

CONCEPTION STRUCTURALE DANS UN CONTEXTE DE MINIMISATION D'EMPREINTE ENVIRONNEMENTALE

Corentin Fivet, Prof. of Architecture and Structural Design

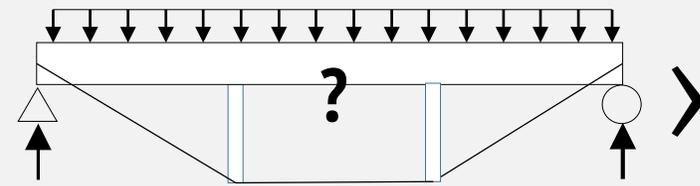
Lausanne, 26-02-2020

EPFL

<http://sxl.epfl.ch>  STRUCTURAL
XPLORATION
LAB

conception structurale





> **charges appliquées**

$q = \dots$ kN/m (poids propre, neige, vent,...)

> **équilibre statique**

$$\sum H = 0$$

$$\sum V = 0$$

$$\sum M = 0$$

> **compatibilité des déformations**

> **états limites ultimes**

$$\sigma \leq \dots$$

> **états limites de service**

$$\delta \leq \dots$$

> **sections**

$$A = \dots$$

$$EI = \dots$$

> **assemblages**

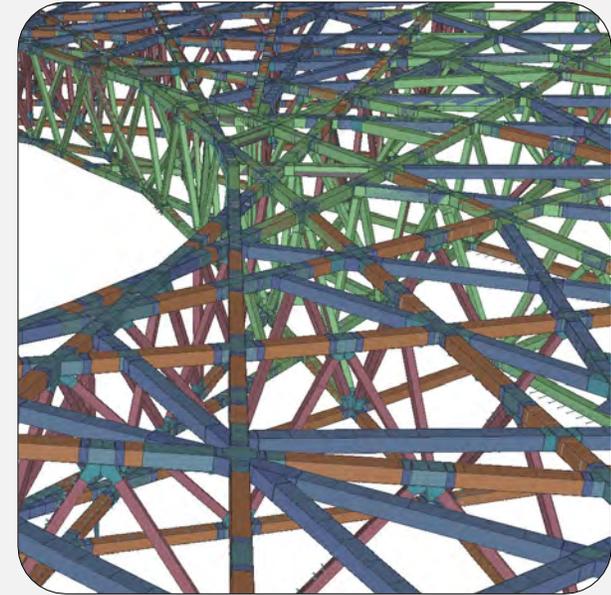
- > **choix des matériaux**
- > **choix géométriques**
- > **choix topologiques**



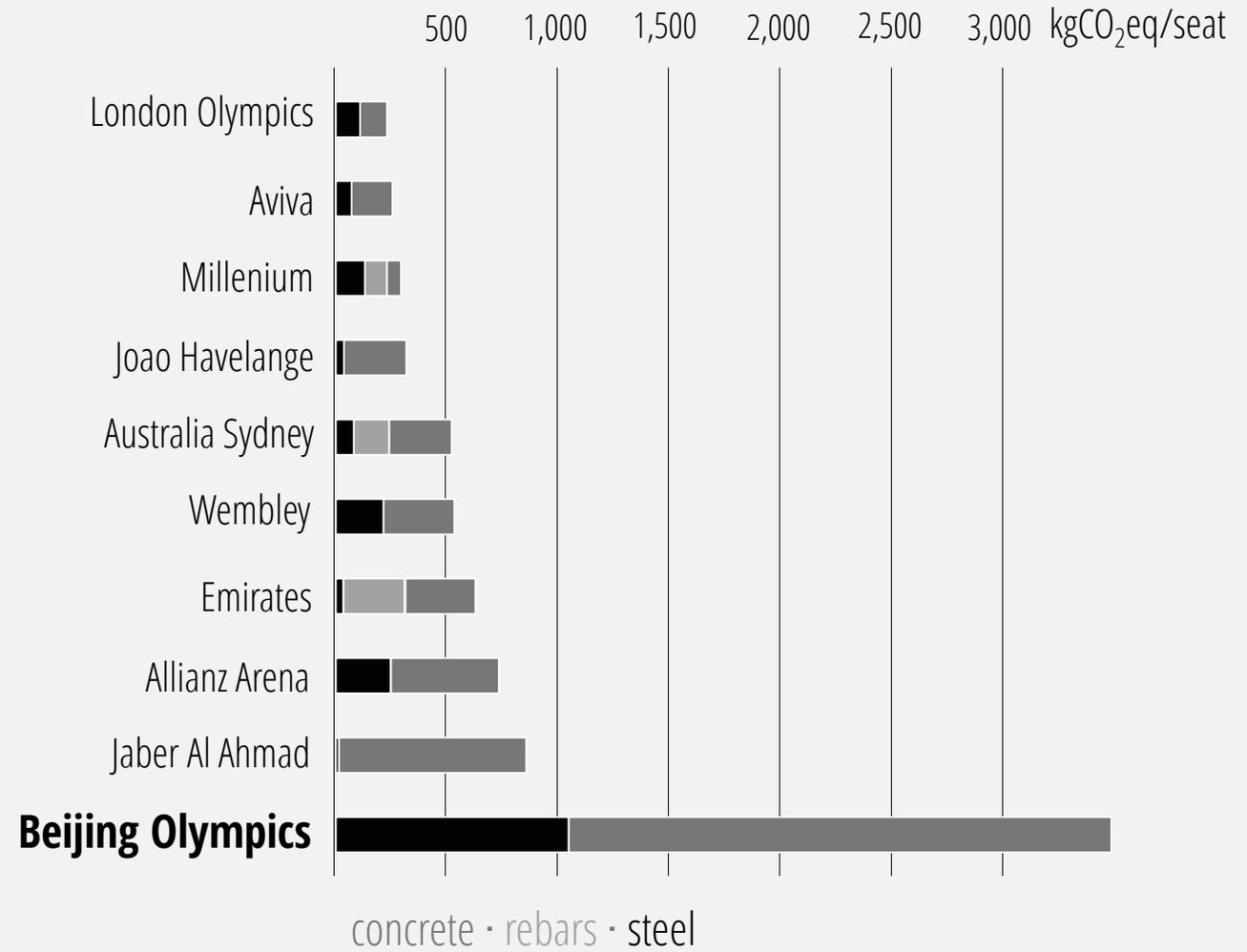
> **empreinte environnementale**

$$EI = \sum_{i=0}^{\text{matériaux}} \underbrace{ECC_i}_{\text{kgCO}_2\text{e/kg}} \times \underbrace{MASS_i}_{\text{kg/unit}}$$

