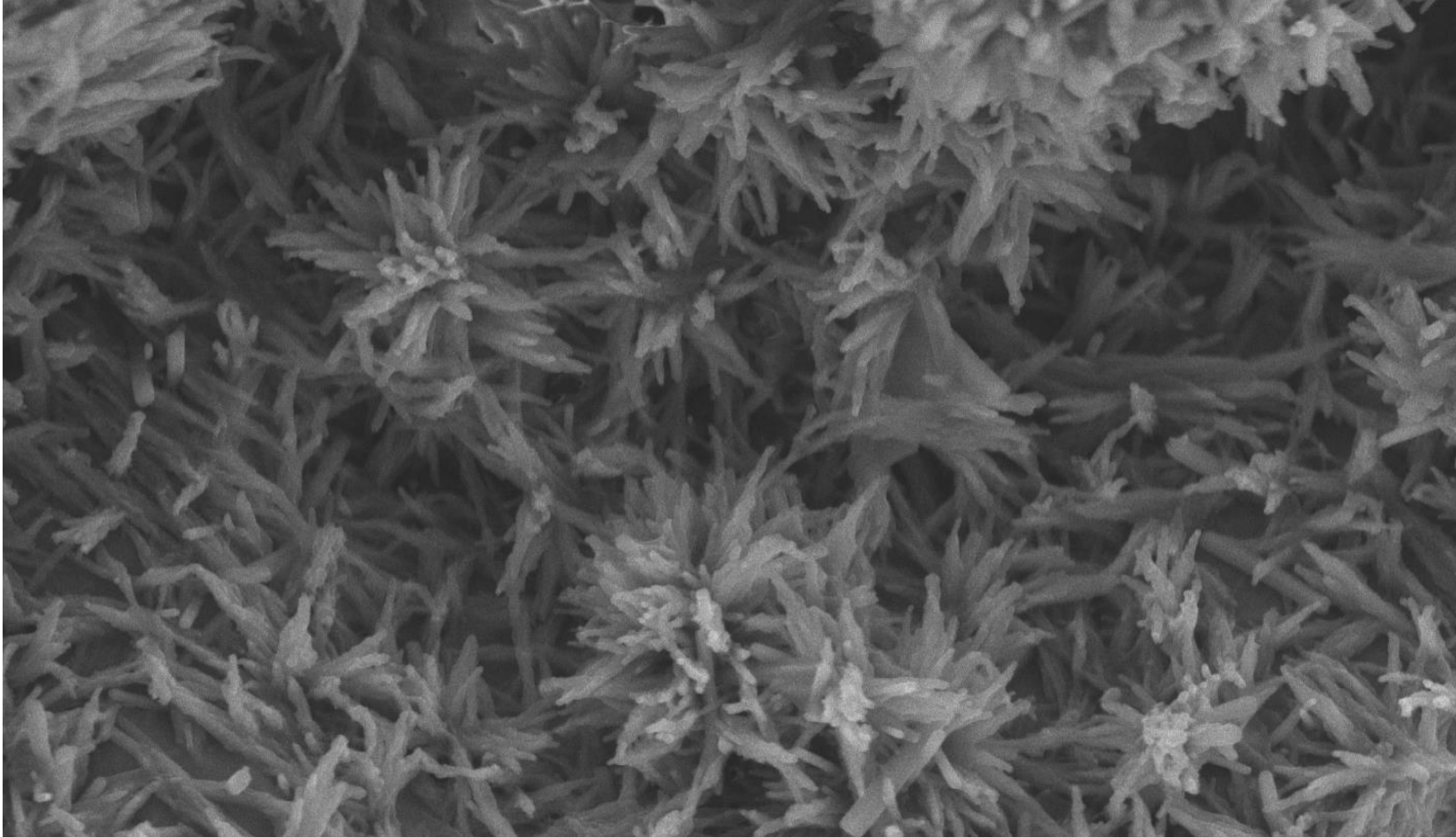
10% ciment

2% adjuvant

6% eau

82% granulats
+sable

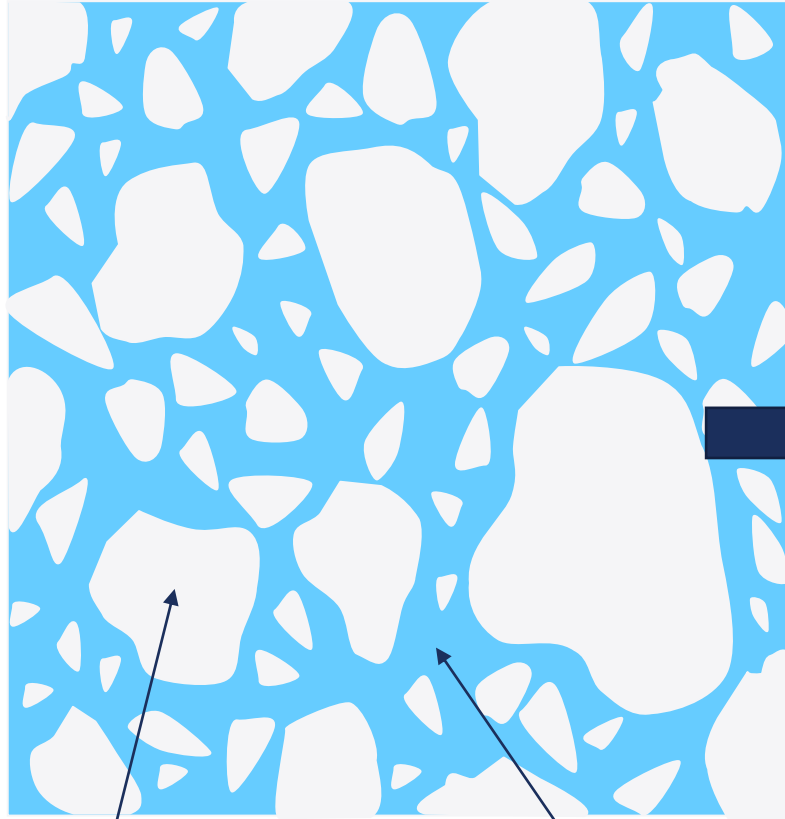




« Fleurs de ciment »

