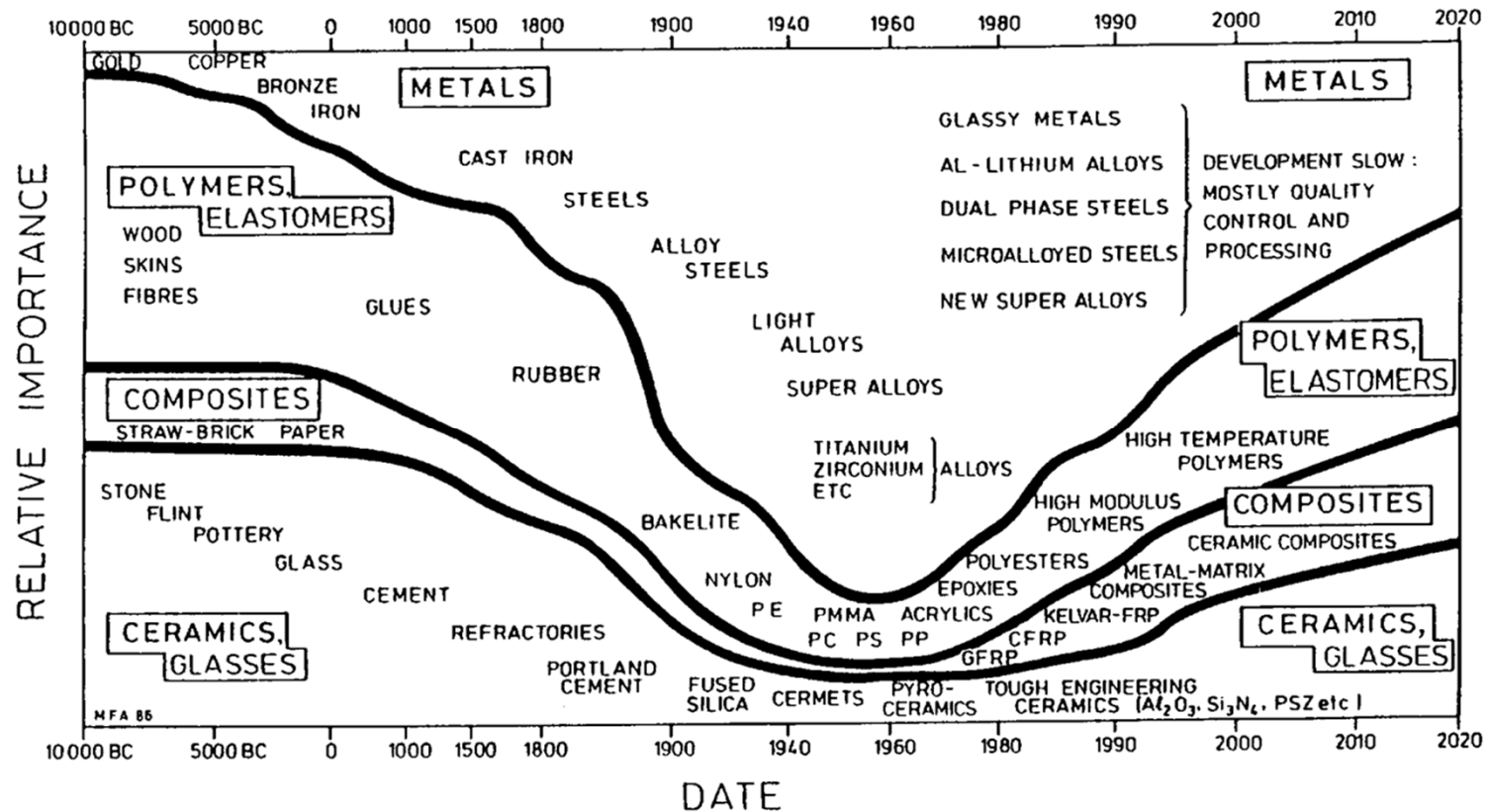


Ressources secondaires et matériaux bio-sourcés pour une construction durable

Luc COURARD, Université de Liège, Belgique

Constataation



âge de la pierre

âge du bronze

âge du fer

matériaux avancés!

- 2000000 BC

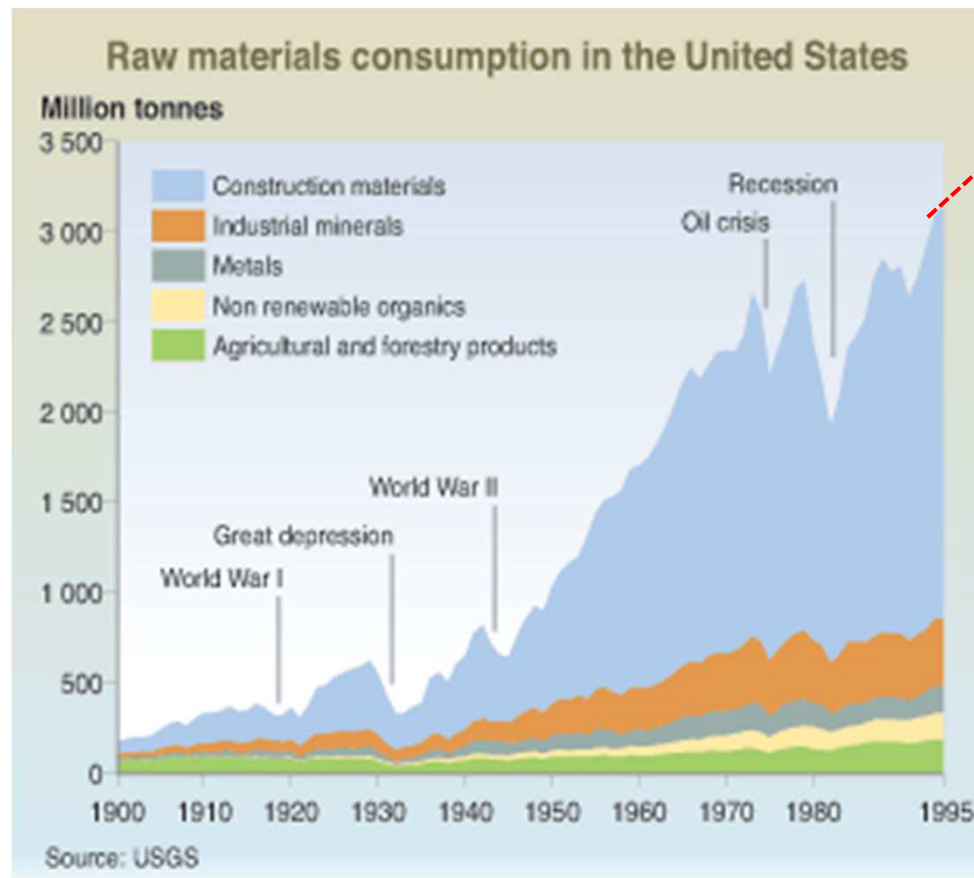
- 3200 BC

- 1200 BC

aujourd'hui

Constatation

Nous avons besoin de matériaux



Constatation

Nous avons besoin de matériaux

la construction au sens large consomme entre 40 et 50%
des ressources naturelles sous forme de matériaux,
la construction utilise et consomme 40% de l'énergie
utilisée et produit près de 40% du CO₂



Constatation

Nous avons besoin de matériaux

Béton: plus de 9 milliards de tonnes (= 30000 arches de La Défense)

Gravier: 4,7 milliards de tonnes (670 pyramides de Chéops)

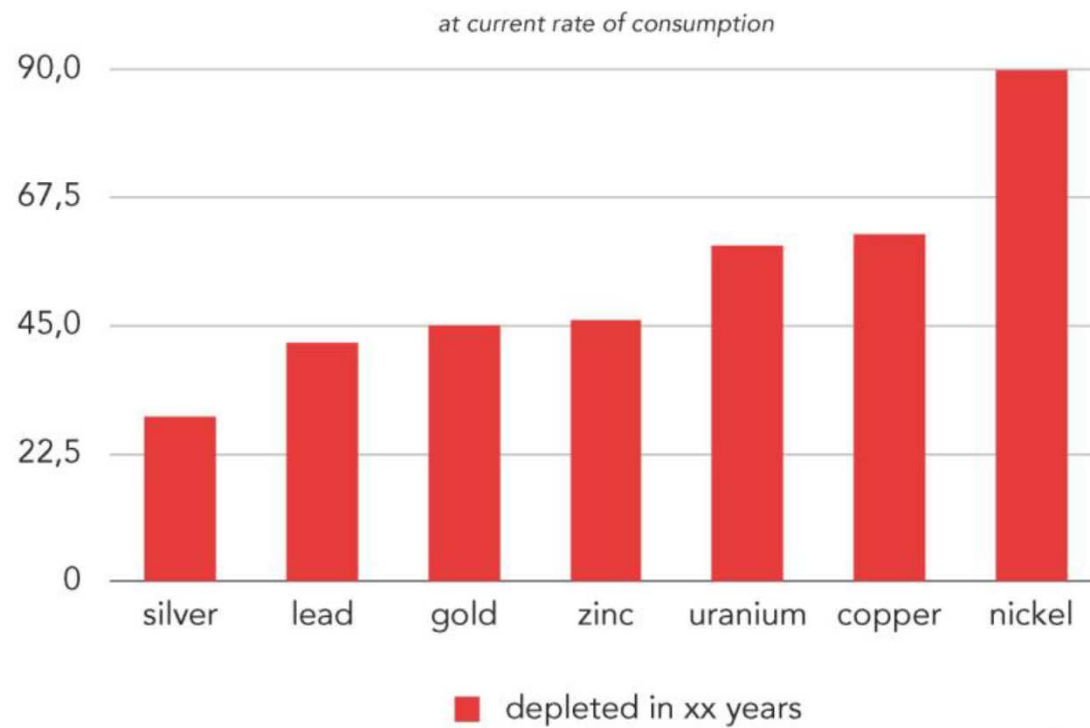
Sable: 2,2 milliards de tonnes (22 millions de wagons = train de 264000 km)

Ciment: 1,3 milliards de tonnes (17000 paquebots Norway = 2,34 milliards de tonnes de calcaire et argile)

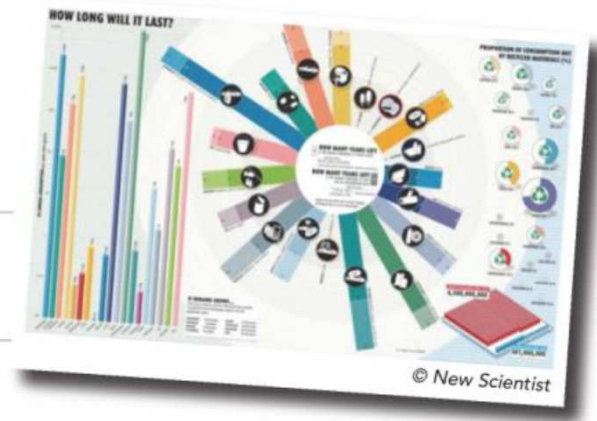
Eau: 800 milliards de litres (23 fois le débit journalier de la Seine)

Constataation

Les matières premières s'épuisent



source: New Scientist



Constatation

Nous produisons beaucoup de déchets

Difficile à estimer

Ce chiffre varie de 3400 à 4000 milliards de kilos par an, soit de 80 à 126 tonnes de déchets générés chaque seconde !

Chaque jour, l'activité humaine produit environ plus de 10 milliards de kilos de déchets.

La construction produit près 50% de tous les déchets produits dans le monde,

Selon Pike Research, nous produisons 74 millions de tonnes de déchets et d'équipements électriques et électroniques par an en 2014 soit 2346 kilos par seconde!