contre-exemple

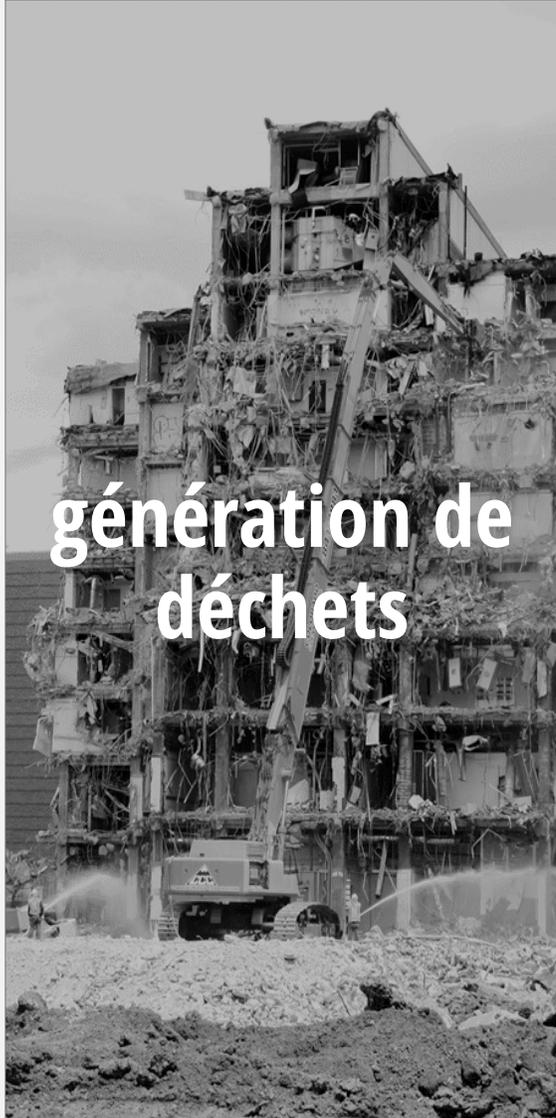


contre-exemple



contexte environnemental

impacts environnementaux des bâtiments



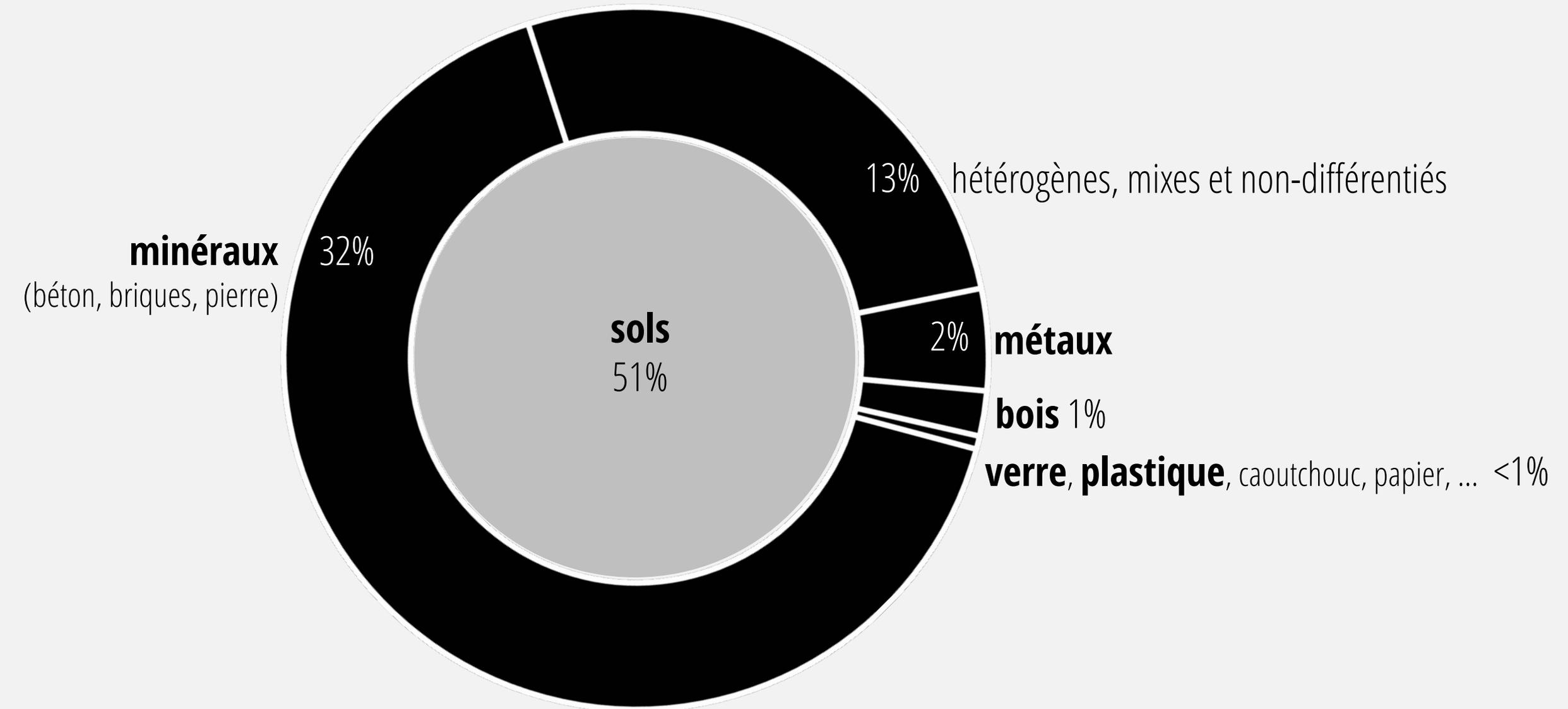
déchets solides

par industrie,
dans l'Europe des 28,
comparaison des masses

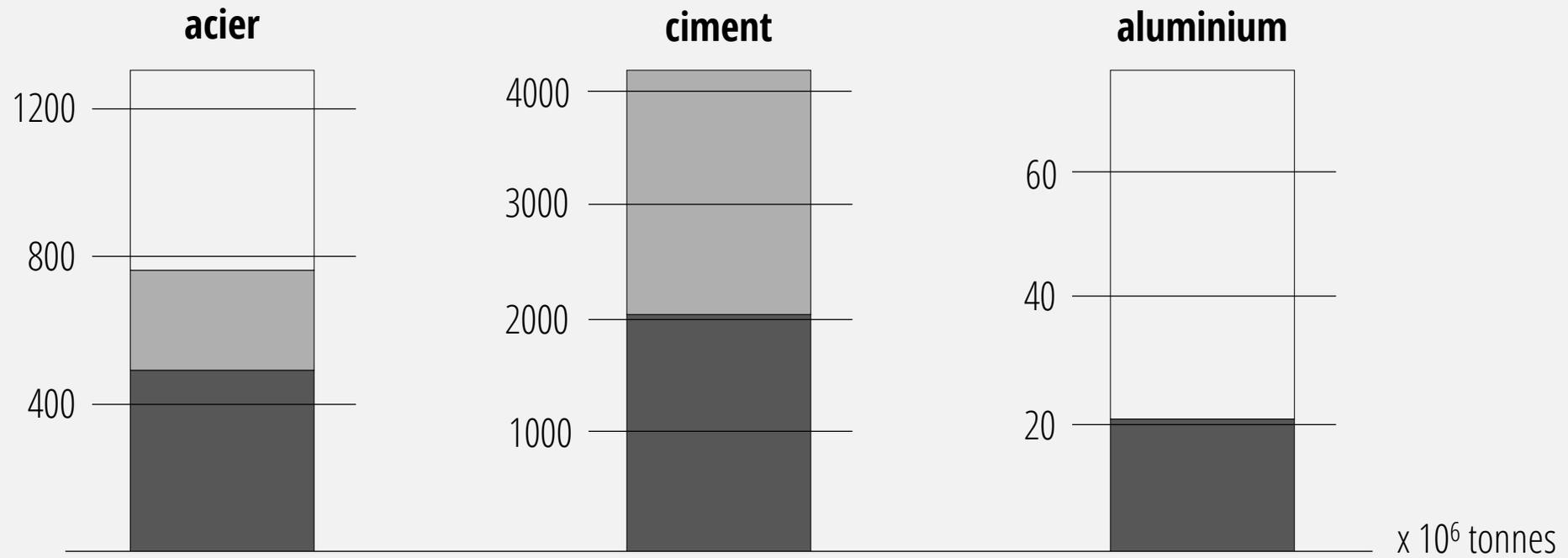


déchets de construction et démolition par matériau

dans l'Europe des 28, comparaison des masses



demande globale d'acier et de ciment, par finalité



- autres (voitures, camions, bateaux, avions, équipement mécanique, équipement électrique, emballages, ...)
- infrastructure
- bâtiments

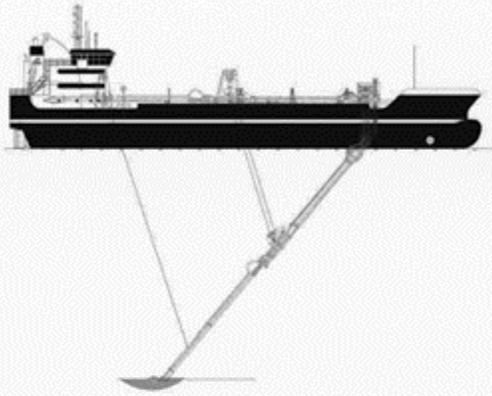
épuisement des ressources

cas de l'extraction de sable de construction



épuisement des ressources

cas de l'extraction de sable de construction



pollution des sols, origines



› **exploitation minière**

- certaines mines de l'antiquité posent encore des problèmes de pollution aujourd'hui

› **transformation des matières premières**

- environ 80'000 produits chimiques sont utilisés dans la construction de bâtiment
- le nombre de produits avec dangers pour la santé a été multiplié par 4 depuis 1971

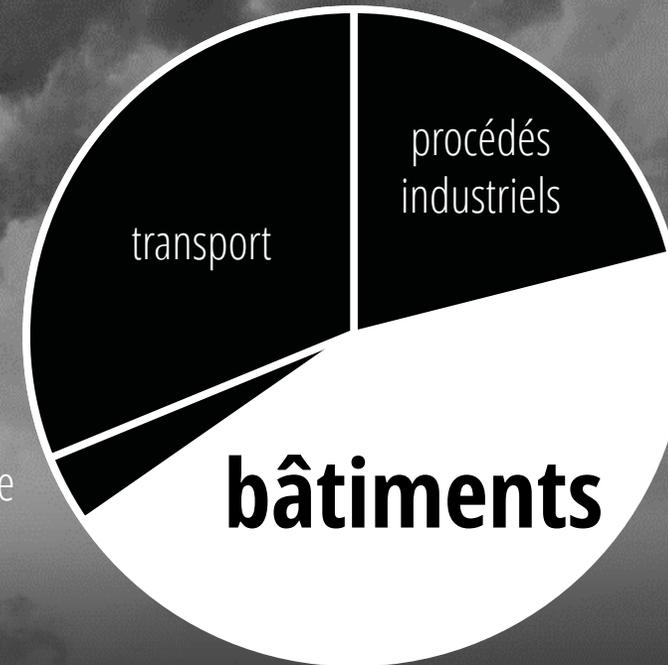
› **utilisation des éléments de construction**

- certains matériaux émettent des poussières ou de la radiation tout au long de leur utilisation

