

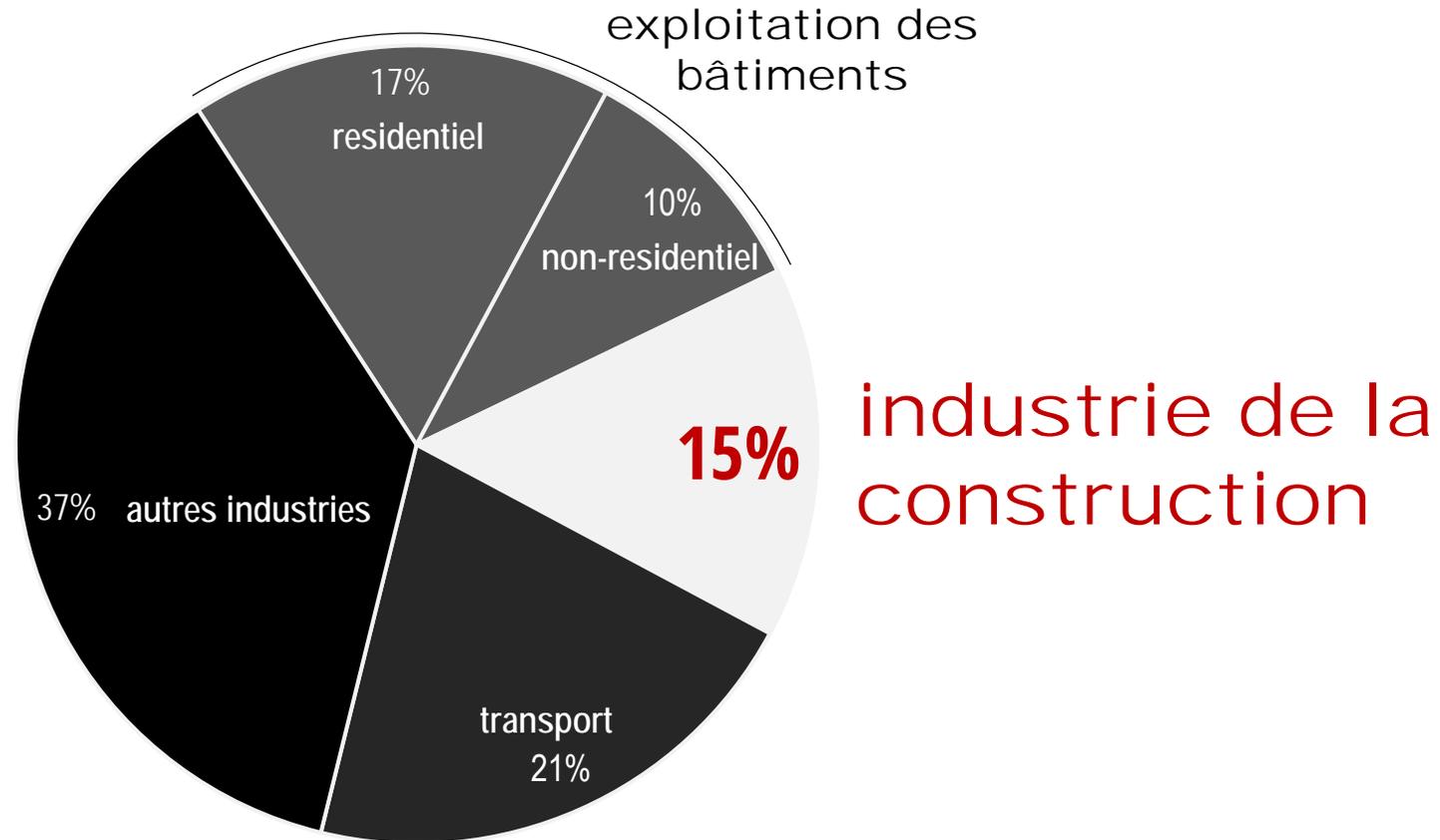


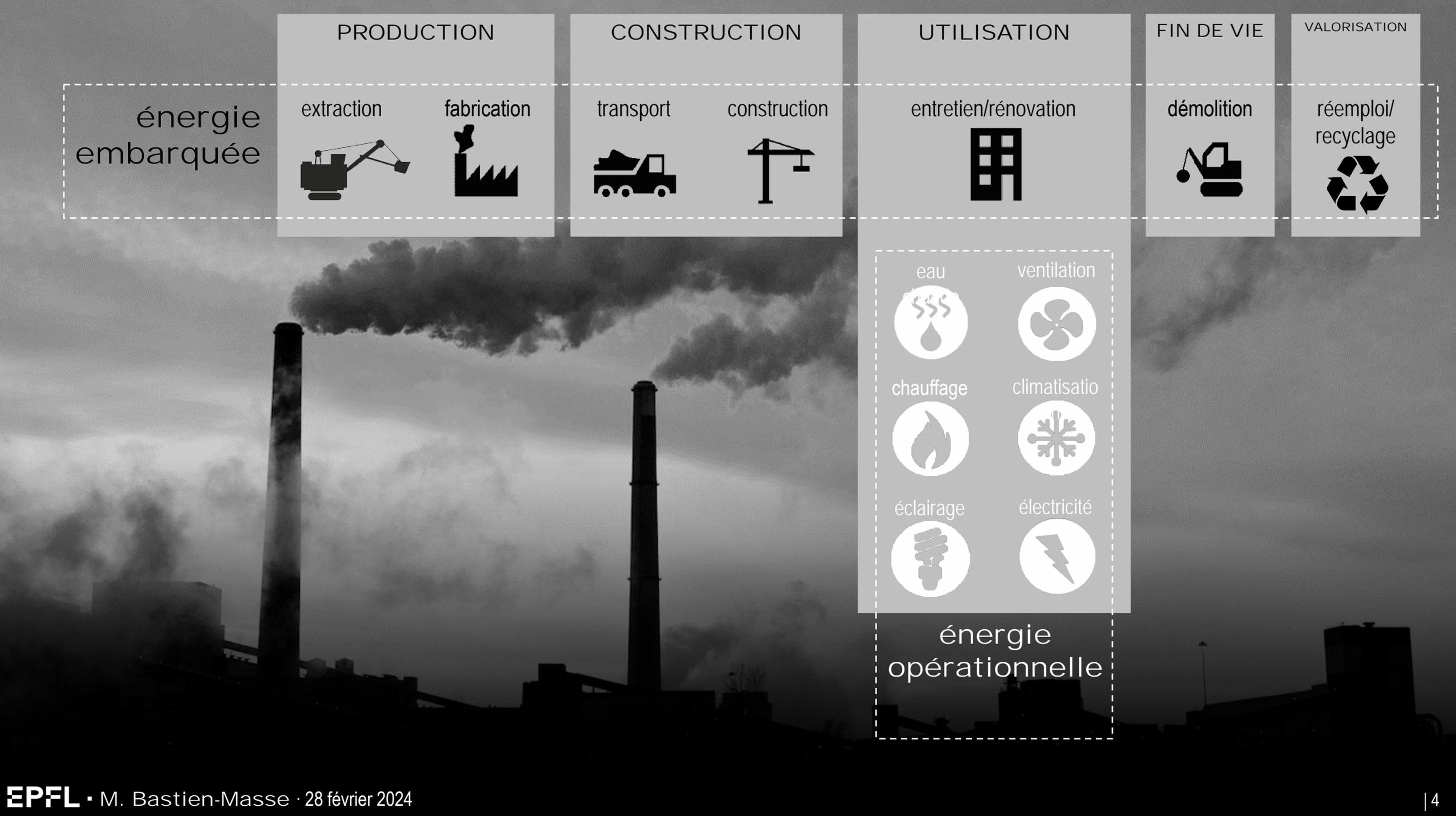
Structures et empreinte carbone

Maléna Bastien-Masse, Dr ès Sc. EPFL
Ingénieure civile et chercheuse

contexte

émissions CO₂ mondiales anthropiques





PRODUCTION

CONSTRUCTION

UTILISATION

FIN DE VIE

VALORISATION

énergie
embarquée

extraction



fabrication



transport



construction



entretien/rénovation



démolition



réemploi/
recyclage



eau



ventilation



chauffage



climatisatio



éclairage



électricité



énergie
opérationnelle

impacts de la construction

réchauffement

15%
des émissions
CO₂-eq

Global Status Report for
Buildings and Construction,
GABC-IEA-UN, 2022

épuisement

50%
de la
production
industrielle

Sixth Assessment Report,
Working group III IPCC, 2022

déchets

19% poids
de la
production
annuelle en
CH

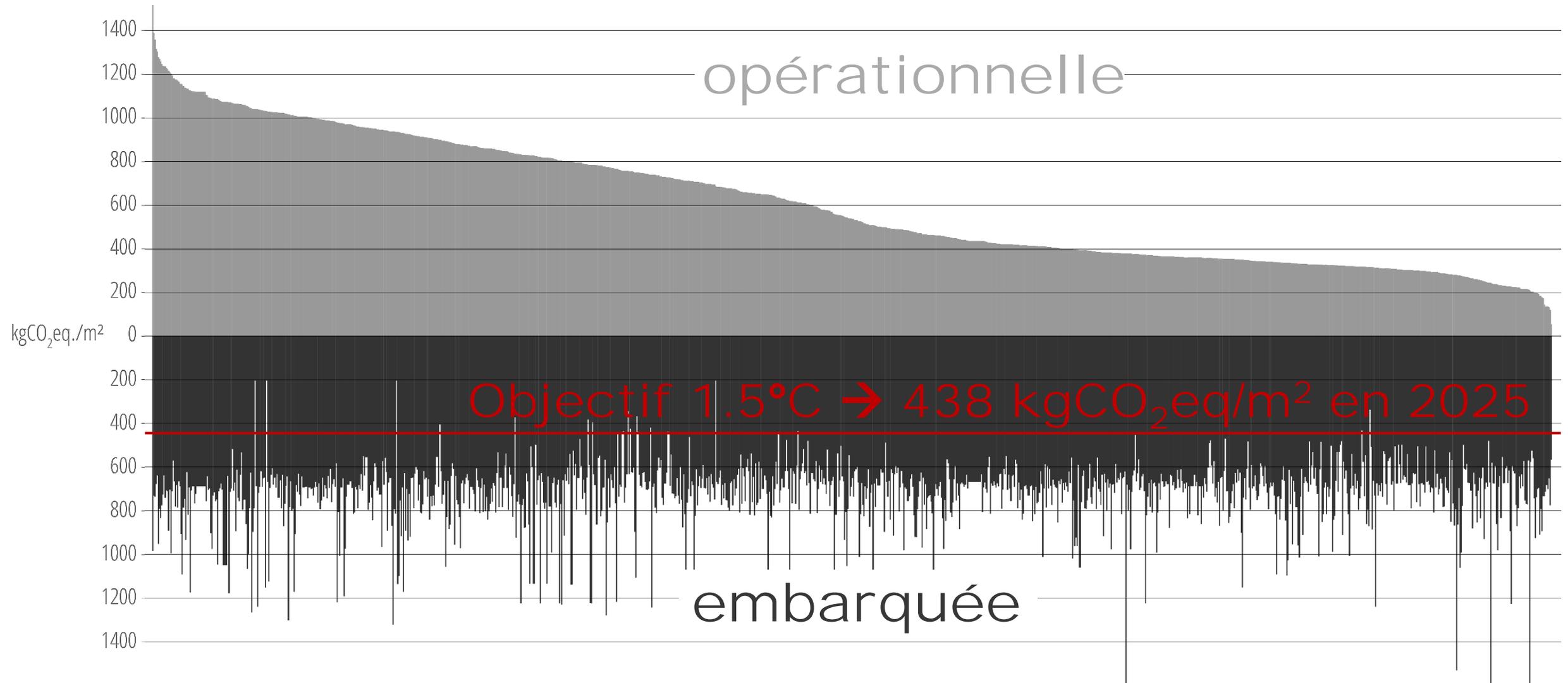
OFEV, 2021

perte du
patrimoine

0.3% volume
des matériaux
démoli
annuellement
en CH

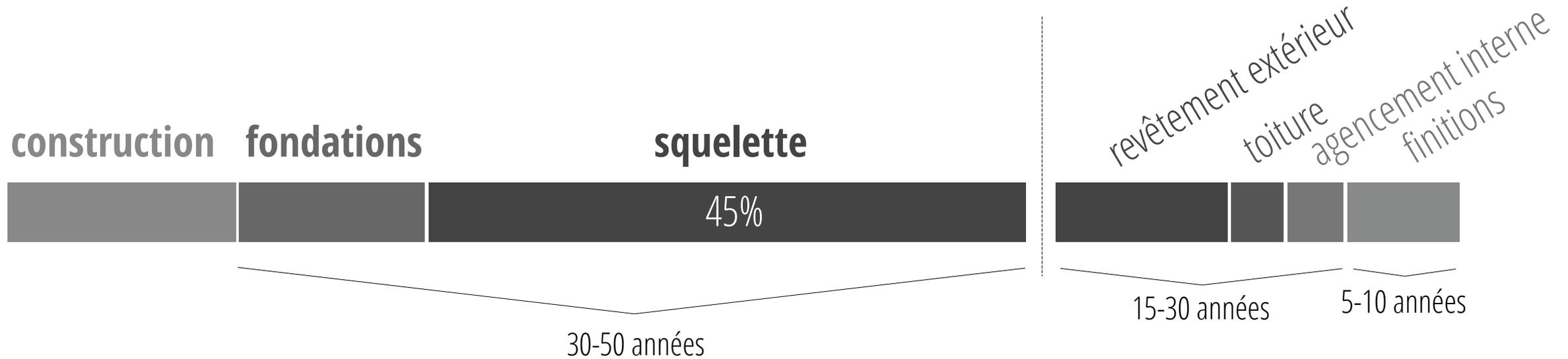
Bauabfälle in der Schweiz - Hochbau
Wüst & Partner, BAfU, 2015

part de l'impact ignorée

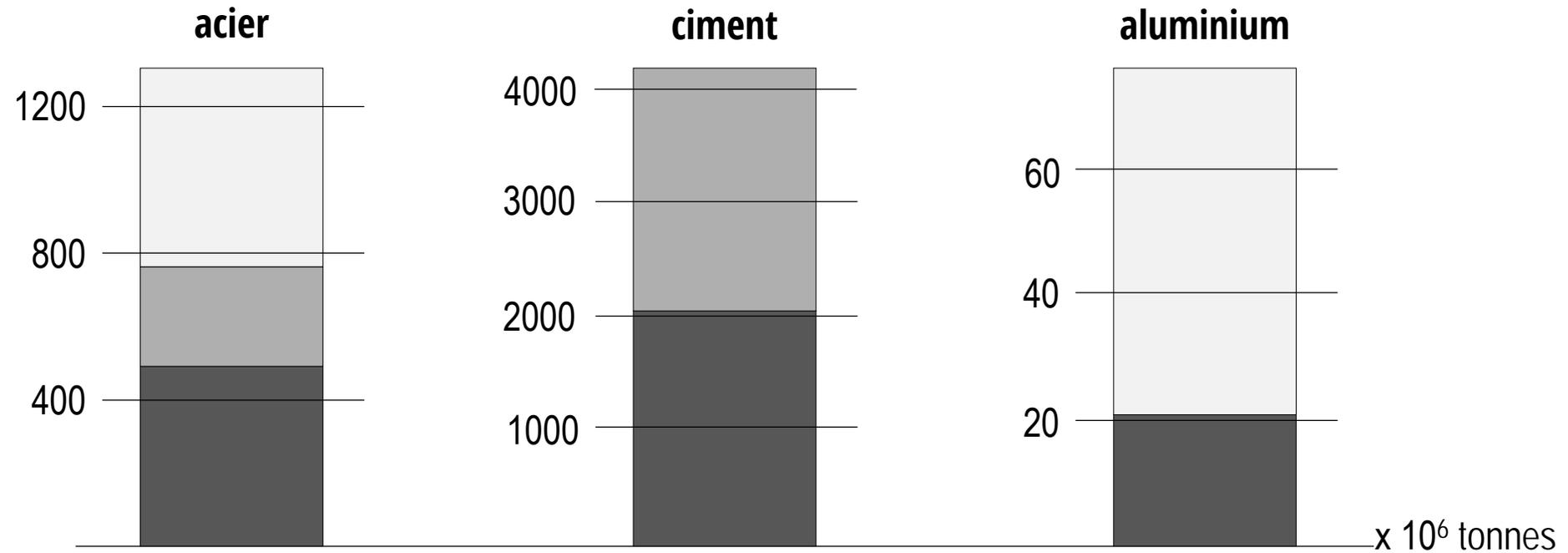


Priore YD et al. · Exploring the gap between carbon-budget-compatible buildings and existing solutions – A Swiss case study · Energy and Buildings · 2023. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112598>