Source: <http://www.planetoscope.com/dechets/363-production-de-dechets-dans-le-monde.html>

Constatation

Nous produisons beaucoup de déchets

Répartition des déchets (différentes formes)

83% des déchets se trouvent sous forme solide

10% des déchets se trouvent sous forme pâteuse

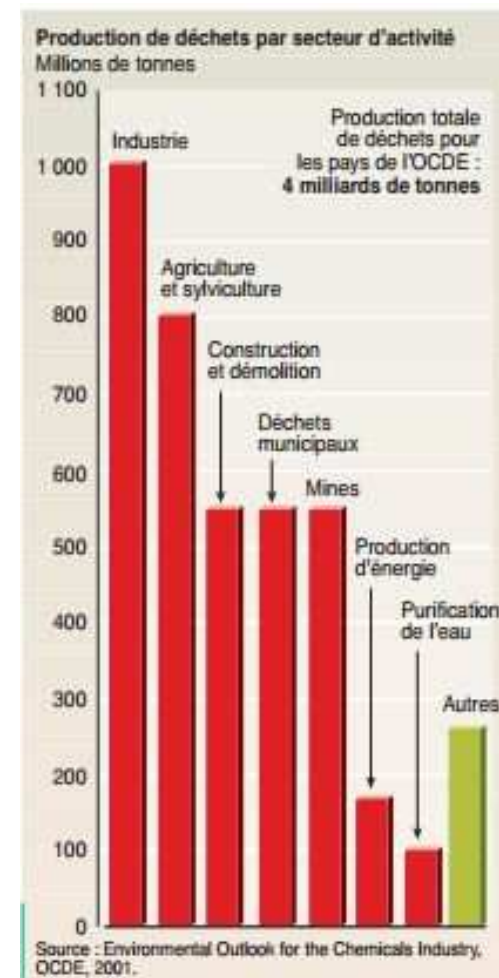
7% des déchets se trouvent sous forme liquide

Production de déchets industriels

déchets inorganiques (70%)

déchets organiques (25%)

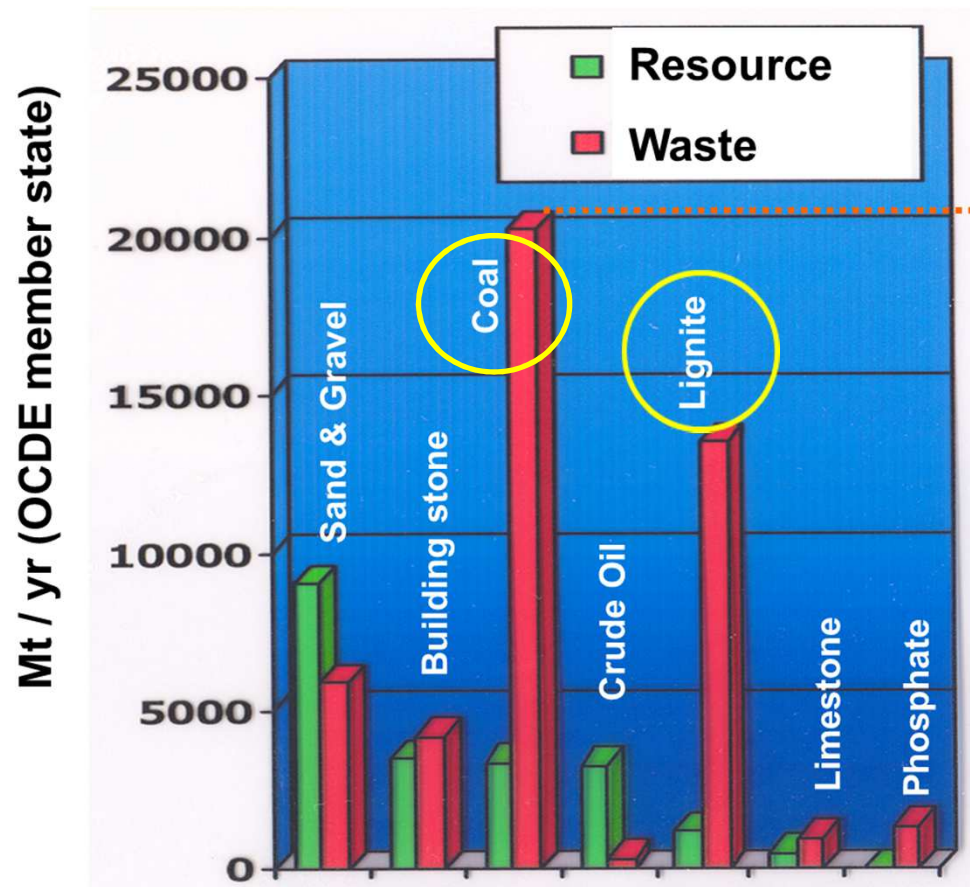
Le solde est constitué de déchets non classés



Constataation

Nous produisons beaucoup de déchets

2 tonnes extraites =
1 tonne de charbon!



20 Gt / yr !

The annual flux of raw mineral materials corresponds to 12 km³.

This is roughly equivalent to the total annual weight of sediments transported by rivers around the globe !

Constatacion

Les déchets ont une valeur



Metal	Metal content and value estimated for a typical cell phone		Metal content and value for 500 million obsolete cell phones in storage in 2005 ²	
	Wt ¹ (g)	Value	Wt ³ (t)	Value
Copper	16	\$0.03	7,900	\$17 million
Silver	0.35	\$0.06	178	\$31 million
Gold	0.034	\$0.40	17	\$199 million
Palladium	0.015	\$0.13	7.4	\$63 million
Platinum	0.00034	\$0.01	0.18	\$3.9 million
Total			8,102	\$314 million

Constatation

Constatation

Prise de conscience des limites: nous vivons dans un **monde limité**

Énergie

Matières premières

Espace (urbanisme)

Capacité d'adaptation de la nature

Constatation → comportement

Consommation

Architecture

Génie civil

....

Sommaire

Constatation

les chiffres

Attitudes et conception

les stratégies de réorientation et l'éco-bénéficine

Critères et méthodes de sélection

l'énergie grise et les ACV

Matériaux bio-sourcés

un retour aux sources

Matières secondaires

la recyclage et la durabilité

Conclusions et perspectives

Attitudes et conception

Stratégies de réorientation et éco-bénéficine

Attitudes et conception

Politique: (1) **prévention** < (2) **recyclage** < (3) **stockage**

Prévention: limiter la consommation de matières premières et la production de déchets par le développement de nouvelles technologies

Recyclage: donner une nouvelle vie aux déchets

Stockage: stocker les déchets ultimes

Centres d'enfouissement techniques



Attitudes et conception

Prévention: limiter la consommation de matières premières et la production de déchets par le développement de nouvelles technologies

- Education – sensibilisation

 - Éco-conseillers

 - Technologies propres

- Réduction des nuisances à la source (≠ technologie « end of pipe »)

 - Réduction des risques de pollution

 - Réduction de la consommation d'eau, d'énergie, de matières premières, ...

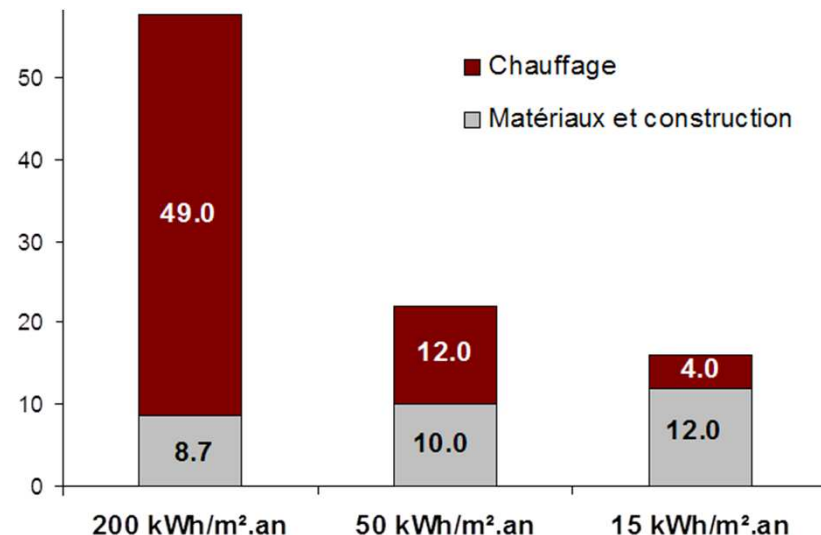
Attitudes et conception

Prévention: développement de matériaux et techniques alternatives pour le bâtiment

Amélioration des performances énergétiques des bâtiments

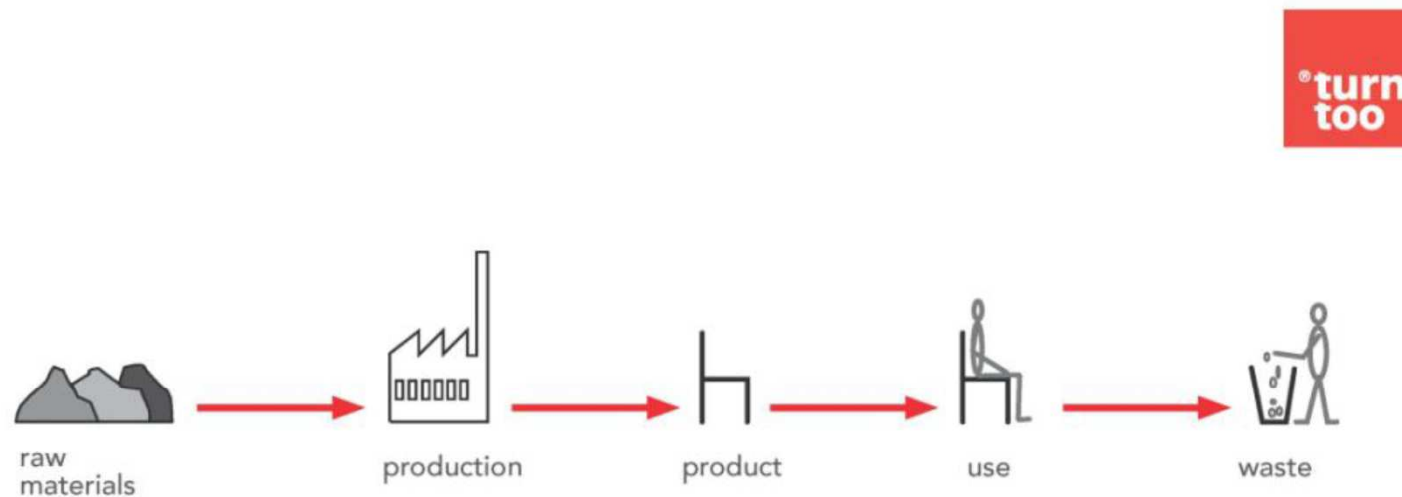
Augmentation du poids relatif des matériaux de construction / impacts environnementaux

Nécessité de développer de nouveaux matériaux



Il faut maîtriser l'approche « Matériaux »

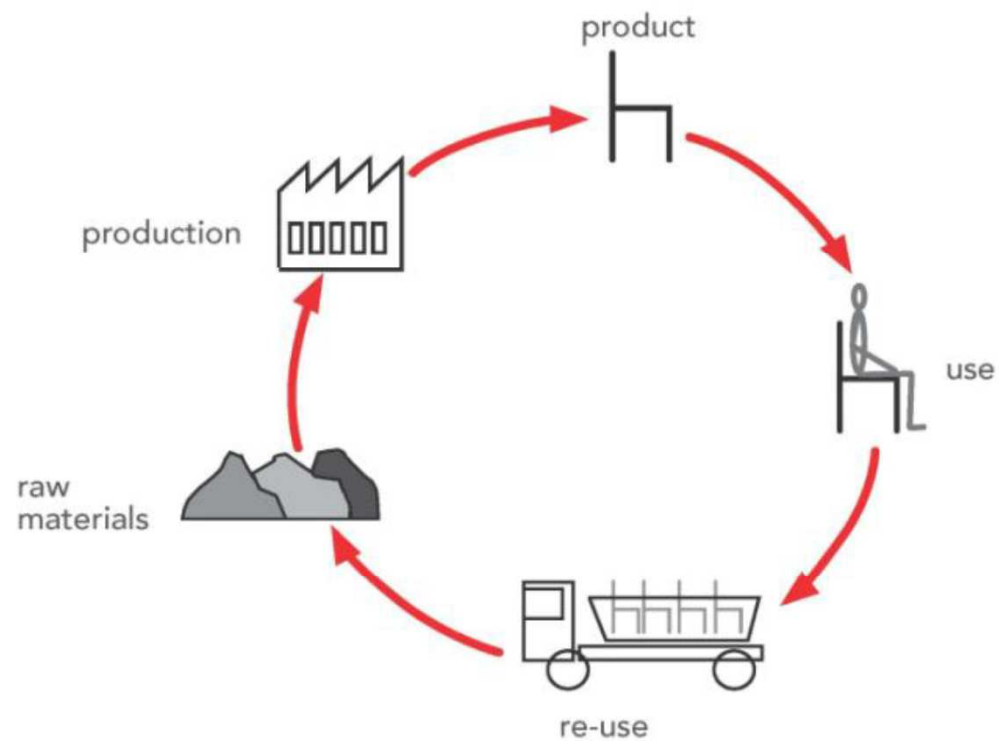
Eco-bénéficine



OLD LINEAR ECONOMY - is about ownership

SOURCE: S. BECKERS (d'après M. BRAUNGART –EPEA, Cradle to Cradle)