Source: E. Berodier, Thèse EPFL 2015

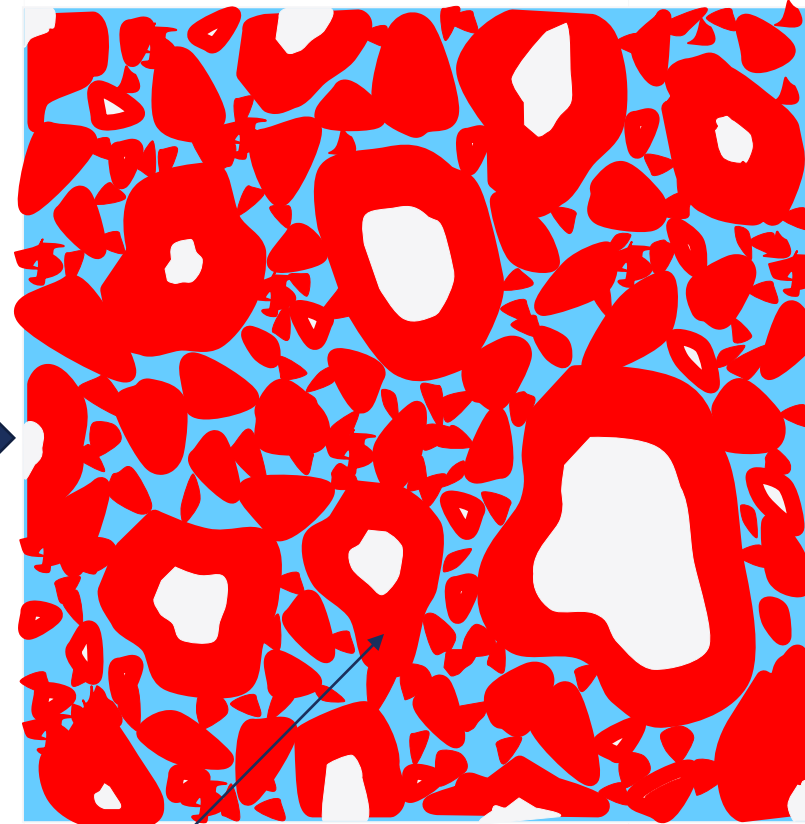
Etat Liquide



Grain de ciment

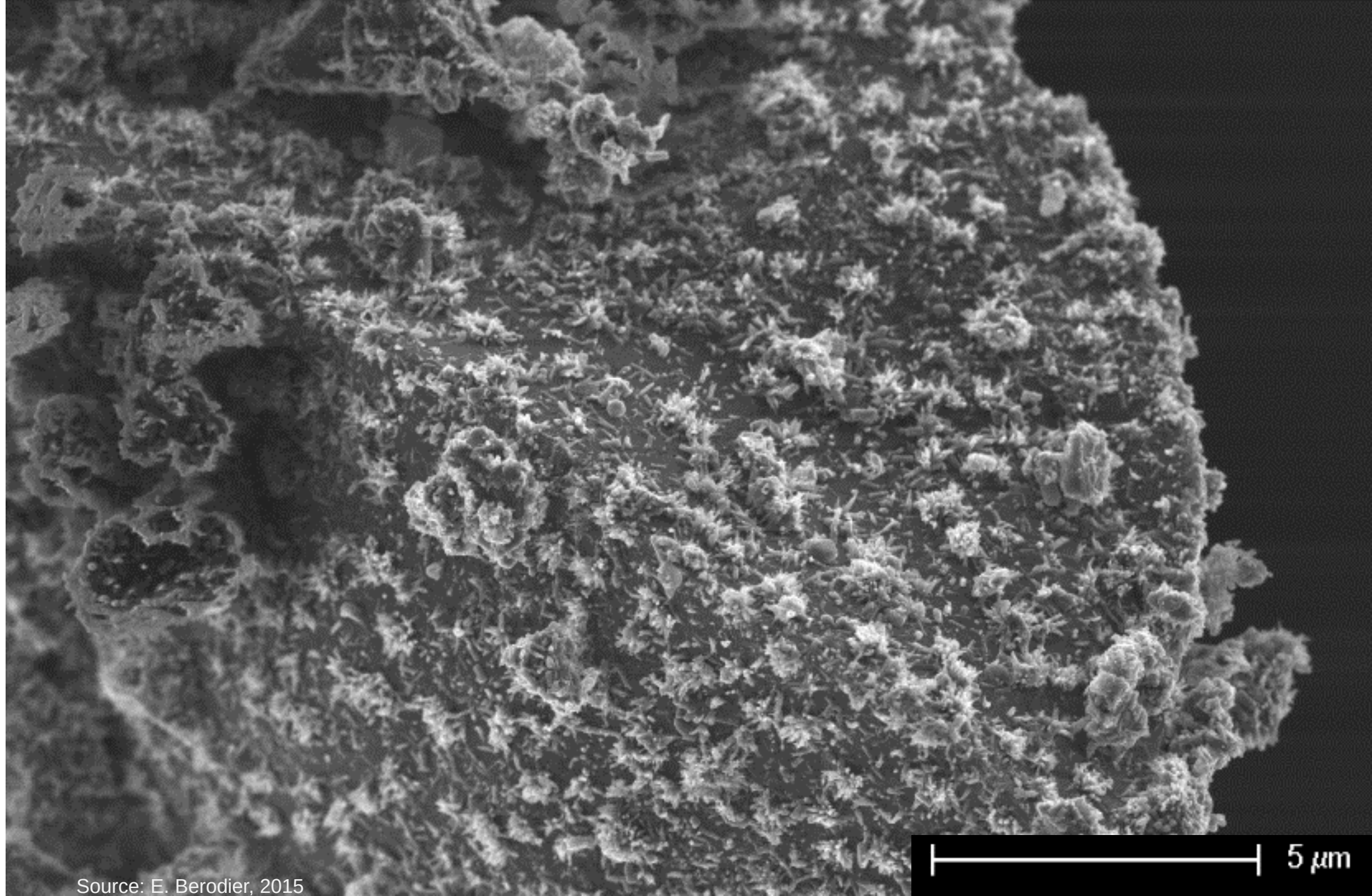
eau

Etat Solide



Hydrates

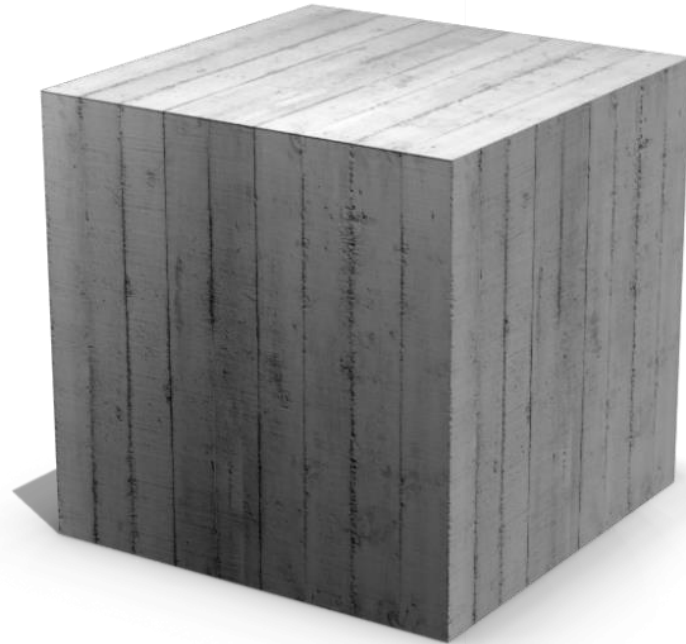
«Fleurs de ciment» Nom scientifique : C-S-H



