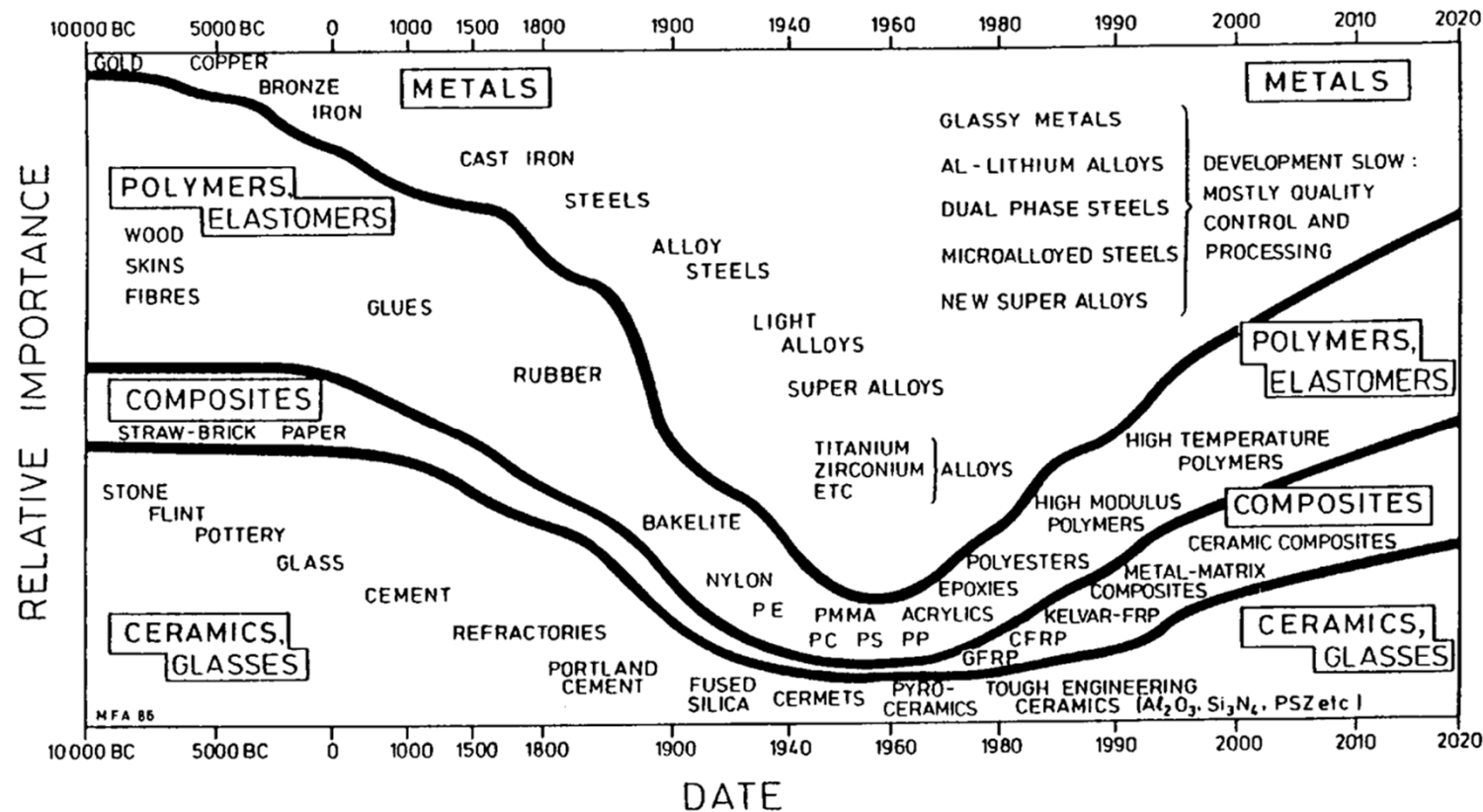


Matériaux du futur: ressources naturelles ou secondaires?