› **mise en décharge**

- incinération est possible mais rejette la plupart du temps dioxyde de soufre SO_2 , chlorure d'hydrogène HCl , métaux lourds et dioxines

demande énergétique, répartition par source



demande énergétique dans le bâtiment

**énergie
embarquée**

= énergie grise

PRODUCTION

fourniture



fabrication



CONSTRUCTION

transport



construction



UTILISATION

maintenance/rénovation



FIN DE VIE

démolition



réemploi/recyclage



eau chaude



ventilation



chauffage



refroidissement



éclairage

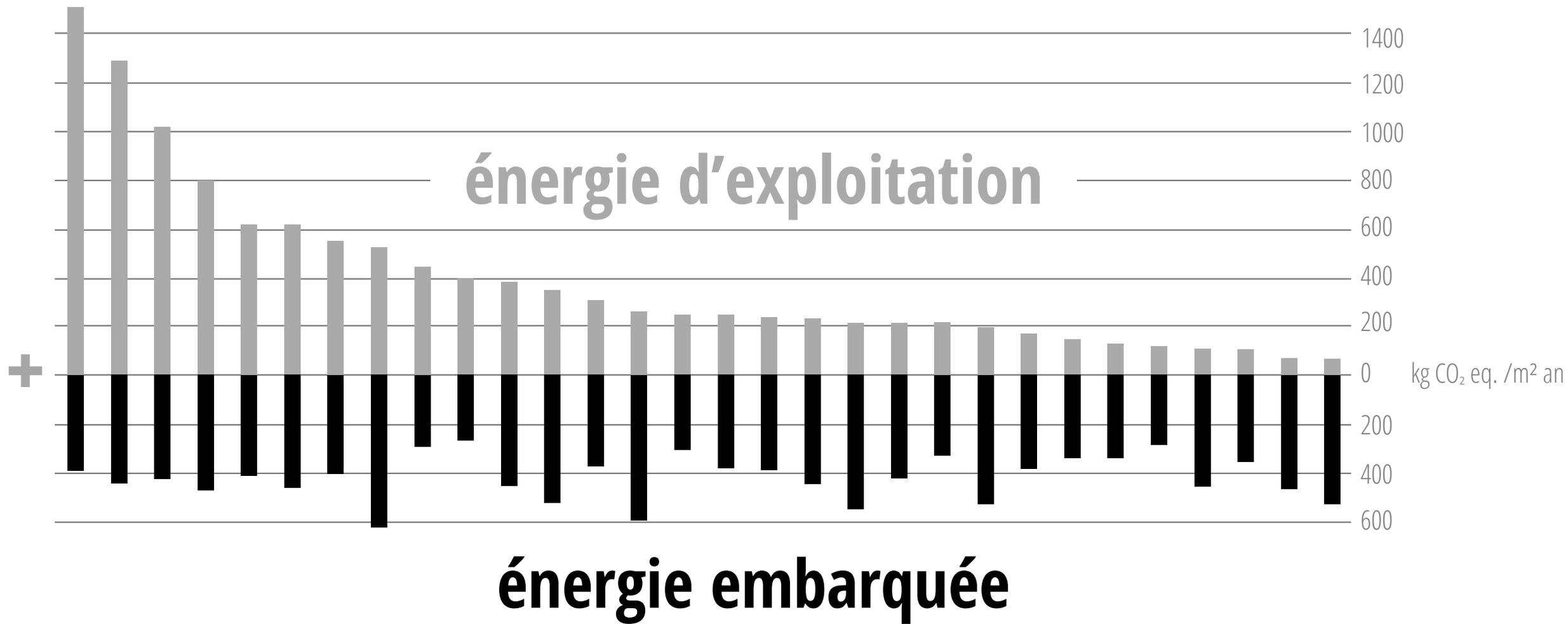


électricité



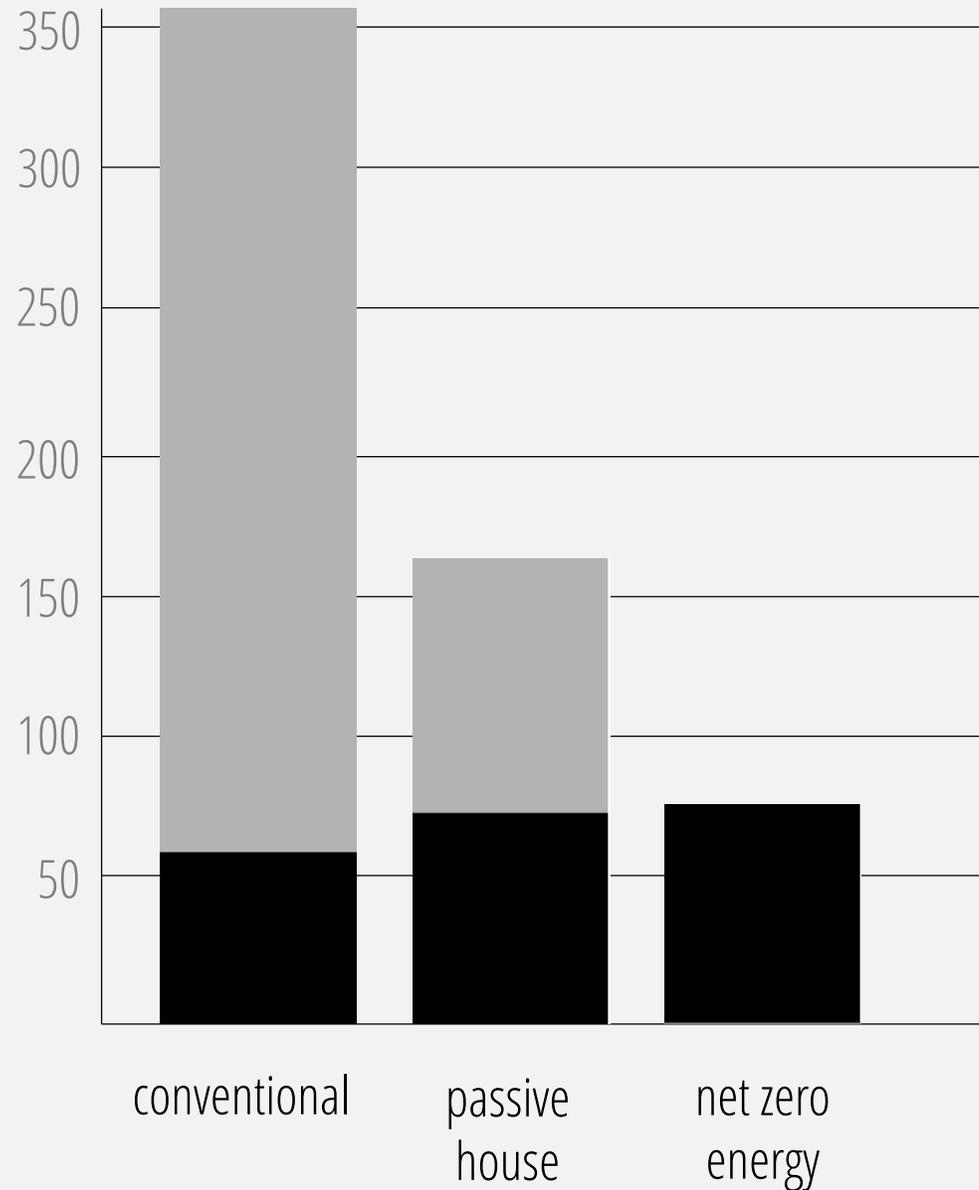
**énergie
d'exploitation**

différence de préoccupation, cas de 30 maisons en France



différence d'impact

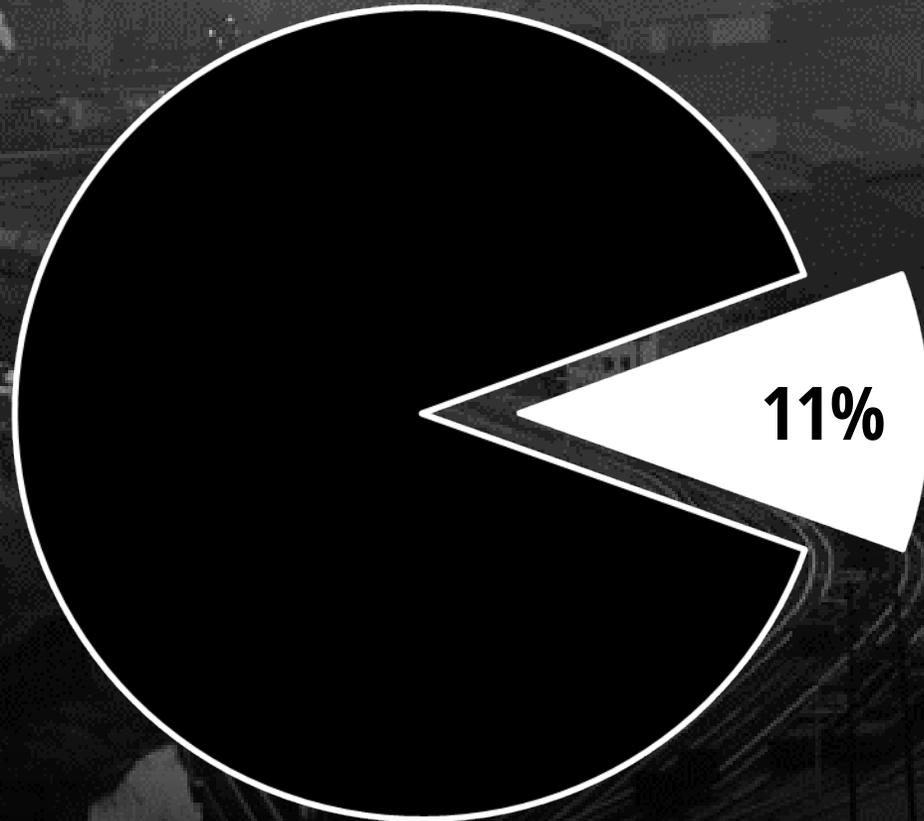
kg CO₂ eq. /m² an



énergie d'exploitation

énergie embarquée

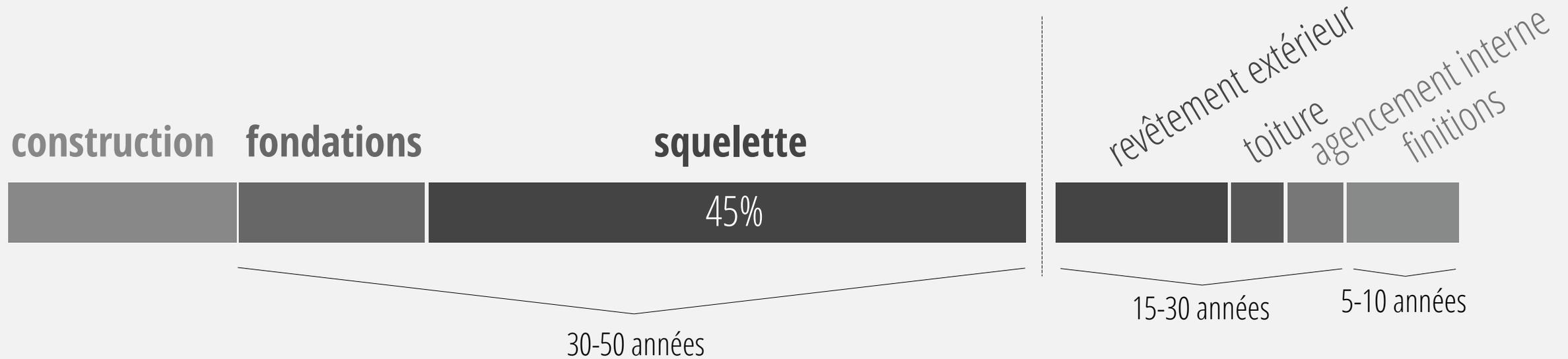
émission de gas à effet de serre, cas de l'empreinte carbone