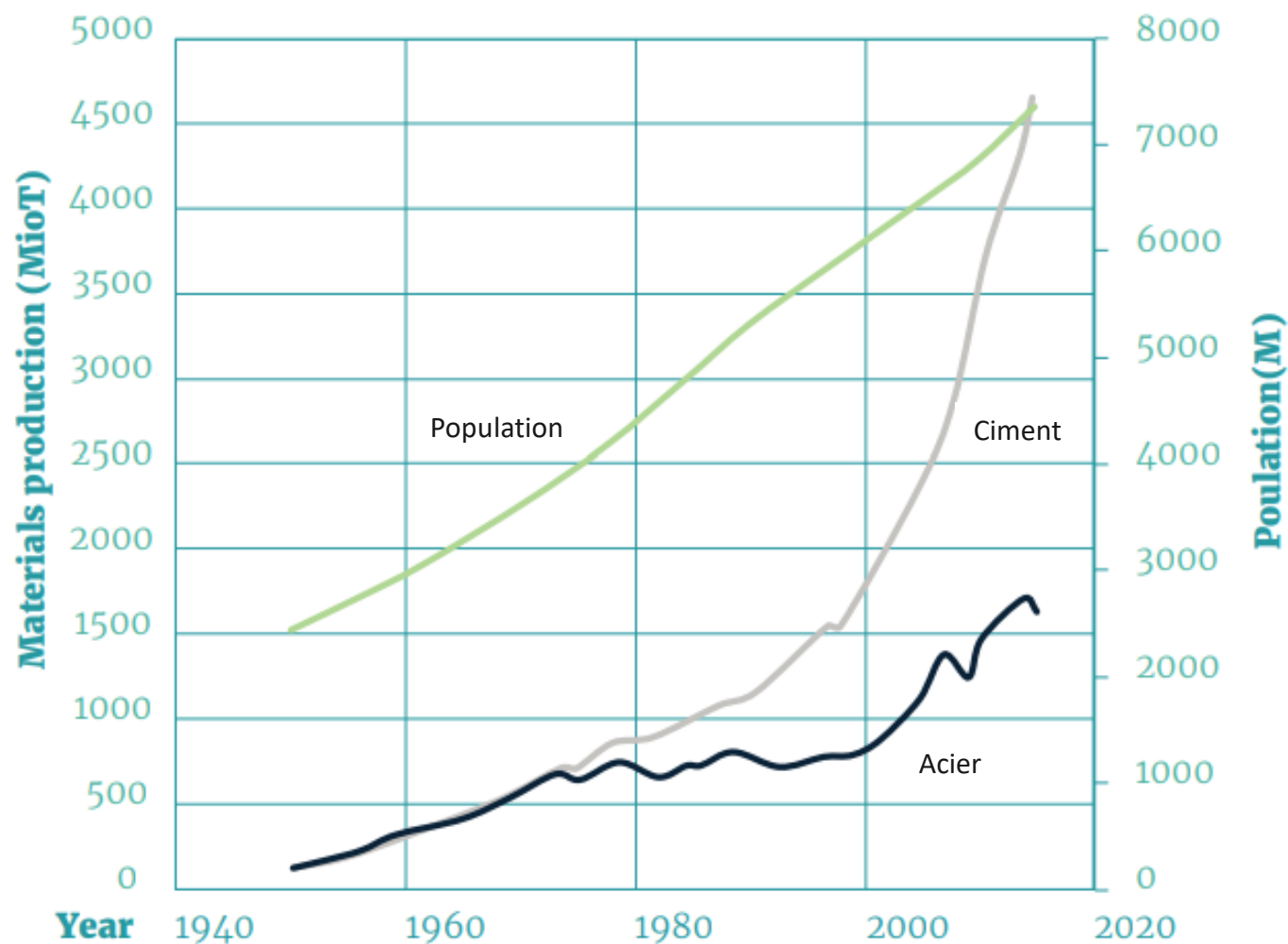
5 μm

Béton et CO₂

1m³ de béton = 240-320kg CO₂ eq/m³



ECHELLE MONDIALE



SUISSE



- 63 millions de matériaux dont **40 millions** de tonnes de béton produites par an
- Tendance à l'augmentation
- >50% des constructions suisses contiennent du béton*

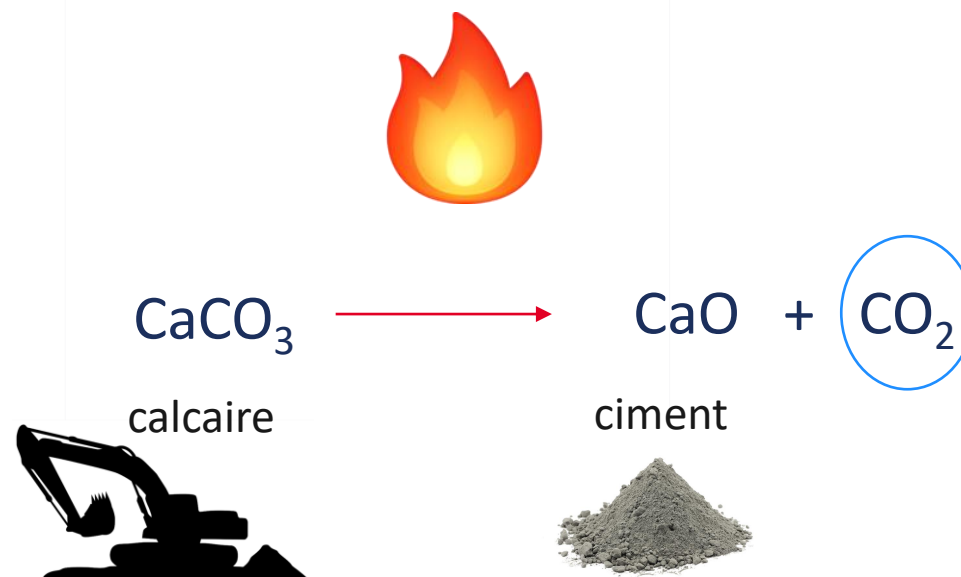
*Étude sur les matériaux de construction utilisés en Suisse SSE

D'où vient le CO₂ ?