Luc COURARD, Université de Liège, Belgique

52ème congrès des professeurs de sciences, Liège, 26 août 2014

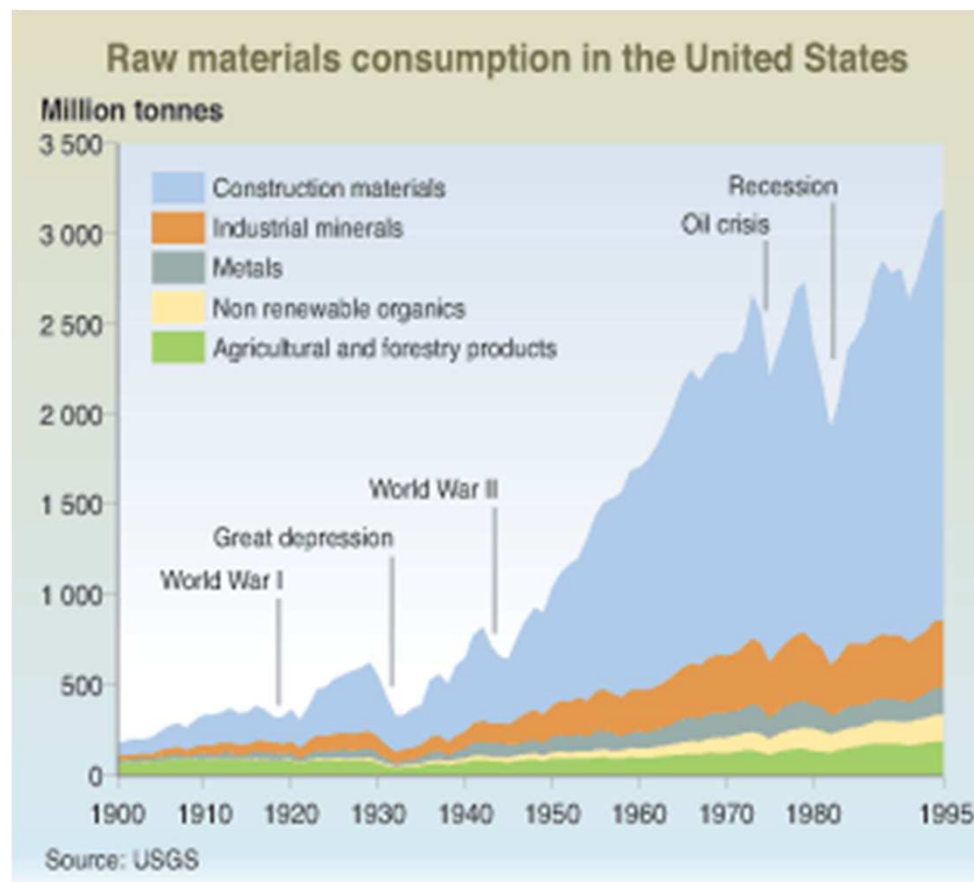
Constatation



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

Béton: 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)

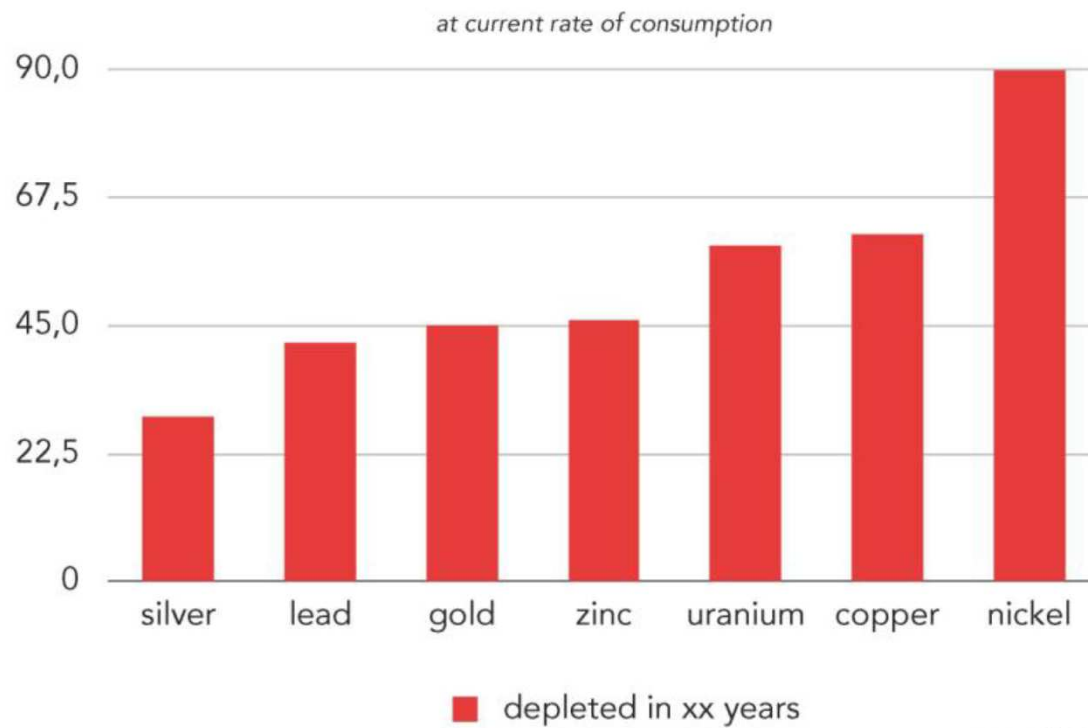
Ciment: 1,3 milliards de tonnes (17000 paquebots Norway = 2,34 milliards de tonnes de calcaire et argile)