CO2 embarqué des structures porteuses



demande globale d'acier et de ciment, par finalité



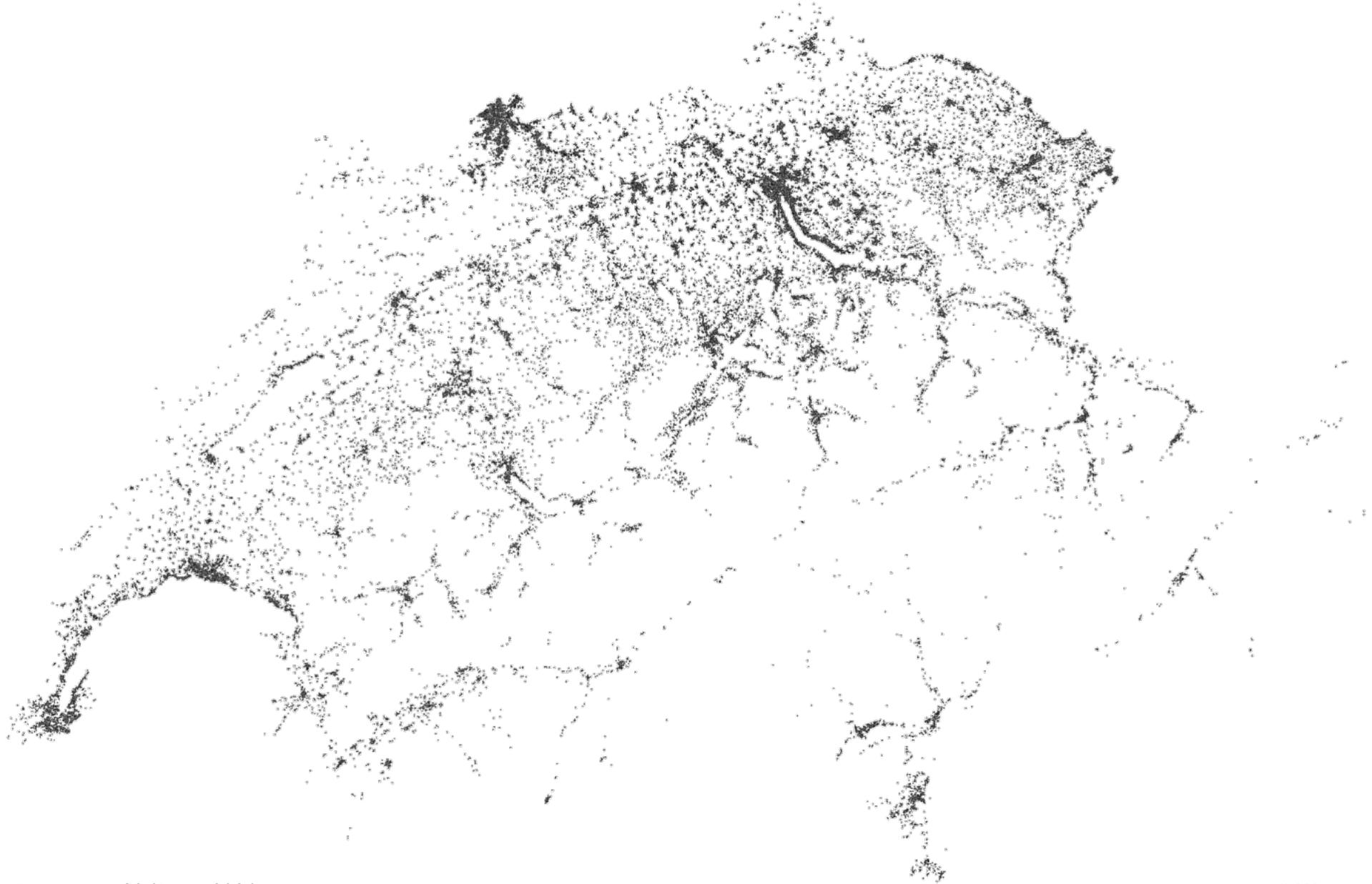
- autres (voitures, camions, bateaux, avions, équipement mécanique, équipement électrique, emballages, ...)
- infrastructure
- bâtiments

année de référence: 2017

impacts de la construction

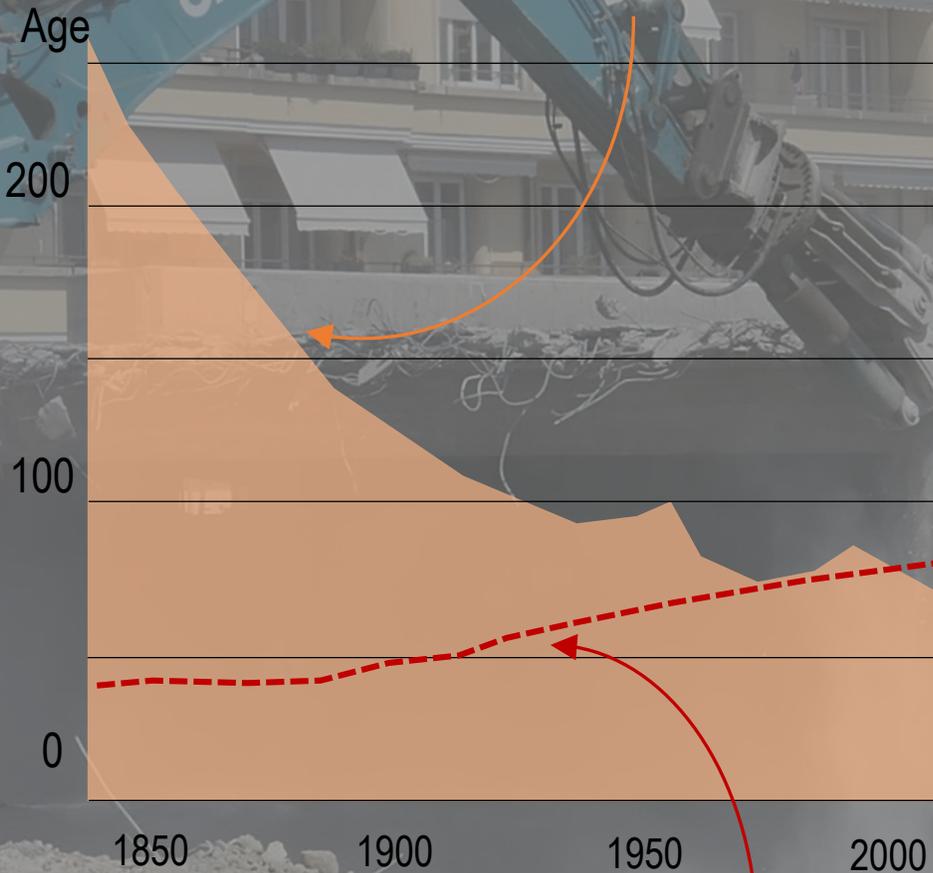


70'000 bâtiments démolis entre 2000 et 2022



évolution des besoins

Âge moyen des bâtiments au moment de la démolition



Espérance de vie humaine

déchets solides

par industrie, en poids
Europe (28)



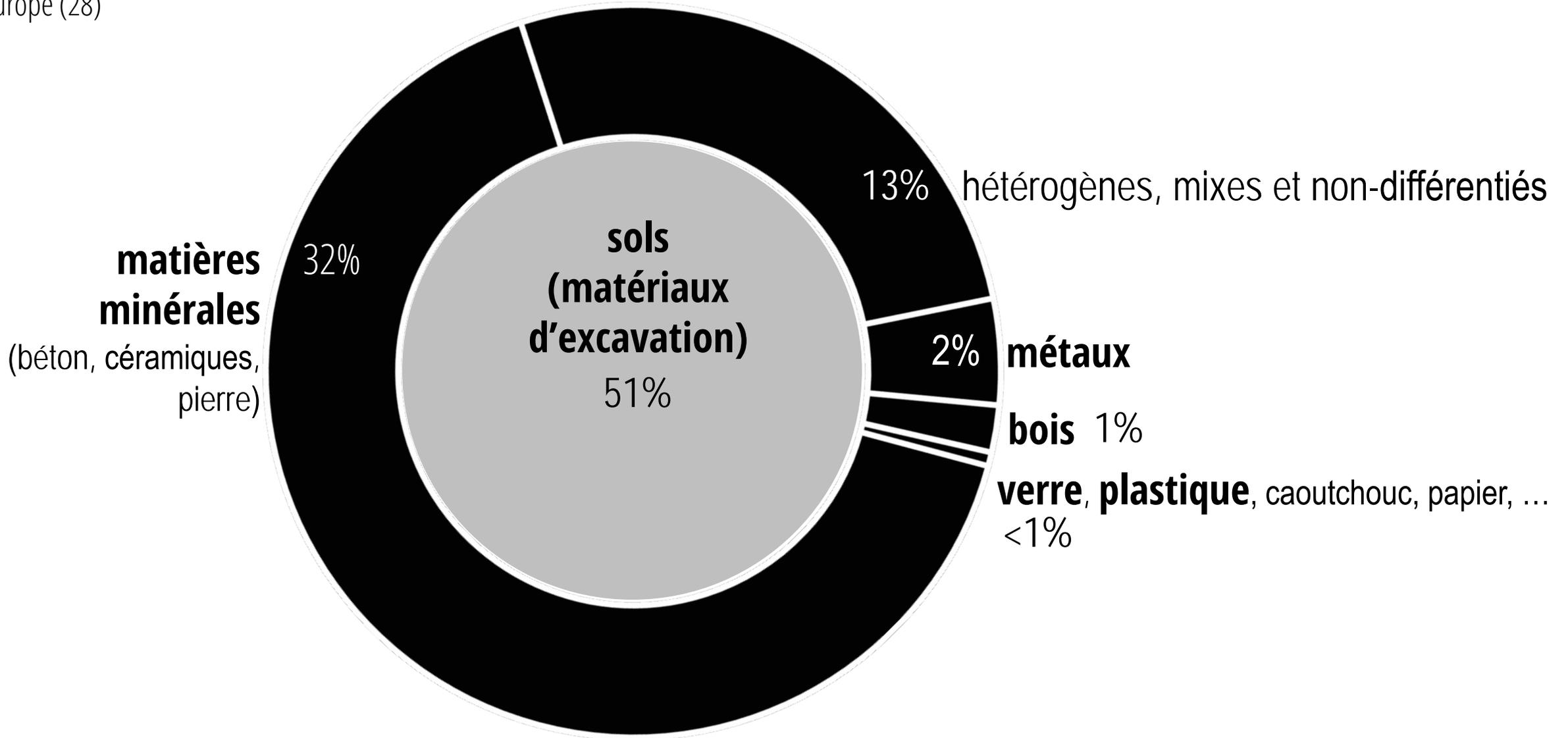
construction & demolition **≈33%**

- extraction
- production
energie
- autres secteurs
- ménages

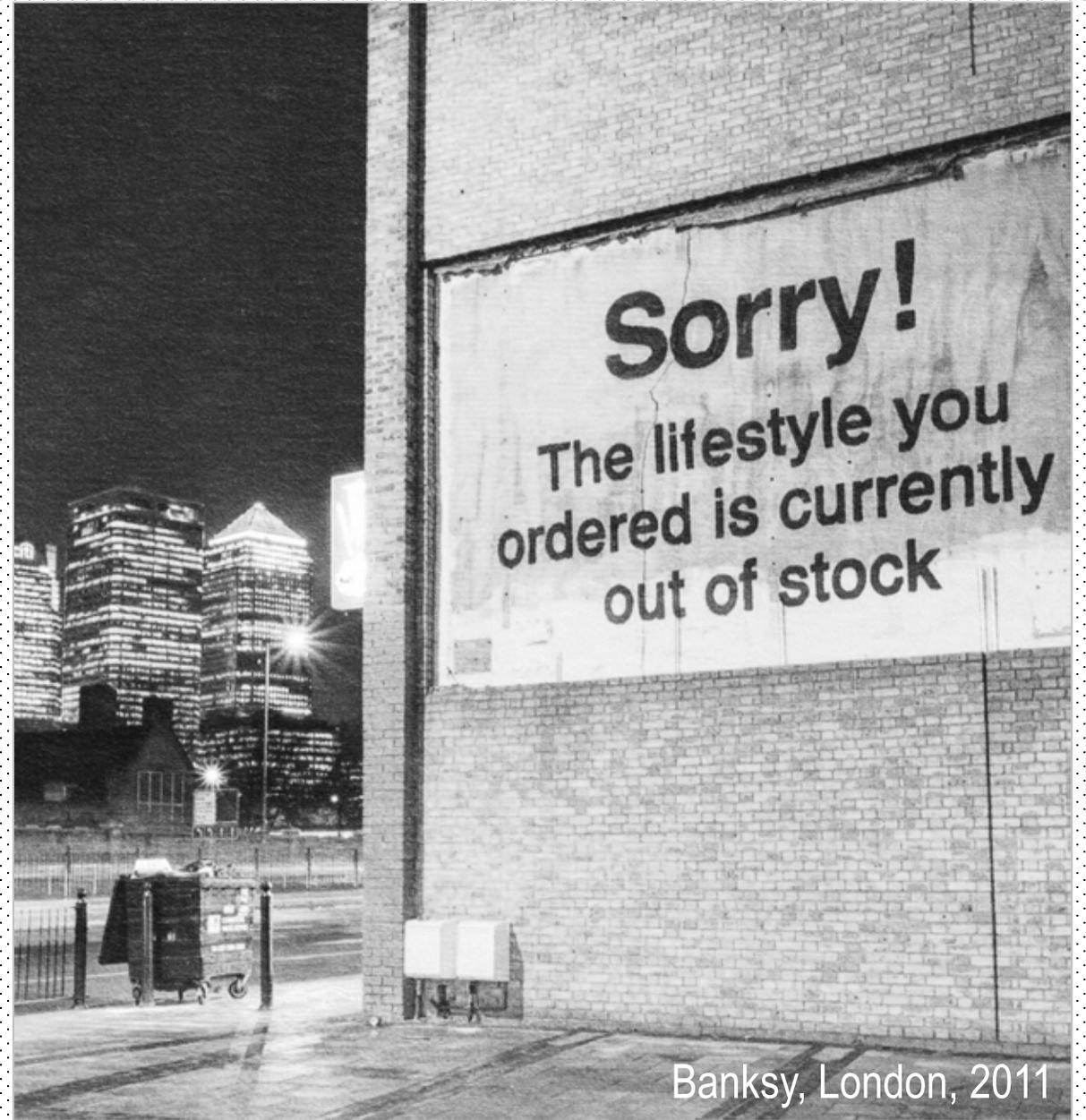


déchets de construction & démolition

par matériaux, en poids
Europe (28)

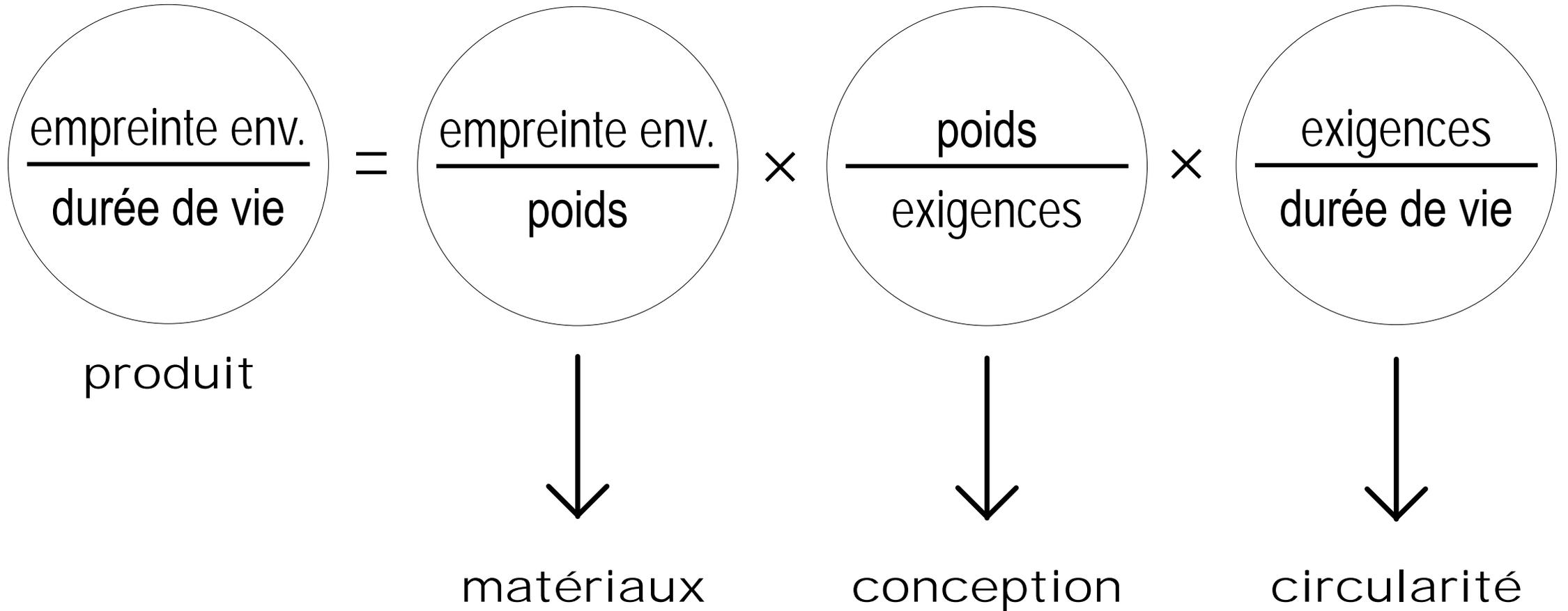


stratégie

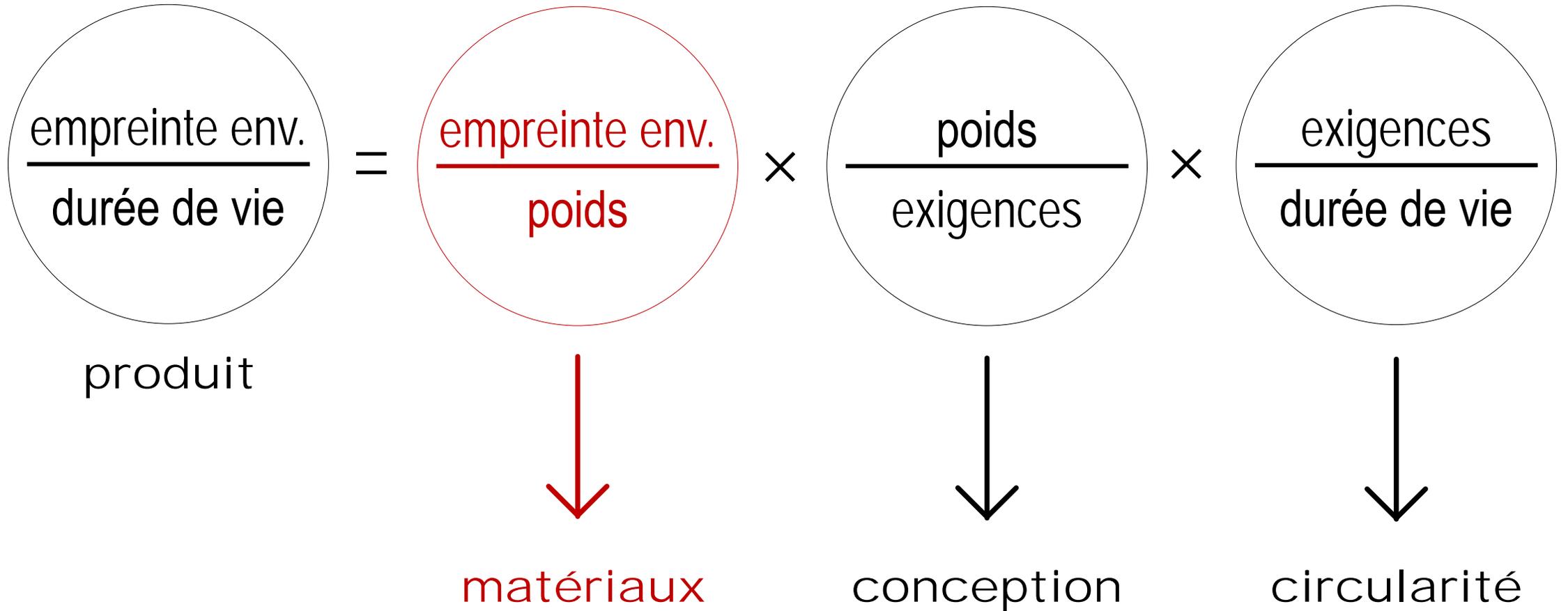


Banksy, London, 2011

stratégies de conception



stratégies de conception



choix des matériaux

aluminium	8.24 kgCO2e/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 traction