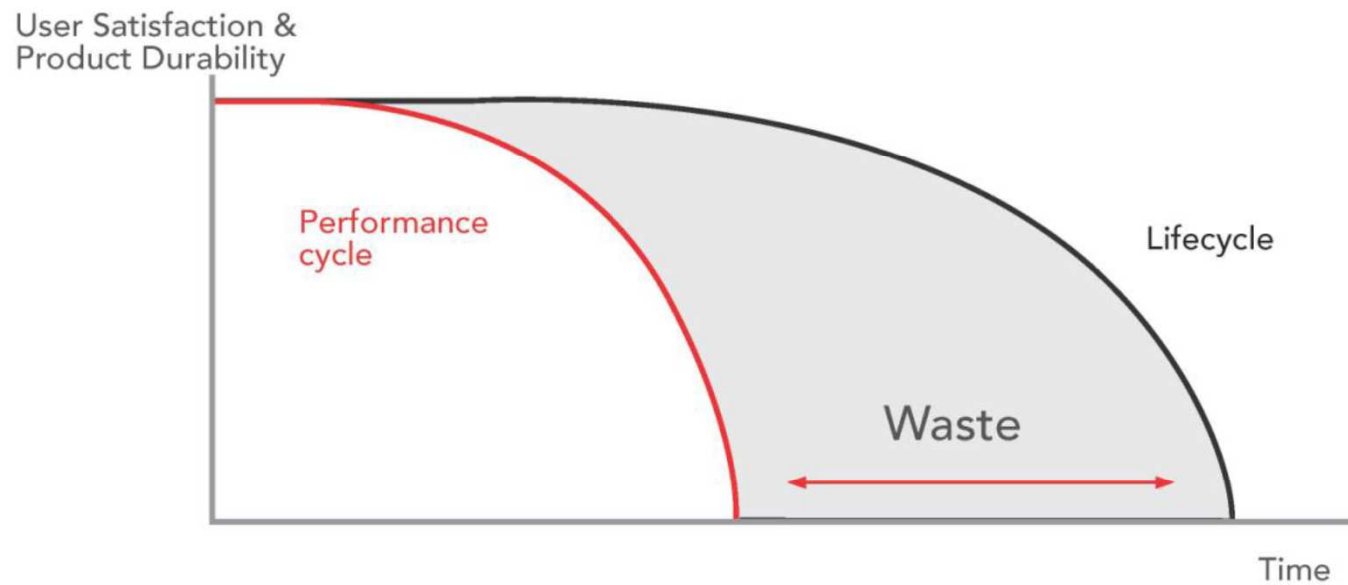
Eco-bénéficine



C2C - TECHNICAL NUTRIENT CYCLE

SOURCE: S. BECKERS (d'après M. BRAUNGART -EPEA, Cradle to Cradle)

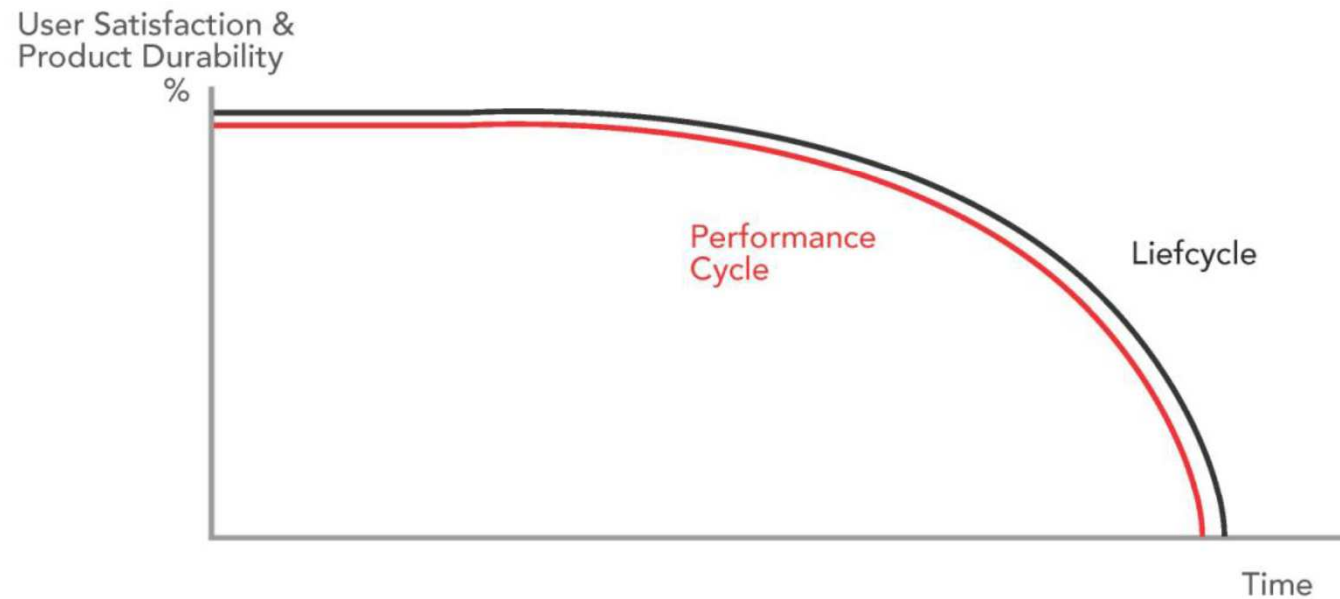
Eco-bénéfice



Life cycle versus Performance cycle

SOURCE: S. BECKERS (d'après M. BRAUNGART –EPEA, Cradle to Cradle)

Eco-bénéfice



Life cycle versus Performance cycle

SOURCE: S. BECKERS (d'après M. BRAUNGART –EPEA, Cradle to Cradle)

Eco-bénéficine

Concevoir les déchets comme des « nutriments »

Concevoir des produits comme des produits de service

cela implique de les fabriquer en vue de leur désassemblage

l'industrie n'a plus besoin de créer des objets plus durables que nécessaire

un immeuble de bureaux ou de magasins doit être construit de façon à s'adapter à des générations successives (notion de sur-cyclage)

Avantages du système (3)

n'engendre aucun déchet inutile

permet aux fabricants d'épargner des milliards d'Euros en métaux précieux

des nutriments techniques circulent en permanence ...

Critères et méthodes de sélection

L'énergie grise et les ACV

Méthodes de sélection

Directive 89/106/CEE du Conseil, relative au rapprochement des dispositions législatives, réglementaires et administratives des états-membres concernant les produits de construction (1988, modifiée par la directive 93/68/CEE (1993)).

Le Règlement européen (UE) 305/2011 établissant des conditions harmonisées de commercialisation pour les produits de construction remplace désormais la Directive 89/106/CEE

Objectifs:

assurer la libre circulation de l'ensemble des produits de construction, par l'harmonisation des législations nationales concernant les exigences essentielles de ces produits en matière de santé, de sécurité, de bien-être.

Méthodes de sélection

Six **exigences essentielles** à la base des systèmes réglementaires et législatifs nationaux

Permettre d'ériger des ouvrages qui remplissent, pendant une durée de vie raisonnable du point de vue économique, les exigences essentielles en matière de :

Résistance mécanique et de stabilité : stabilité et **durabilité** des résistances mécaniques,

Sécurité en cas d'incendie,

Environnement thermique, éclairage, qualité de l'air, humidité et bruit,

Sécurité d'utilisation,

Protection contre le bruit,

Economie d'énergie et d'isolation thermique.

Méthodes de sélection

Aspects techniques

Propriétés mécaniques, physiques et chimiques des matériaux

Calcul et dimensionnement (Eurocodes)

Aspects sociaux

Aspects environnementaux

Critères de sélection des matériaux

La notion d'**énergie grise**, c'est-à-dire l'énergie, calculée en kWh/m³ ou T, associée à un matériau, permet de prendre en compte les aspects suivants :

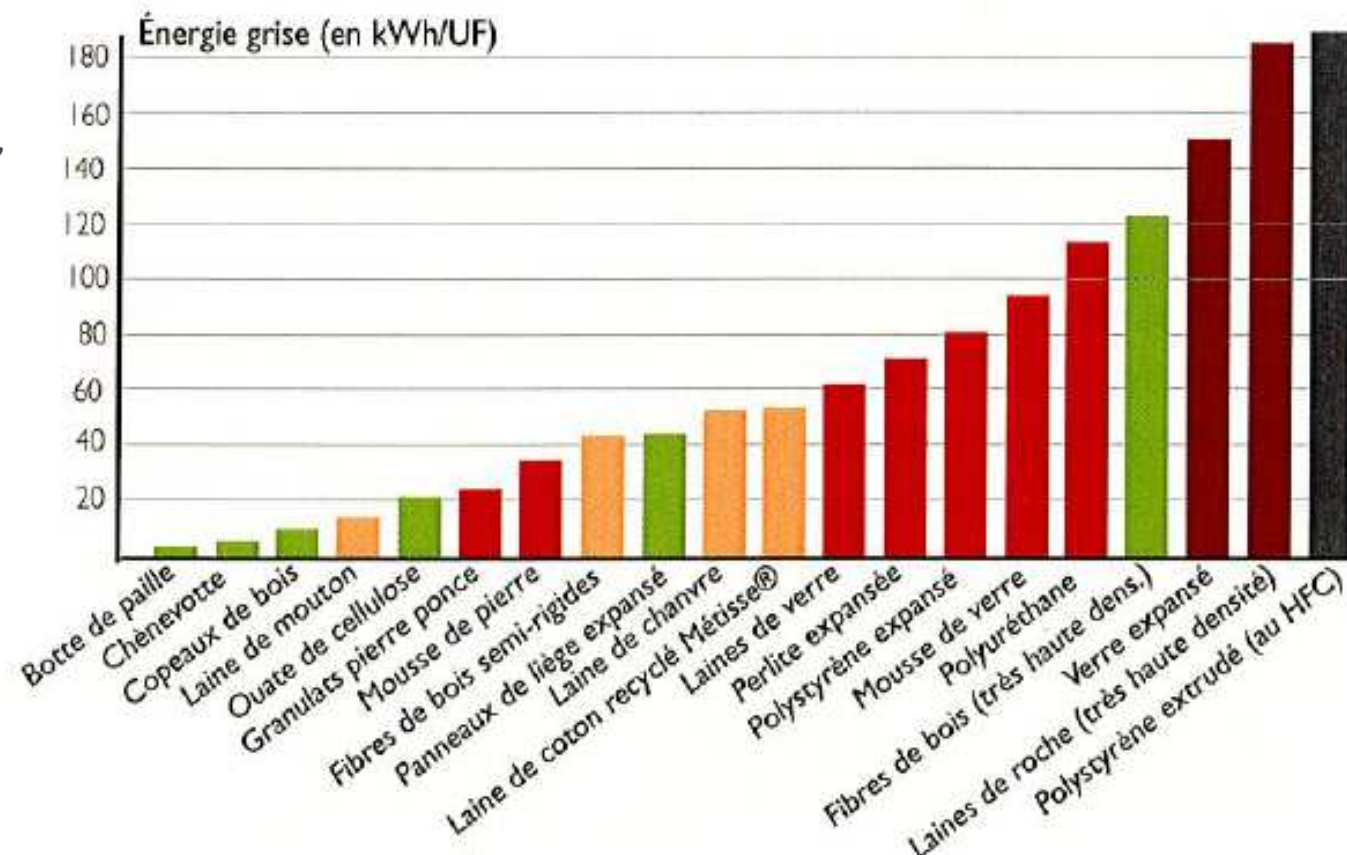
*machines d'extraction,
carburant pour le transport,
consommation d'électricité
pour la transformation,
pétrole utilisé pour la
production*

Matériau	Energie grise (kWh/m ³)
Brique perforée	700
Brique silico-calcaire	350
Enduit synthétique	3300
Enduit au ciment	1100
Profilés en acier	57000
Bois d'œuvre	180
Panneaux d'agglomérés (liés avec résine formaldéhyde)	2000
Panneaux de fibres de bois (tendre)	1400
Polystyrène expansé (isolant)	450
Isolant à base de cellulose de bois	50

Critères de sélection des matériaux

Energie grise des matériaux (kWh/m³ ou T)

machines d'extraction,
carburant pour le
transport,
consommation
d'électricité pour la
transformation,
pétrole utilisé pour la
production.



Source : Isolation thermique et écologique J.P. Oliva et S. Courgey (d'après G. Escadeillas, Métamorphoses, Liège, 2011)

Critères de sélection des matériaux

Consommation
d'énergie pour la
production de 1m³ de
béton armé

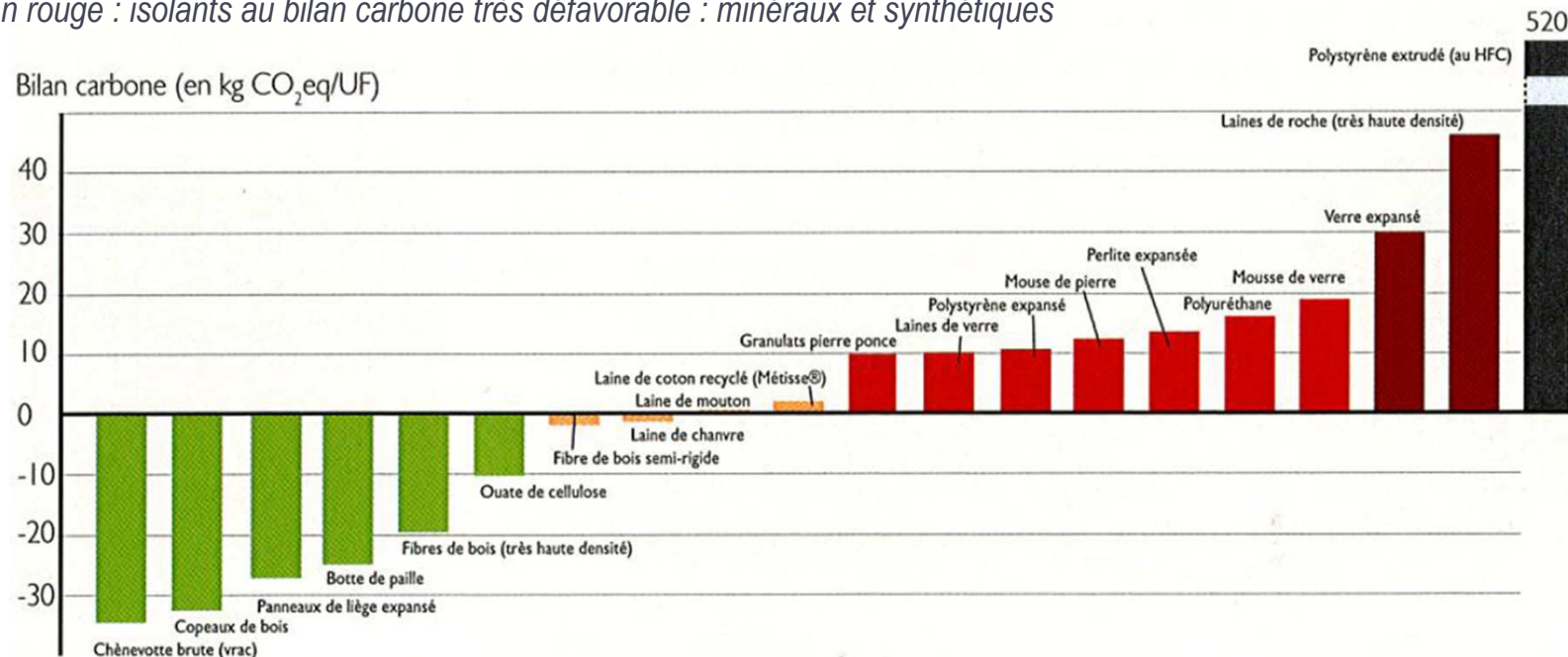
Matériau/opération	Energie (GJ)
Ciment	1.58
Sable et granulats	0.27
Armatures	2.25
Coffrage	0.43
Transport et mise en œuvre	0.34
Démolition et traitement des déchets	0.27
TOTAL	5.14