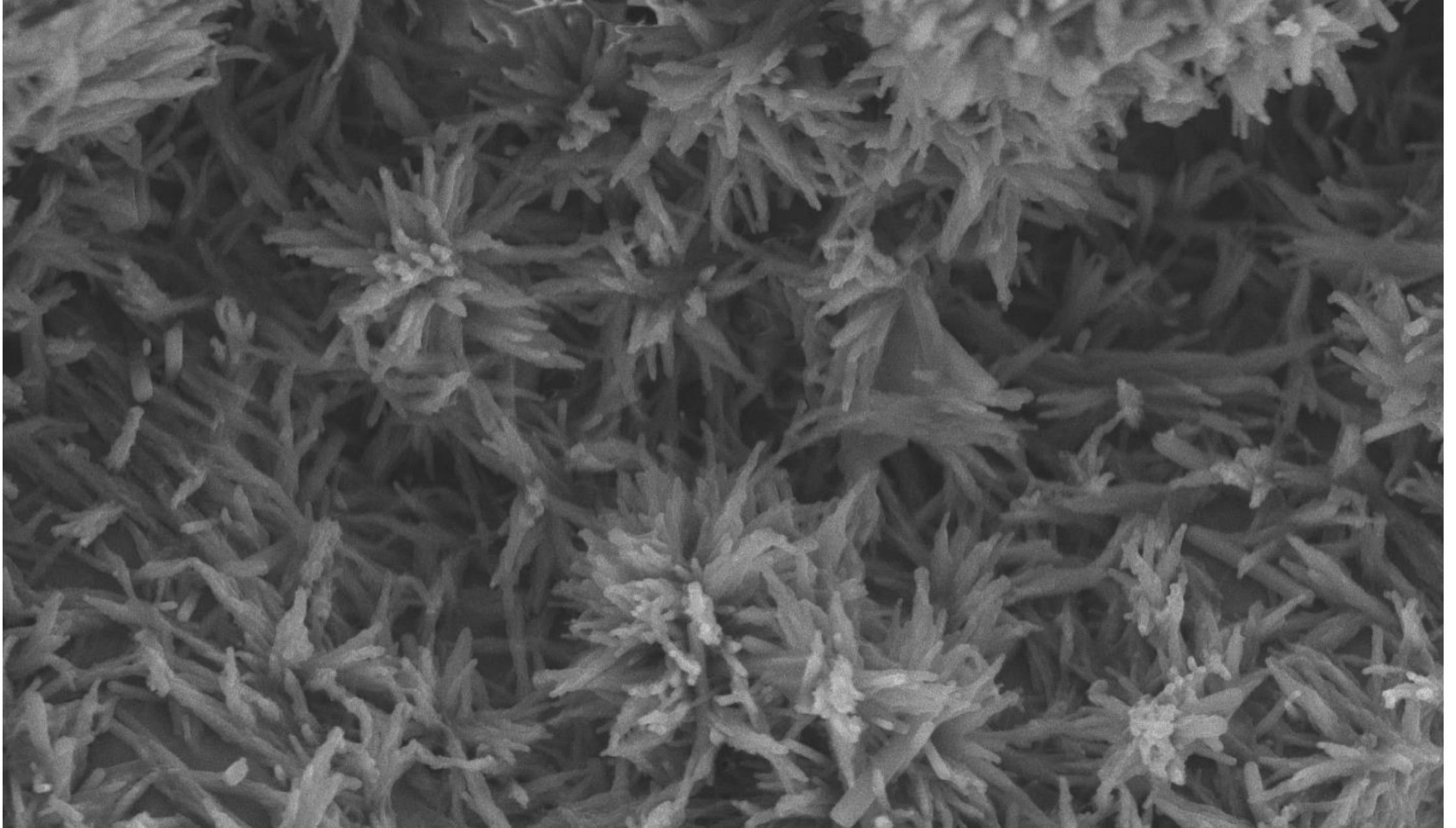
Ciment
(clinker)

65% Décomposition du Calcaire CaCO₃



Quels matériaux de remplacement ?





« Fleurs de ciment »

Source: E. Berodier, 2015

Matériaux partiellement substitutifs

Sous-produits d'industries

Laitier de hauts-fourneaux



Cendres Volantes



Produits « naturels »

Filler calcaire



Argiles calcinées



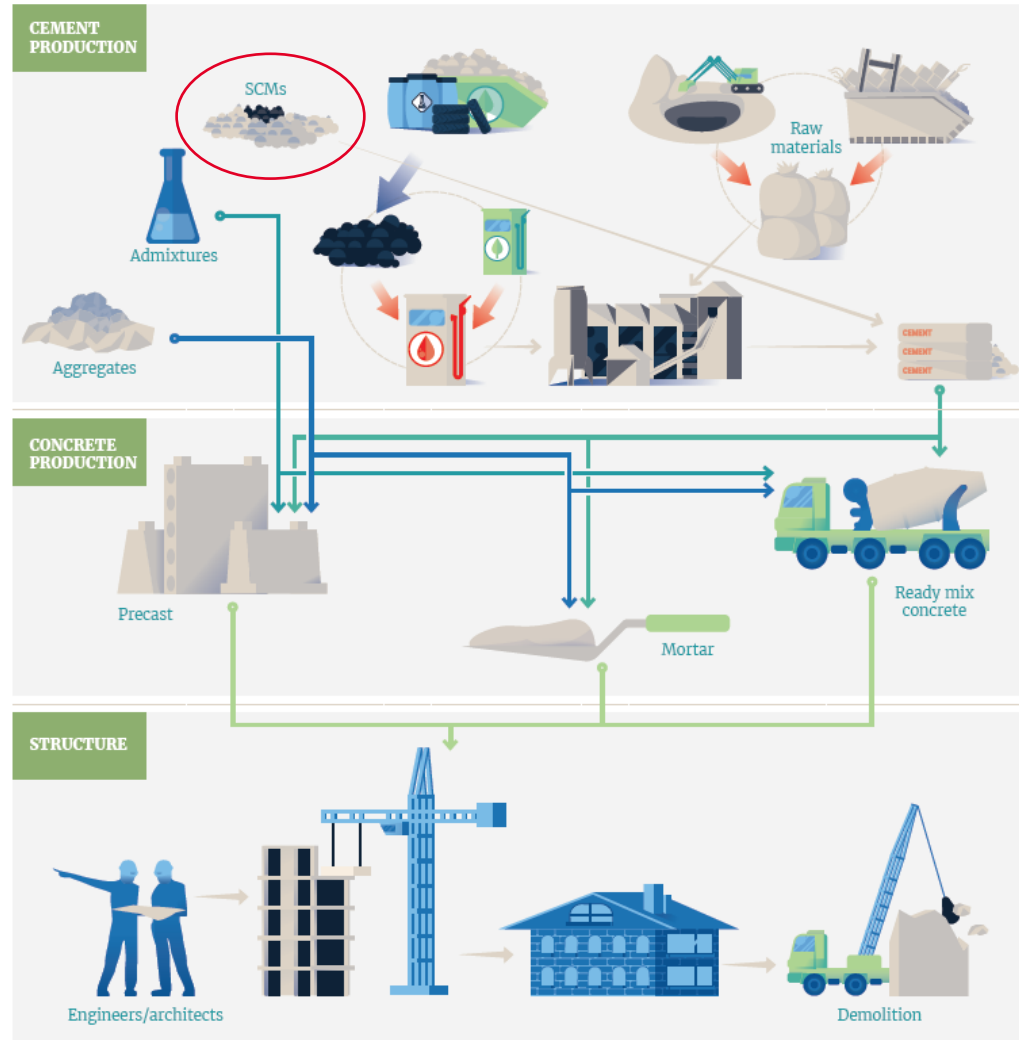
Exemples de ciments avec matériaux de substitution

Types	Notation		Constituants principaux (*)				Constituants secondaires (*)
			Klinker (K)	Laitier de haut fourneau (S)	Cendres volantes (V)	Calcaire (L ou LL)(**)	
I	ciment Portland	CEM I	95-100	—	—	—	0-5
II	ciment Portland aux cendres volantes	CEM II/ A-V	80-94	—	6-20	—	0-5
		CEM II/ B-V	65-79	—	21-35	—	0-5
	ciment Portland au calcaire	CEM II/ A-L ou LL	80-94	—	—	6-20	0-5
	ciment Portland composé	CEM II/ A-M	80-94	← 6-20 →			0-5
		CEM II/ B-M	65-79	← 21-35 →			0-5
	III	ciment de haut fourneau	CEM III/ A	35-64	36-65	—	—
CEM III/ B			20-34	66-80	—	—	0-5
CEM III/ C			5-19	81-95	—	—	0-5
V	ciment composé	CEM V/ A	40-64	18-30	18-30	—	0-5

(*) Les valeurs indiquées sont des pourcentages en masse et se réfèrent à la somme des constituants principaux et secondaires.

(**) L : calcaire avec une teneur totale en carbone organique inférieure à 0,50 % en masse.
LL : calcaire avec une teneur totale en carbone organique inférieure à 0,20 % en masse.