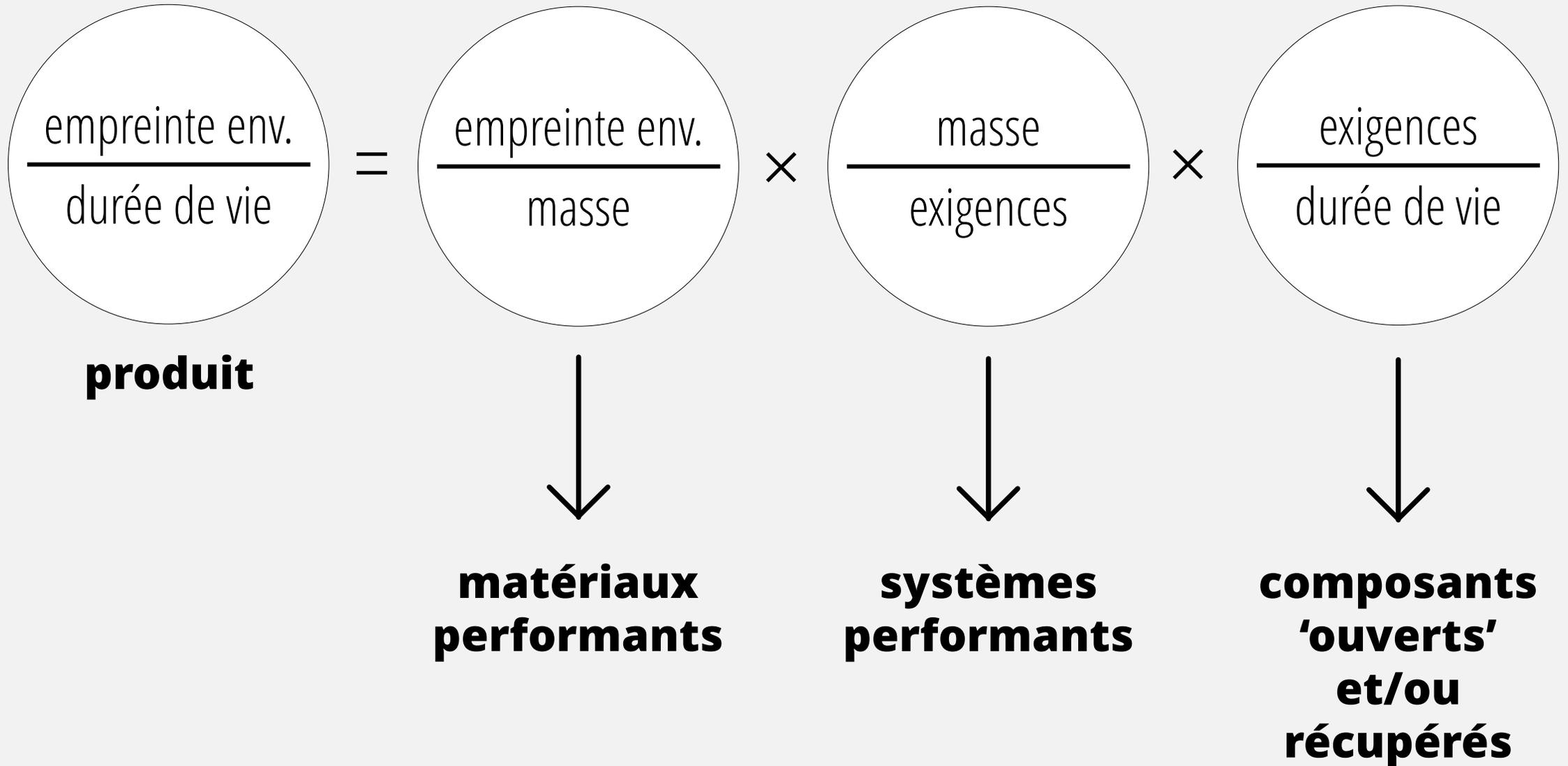
11%

production, transformation,
et démolition de constructions

CO2 embarqué des structures porteuses



stratégies pour minimiser l'empreinte environnementale



matériaux performants

$$\frac{\text{empreinte env.}}{\text{durée de vie}} = \frac{\text{empreinte env.}}{\text{masse}} \times \frac{\text{masse}}{\text{exigences}} \times \frac{\text{exigences}}{\text{durée de vie}}$$

produit



**matériaux
performants**



**systèmes
performants**



**composants
'ouverts'
et/ou
récupérés**

choix des matériaux

aluminium	8.24 kgCO ₂ e/kg
acier	1.77
verre	0.85
bois contreplaqué	0.81
bois	0.46
briques	0.22
béton armé	0.15
plaque de marbre	0.19
parpaing	0.06
Pierre	0.06



objectifs contradictoires: exemple de la barre en tension

acier bois aluminium



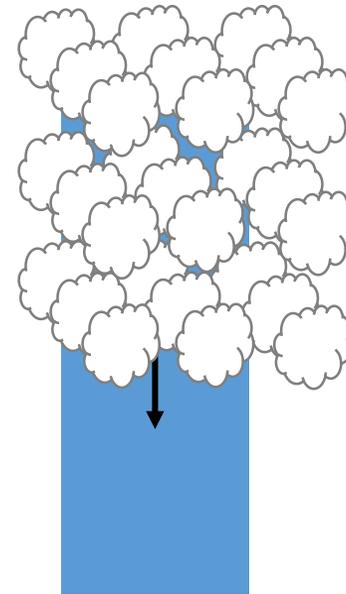
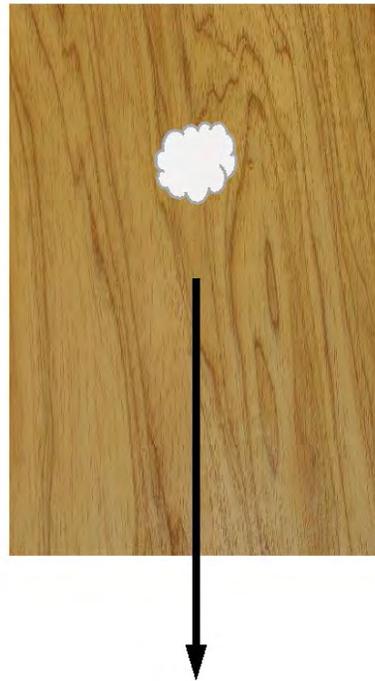
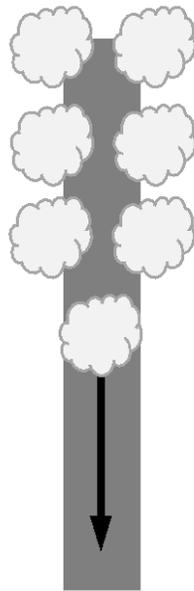
objectifs contradictoires: exemple de la barre en tension

	acier	bois	aluminium
σ_{allow} [MPa]	200	7	130
ρ [kg/m ³]	8000	500	2700
ECC [kg _{CO2e} /kg]	1.1	0.04	9



objectifs contradictoires: exemple de la barre en tension

	acier	bois	aluminium
volume [cm ³]	500	14285	770
masse [kg]	4	7	2
carbone embarqué [kg _{CO2e}]	4.4	0.3	18



systemes performants

$$\frac{\text{empreinte env.}}{\text{durée de vie}} = \frac{\text{empreinte env.}}{\text{masse}} \times \frac{\text{masse}}{\text{exigences}} \times \frac{\text{exigences}}{\text{durée de vie}}$$