Critères de sélection des matériaux

En vert : isolants « puits de carbone » peu transformés ou denses

En jaune : isolants neutres : laines végétales

En rouge : isolants au bilan carbone très défavorable : minéraux et synthétiques



« Bilan CO₂ » de 1 m² de divers isolants pour une épaisseur correspondant à une résistance thermique de 5 m²K/W.

Source : Isolation thermique et écologique J.P. Oliva et S. Courgey (d'après G. Escadeillas, Métamorphoses, Liège, 2011)

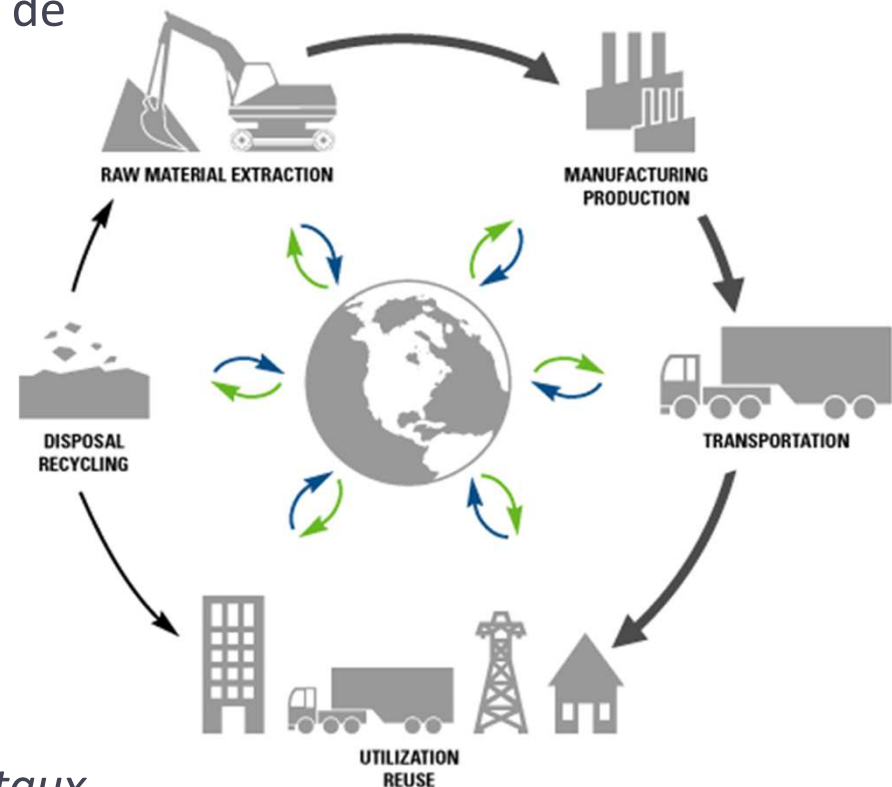
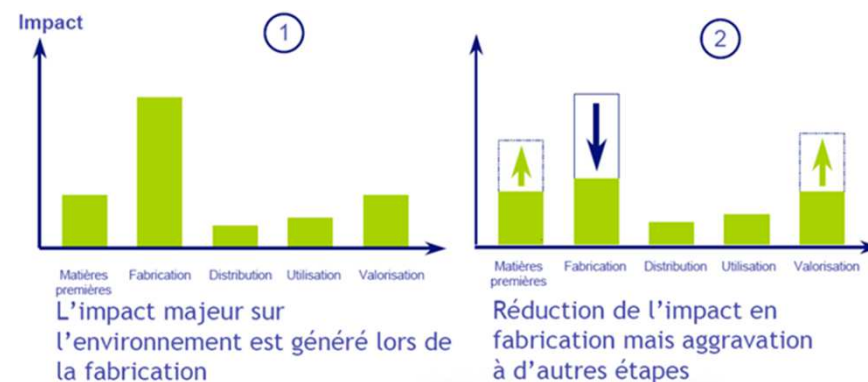
Méthodes de sélection

Analyse de Cycle de Vie (ACV)

Étude de l'ensemble des étapes du cycle de vie (« from cradle to grave »)

Normalisation: série EN1404x

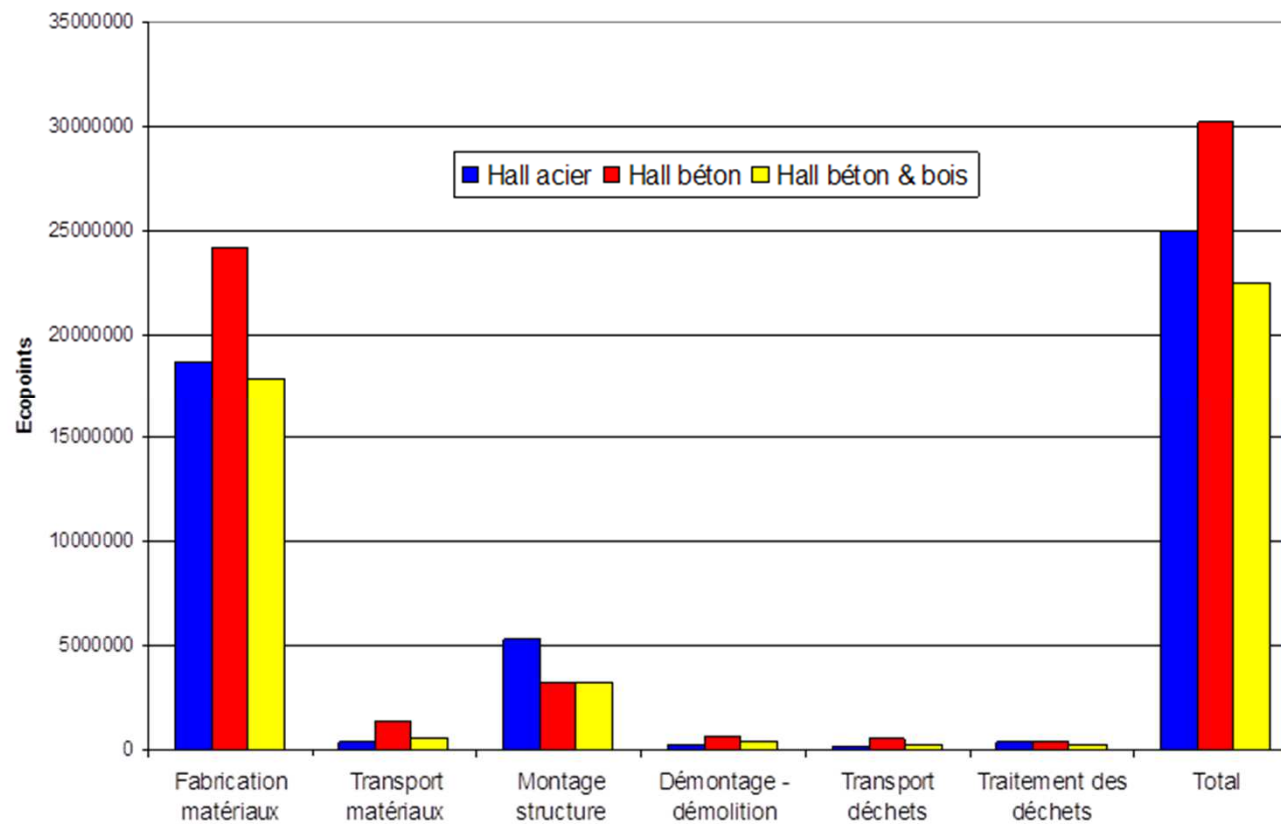
Outil performant et reconnu



Ne traite que des aspects environnementaux (ni social, ni économique)

Application: hall industriel

Comparaison hall industriel

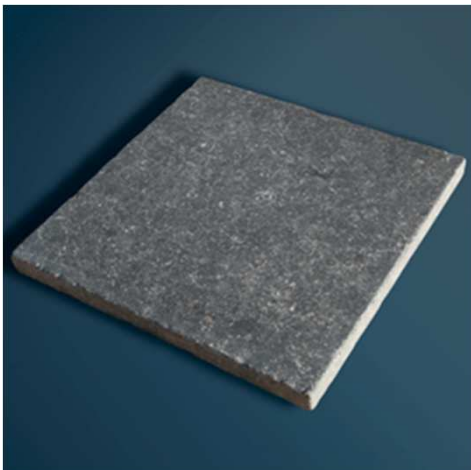


Source: *Evaluation environnementale des matériaux et des procédés de construction : application de l'analyse de cycle de vie à la construction d'un hall industriel.* L. Courard, Ph. Teller. *Mater. Struct.*, 34 (Août-Septembre 2001), 404-412.

Application: pierres naturelles

Compétition déloyale de l'Asie?

Proximité et qualité



Exotisme et bas prix



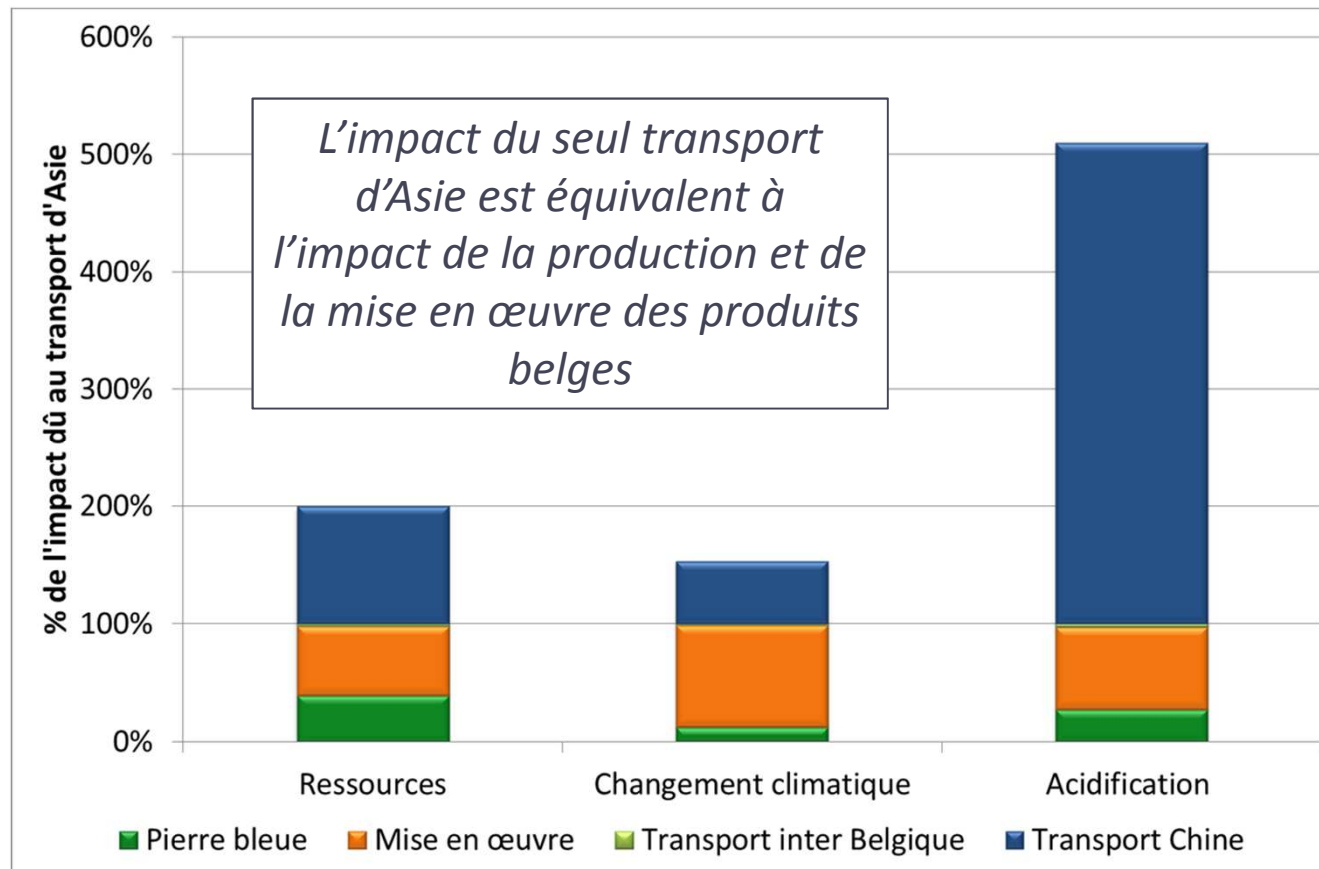
Prix imbattables
Besoin d'arguments
pour les produits belges