acier bois aluminium



objectifs contradictoires: exemple de la barre en traction

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

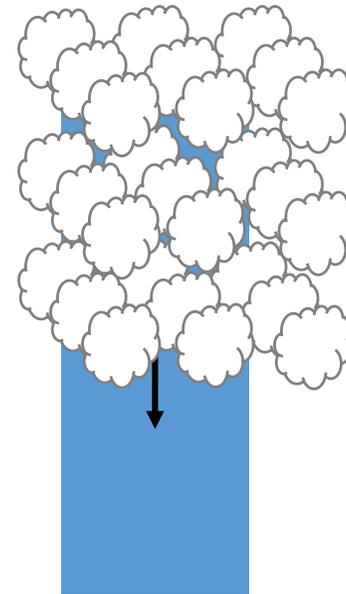
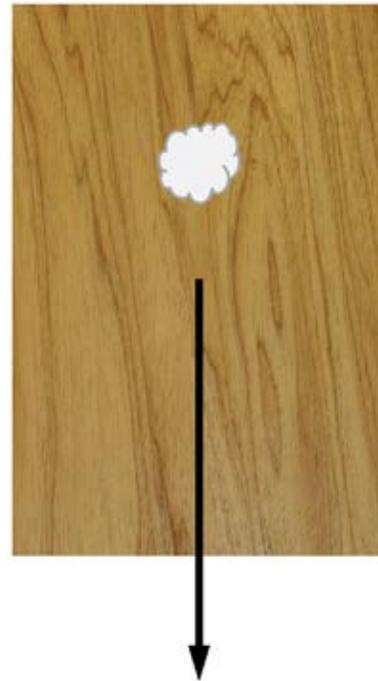
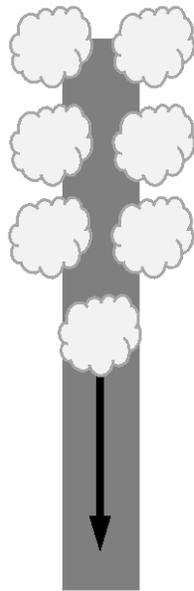


empreinte carbone [kg_{CO2e}]

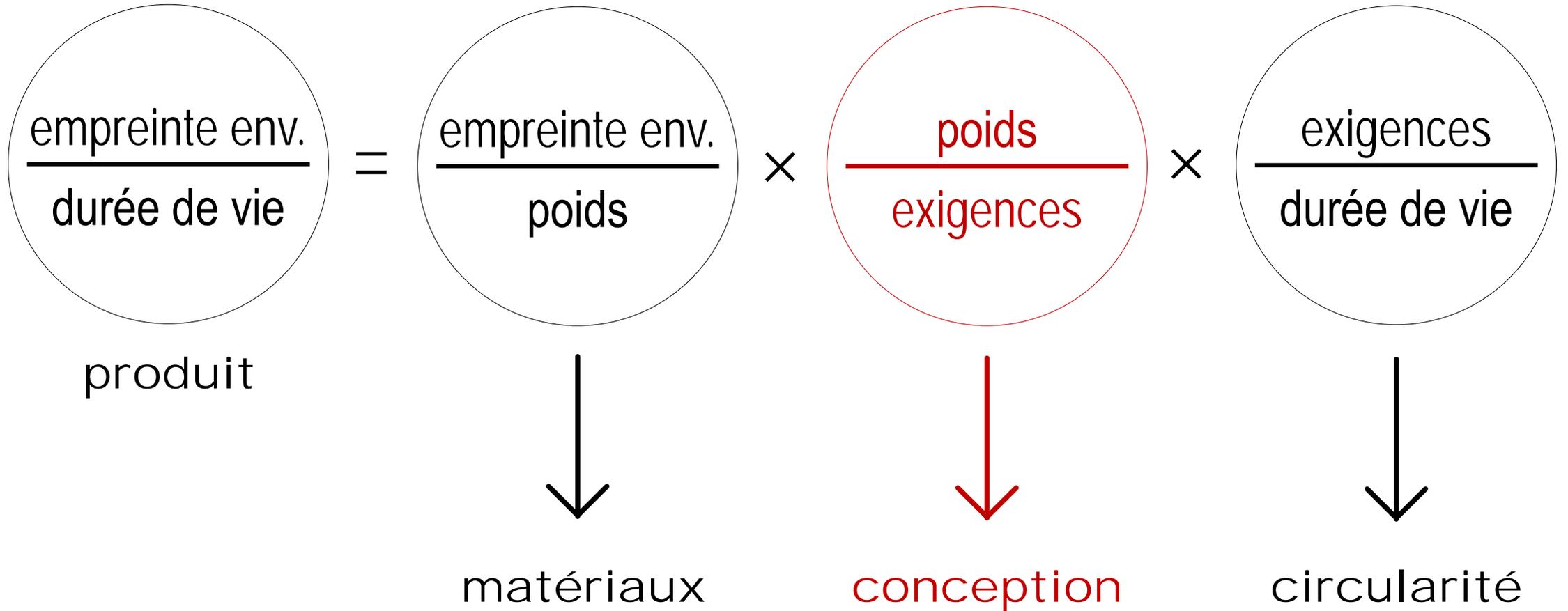
$$\begin{aligned} &= \text{coeff. carbone [kg}_{\text{CO2e}}/\text{kg}] \times \text{masse [kg]} \\ &= \rho \text{ [kg/m}^3\text{]} \times \text{volume [m}^3\text{]} \\ &= \text{longueur de la barre [m]} \times \text{aire de la section [m}^2\text{]} \\ &= \text{force appliquée [kN]} / \sigma \text{ [kN/m}^2\text{]} \end{aligned}$$

objectifs contradictoires: exemple de la barre en traction

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

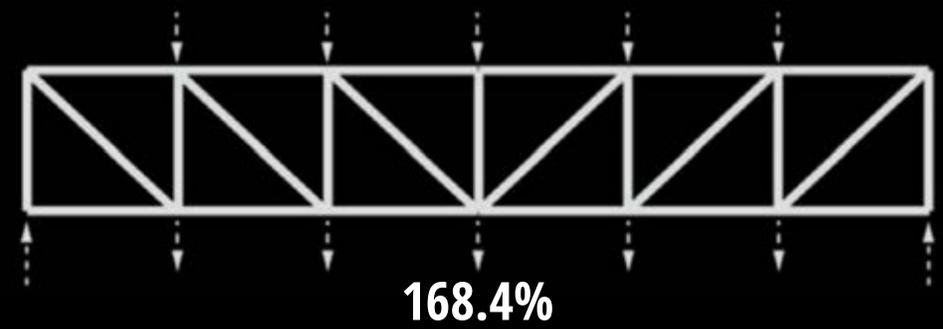
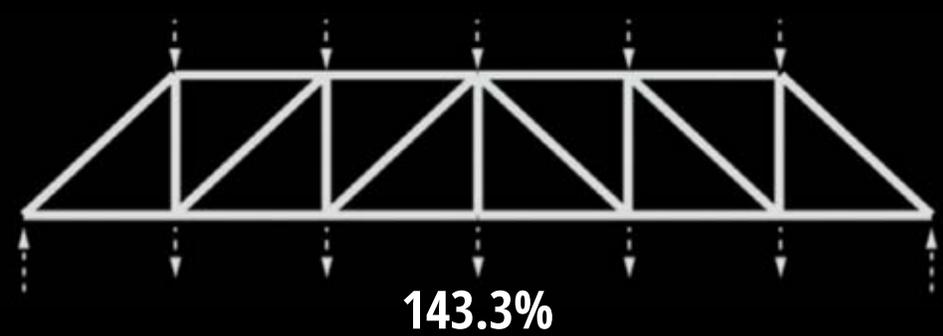
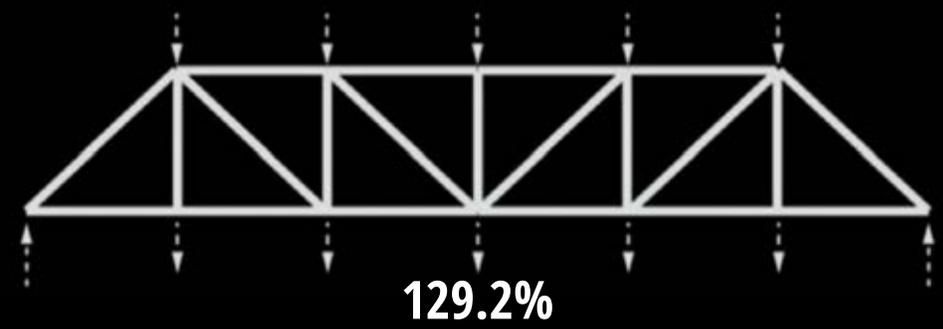
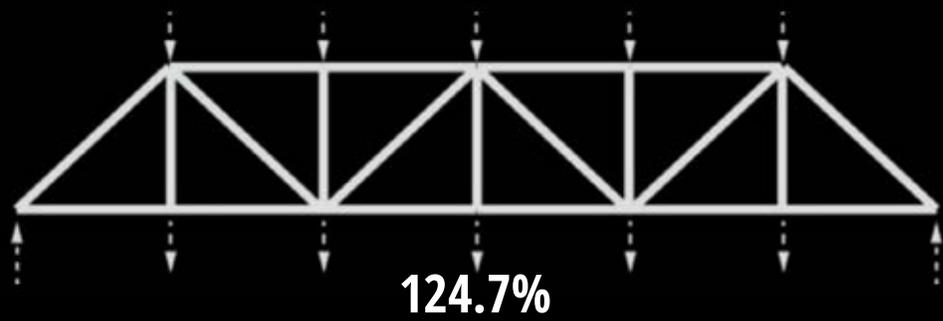
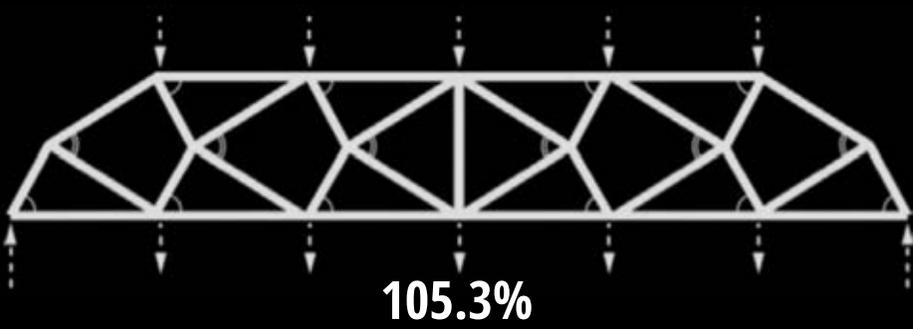
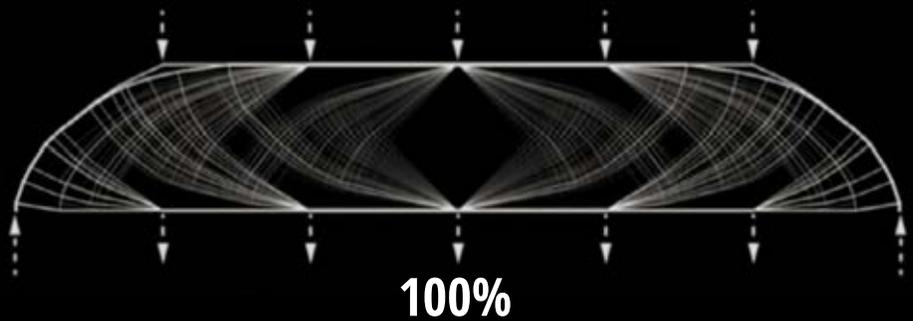