produit



**matériaux
performants**



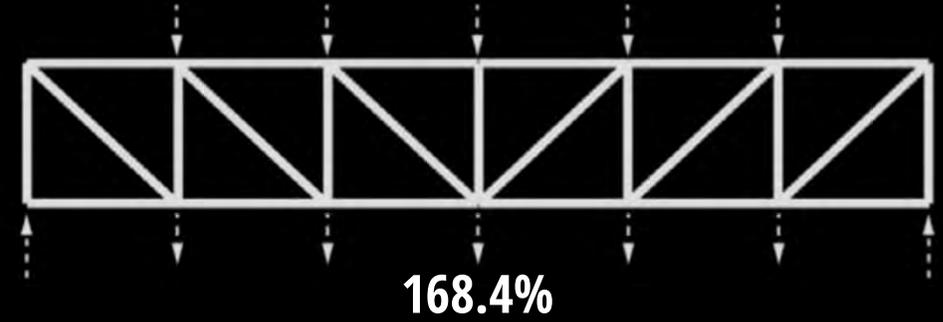
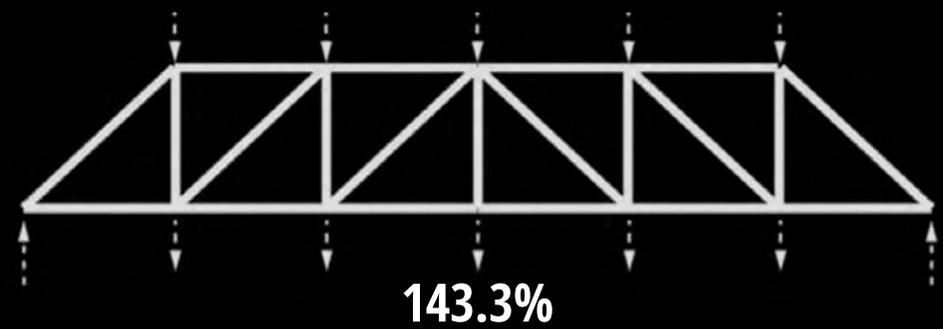
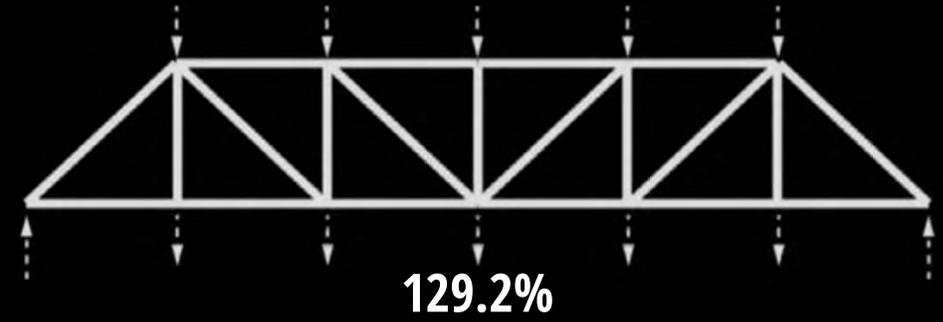
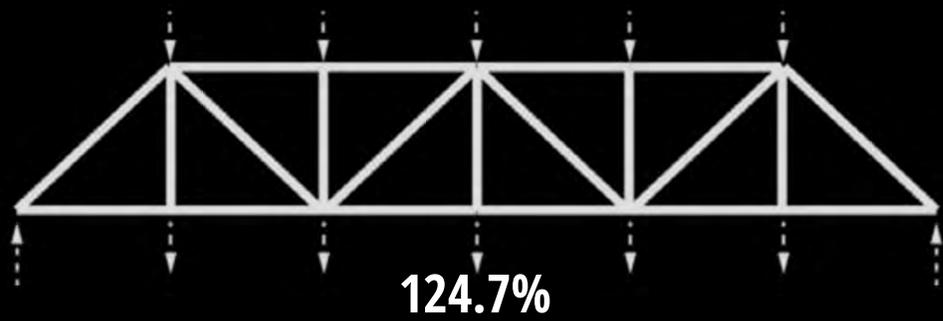
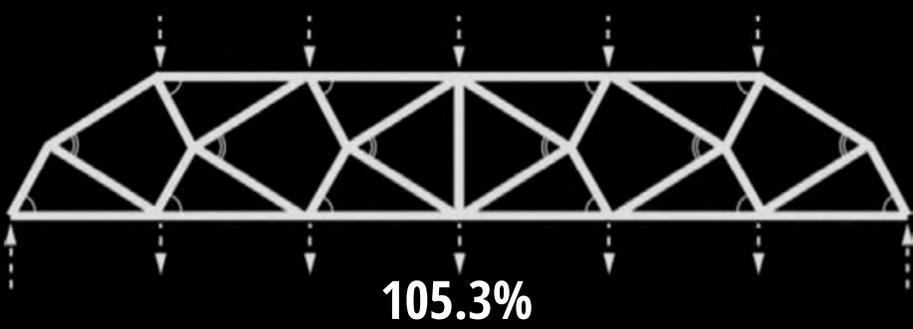
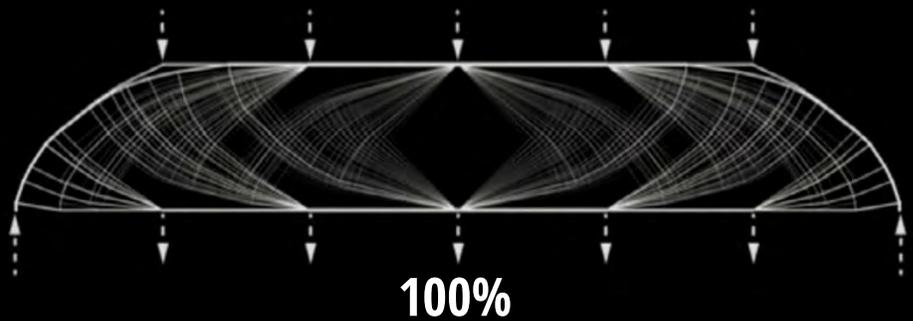
**systèmes
performants**



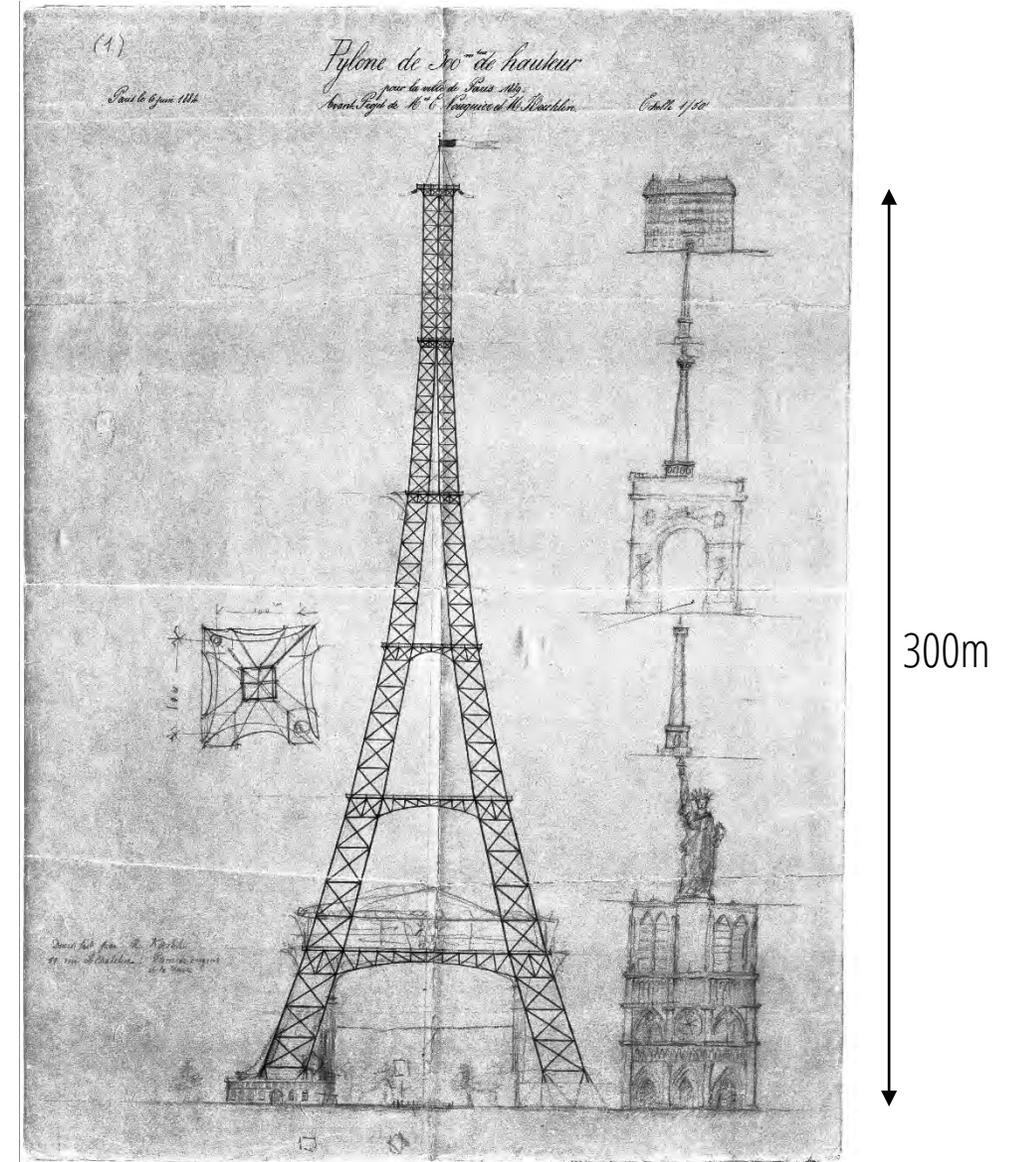
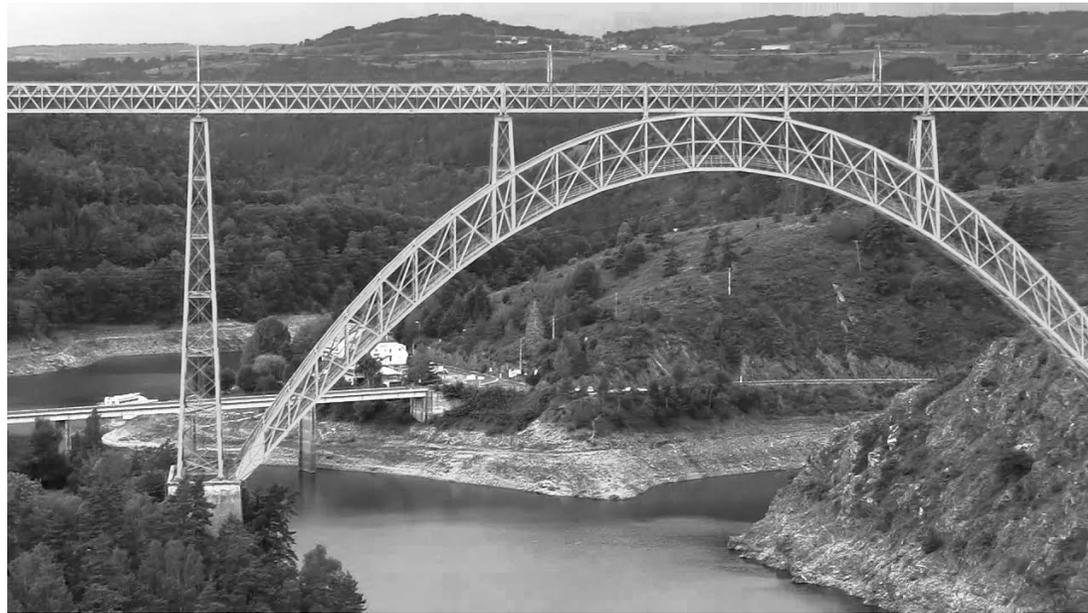
**composants
'ouverts'
et/ou
récupérés**