ENVIRONNEMENT

Application: pierres naturelles

Pierre bleue vs pierre chinoise



Source : LCA as decision tool for sustainable choices in mineral materials field: environmental declarations of Belgian products and their foreign equivalents. S. Belboom, R. Renzoni, A. Léonard, F. Tourneur, Laboratoire de génie chimique, Université de Liège, 2013

Méthodes de sélection

Les paramètres environnementaux sont encore au bas de l'échelle des critères de choix des matériaux !
(étude 2011 – CSI – Allemagne, Royaume-Uni, Etats-Unis, Brésil)

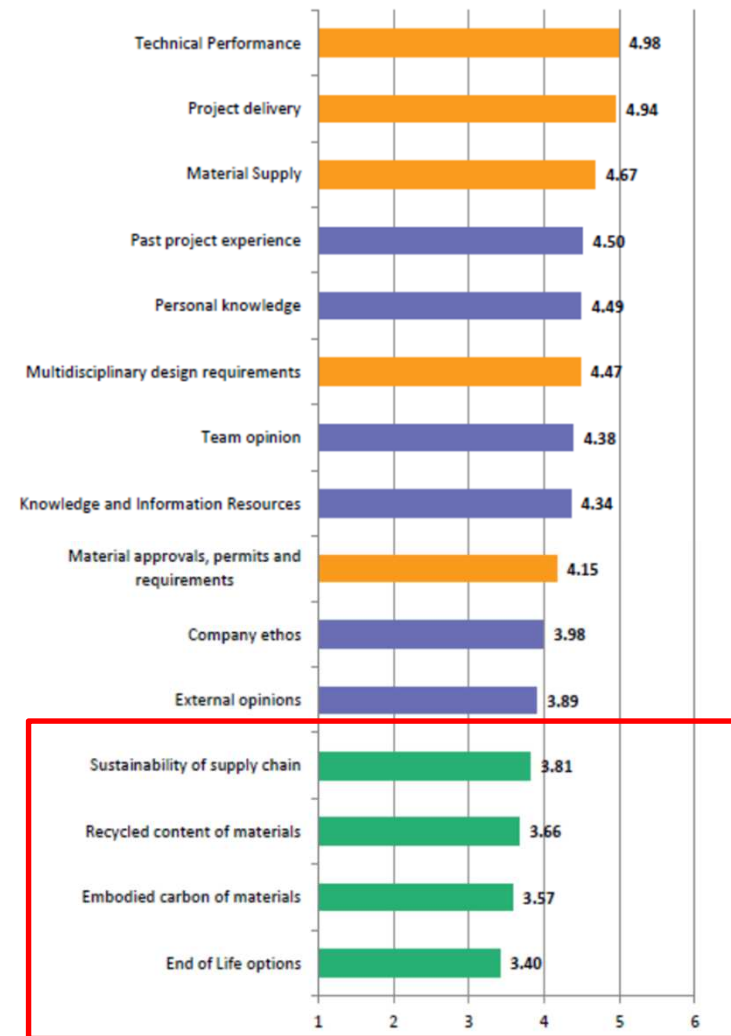


Figure 16 Rate the extent of influence that each factor has on decisions around material choice. (Online Survey)

Métamorphoses – Liège – 2011 (B. Mathieu, HeidelbergCement)

Matériaux bio-sourcés

Avantages et limites

Matériaux bio-sourcés

Prévention: matériaux bio-sourcés

matériaux issus de la biomasse d'origine végétale ou animale. Ils couvrent aujourd'hui une large gamme de produits et trouvent de multiples applications dans le domaine du bâtiment et de la construction, en tant que :

isolants (laines de fibres végétales ou animales, de textile recyclé, ouate de cellulose, chènevotte, anas, bottes de paille, etc.),
mortiers et bétons (béton de chanvre, de bois, de lin, etc.),
panneaux (particules ou fibres végétales, paille compressée, etc.),
matériaux composites plastiques (matrices, renforts, charges),
chimie du bâtiment (colles, adjuvants, peintures, etc.).

Matériaux bio-sourcés

Béton de bois: copeaux de bois minéralisés pour la production de granulats



Béton de bois $\lambda = 0.09 \text{ W/m.}^\circ\text{K}$

bloc de béton cellulaire $\lambda = 0.12 \text{ W/m.}^\circ\text{K}$

brique de terre cuite $\lambda = 0.27 \text{ W/m.}^\circ\text{K}$



Matériaux bio-sourcés



Systeme constructif CEMWOOD, ATG 13/2932

Matériaux bio-sourcés

Ballots de paille

Vers une reconnaissance de l'usage de la paille comme matériau isolant dans la construction.

*aPROpaille (2012-2014) Programme Erable
(UCL/ICEDD/PailleTech/GbxAgroBioTech) - Wallonie*



Matériaux bio-sourcés

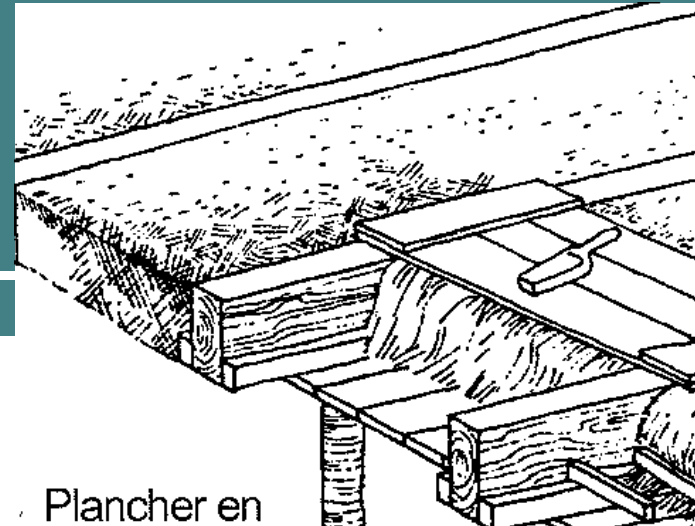


Produits bio-sourcés

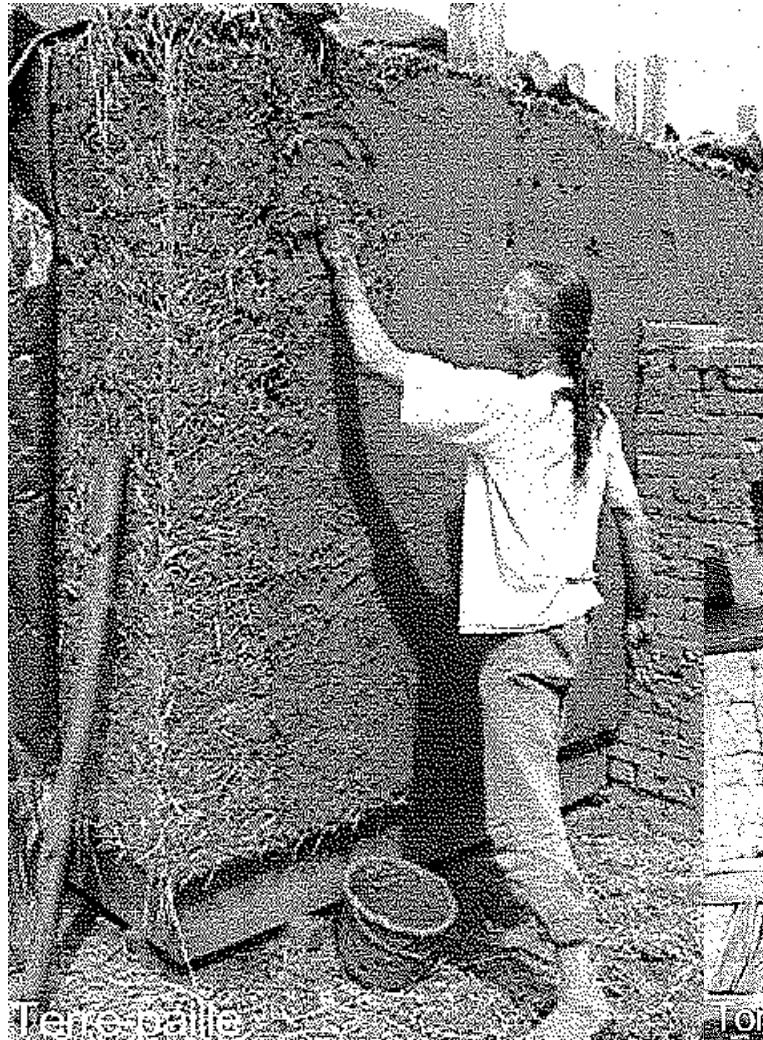


Ballots de paille

Matériaux bio-sourcés



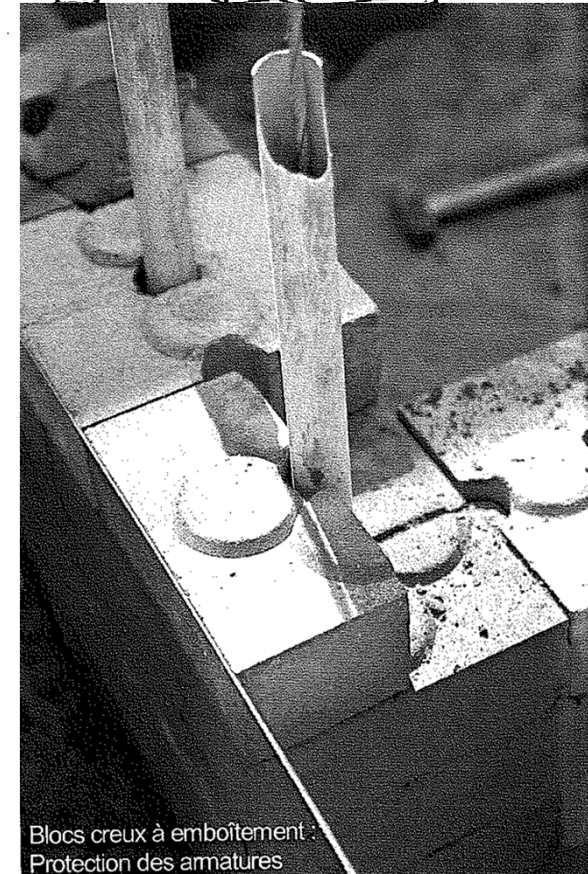
Plancher en terre-paille coulée



Terre-paille



Torchis ou colombage



Blocs creux à emboîtement
Protection des armatures

Matériaux bio-sourcés

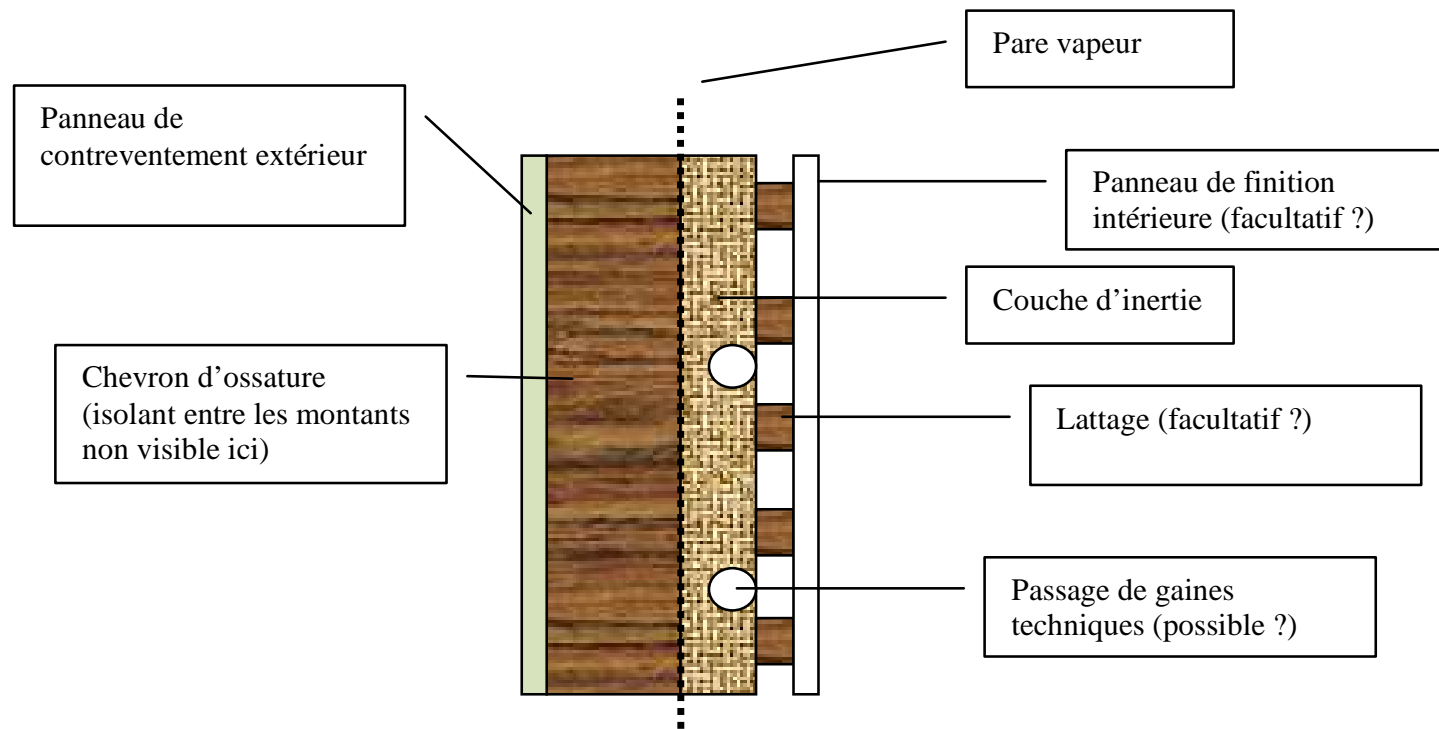
Argile crue (terre crue)