stratégies de conception

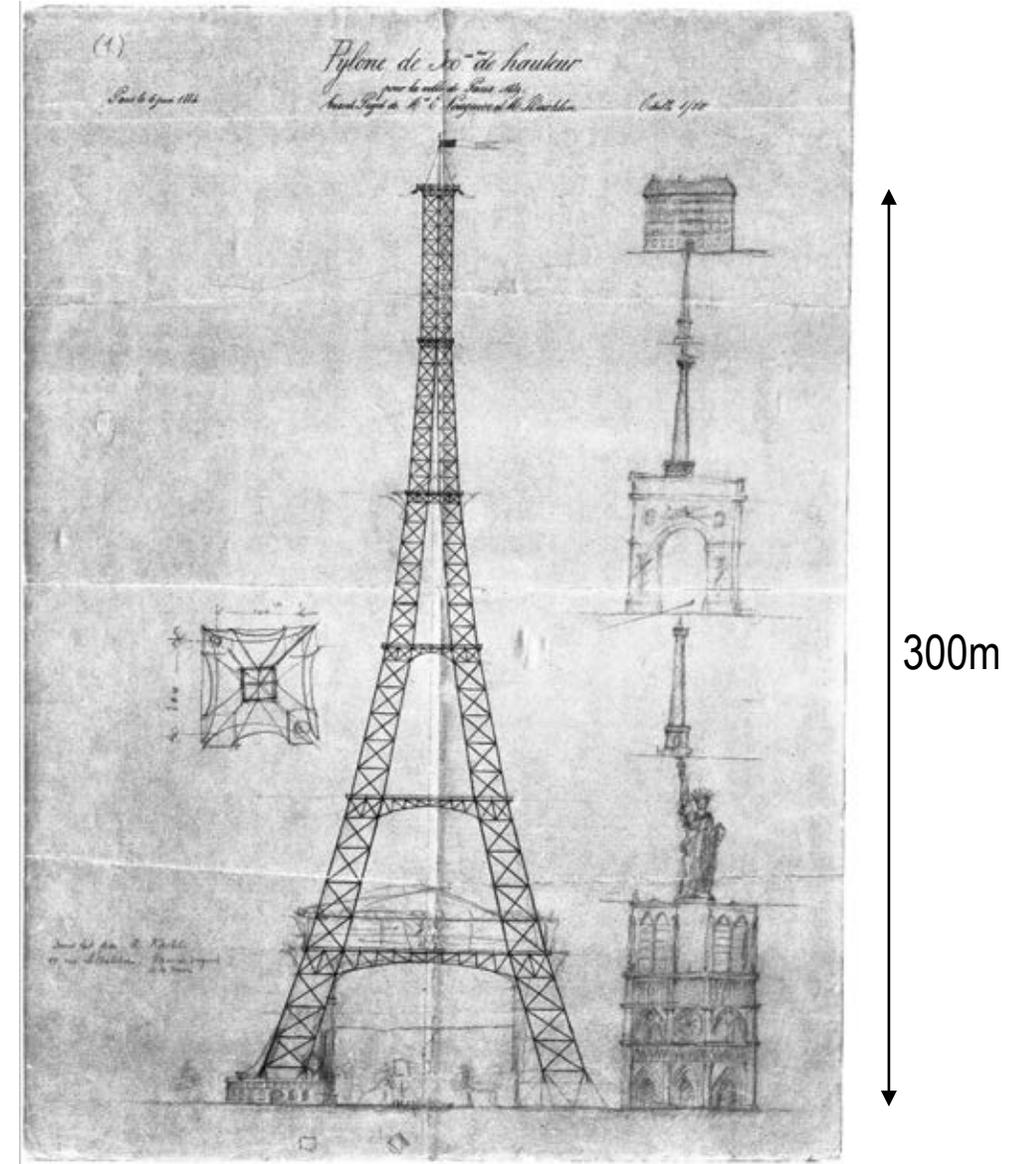


efficacité topologique

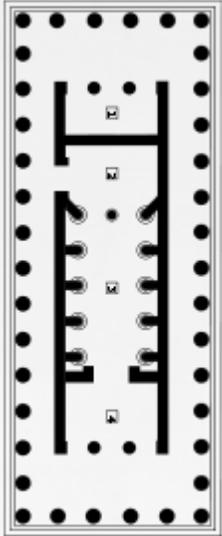




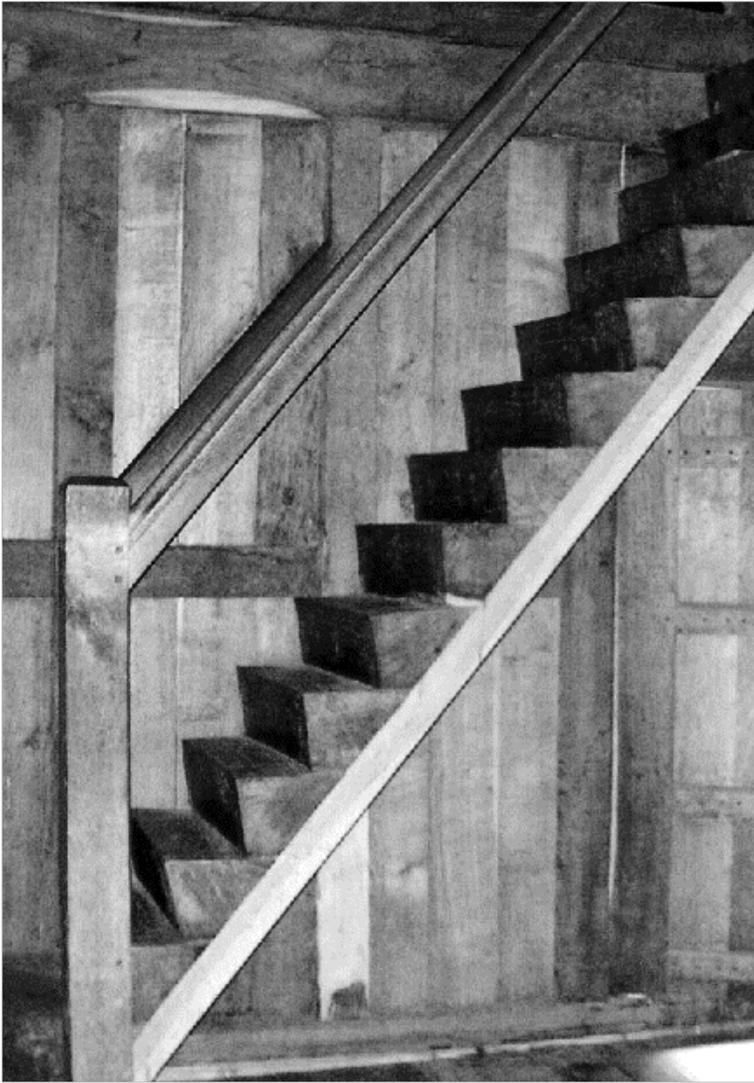
efficacité géométrique



adéquation entre matériau et géométrie



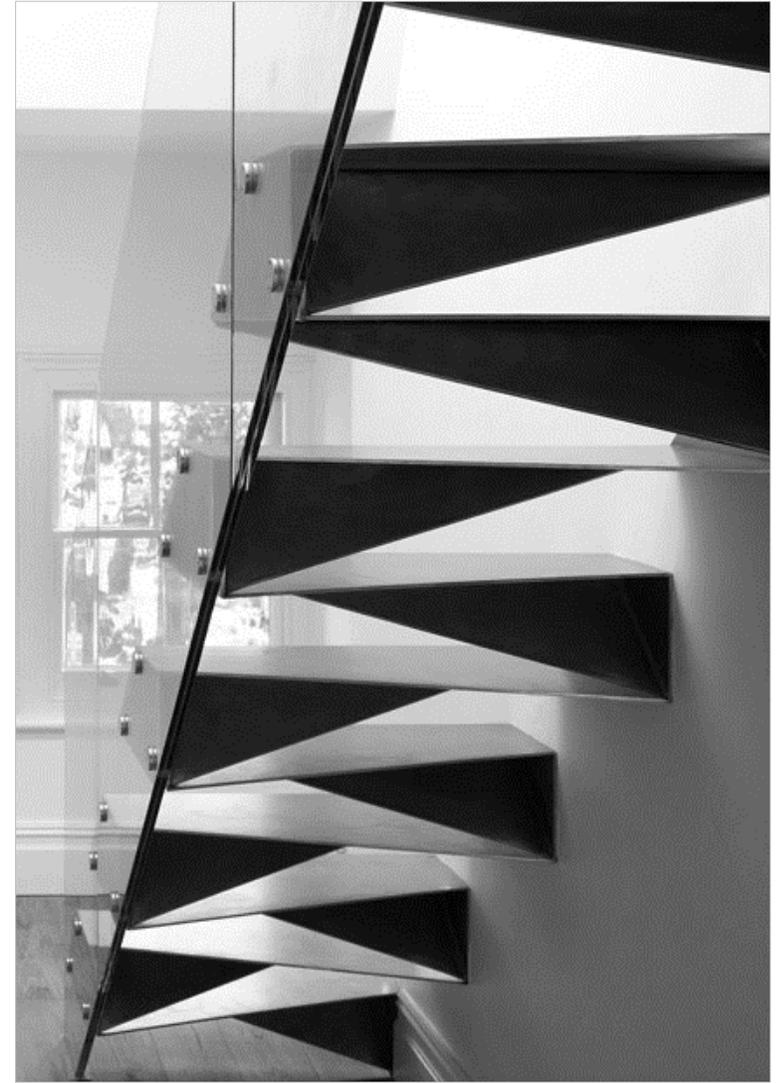
adéquation entre matériau et géométrie



Mount Grace Priory – XIVth century

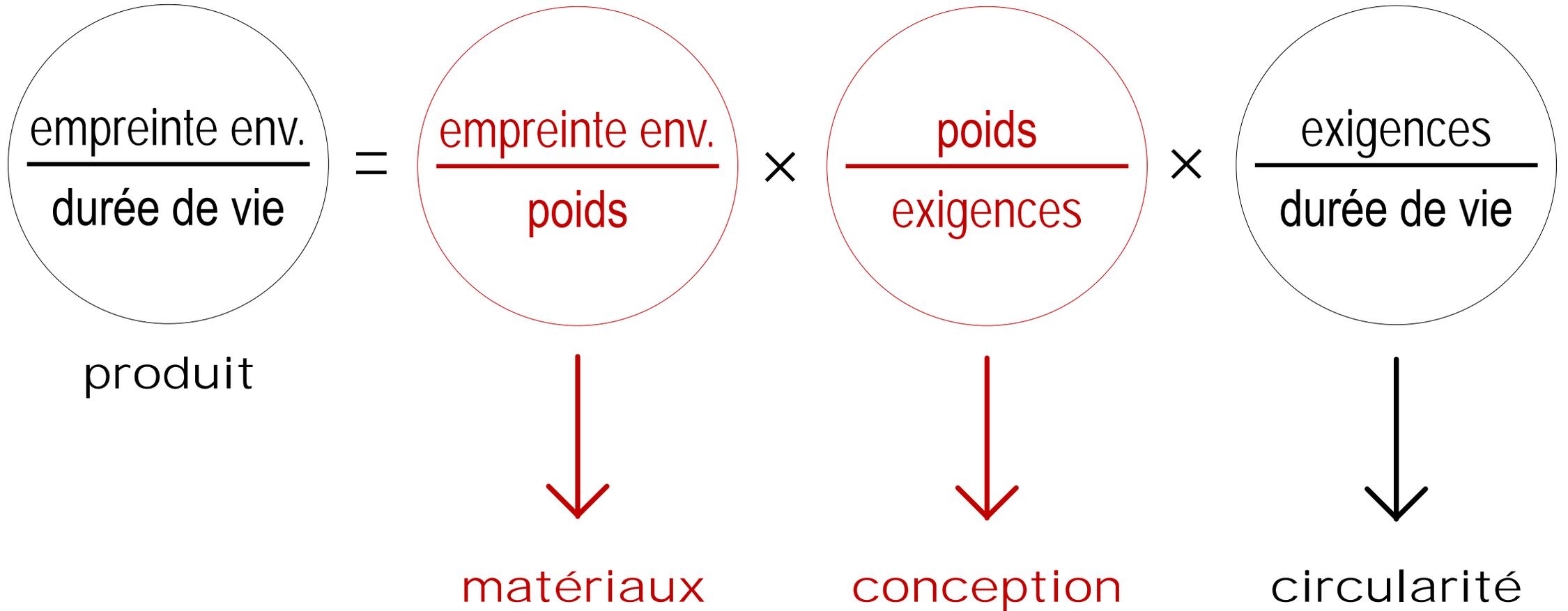


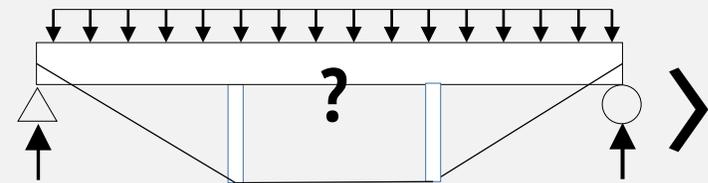
First National Bank – Guastavino 1890



Bell Phillips architects

stratégies de conception





- > **charges appliquées**
 $q = \dots \text{ kN/m}$ (poids propre, neige, vent,...)
- > **équilibre statique**
 $\sum H = 0$
 $\sum V = 0$
 $\sum M = 0$
- > **compatibilité des déformations**
- > **états limites ultimes** > **états limites de service**
 $\sigma \leq \dots$ $\delta \leq \dots$
- > **sections**
 $A = \dots$
 $EI = \dots$
- > **assemblages**

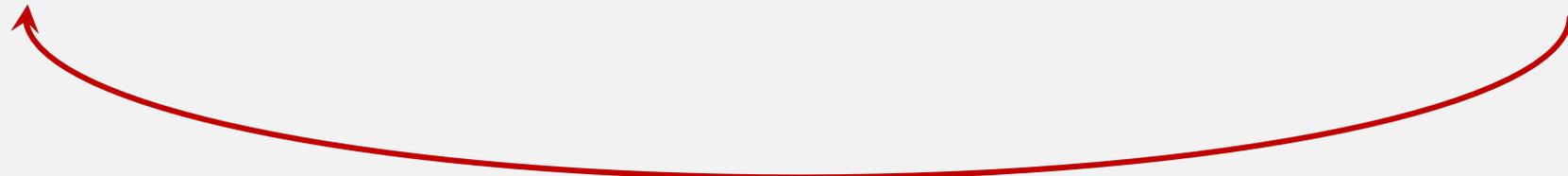
- > **choix des matériaux**
- > **choix géométriques**
- > **choix topologiques**