Une chaine complète d'acteurs



- Adjuvants
- LC3 ciment
- Granulats recyclés
- Granulats recyclés + carbonatés
- Combustion de déchets
- ...

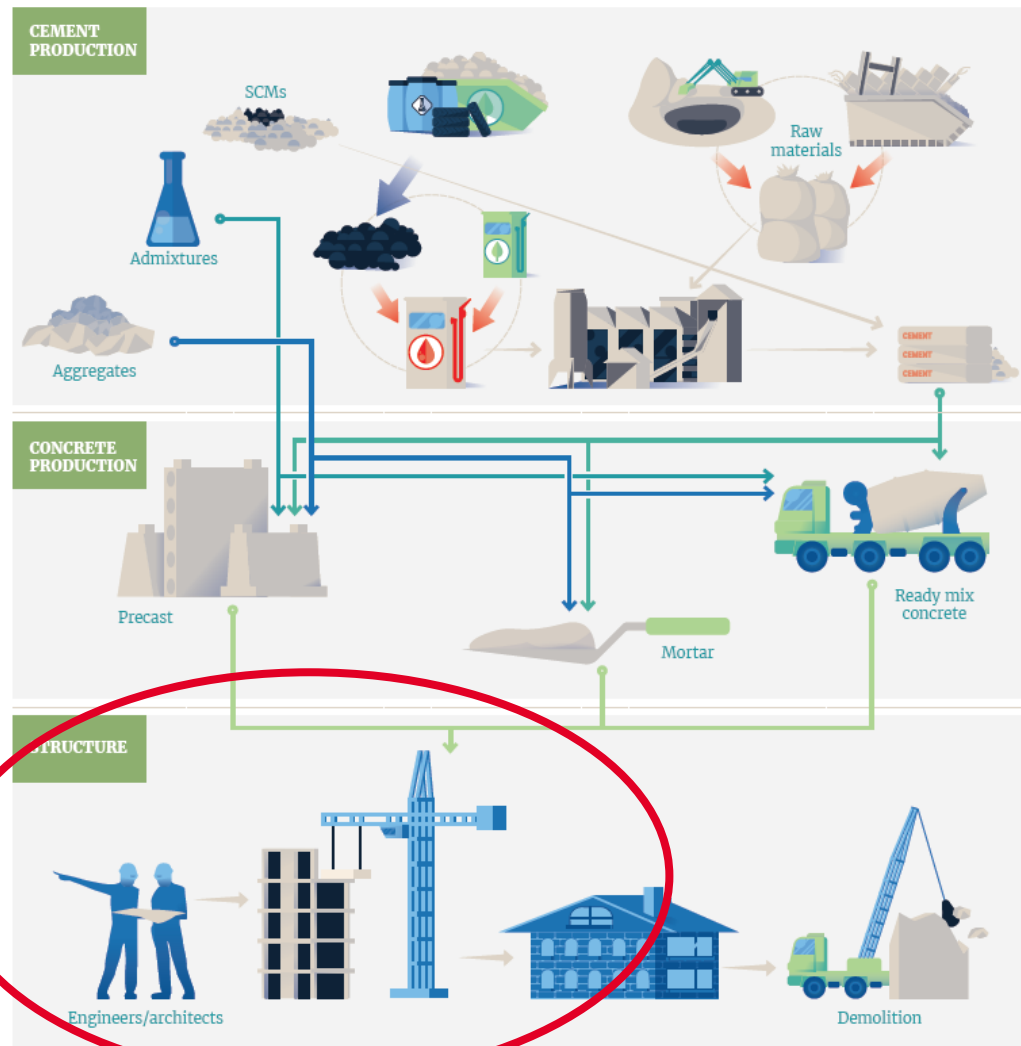
Schéma:
A sustainable future for the european cement and concrete industry

Impact environnemental d'un matériau

$\text{CO}_2 / \text{kg de matériau} \times \text{Quantité de matériau}$

Durée de vie

Une chaîne complète d'acteurs



Ingénieurs,
Architectes,
Entreprises

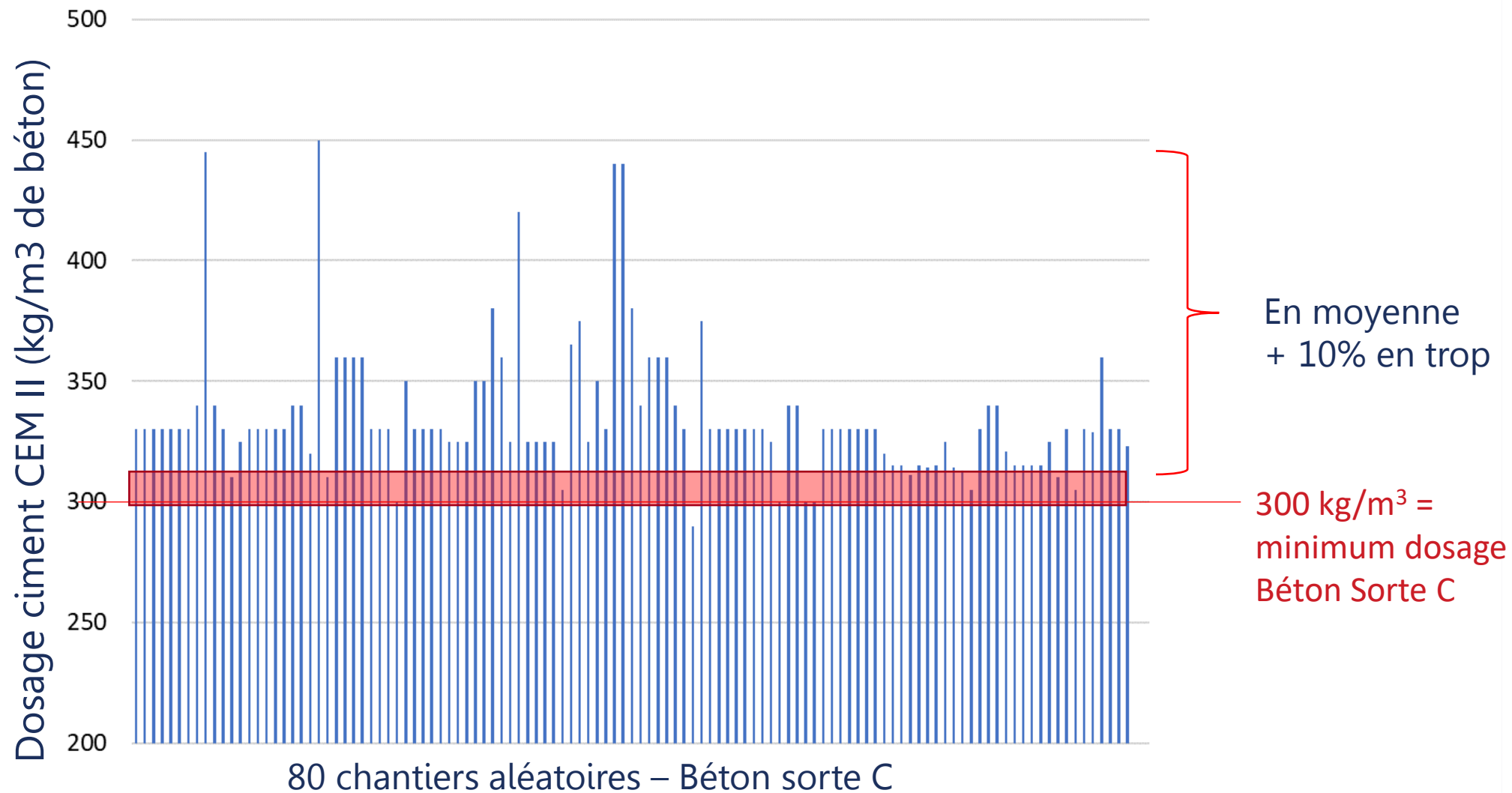
From:
A sustainable future for the european cement and concrete industry