Amélioration de l'inertie thermique des bâtiments à ossature bois par incorporation de matériaux biosourcés au moment de la préfabrication (produit ArgiMob)



Matériaux bio-sourcés

Argile crue (terre crue)



Matériaux bio-sourcés

Matériaux renouvelables: paille, chanvre, lin, roseau, sisal, crin de cheval, miscanthus, balle de riz, ...



Culture du miscanthus

Briques de chanvre



Photo Meve

Matériaux bio-sourcés



Mars: année 1



Juin: année 1



Juillet: année 1



Juin: année 2



Septembre: année 2



Hiver: sénescence



Mars-avril: récolte



Octobre: année 3 et suivantes

Matériaux bio-sourcés

Récolte ensileuse



fauchage et bottelage



Impact environnemental

Cultivar	Energie requise [GJ/ha]	Energie produite [GJ/ha]	Ratio [-]
Miscanthus	9223	300000	+32.53
Saule	6003	180000	+29.99
Chanvre	13298	112500	+8.46
Blé	21465	189338	+8.82
Colza	19390	72000	+3.76

Rendement

Cultivar	Bois	Maïs	Blé dur	Colza	Chanvre	Lin	Miscanthus
Rendement [T MS/ha/an]	6	8.9	5.1	3.8	5.3	2	15

Matériaux bio-sourcés

Valorisation: bio-combustible, plasturgie, litière, chaume, isolation

Minéralisation

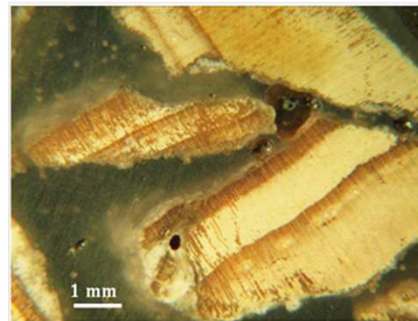


Figure 6c - miscanthus after mineralization

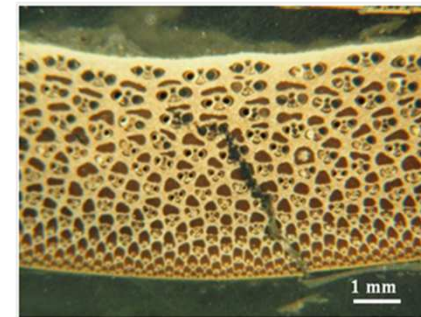


Figure 6d - bamboo after mineralization

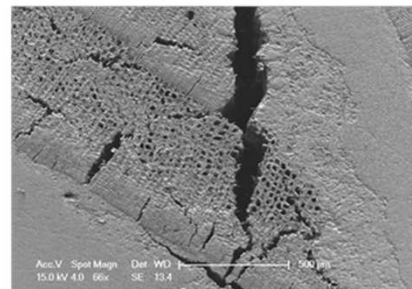


Figure 8c - Miscanthus after mineralization

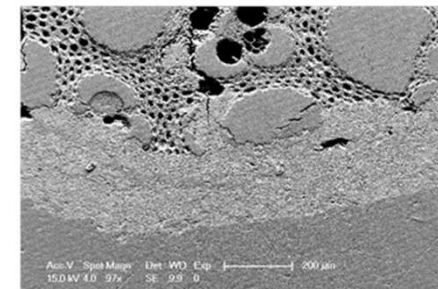


Figure 8d - Bamboo after mineralization

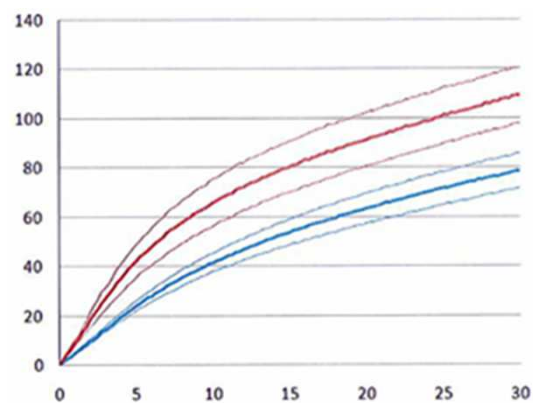
Matériaux bio-sourcés

Minéralisation: chaux, ciment, adjuvants, additions, eau

Masse volumique (kg/m³)

Sample	Raw miscanthus	Crushed miscanthus	Mineralized miscanthus
1	111	98	370
2	113	103	371
3	115	103	386

Absorption d'eau

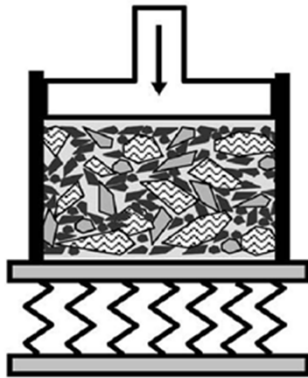


Raw
miscanthus

Crushed
miscanthus

Matériaux bio-sourcés

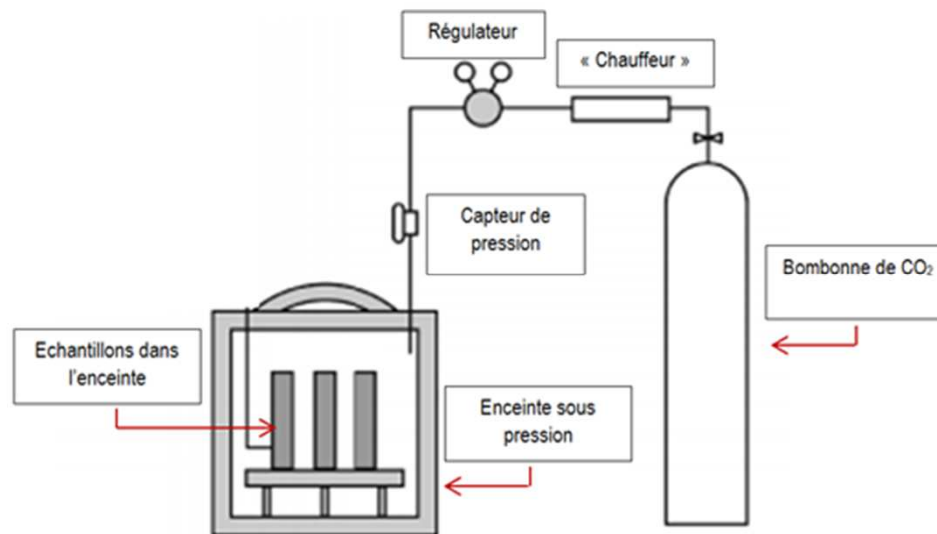
Blocs à base de miscanthus



Matériaux bio-sourcés

Captation du CO₂

Fabrication de blocs de construction à base de miscanthus minéralisé et injection de CO₂



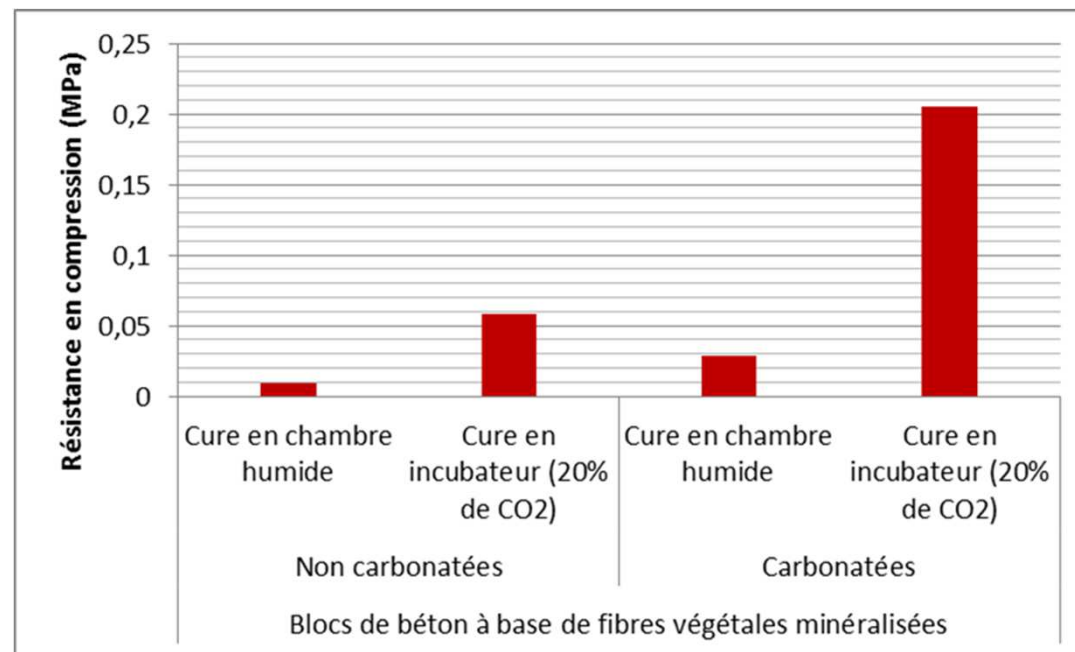
Matériaux bio-sourcés

Effet de la carbonatation sur les blocs de béton à base de miscanthus minéralisé

Variation de masse

Variable	Fibres végétales minéralisées	
	Non carbonatées	Carbonatées
Gain en masse (%)	1.33	1.34

Résistance en compression à 7 heures



Matières secondaires

Recyclage et durabilité

Recyclage et réemploi

Augmenter les perspectives du « **recyclage** »

- le **recyclage**, qui consiste à refaire le même produit que le produit initial (bouteilles en verre) ;
- la **réutilisation**, qui consiste à fabriquer un autre produit que celui qui a donné naissance au déchet (bouteilles en PVC pour la fabrication de jouets) ;
- le **réemploi**, qui consiste à prolonger la durée de vie d'un produit (bouteilles consignées) ;
- la **régénération**, qui consiste à redonner au déchet les qualités et propriétés du produit initial par un ou plusieurs procédés adaptés (purification des huiles de vidange) ;
- la **valorisation énergétique**, par incinération.



Recyclage et réemploi

Évaluation de l'opportunité du recyclage

Technique

Caractérisation des déchets

Durabilité

Constance des propriétés

Logistique et économique

Gisement et transport

Constance de production

Conditionnement

Localisation



Recyclage et réemploi

Évaluation de l'opportunité du recyclage

Environnementale et économique

Diminution des quantités mises en C.E.T

Obligation réglementaire d'élimination

Taxation



On ne recycle pas ...

n'importe quoi, n'importe comment, à n'importe quel prix.

Recyclage et réemploi

Réaliser des gains

Pillage des abbayes, châteaux, industries,...

Récolte sélective du papier et du carton

Remplacement des granulats naturels par des granulats recyclés

Conserver

Témoins historiques: conservation du patrimoine

Témoins sentimentaux

Économiser les moyens

Colonnes du fronton du Théâtre Royal de Liège

Fonte des cloches en période de guerre

Recyclage et réemploi

Economiser des matières premières

l'acier recyclé permet d'économiser du minerai de fer;
chaque tonne de matière plastique recyclée permet
d'économiser 700 kg de pétrole brut ;

le recyclage de 1 kg d'aluminium peut économiser
environ 8 kg de bauxite, 4 kg de produits chimiques et 14
kWh d'électricité;

chaque tonne de carton recyclé fait économiser 2,5
tonnes de bois;

chaque feuille de papier recyclé fait économiser 1 l d'eau
et 2,5 W d'électricité en plus de 15 g de bois.