efficacité topologique

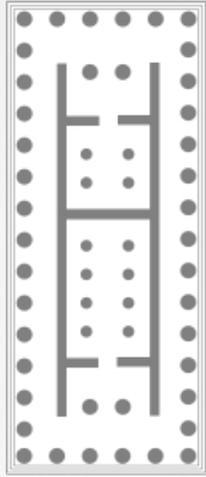




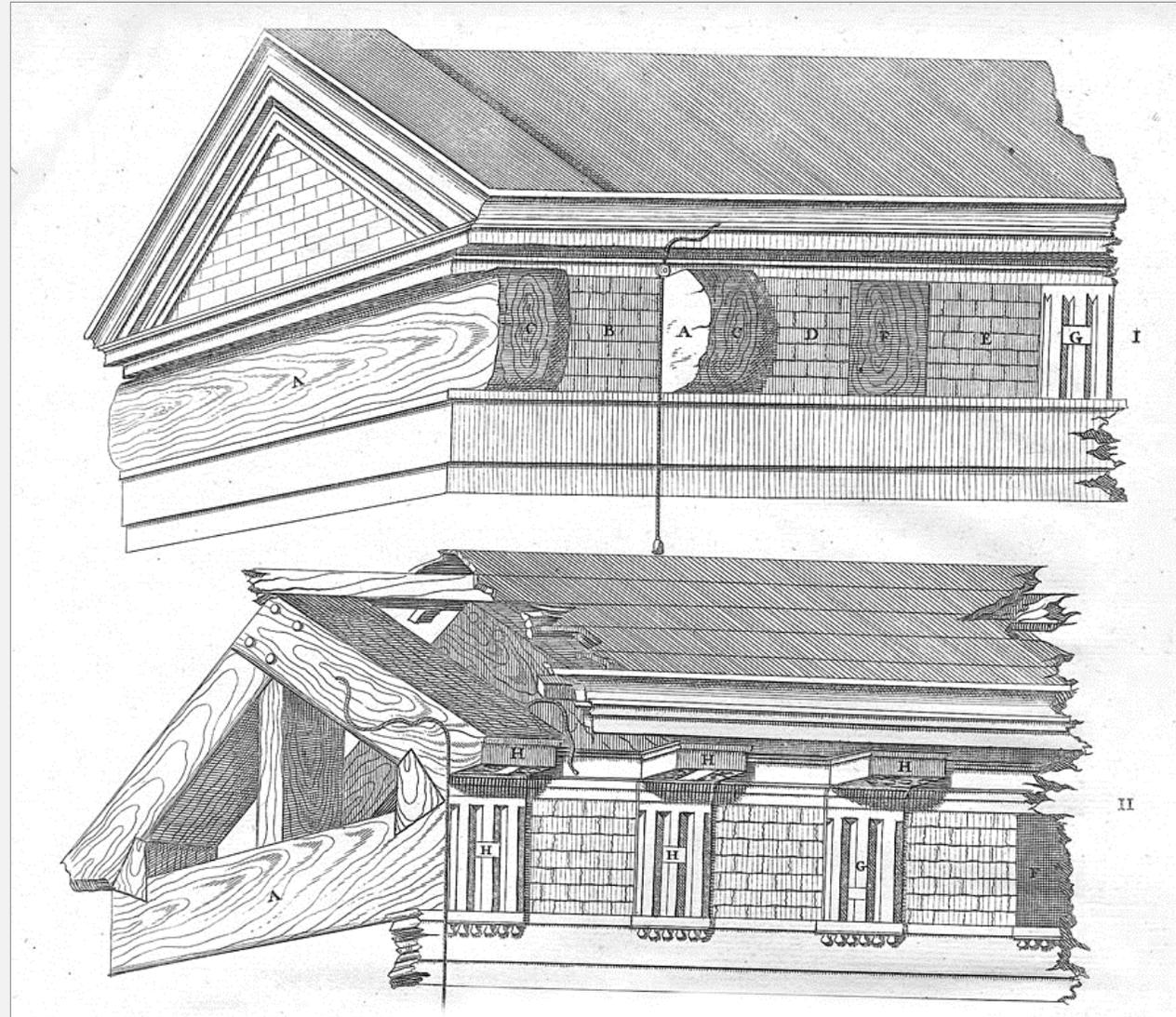
efficacité géométrique



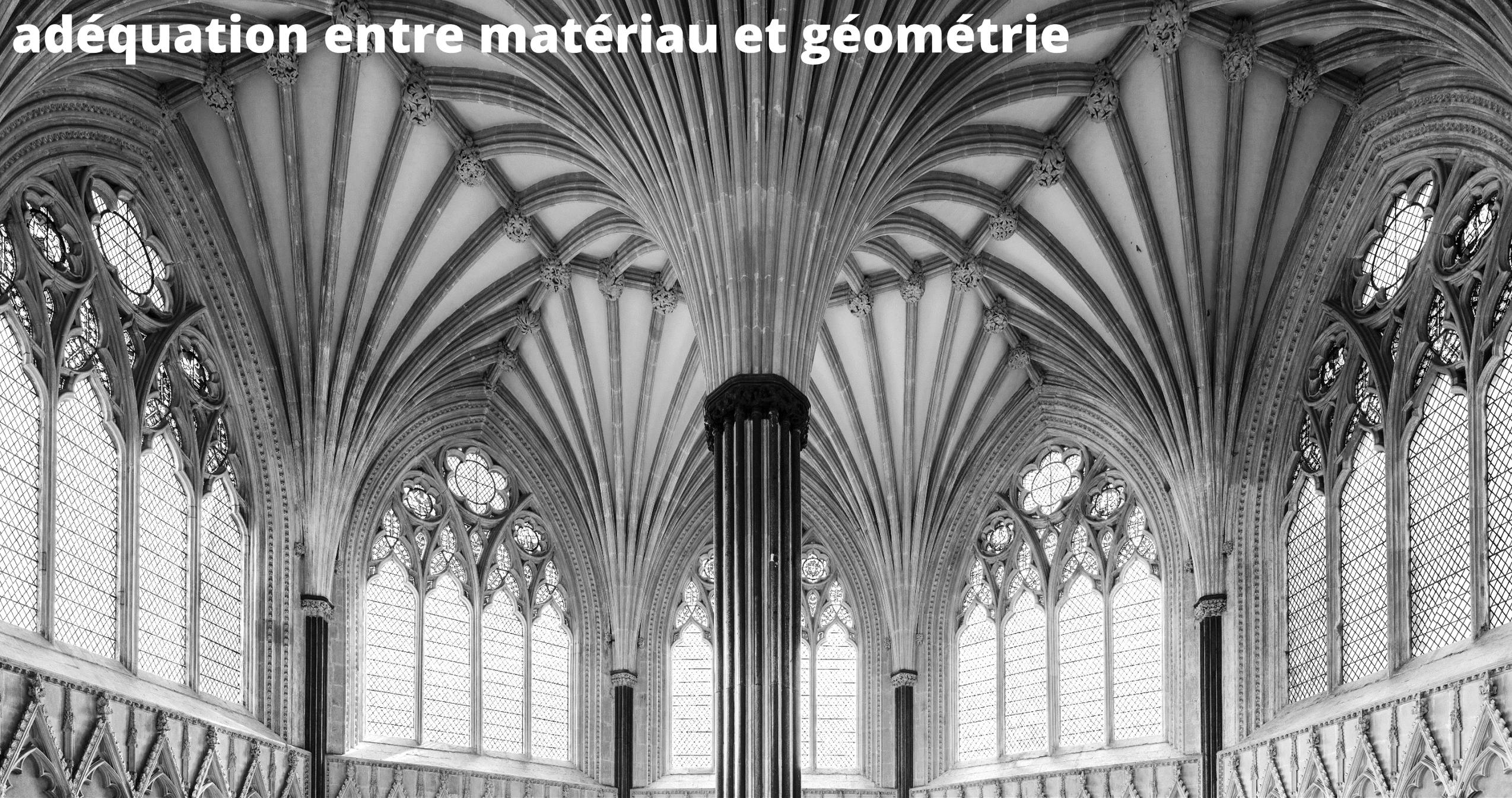
adéquation entre matériau et géométrie



adéquation entre matériau et géométrie



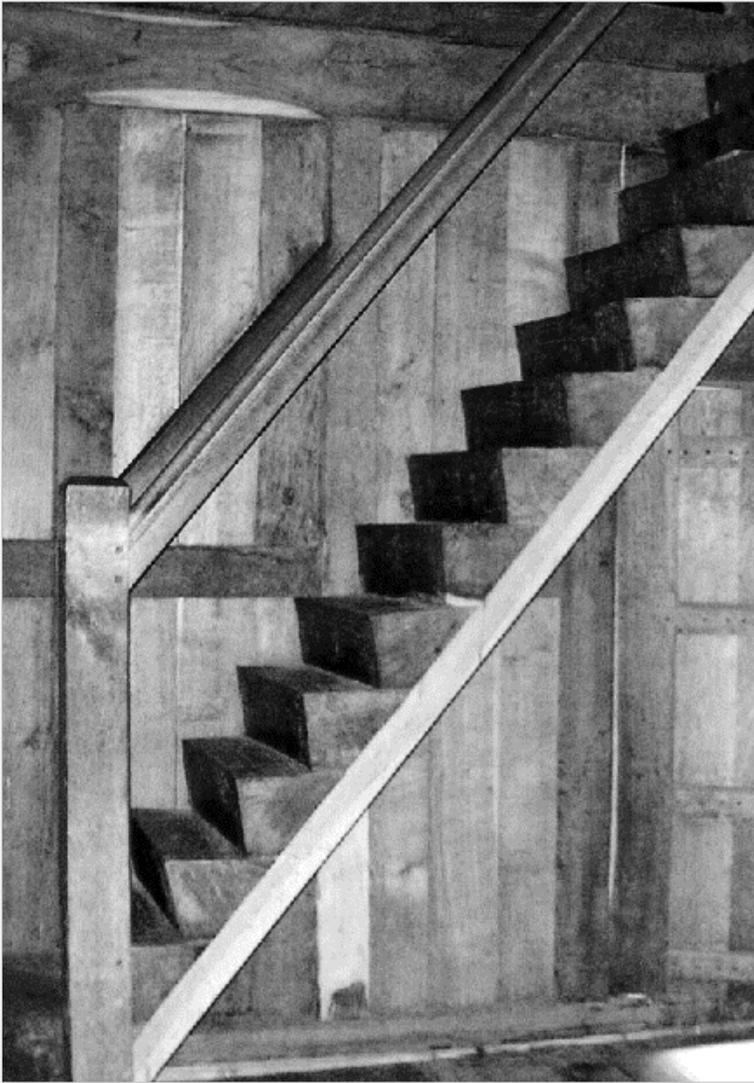
adéquation entre matériau et géométrie





Oxford museum, Francis Skidmore, 1857-1859

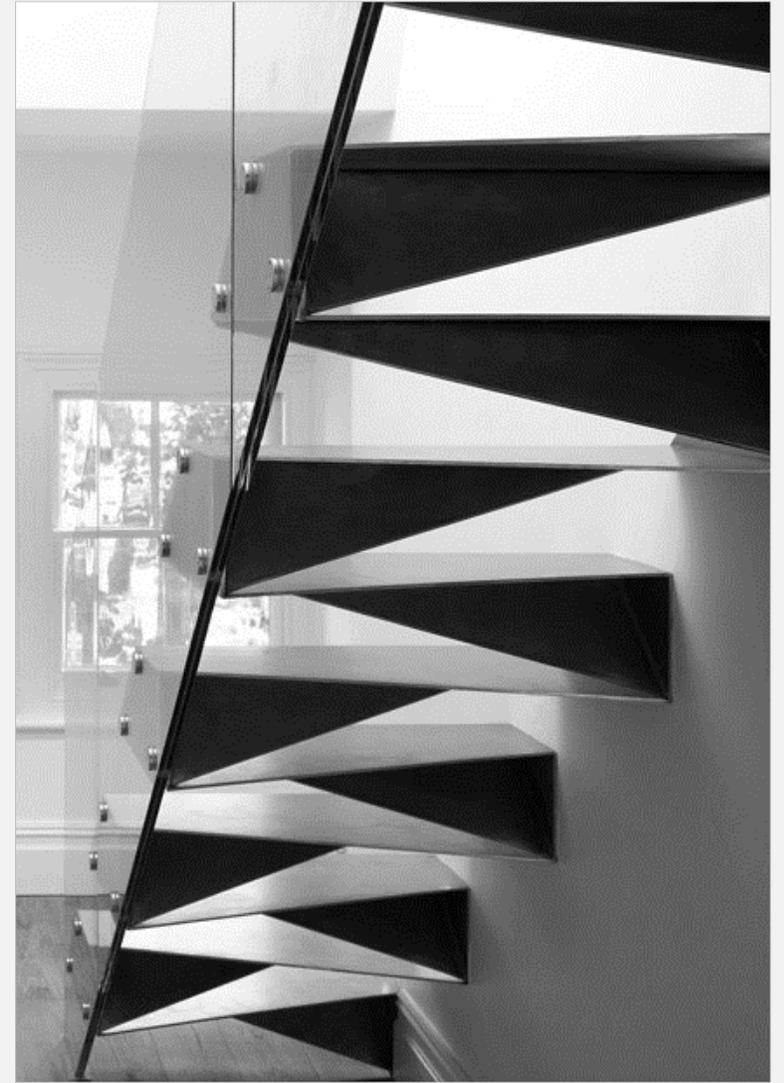
adéquation entre matériau et géométrie