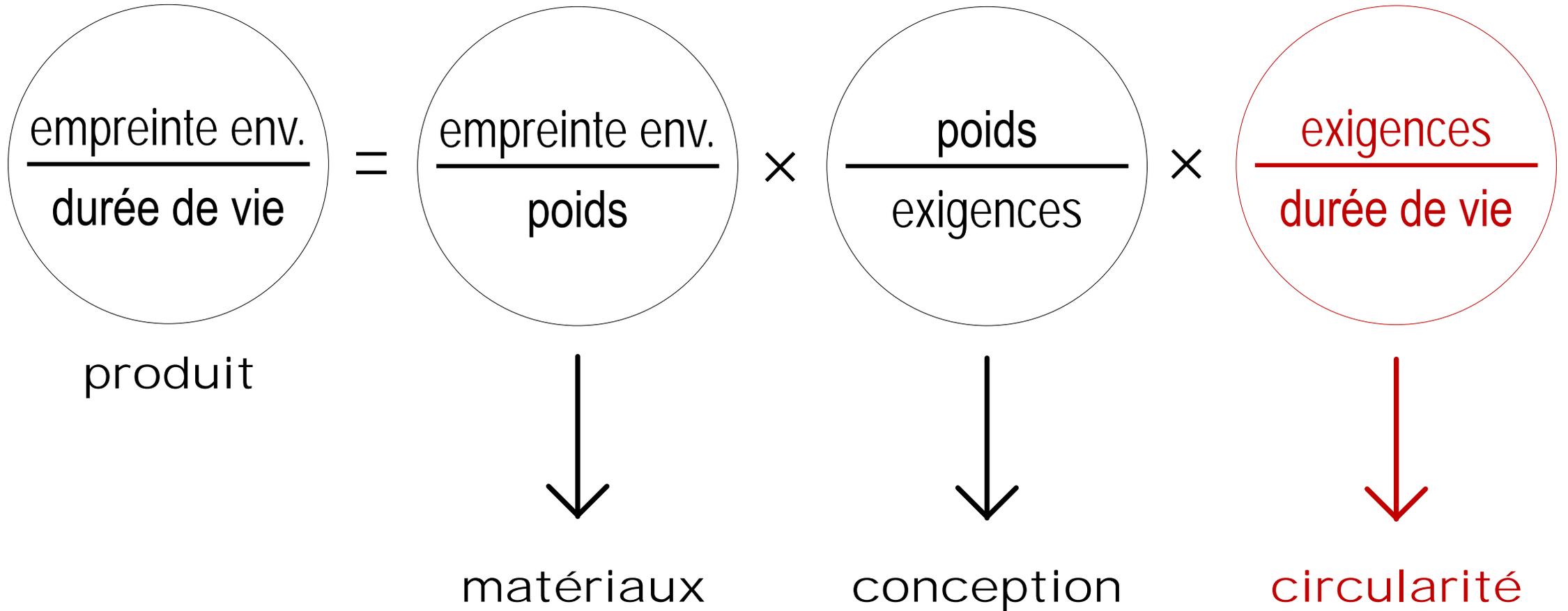
> **empreinte environnementale**

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

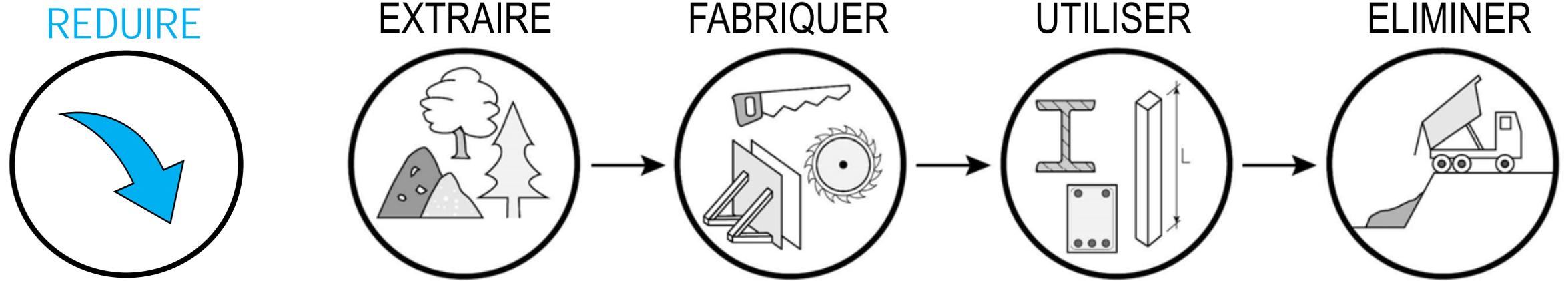
$\text{kgCO}_2\text{e/kg}$ kg/unit



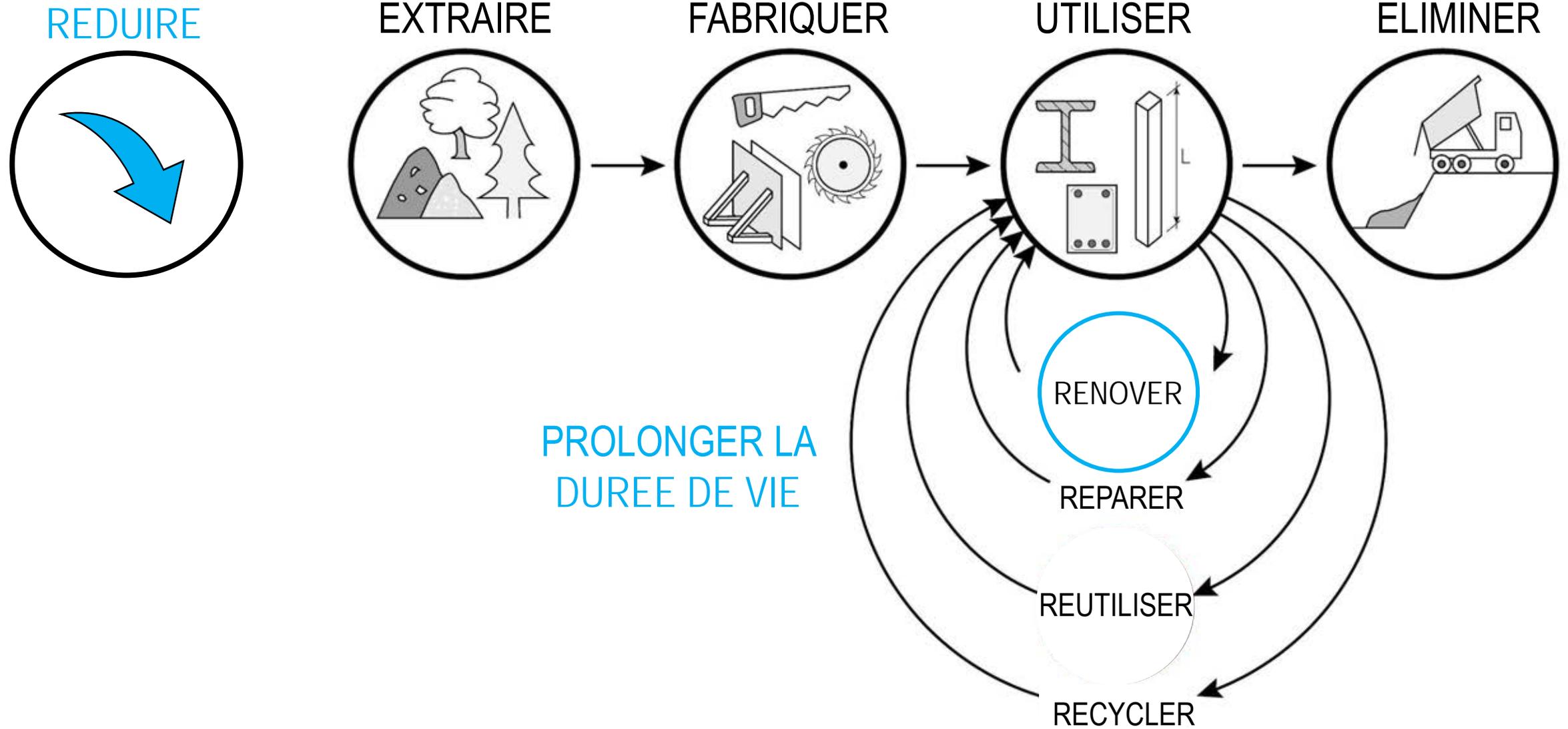
stratégies de conception



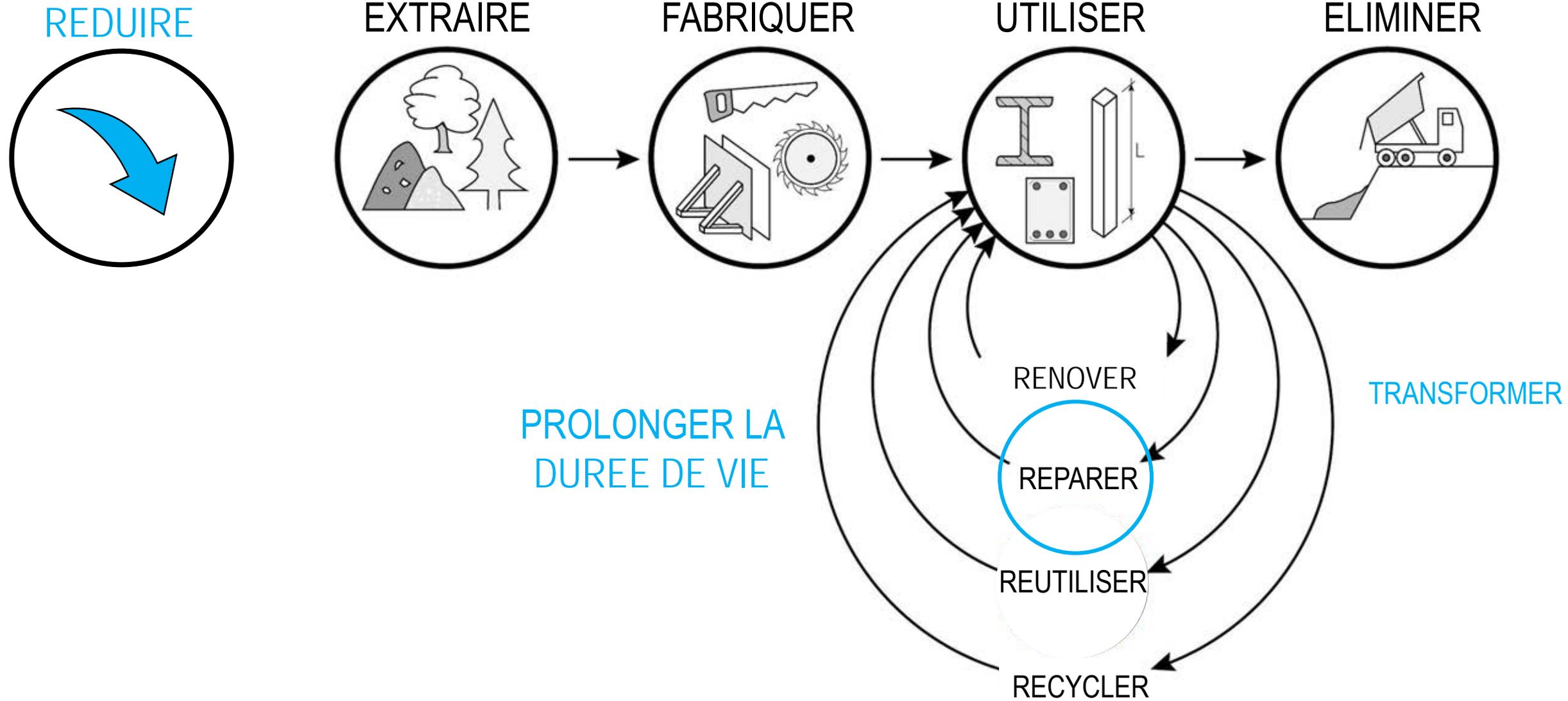
économie linéaire



économie circulaire



économie circulaire



transformation lourde



Rénovation, agrandissement et surélévation d'un immeuble locatif - 9 avenue Wendt, Genève

Propriétaire : Vaudoise Vie, Compagnie d'Assurance SA

Entreprise totale : HRS Real Estate SA

Architecte : Clavien & Associés Sàrl

Ingénieur civil : Nicolas Fehlmann Ingénieurs Conseils SA

Réalisation : 2023 - fin prévue 2024



***50,000 sqm vacancy
in the middle
of Berlin...***

© Ute Zscharnt, 2019

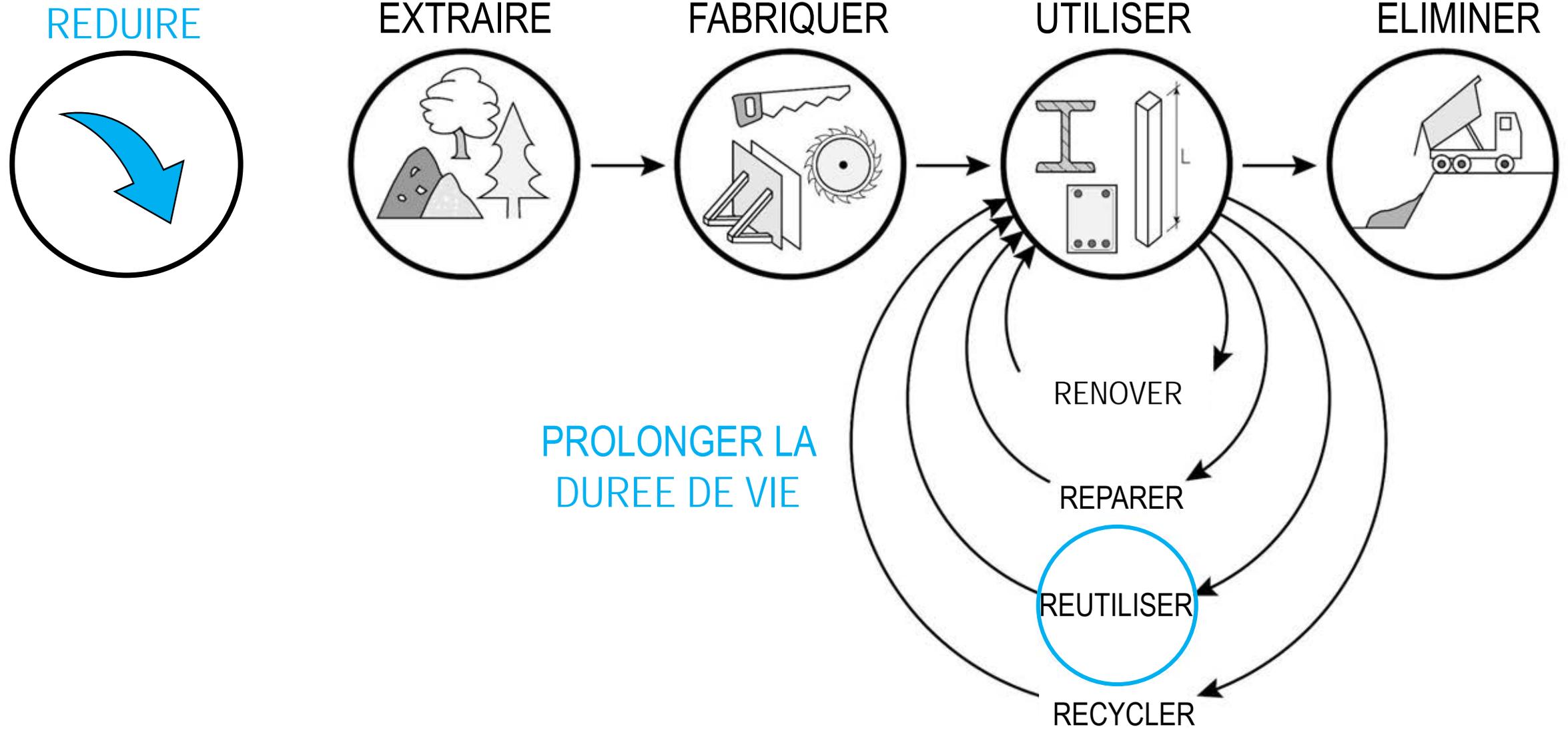
transformation et changement d'usage



Bâtiment administratif →
lieu à usage mixte (logement,
culture, commercial, bureaux)

<https://hausderstatistik.org/modellprojekt/>

économie circulaire

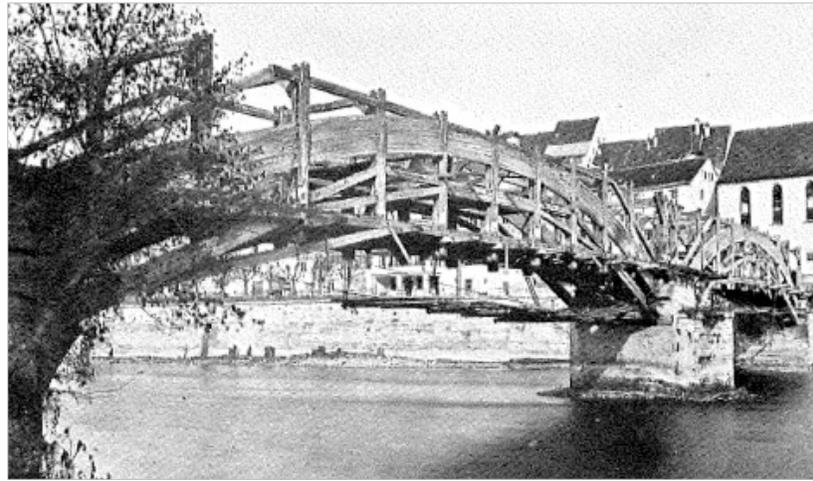


exemple historique

1810



1919



Eglisau, CH

Rheinau, CH

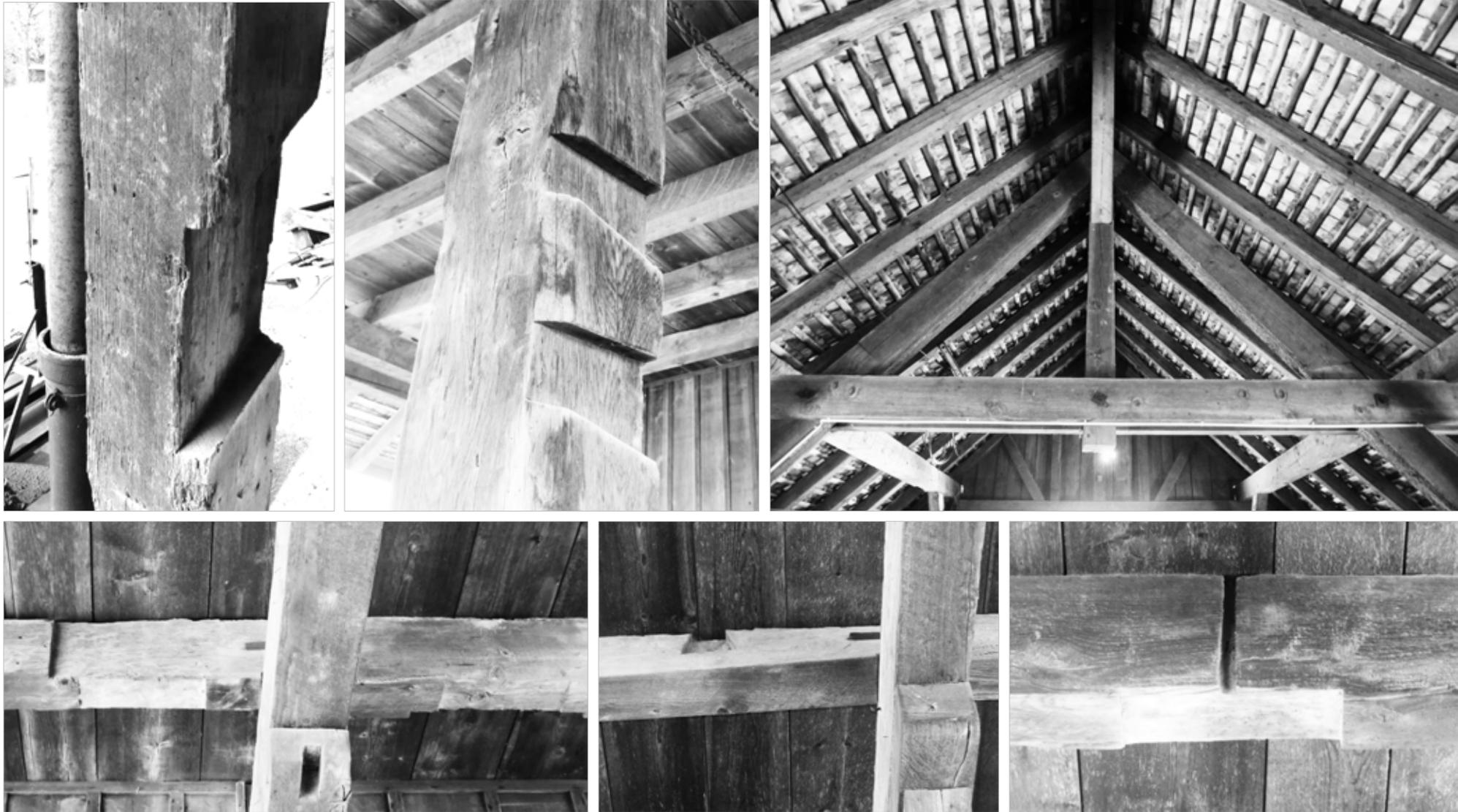


1920



2019

exemple historique



pratique banale et courante



exemple récent

bâtiment existant



approvisionnement



rehabilitation et réemploi



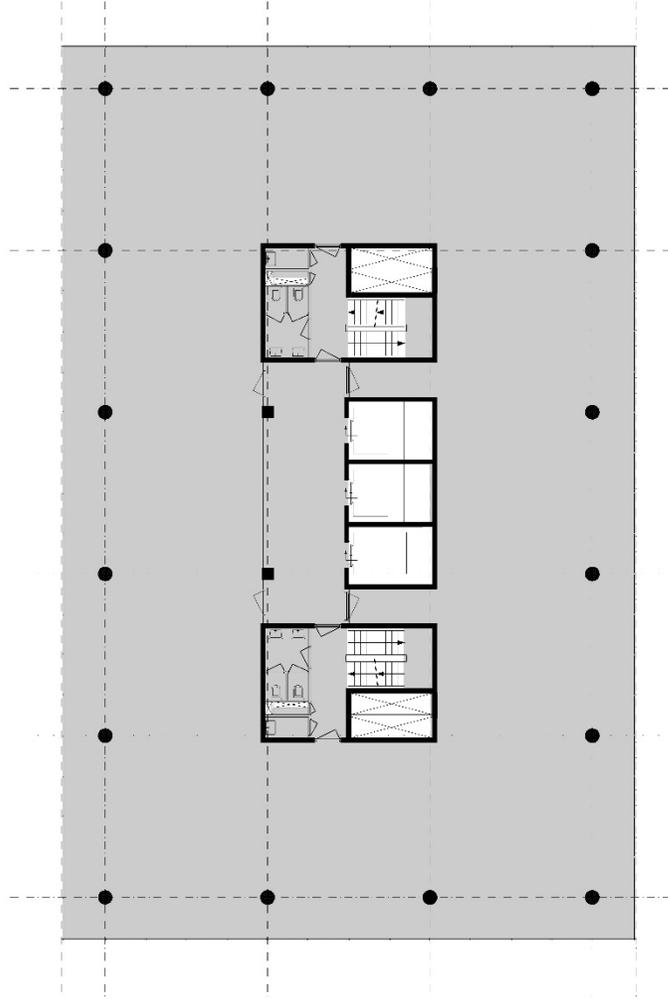
réemploi opportuniste



modularité fermée



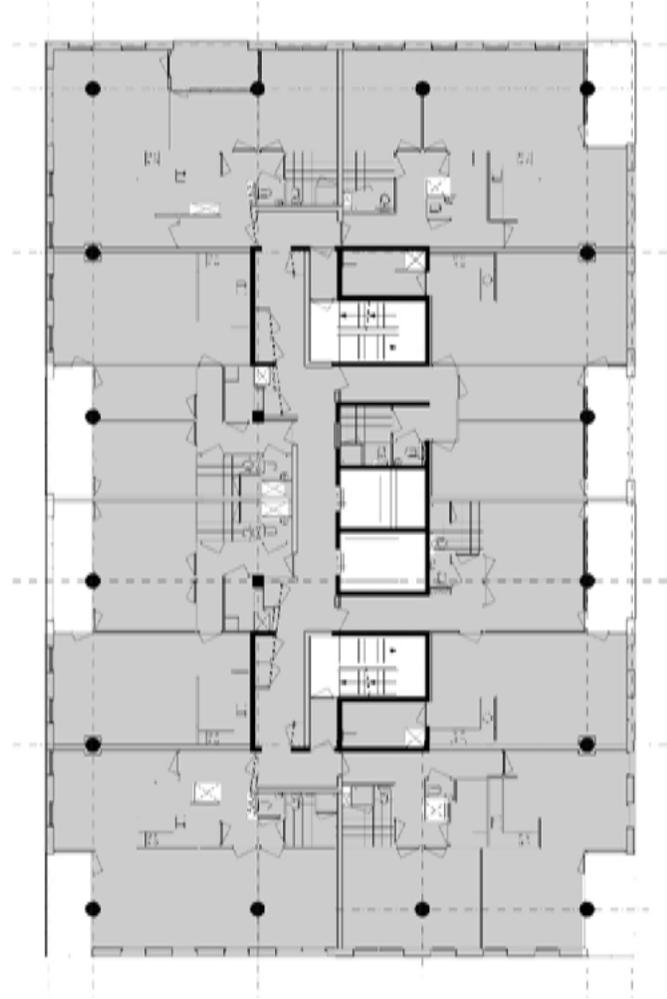
exigences pour les dalles prêtes à être réutilisées