Recyclage des déchets urbains

Economiser les ressources

Déchets municipaux

Combustion à 900-1000°C

Opérations post-combustion



Approvisionnement



Criblage



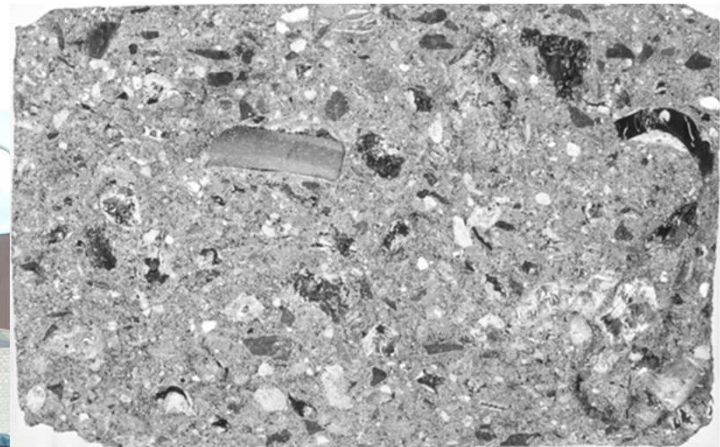
Séparation
magnétique



Maturation
(10 – 20 semaines)

Recyclage des déchets urbains

Economiser les ressources



1 cm

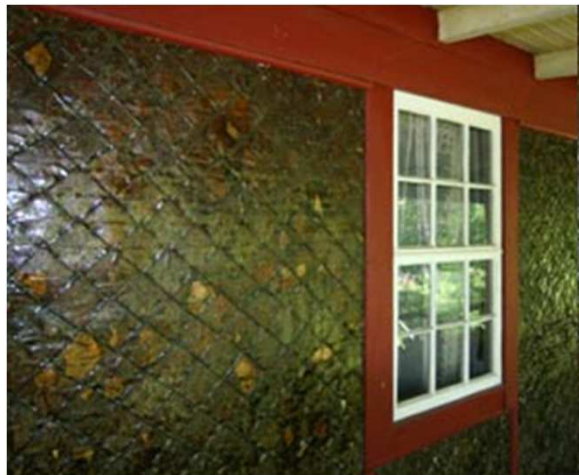
Industrial process – 10% MSW slags

Splitting resistance(N/mm ²)	4.05 ± 0.53
Water absorption (%)	6.61 - 6.29
Abrasion (mm)	0.98 - 1.36

Utilisation des mâchefers d'incinérateur d'ordures ménagères dans la fabrication des pavés en béton. L. Courard, R. Degeimbre, A. Darimont, A.-L. Laval, L. Dupont et L. Bertrand. *Mater. Struct.*, 35 (Juillet 2002), 365-372.

Recyclage des déchets urbains

Papiers et cartons



www.paperhouserockport.com

Mobilier dans la maison en papier d'Elis Stenman (Pigeon Cove, Massachusets)
Source: Elfers, J. & Schuyt, M., « Les bâtisseurs de rêves »



Recyclage des déchets urbains

Papiers et cartons

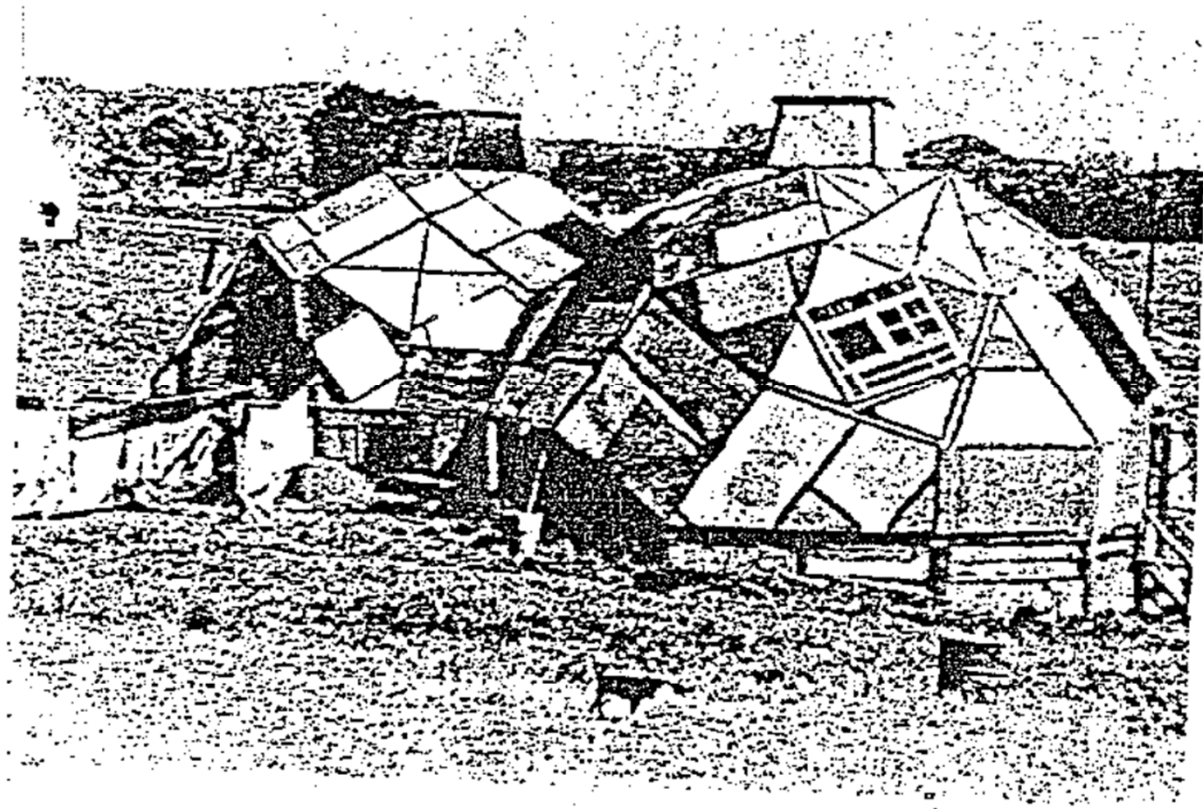
Le panneau acoustique PAN TERRE NATURE de Acoustix est composé de **ouate de cellulose** et de *fibres de lin* compressées ce qui donne un panneau rigide avec des caractéristiques mécaniques et acoustiques exceptionnelles. Ces matériaux sont issus du recyclage et sont 100% recyclables.



Recyclage et réemploi

Contester

Dômes en matériaux de récupération, réalisés par une communauté de hippies, sous la direction de Buckminster Fuller, Colorado, 1965
Source: Elfers, J. & Schuyt, M., « Les bâtisseurs de rêves »



Recyclage et réemploi

Etre sentimental



Palais Idéal du facteur Cheval (Photo G. Thérin)

Recyclage et réemploi

Créer

**Baldaccini, César - "Compression" -
Compression 1960 - Métal compressé,
pots d'échappement d'automobiles**



**Baldaccini, César - "Compression" -
(1960)**

Recyclage et réemploi

Vivre et survivre



Maisons de marchands pauvres à Bangkok
Source: Gabor, M., « Maisons sur l'eau »

Ramasseurs de déchets dans un bidonville de
Jakarta en Indonésie



Recyclage des déchets urbains

Vivre et survivre: matières plastiques (www.autre-terre.org)



ASDES : assainir
Kaolack (Sénégal) et
promouvoir l'emploi

Pérou / CECYCAP
Arequipa



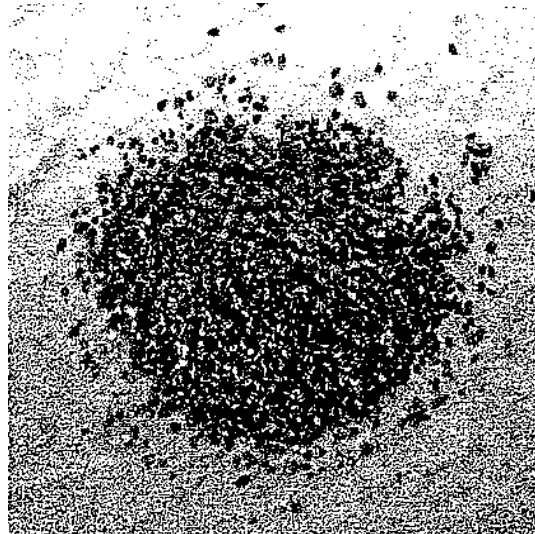
AJADD (Association Jeunesse
et Actions pour le
Développement Durable) est
née en 1996 à l'initiative de
jeunes aidés par le maire de
Kaya au Burkina-Faso.

Recyclage des déchets industriels

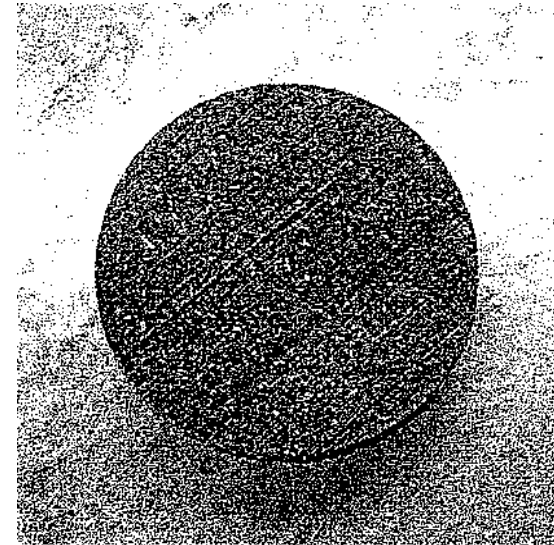
Caoutchoucs: poudrettes



pneus usagés



poudrette de caoutchouc



tapis de sol

transformation des pneus usagés

Recyclage des déchets industriels

Caoutchoucs: ouvrages de soutènement (procédé PNEUSOL)



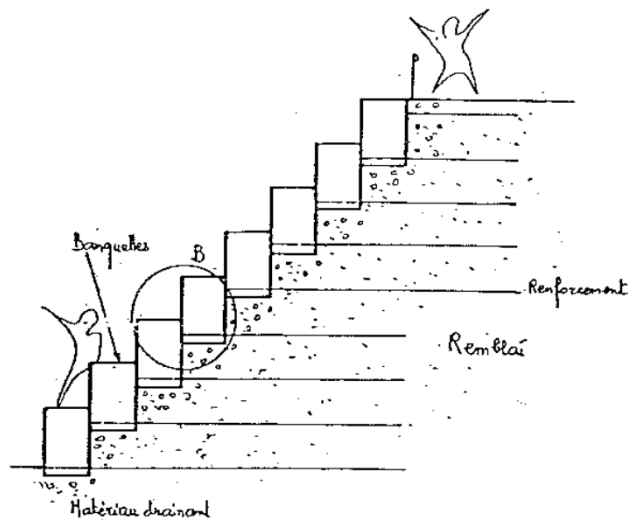
protection des pentes en Suisse



rampe pour véhicules

Recyclage des déchets industriels

Caoutchoucs: ouvrages de soutènement (procédé PNEUSOL)



stade en plein air (France)



réducteur de poussée à Mende (France)

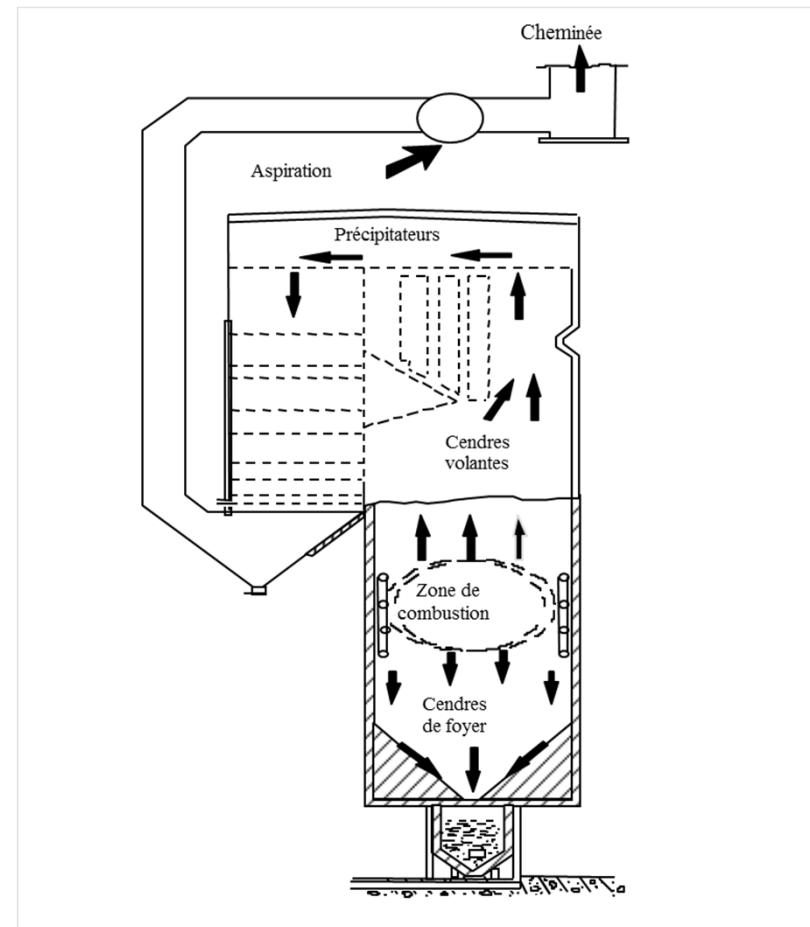
Recyclage des déchets industriels

Cendres volantes: origine

Cendres entraînées par les fumées récupérées dans un précipitateur électrostatique ou un rideau d'eau.