Les types de béton

Désignation	Sorte 0 ("zéro")	Sorte A ¹⁾	Sorte B	Sorte C	Sorte D 2, 3) (T1)	Sorte E ³⁾ (T2)	Sorte F ⁴⁾ (T3)	Sorte G ⁴⁾ (T4)
Exigences de base								
Classe de résistance à la compression	C12/15	C20/25	C25/30	C30/37	C25/30	C25/30	C30/37	C30/37
Classe(s) d'exposition Combinaison des classes indiquées)	X0(CH)	XC2(CH)	XC3(CH)	XC4(CH) XF1(CH)	XC4(CH) XD1(CH) XF2(CH)	XC4(CH) XD1(CH) XF4(CH)	XC4(CH) XD3(CH) XF2(CH)	XC4(CH) XD3(CH) XF4(CH)
Dimension maximale nominale du granulat	D _{max} 32	D _{max} 32	D _{max} 32	D _{max} 32	D _{max} 32	D _{max} 32	D _{max} 32	D _{max} 32
Classe de teneur en chlorures ⁵⁾	Cl 0,10	Cl 0,10	Cl 0,10	Cl 0,10	Cl 0,10	Cl 0,10	Cl 0,10	Cl 0,10
Classe de consistance ⁶⁾	C3	C3	C3	C3	C3	C3	C3	C3
Exigences supplémentaires pour les classes d'exposition XF2 à XF4								
Résistance au gel/dégel en présence de sels de déverglaçage	néant	néant	néant	néant	moyenne	élevée	moyenne	élevée
Exigences supplémentaires (à spécifier selon l'objet)								
Résistance à la RAG	selon NA, chiffre 5.3.4.6							
Résistance aux sulfates	néant	néant	néant	selon NA, chiffre 5.3.4.9 et 5.3.4.10				
Exigences à la composition et aux essais								
Rapport E/C resp. rapport E/C _{eq} maximal [-]	-	0,65	0,60	0,50	0,50	0,50	0,45	0,45
Dosage min. en ciment (kg/m ³) ^{a)}	-	280	280	300	300	300	320	320
Essais de durabilité	aucun	aucun	b) RCarb	RCarb	RCarb, GDS	RCarb, GDS	RCI-, GDS	RCI-, GDS
Autres exigences	SN EN 12 620:2002 contient les exigences relatives aux granulats							

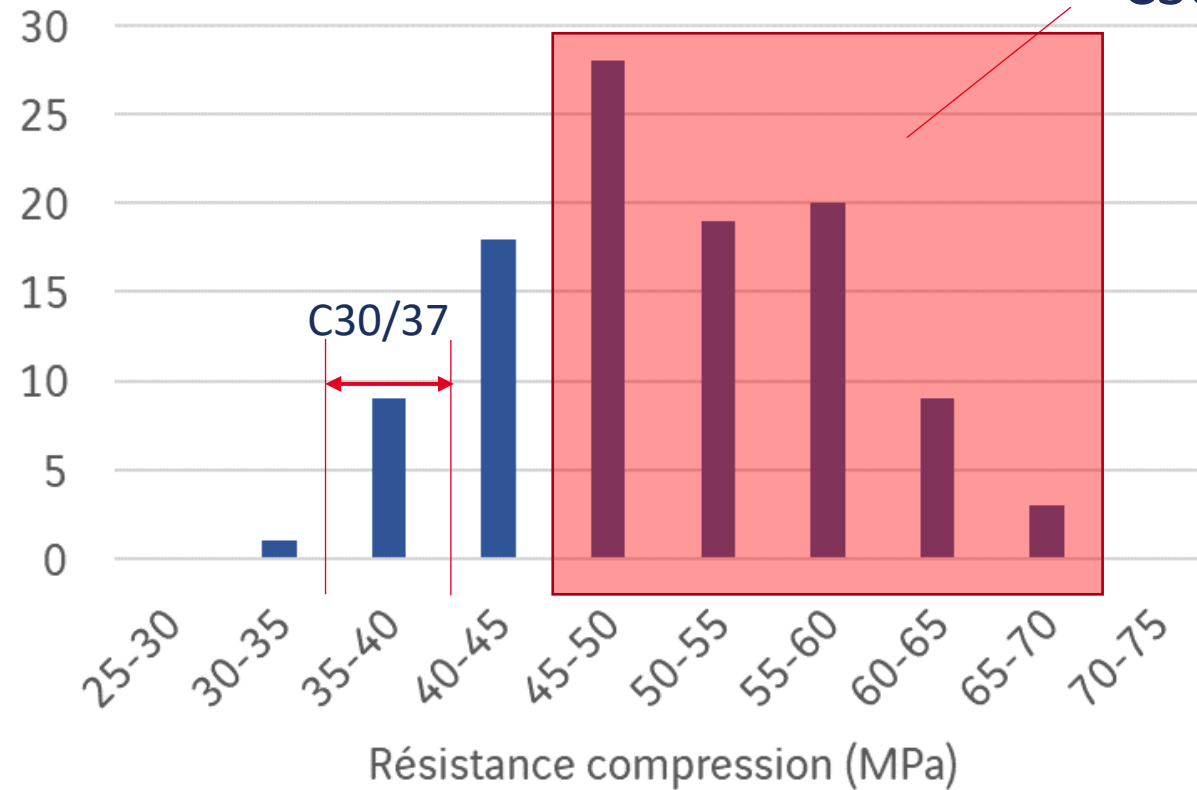
- 1) La sorte de béton A couvre aussi les exigences de la classe d'exposition XC1(CH).
 - 2) La sorte de béton D couvre aussi les exigences de la classe d'exposition XF3(CH).
 - 3) Les sortes D et E couvrent la classe d'exposition XD2a(CH). Définition voir chiffre 4.1/NA.
 - 4) Les sortes F et G couvrent la classe d'exposition XD2b(CH). Définition voir chiffre 4.1/NA.
 - 5) La classe de teneur en chlorures indiquée convient au béton armé et au béton précontraint.
 - 6) La classe de consistance est indiquée à titre informatif. Elle doit être vérifiée par l'utilisateur du béton, par rapport aux conditions cadres spécifiques à l'objet et à ses exigences (p.ex. procédés de bétonnage) dans la phase de l'offre et adaptée au besoin (voir NA, chiffre 5.3.4.1). Les adaptations éventuelles sont à fixer et à prendre en compte dans l'offre. Note: selon le chiffre 5.4.1 (5), EN 206, les exigences concernant la consistance du béton doivent être définies au moment de la livraison par le producteur de béton à l'utilisateur.
- a) Le dosage minimal en ciment est valable sans prise en compte des additions et pour D_{max} 32 mm.
Pour d'autres D_{max}, adapter le dosage minimal en ciment selon tableau NA.7.
Pour le type de ciment CEM II/B-LL, il faut tenir compte des notes en bas de page sur le tableau NA.1.
- b) La détermination de la perméabilité à l'eau doit être effectuée, au cas où il faut fournir la justification selon NA, chiffre 8.2.3.4.