1^{er} cycle de vie



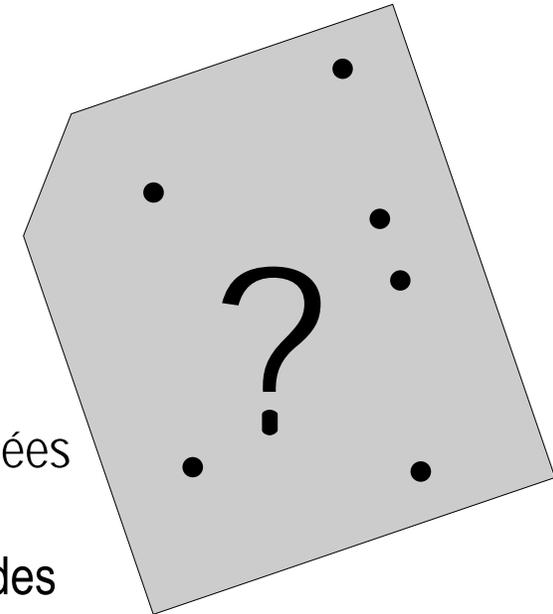
nouveaux
noyaux,
nouvelle
enveloppe



2nd cycle de vie
vie



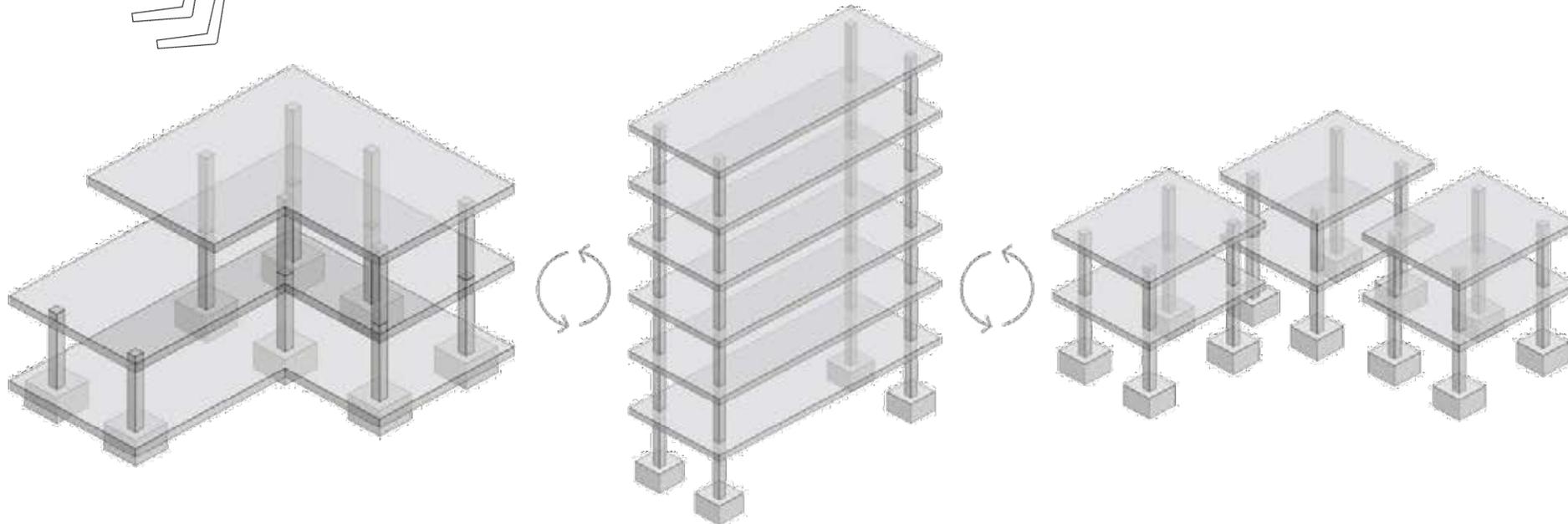
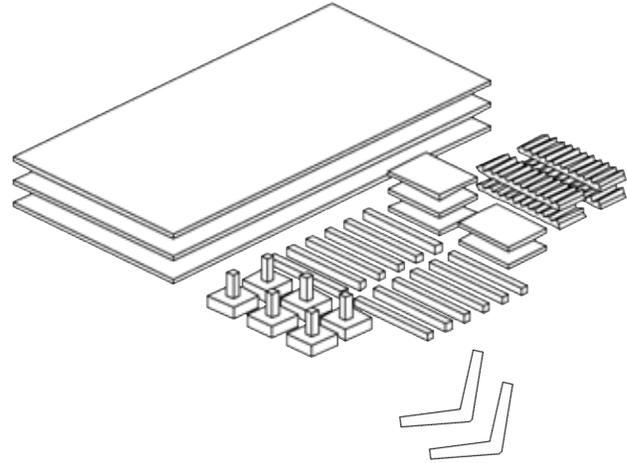
nouvelles travées
nouvelles
dispositions des
colonnes...



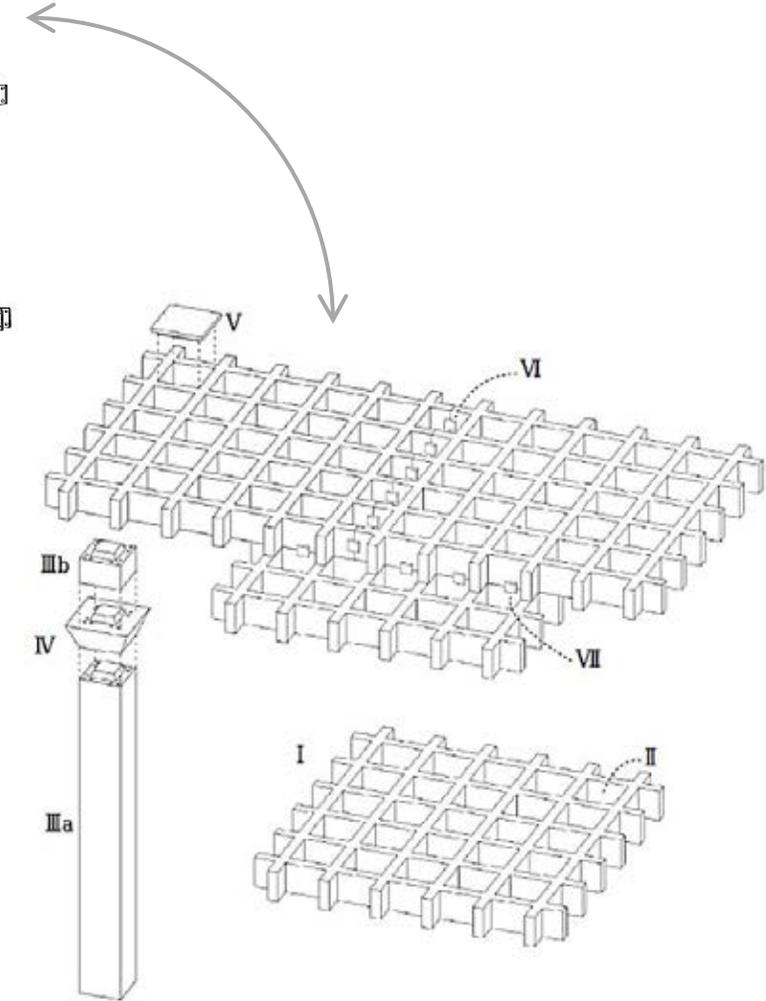
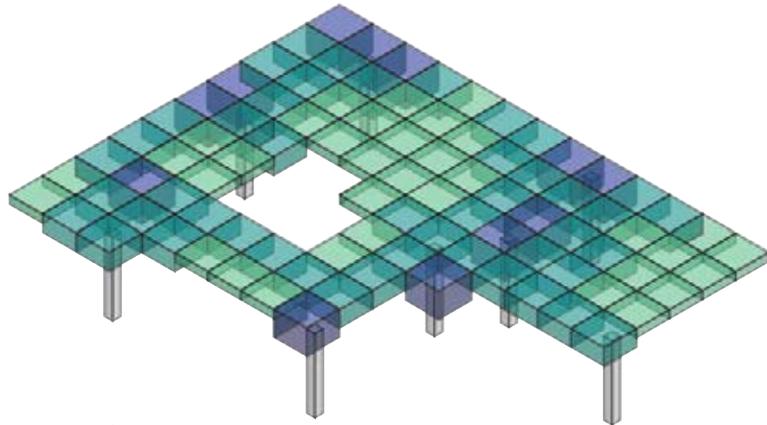
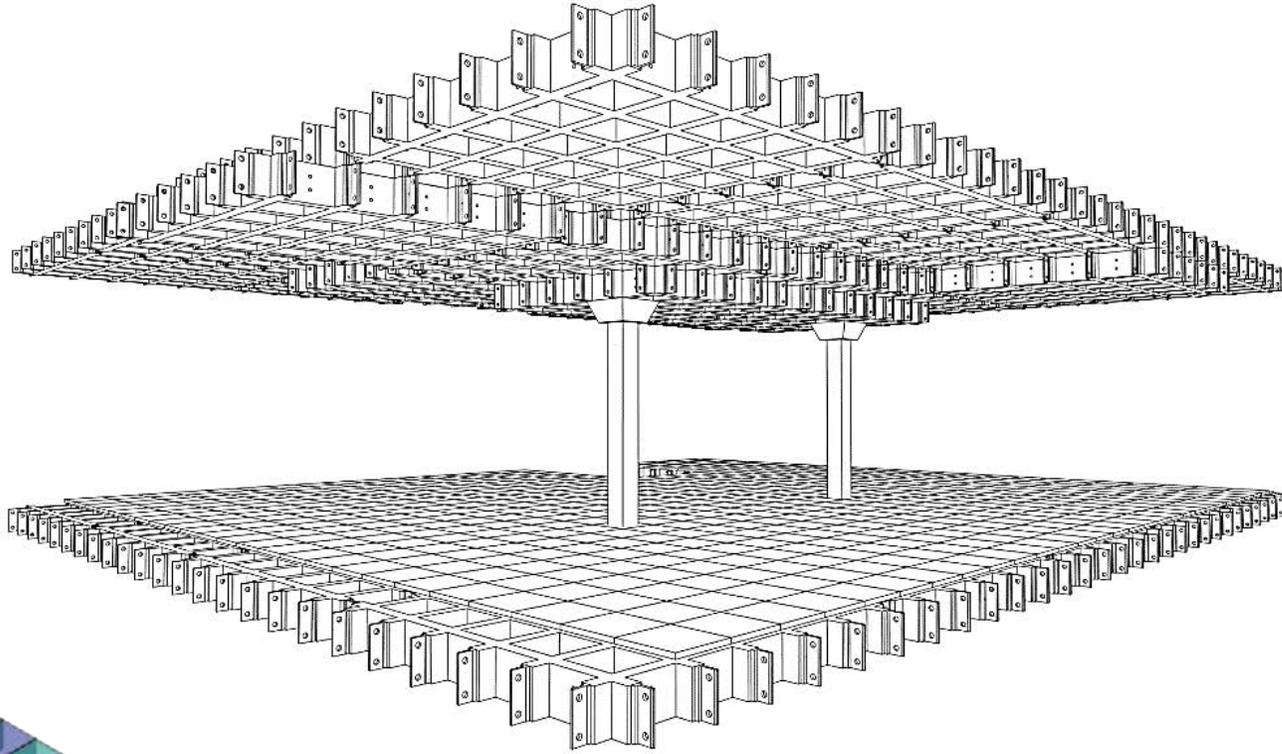
3^e cycle de vie

exigences pour les dalles prêtes à être réutilisées

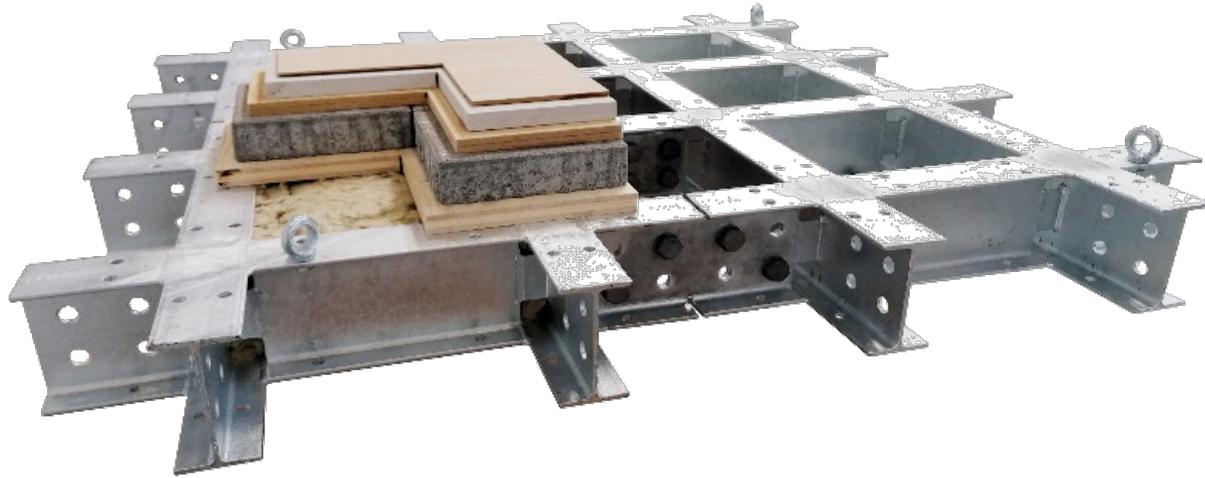
- Fabrication et détails **durables**
- assemblages **polyvalents** pour retarder l'obsolescence
- connexions **réversibles** pour permettre le démontage et le remontage
- éléments **modulaires** pour remplacements et reconfigurations sans déchets
- systèmes **transformables** pour permettre de nouvelles dispositions