Solidification en petites sphères, principalement vitreuses

Production en 2010: $800 \cdot 10^6$ tonnes



Recyclage des déchets industriels

Cendres volantes: propriétés physiques

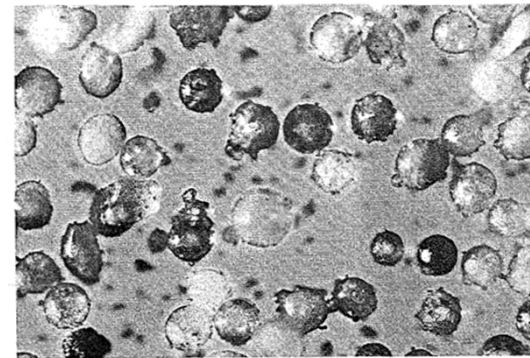
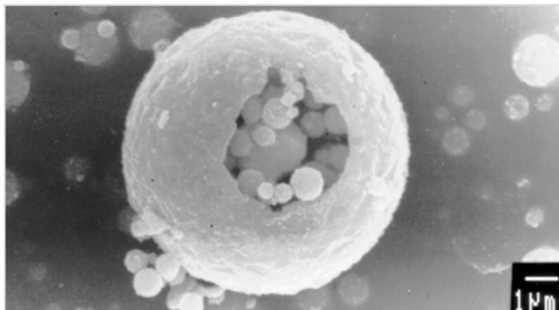
Forme: poudre fine - microsphères noires et dures, creuses (cénosphères) ou remplies d'autres sphères plus petites (plérosphères).

Structure minéralogique: combustion dans chaudière → structures amorphes (vitrifiées) – plus de 50% SiO_2

Granulométrie: 0.5 – 200 μm et $d_{\text{médian}} < 20 \mu\text{m}$

Finesse: $SS = 2500\text{-}5500 \text{ cm}^2/\text{g}$

Densité: 1.9 – 2.4



b) fraction 37-45 μm

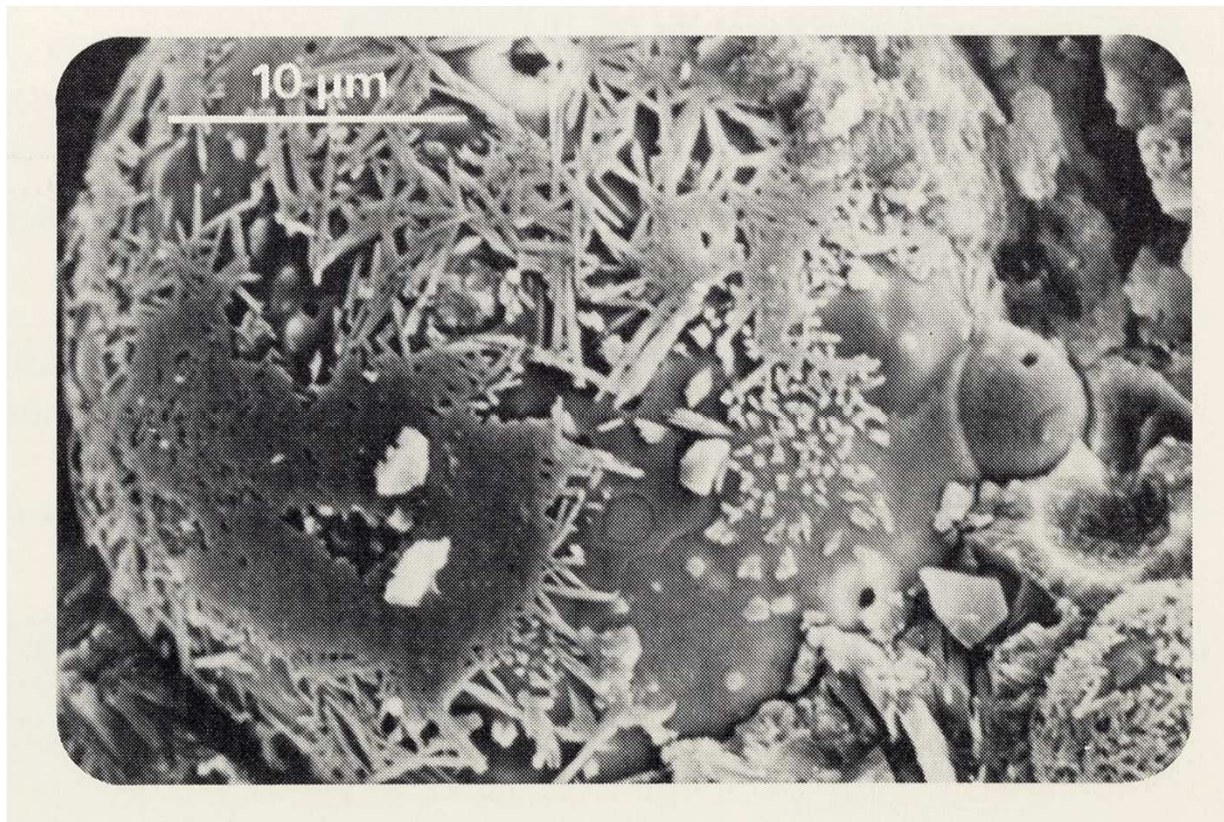
CRR n° 1788-19

← 40 μm

Recyclage des déchets industriels

Cendres volantes: pouzzolanité

Réaction lente à se manifester ($[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ minimale nécessaire)

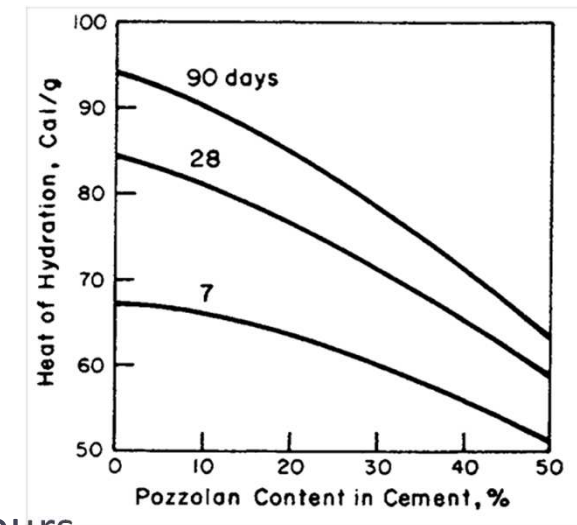
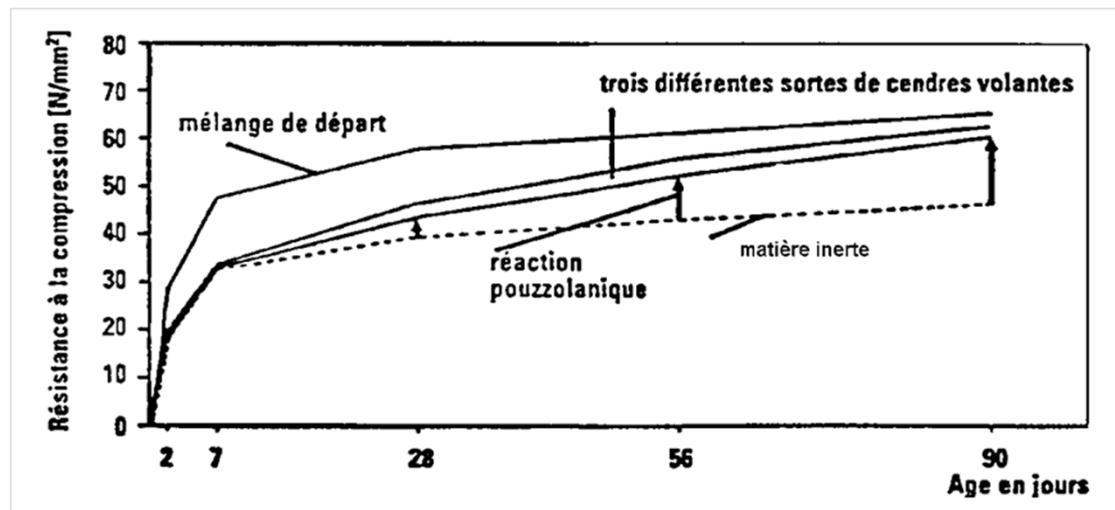


Febelcem, 2003

Recyclage des déchets industriels

Cendres volantes: pouzzolanicité

Réaction lente à se manifester ($[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ minimale nécessaire)



Mesure de l'indice d'activité après 28 et 90 jours

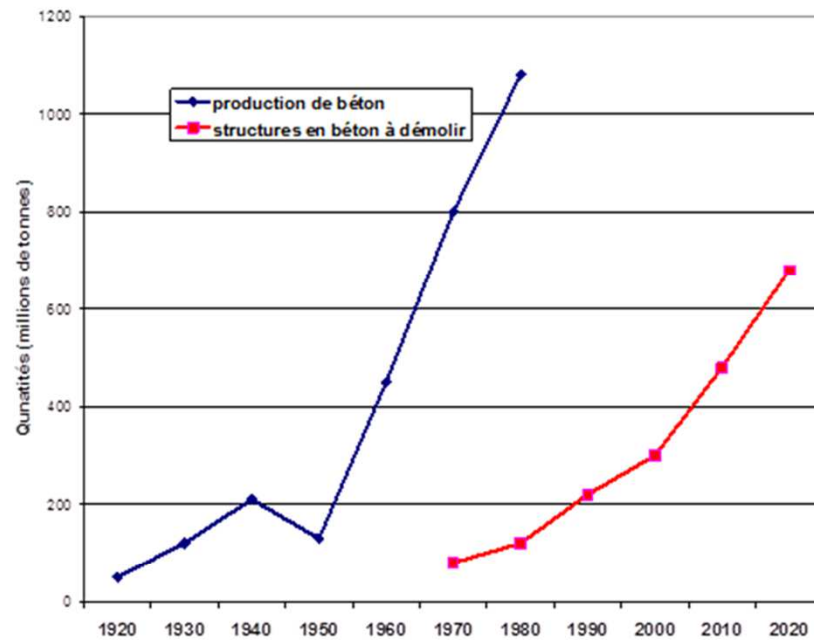
$$i = \frac{f_{25}}{f_0}$$

f_0 = résistance en compression d'un mortier normalisé

f_{25} = résistance en compression d'un mortier normalisé dans lequel 25% de ciment a été substitué par l'addition étudiée

Recyclage des déchets industriels

Déchets de construction et de démolition



Centre Scientifique et Technique de la Construction

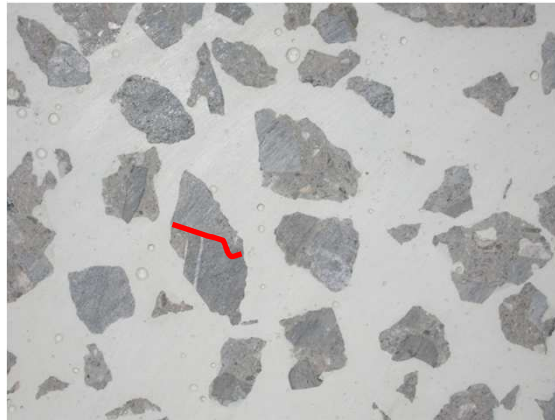
Photo F. Debieb, Université de Médéa, Algérie



Recyclage des déchets industriels

Déchets de construction et de démolition: Béton Compacté au Rouleau

Granulat recyclé =
ancien mortier
+ ancien granulat



Conclusions et perspectives

Demain, les matériaux

Conclusions

Les matériaux du futur.....

Se libérer de responsables identifiés “nocifs”, “toxiques”, ...

Affiner les techniques d'évaluation

Trouver des ressources alternatives

Exploiter la mine urbaine

Intégrer de nouveaux critères de sélection

La nature l'a fait ..., pourquoi pas nous?

Références

Quelques articles ou livres intéressants

W. McDonough, M. Braungart. *Cradle to cradle – Créer et recycler à l'infini* (Ed. Alternatives, Paris), 2011.

E. Peris Mora. *Life cycle, sustainability and the transcendent quality of building materials*. Building and Environment 42 (2007) 1329-1334.

L. Courard. *Valorisation des déchets et sous-produits industriels en génie civil*. Centrale des cours, Faculté des Sciences Appliquées, Université de Liège (2010), 181p.



Merci

Danke

Takk

Hvala

Dziękuję

Thank you

Dank u

Grazie

Gratias

Arigato

Efkaristos