Aperçu en Suisse: sur-dosage du ciment



Aperçu : Trop de MPa

A-t-on besoin d'autant de résistance pour un C30/37 ?





Le béton ...



Le béton ...



C'est aussi ça !

An aerial photograph of a city, likely Geneva, Switzerland, showing a dense urban area with numerous buildings and green spaces. In the background, a large body of water (Lake Geneva) is visible under a clear sky. The text 'Béton existant' is overlaid on the upper right portion of the image.

Béton existant

SUISSE

- 830 millions de tonnes de béton existant
- 70 % des édifices en Suisse ont été construits en béton armé dans les années 1945-60
- Production de plus de environ 16 mio. tonnes déchets de chantier par année

Une chaine complète d'acteurs

$$\text{CO}_2 / \text{kg de matériau} \quad \times \quad \text{Quantité de matériau}$$

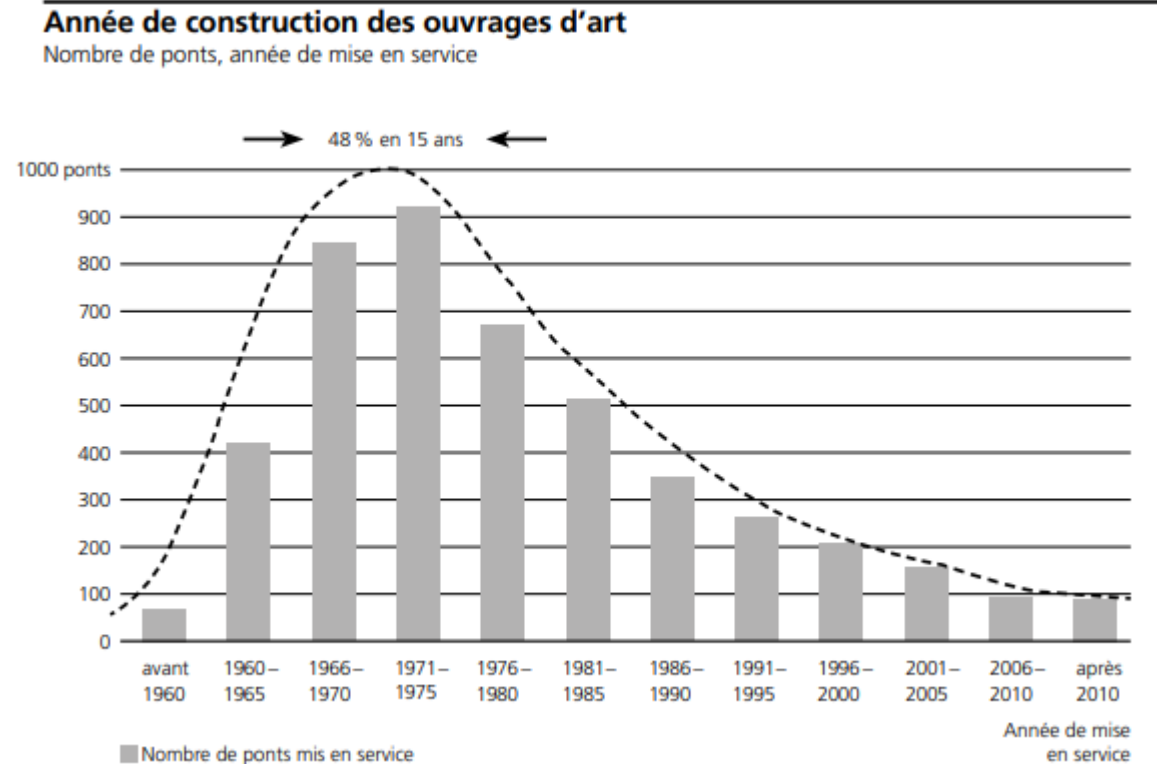
Durée de vie

Béton existant : patrimoine et matière à respecter

Infrastructures

- Ouvrages vieillissants

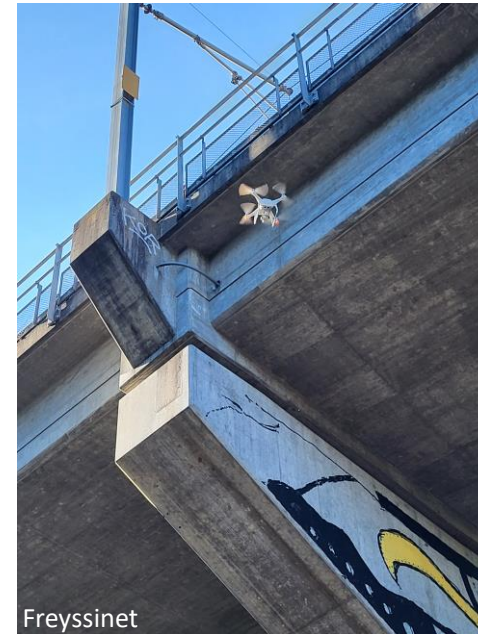
91% > 20ans



Prolonger la vie d'une structure : surveiller, réparer, renforcer

Surveiller

- Inspection régulière globale et des éléments d'ouvrages : appuis, joints de chaussée, éléments béton, étanchéité, ancrage haubans ...
- Changement des éléments si besoin, monitoring..



Nouvelles
technologies facilitent
la surveillance

Prolonger la vie d'une structure :

Réparer

- Expertise nécessaire
- Quelles pathologies du béton?
 - Corrosion des fers d'armatures
 - Réaction Alkali-granulats
 - Attaque sulfatique
 - Gel/dégel
 - Carbonatation
 - Mécaniques/Structurelles
 - Incendie
- Préconisation d'intervention



Protection cathodique



Prolonger la vie d'une structure : surveiller, réparer et renforcer

Renforcer / Améliorer

- Tissu ou lamelles composites en fibre de carbone
- CFUP projeté
- Précontrainte additionnelle
- ...