one slab ready for unknown new service lives

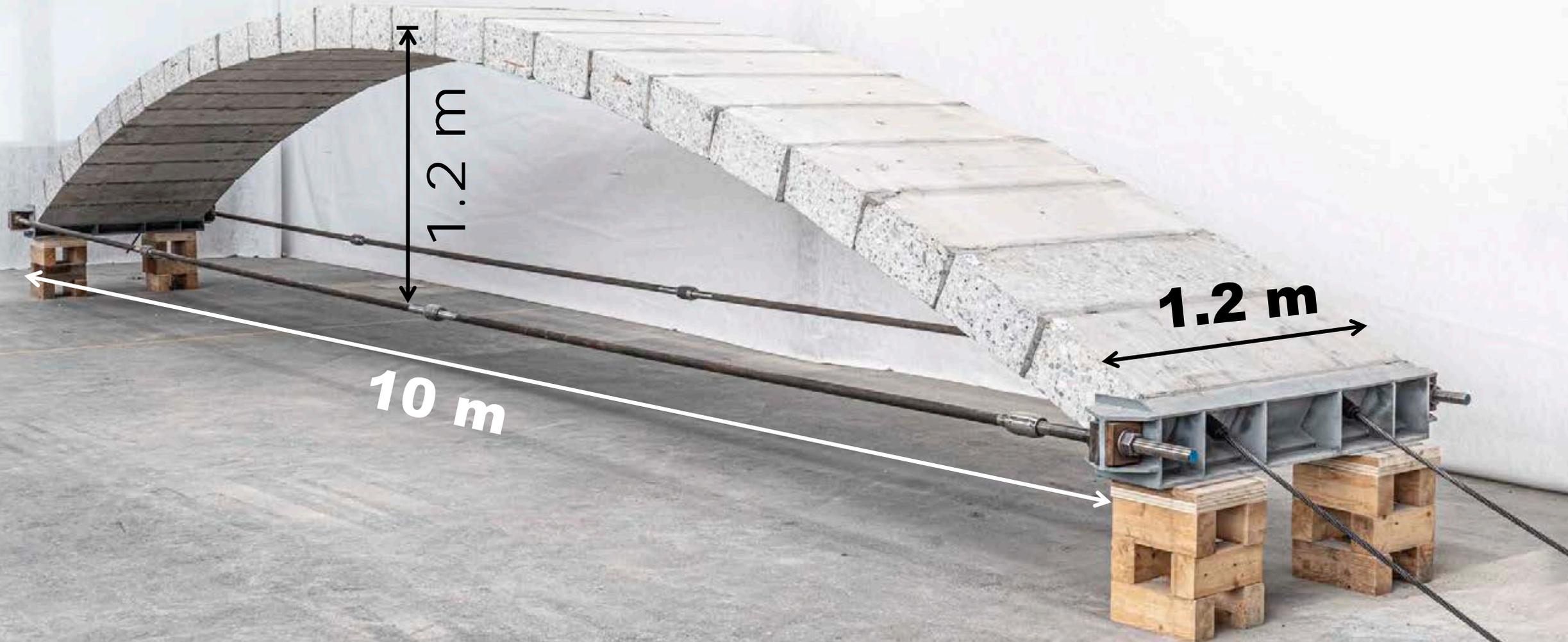


one slab - many service lives

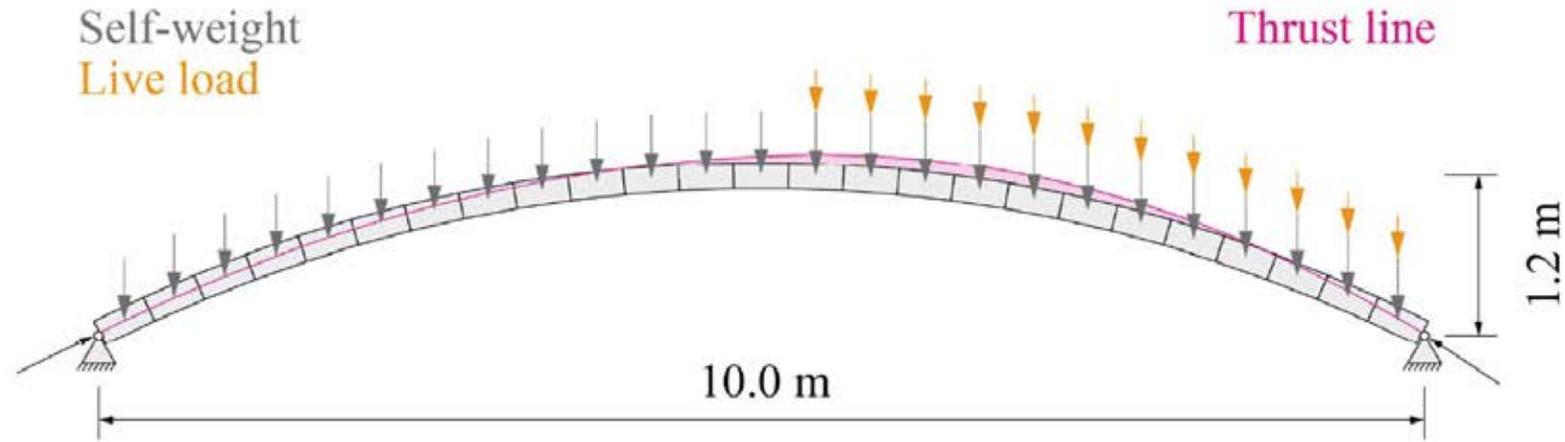


European Patent - EP3816360

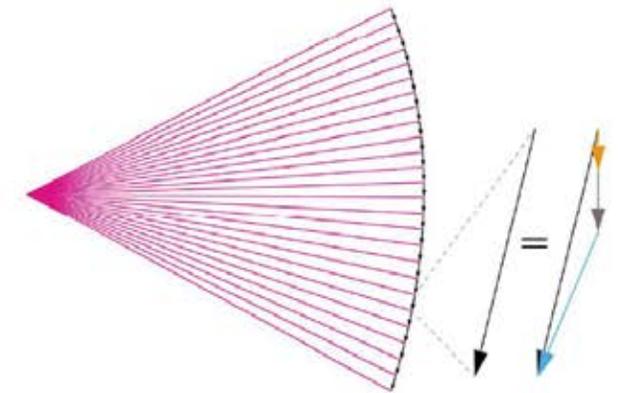
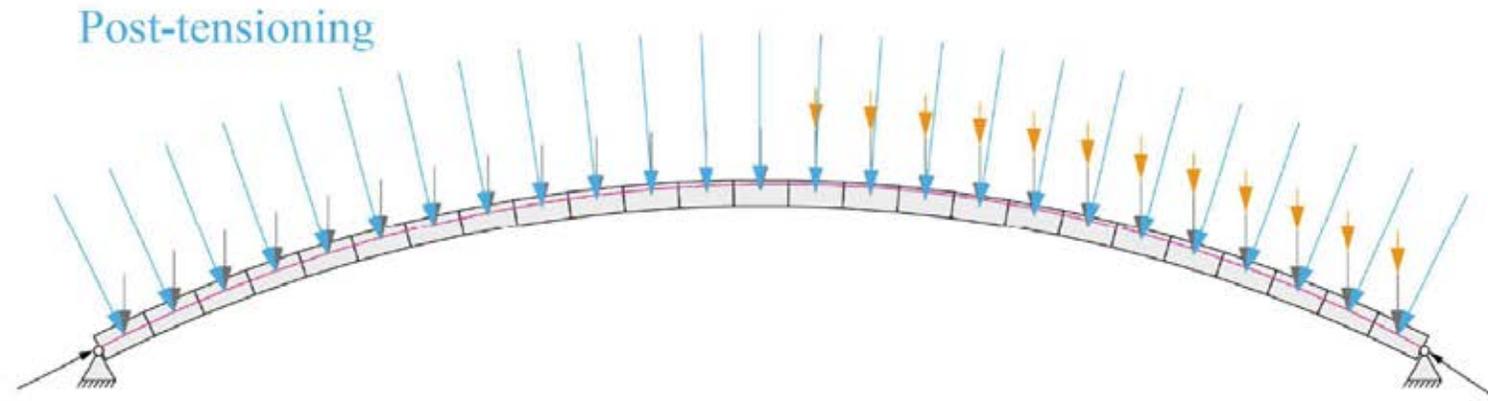
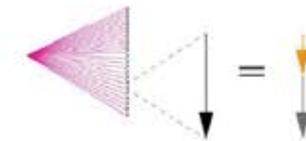
passerelle Re:Crete



concept



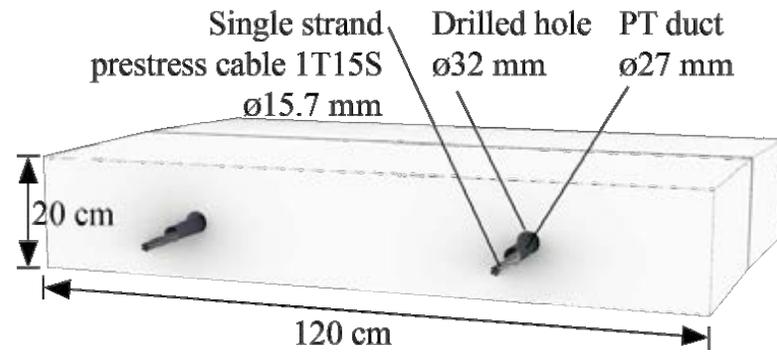
Force diagram



approvisionnement



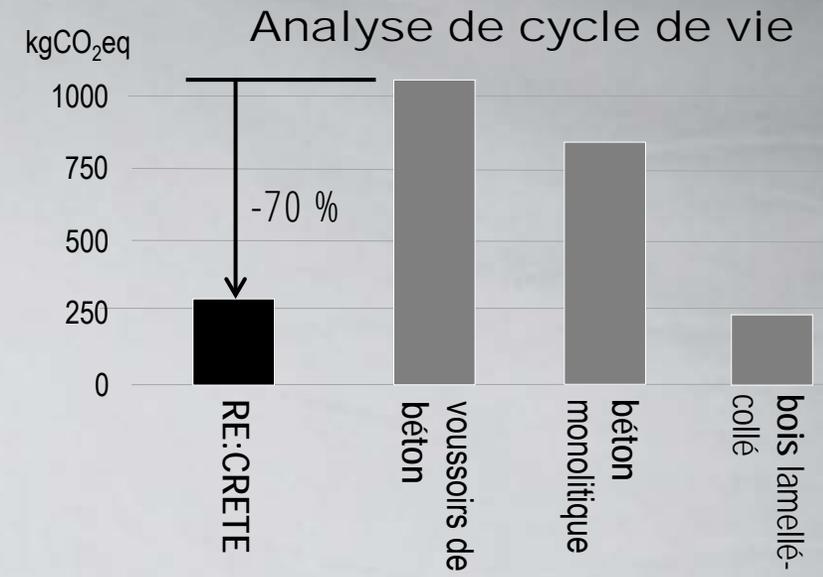
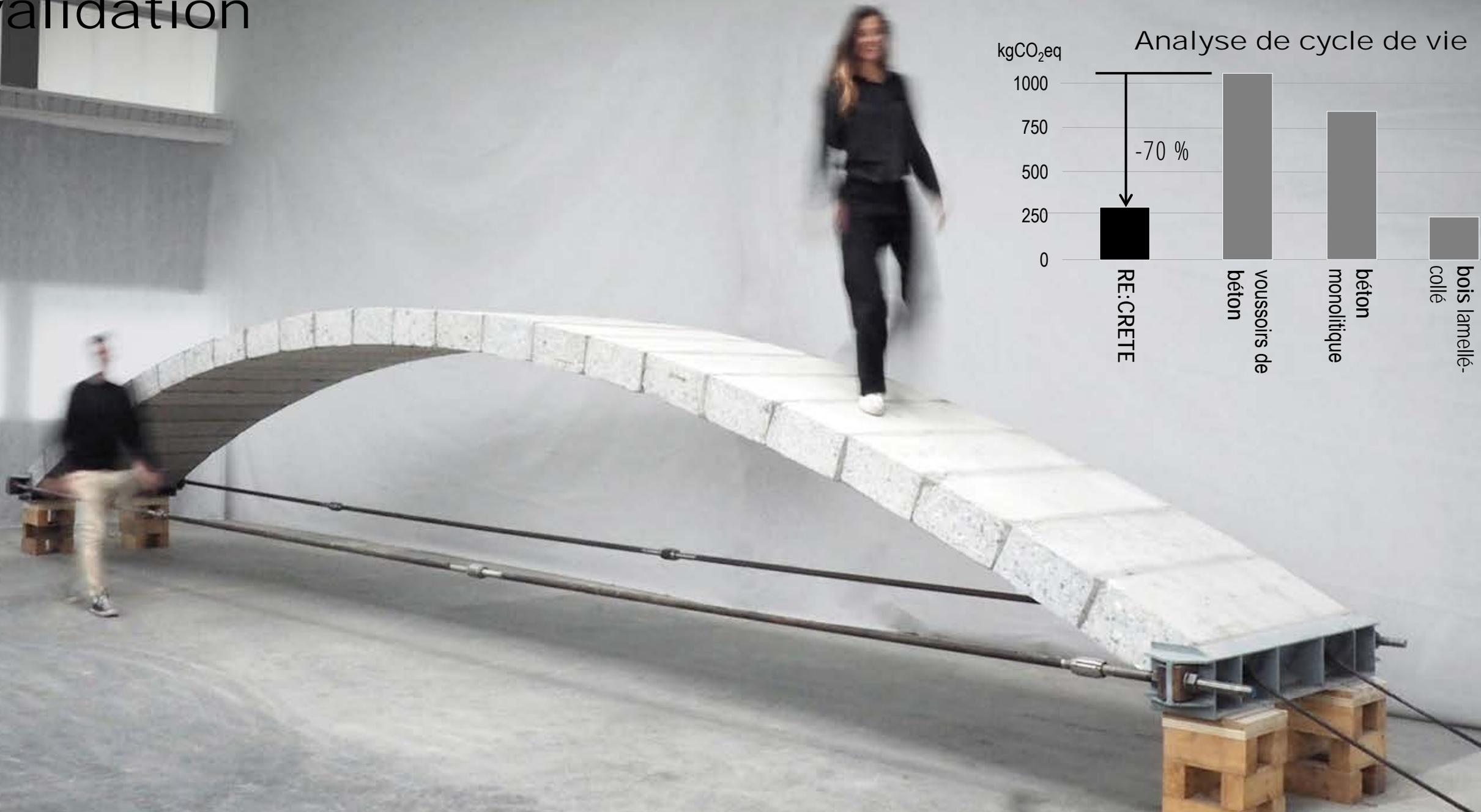
assemblage



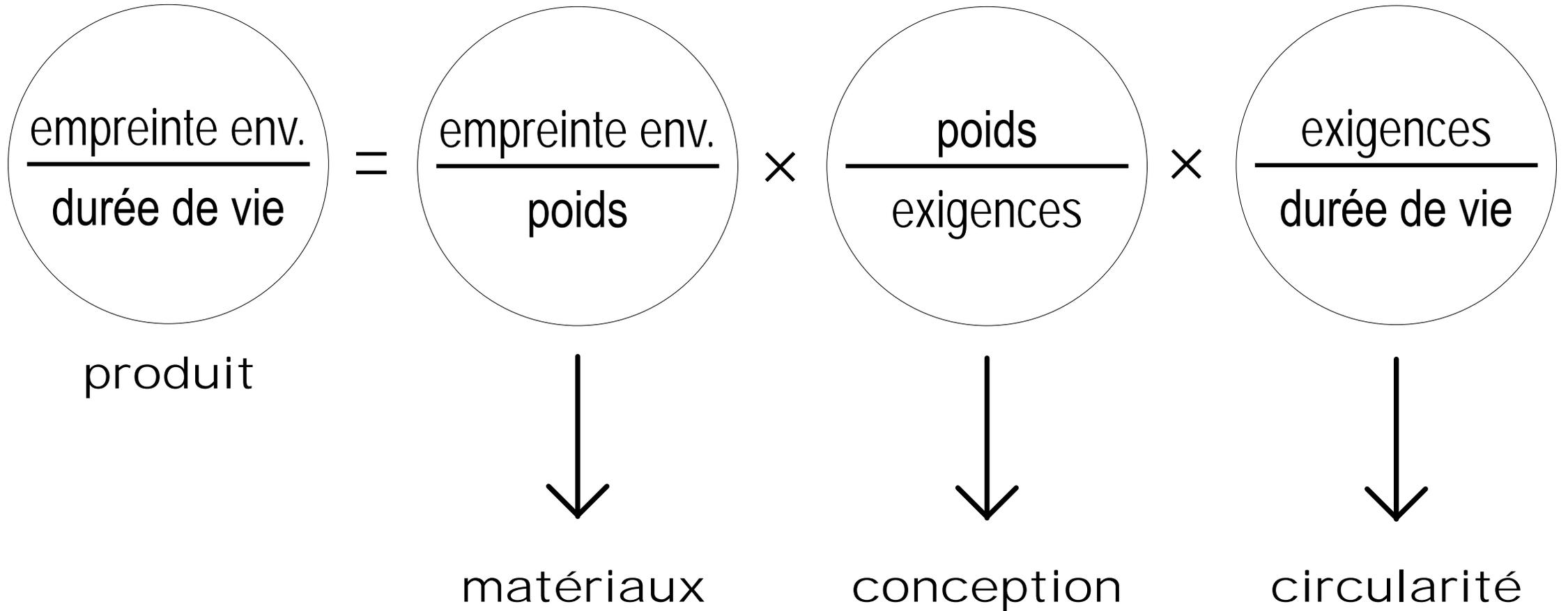
précontrainte



validation



stratégies de conception

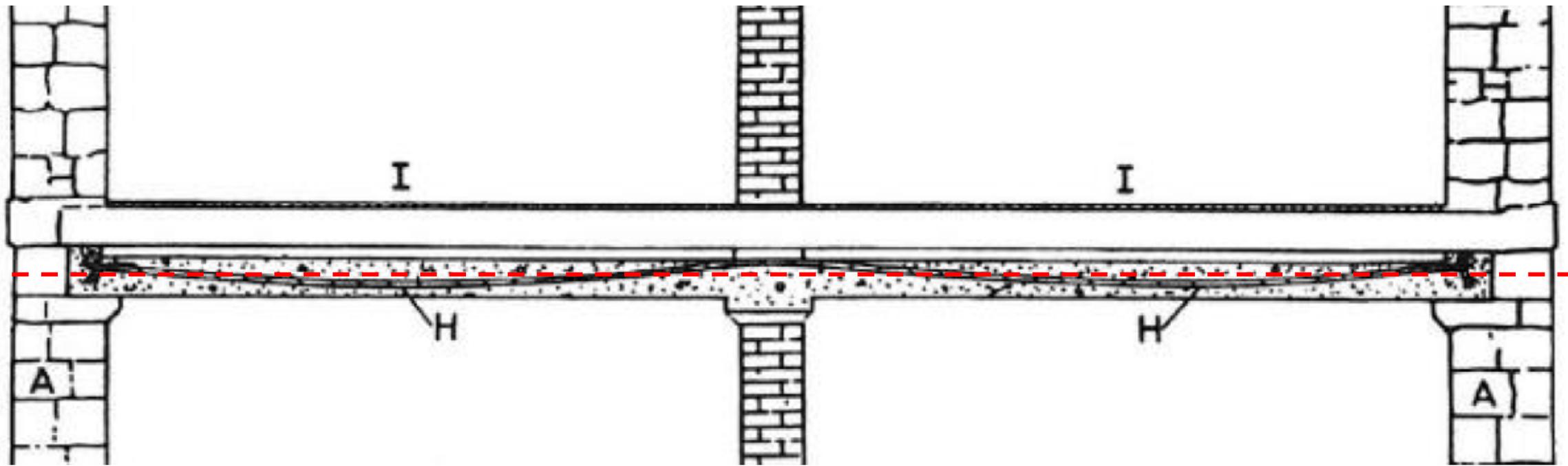


prédimensionnement

prédimensionnement : élancements usuels

Matériau	Structure	Elancement économique l/h d'une poutre simple
Acier	Vierendeel	7 - 10
	Treillis	10 - 15
	Treillis spatial	12 - 18
	Poutre	15 - 20
Béton armé	Poutre	12 - 18
	Dalle	20 - 25
Béton précontraint	Poutre	18 - 25
	Dalle	28 - 35
Bois	Poutre	15 - 20