Mount Grace Priory – XIVth century



First National Bank – Guastavino 1890



Bell Phillips architects

**composants récupérés
et/ou 'ouverts'**

$$\frac{\text{empreinte env.}}{\text{durée de vie}} = \frac{\text{empreinte env.}}{\text{masse}} \times \frac{\text{masse}}{\text{exigences}} \times \frac{\text{exigences}}{\text{durée de vie}}$$

produit



**matériaux
performants**



**systèmes
performants**



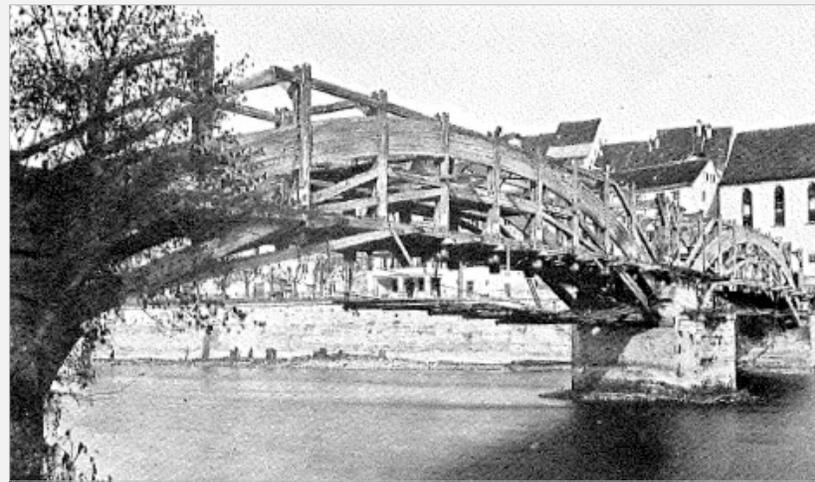
**composants
'ouverts'
et/ou
récupérés**