Renforcement sous voie routière

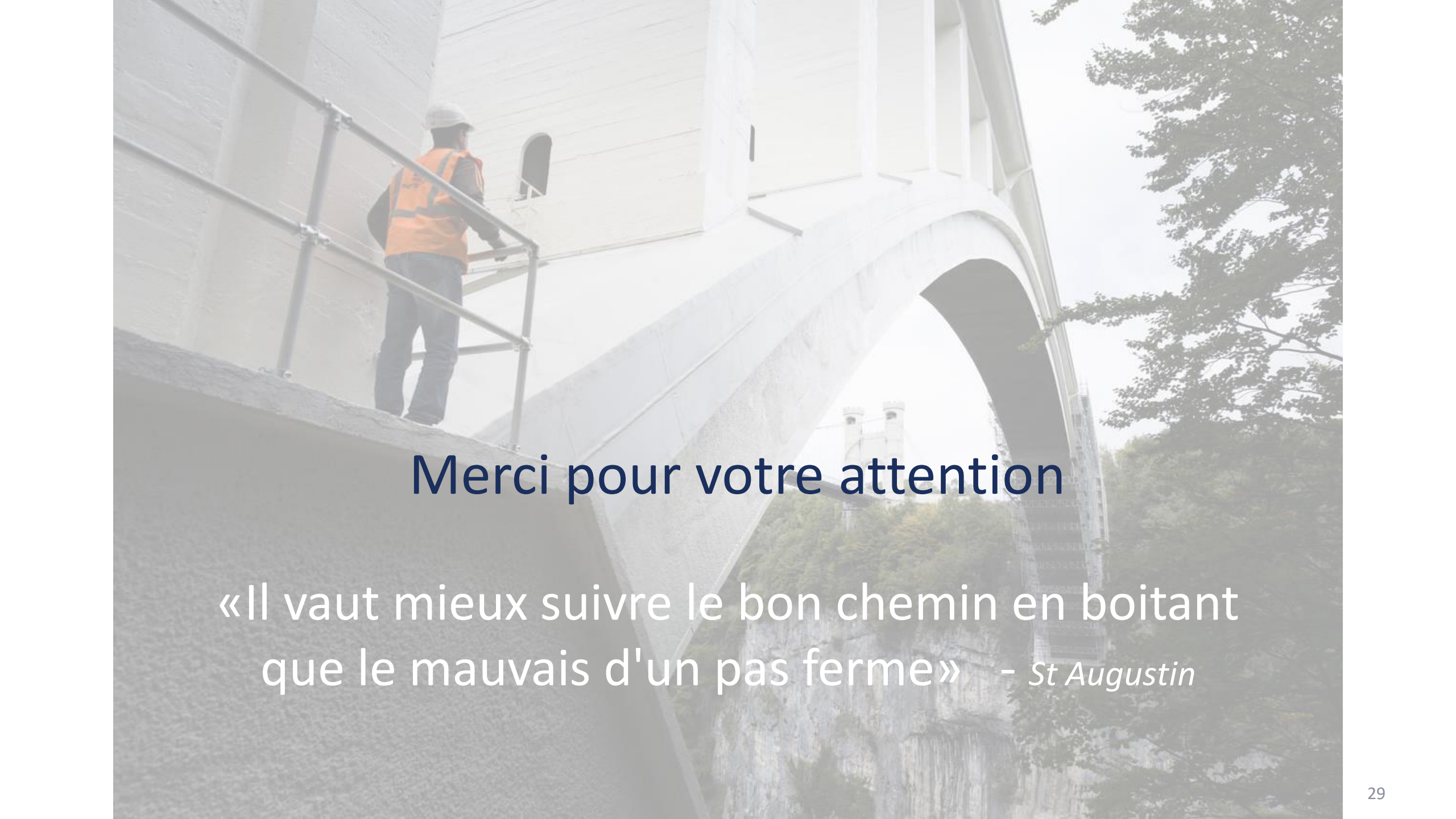


Création d'une trémie pour un escalier



Conclusion

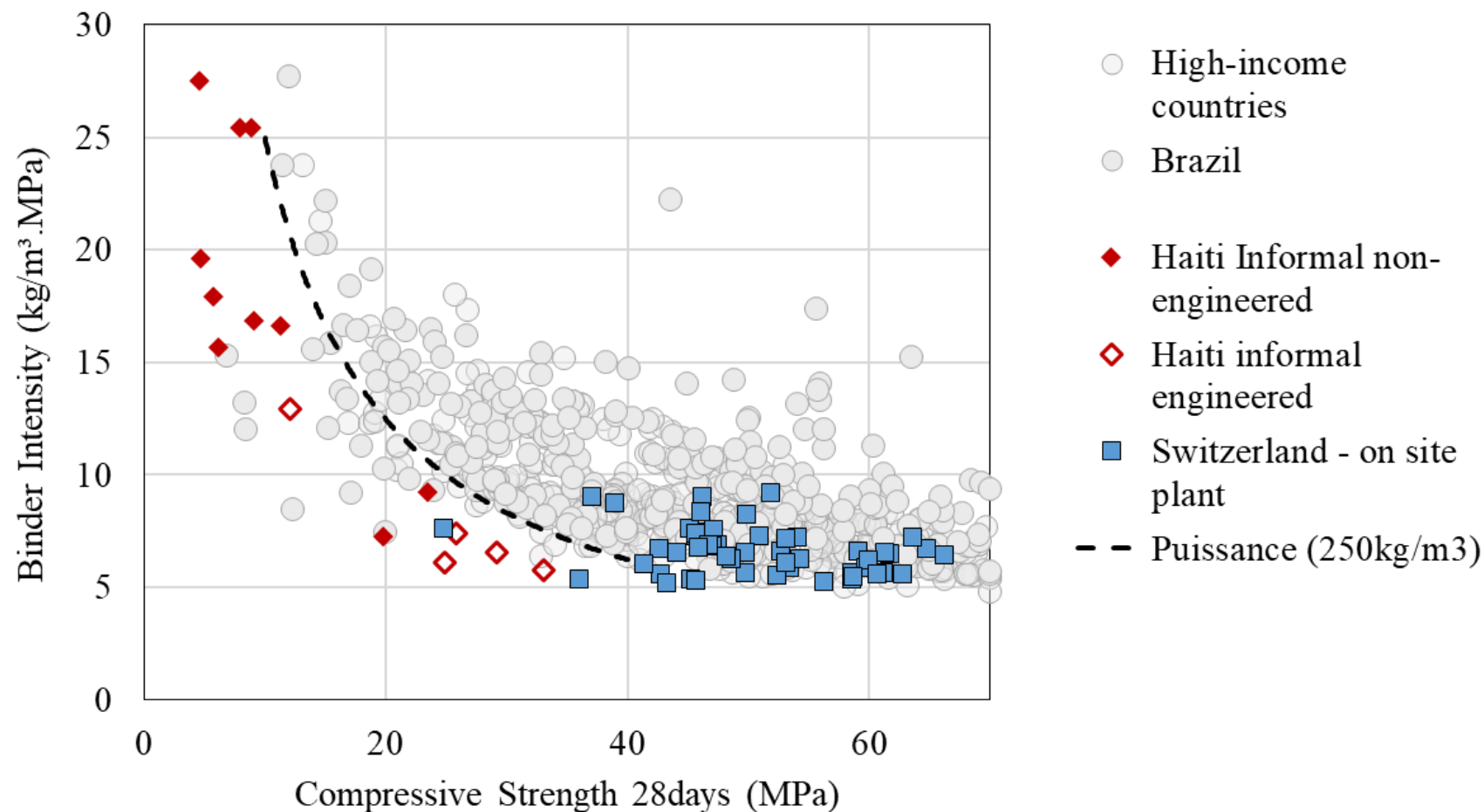
- Utilisation de l'existant au maximum – respect du patrimoine bâti. De nombreux développements technologiques dans ce sens
- Pas de bon ou mauvais matériau mais des bonnes ou des mauvaises utilisations
- Suisse, nombreux talents dans le secteur du béton
- Vers une valorisation de nos métiers



Merci pour votre attention

«Il vaut mieux suivre le bon chemin en boitant
que le mauvais d'un pas ferme» - *St Augustin*

Aperçu : pas assez d'efficience, trop de MPa



Data : E. Berodier + Daminelli