exemple de poutre alternant fibre tendue et comprimée



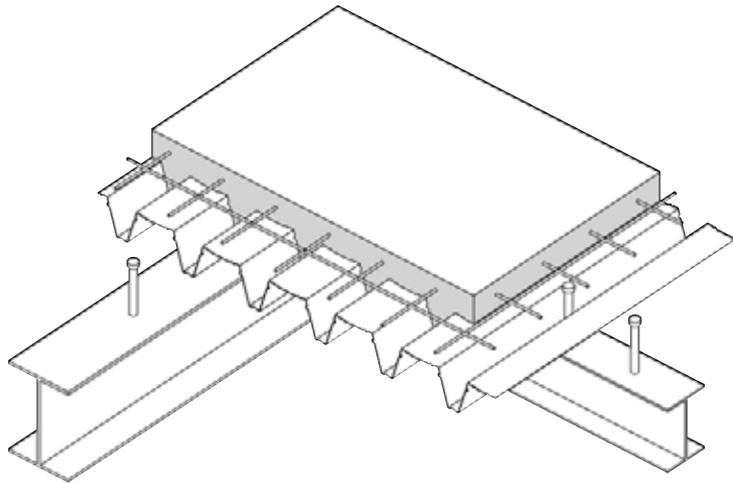
Planchers en bois



bois lamellé-collé



Plancher mixte



Dalles sur sommiers



Plancher-dalles avec champignon



prédimensionnement dalle en béton armé

élançements usuels

Systeme de dalle	Portée typique L (économique)	Elancement recommandé h/L
Dalle sur murs	8 m	1/25 à 1/35
Plancher-dalle	6 – 9 m	1/20 à 1/30
Plancher-dalle avec champignons ou surépaisseurs	6 – 15 m	1/25 à 1/35 ($h_{\min} = 200 \text{ mm}$)
Dalle sur sommiers	6 – 15 m	1/25 à 1/35
Dalle nervurée - Nervure standard - Nervure préfabriquée et précontrainte	7 – 12 m < 18 m	Totale : 1/20 à 1/35 Espace entre nervures < 2h
Dalle cassette	12 – 20 m	Nervures : 1/15 à 1/20 Dalle : $h_{\min} = 120 \text{ mm}$
Dalle en porte-à-faux	2 – 3 m	1/10

prédimensionnement: colonne

$$\sigma = F/A \quad [\text{N/mm}^2]$$

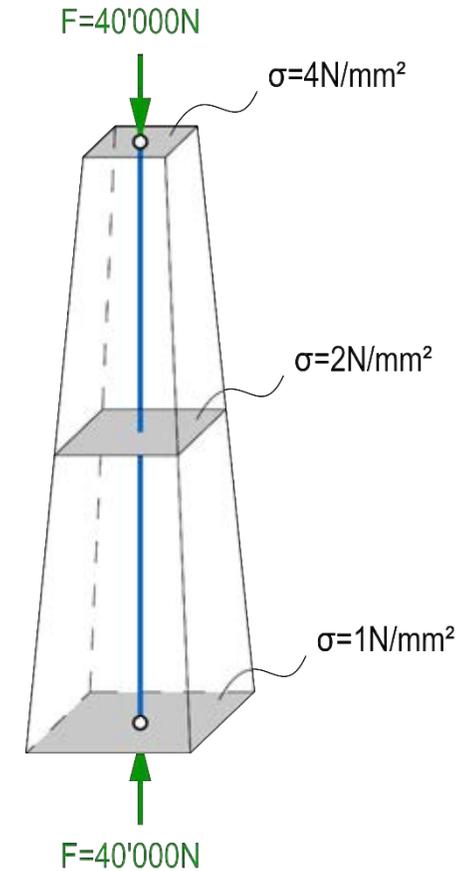
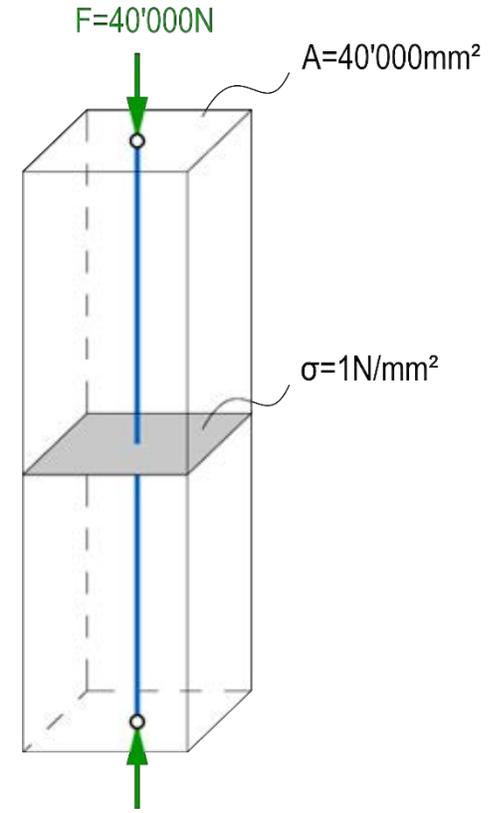
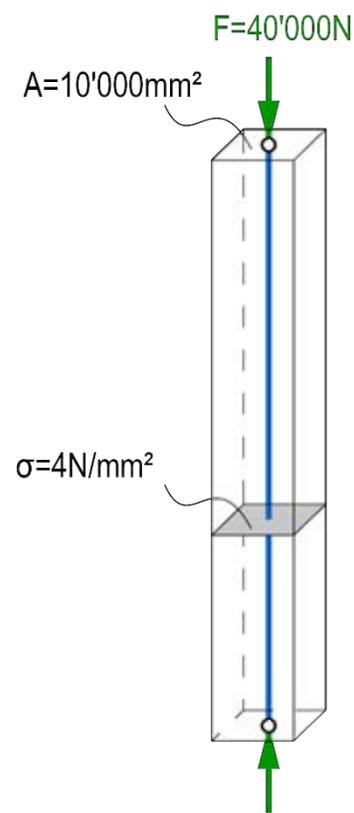
σ ("sigma") = contrainte

F = force axiale appliquée sur la section

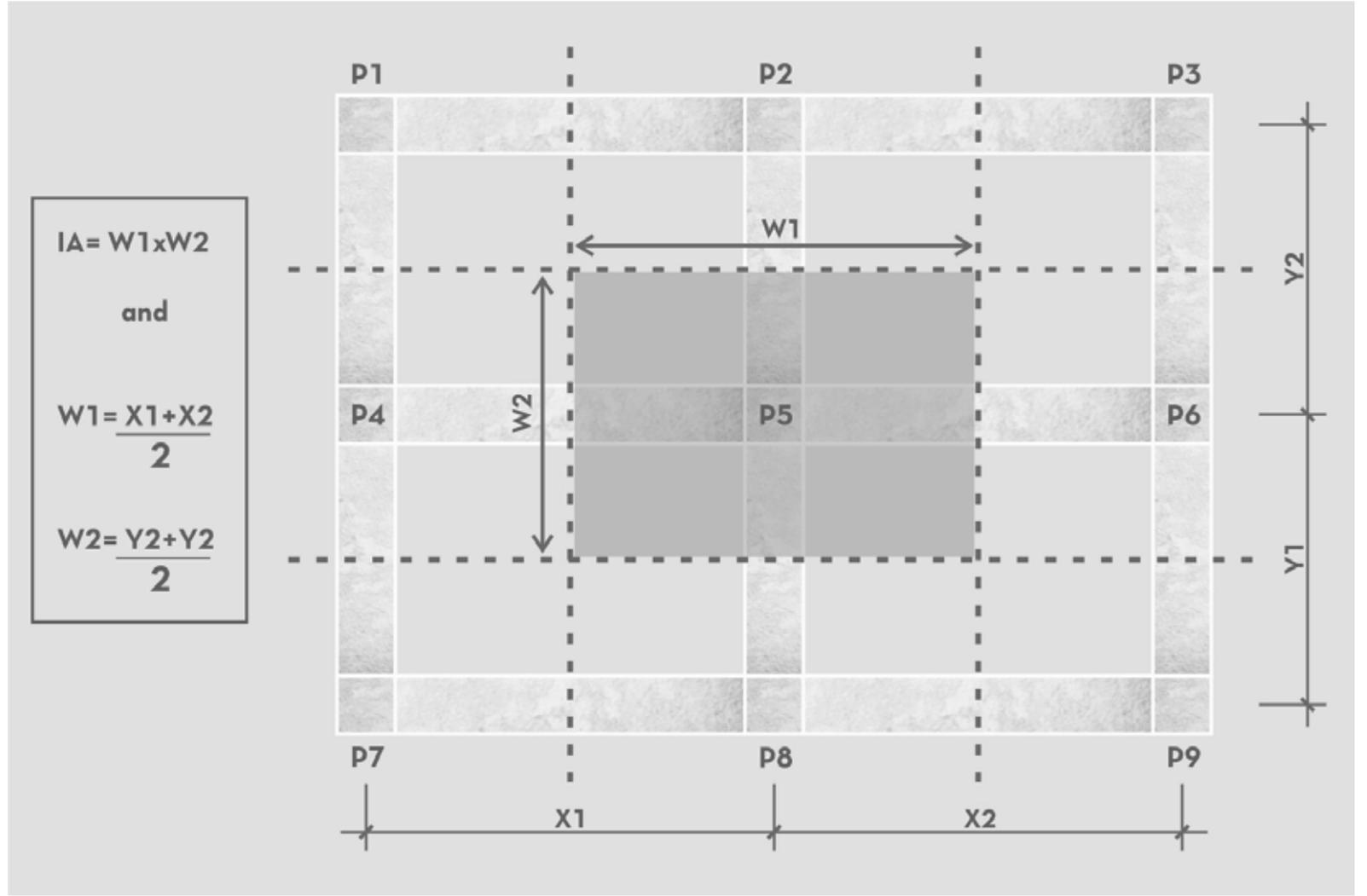
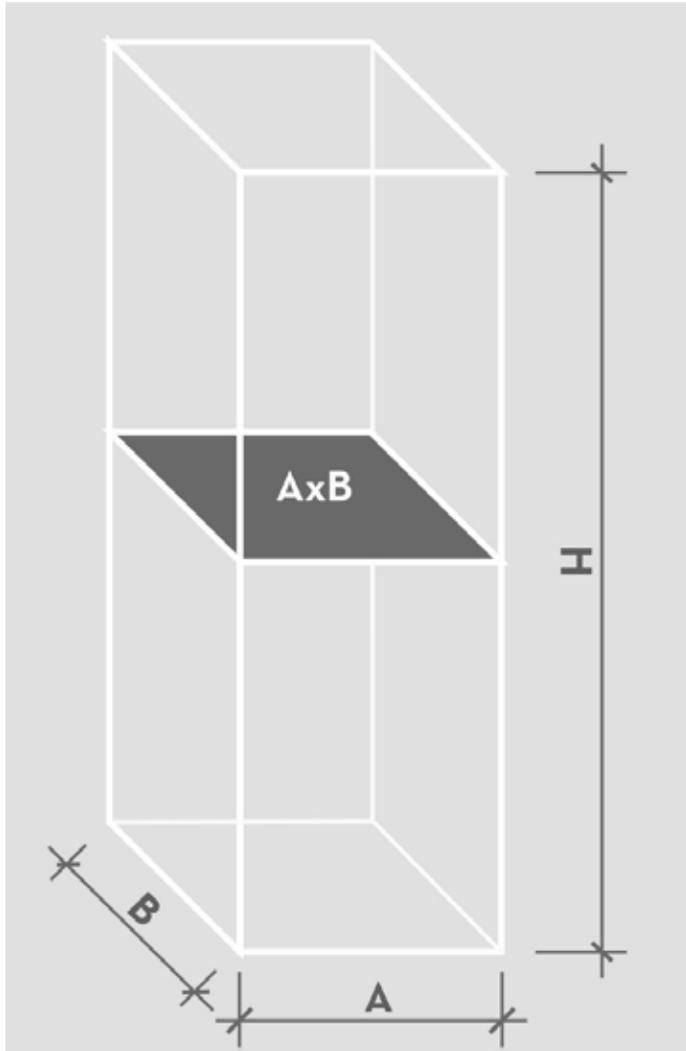
A = aire de la section considérée

$$1\text{N/mm}^2 = 1'000'000\text{Pa} = 1\text{MPa}$$

+ vérification de la stabilité
(flambement)



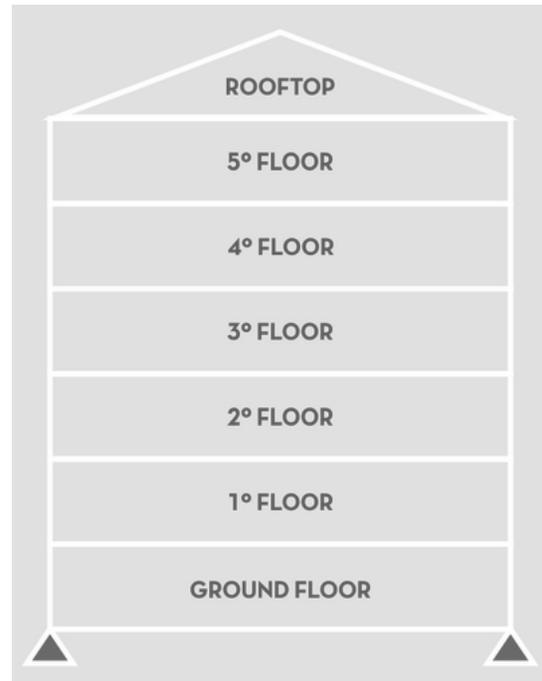
prédimensionnement: colonne → aire tributaire



prédimensionnement: colonne en béton

Hypothèses:

- Charges
10 kN/m²
- Résistance
10 MPa or N/mm²
- Min 200x200 mm



Étage	Aire d'influence	Charge	Charge accumulée	Aire poteau	Dimensions
	m ²	kN	kN	mm ²	mm
Rooftop	40	200			
5	40	400	200	20000	200x200
4	40	400	600	60000	200x300
3	40	400	1000	100000	350x350
2	40	400	1400	140000	300x500
1	40	400	1800	180000	400x500
0	40	200	2200	220000	450x450
Fondation			2400	240000	

prédimensionnement: fondations

$$\textit{Aire fondations} = \frac{\textit{Charge}_{\textit{bâtiment}}}{\textit{Capacité}_{\textit{sol}}}$$

$$\textit{dim fondation} = \frac{\textit{Aire fondations}}{\# \textit{fondations}}$$

prédimensionnement: fondations

$$Aire\ fondations = \frac{Charge_{bâtiment}}{Capacité_{sol}}$$

$$dim\ fondation = \frac{Aire\ fondations}{\# fondations}$$

Étage	Aire d'influence m ²	Charge kN	Charge accumulée kN	Aire poteau mm ²	Dimensions mm
Rooftop	40	200			
5	40	400	200	20000	200x200
4	40	400	600	60000	200x300
3	40	400	1000	100000	350x350
2	40	400	1400	140000	300x500
1	40	400	1800	180000	400x500
0	40	200	2200	220000	450x450
Fondation			2400	240000	

prédimensionnement: fondations

$$Aire\ fondations = \frac{Charge_{bâtiment}}{Capacité_{sol}}$$

$$dim\ fondation = \frac{Aire\ fondations}{\# fondations}$$

Type of Soil	Bearing capacity kN/m ²
Cohesive Soils	
Soft shale, hard or stiff clay in a deep bed, dry state	440
Medium clay readily indented with a thumbnail	245
Moist clay and Sand clay mixture which can be indented by thumb pressure	150
Black cotton soil/expansive clay (50% saturated) in dry state	130 to 160
Soft clay indented with moderate thumb pressure	100
Very soft clay which can be penetrated with the thump up to few centimetres	50
Cohesionless Soil	
Compact gravel/sand and gravel mixture with good resistance against penetration of tools	440
Compact and dry coarse sand	440
Compact and dry medium sand	245
Loose gravel or sandy gravel mixture, dry state	245
Fine sand and silt (consists of dry lumps)	150
Loose and dry fine sand	100
Rocks	
Hard rocks such as granite trap, diorite etc.	3240
Laminated rocks such as sandstone, limestone, etc.	1620
Residual deposits of shattered and broken bedrock and hard shale, cemented material	880
Soft rocks	440

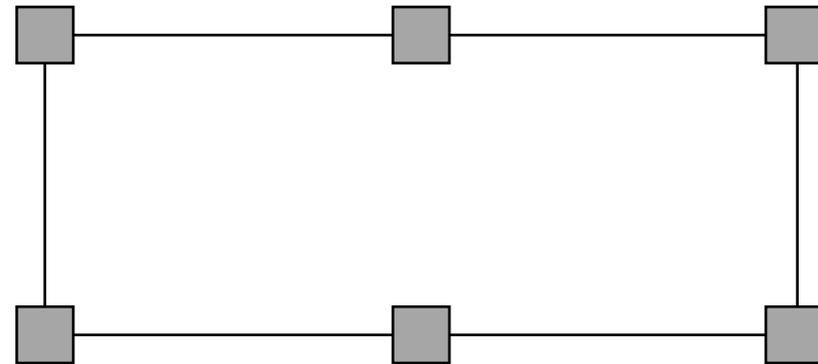
prédimensionnement: fondations

$$\text{Aire fondations} = \frac{\text{Charge}_{\text{bâtiment}}}{\text{Capacité}_{\text{sol}}}$$

$$\text{dim fondation} = \frac{\text{Aire fondations}}{\# \text{ fondations}}$$

$$\text{Aire fondations} = \frac{2400}{440} = 5.45 \text{ m}^2$$

$$\text{dim fondation} = \frac{5.45}{6} = 0.91 \text{ m}^2 = 1 \times 1 \text{ m}$$





Structures et empreinte carbone

Maléna Bastien-Masse, Dr ès Sc. EPFL
Ingénieure civile et chercheuse