reuse in structural engineering

1810



1919



Eglisau, CH

Rheinau, CH



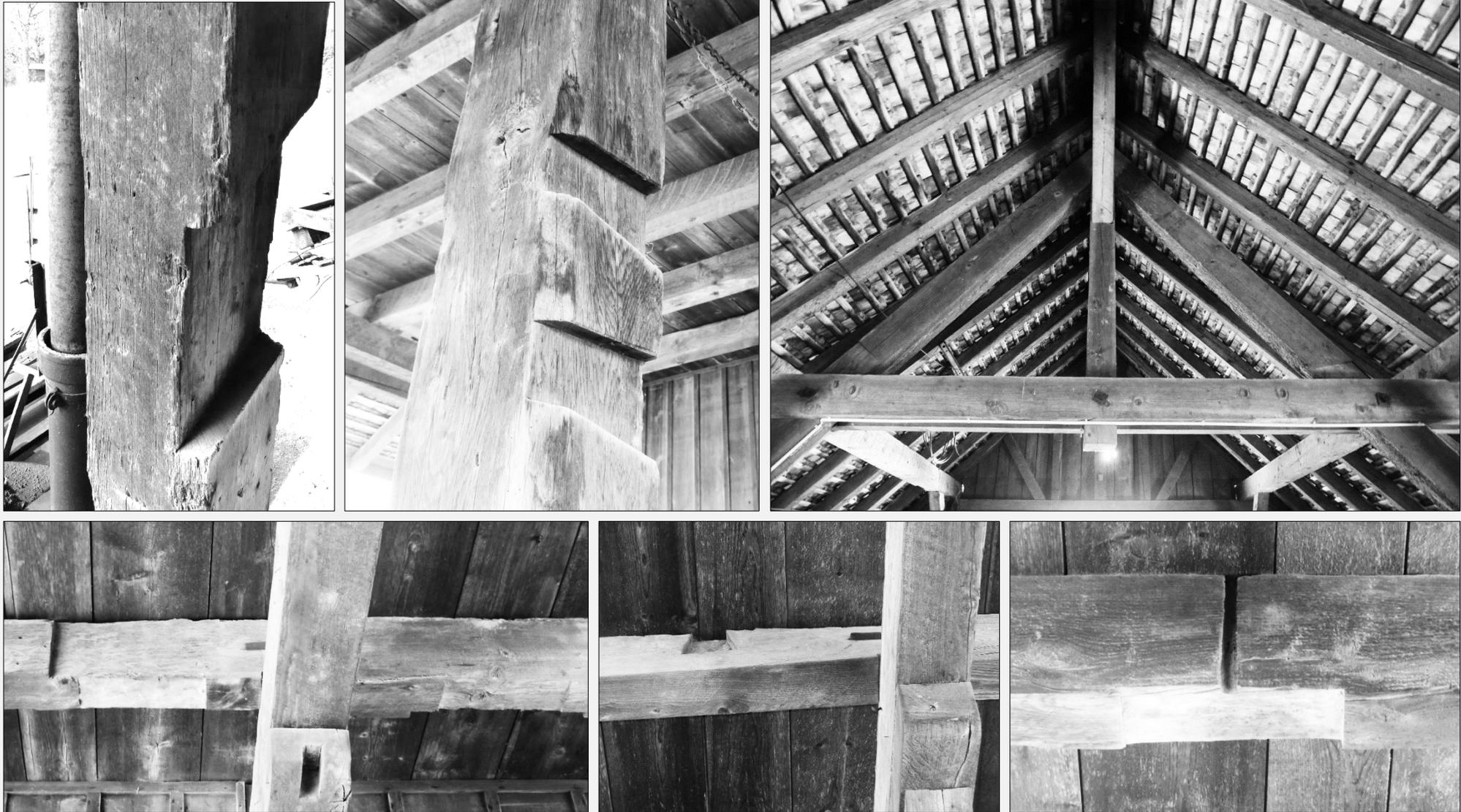
1920



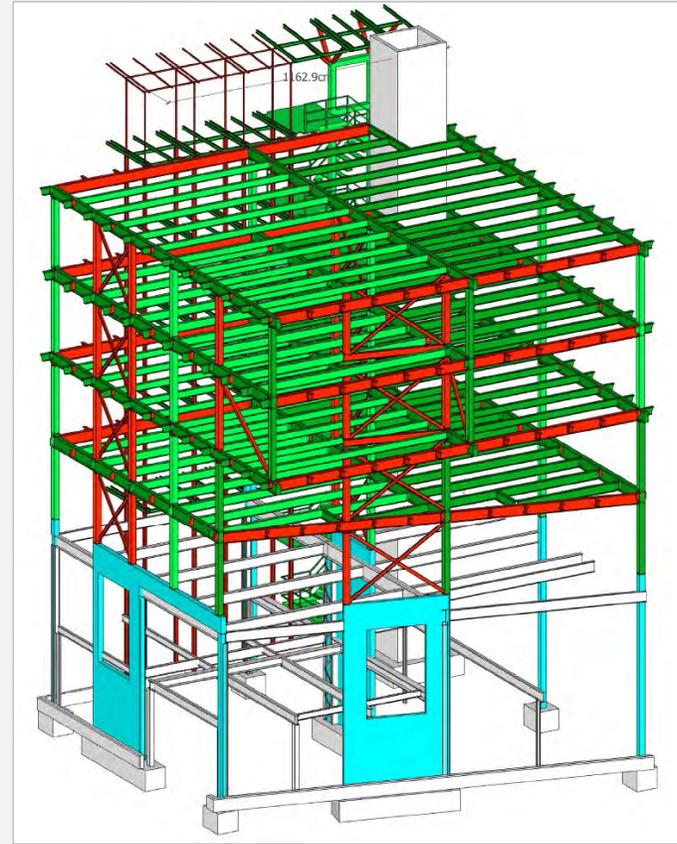
2019

C.Fivet, J.Brütting · *Nothing is lost, nothing is created, everything is reused - The new structural design assignment for the circular economy* · 2019

200yo components make a 100yo barn



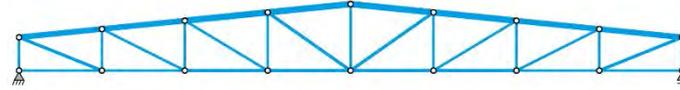
extending the life-span of load-bearing components



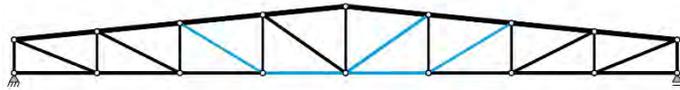
Halle K118 · Winterthur, CH · Baubüro In Situ · 2019

utilisation optimale de composants réutilisés

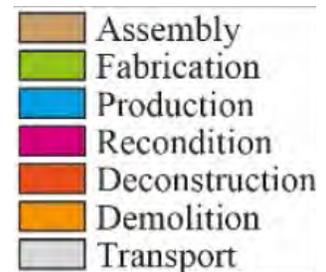
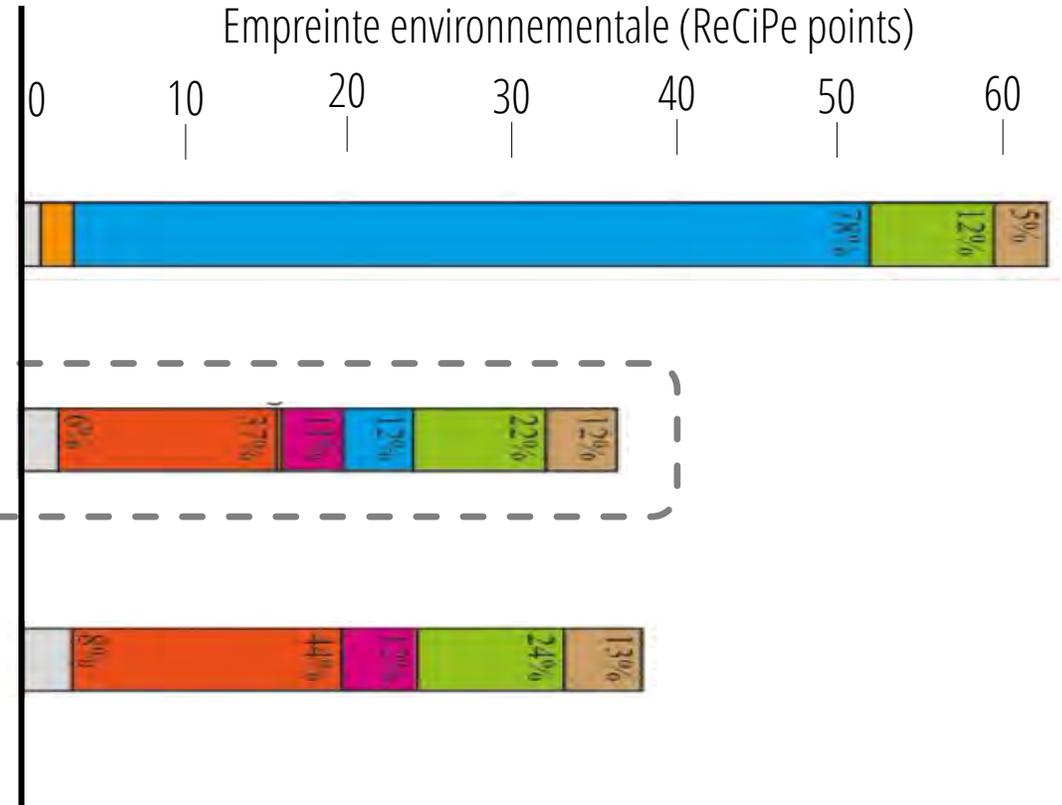
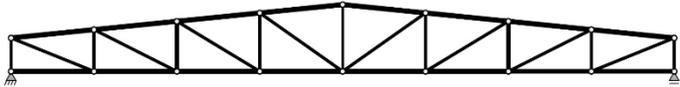
New



Optimal



Reuse



J Brütting et al., Environmental impact minimization of structures made of reused and new elements through Life Cycle Assessment and Mixed-Integer Linear Programming, *Energy and Buildings*, 2020

modularité fermée

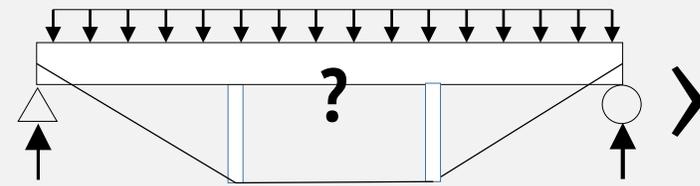


UBC TallWood House · Brock Commons · Vancouver, CA · Fast + Epp · 2019

objectifs contradictoires



récapitulatif



> **charges appliquées**

$q = \dots$ kN/m (poids propre, neige, vent,...)

> **équilibre statique**

$$\sum H = 0$$

$$\sum V = 0$$

$$\sum M = 0$$

> **compatibilité des déformations**

> **états limites ultimes**

$$\sigma \leq \dots$$

> **états limites de service**

$$\delta \leq \dots$$

> **sections**

$$A = \dots$$

$$EI = \dots$$

> **assemblages**

- > **choix des matériaux**
- > **choix géométriques**
- > **choix topologiques**



> **empreinte environnementale**

$$EE = \sum_{i=0}^{\text{matériaux}} ECC_i \times MASS_i$$

\swarrow
 \swarrow
 kgCO₂e/kg kg/unit

stratégies pour minimiser l'empreinte environnementale