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

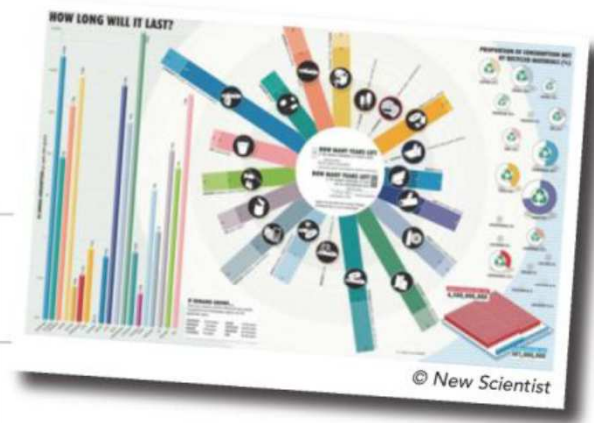


Constatation

Les matières premières s'épuisent



source: New Scientist



Constatation

Nous produisons beaucoup de déchets

Difficile à estimer

Ce chiffre varie de 3.400 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.

Selon Pike Research, nous produirons 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

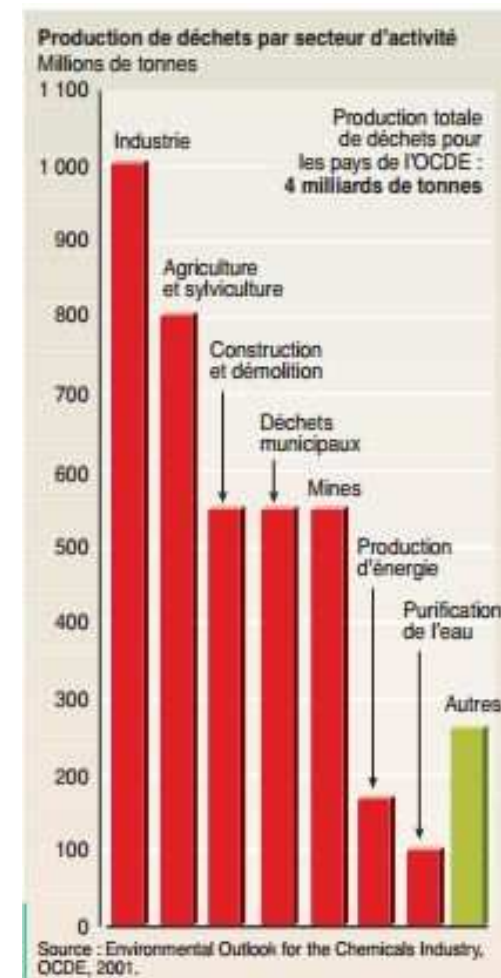
7% des déchets se trouvent sous forme liquide

Production de déchets industriels

déchets inorganiques (70%)

déchets organiques (25%)

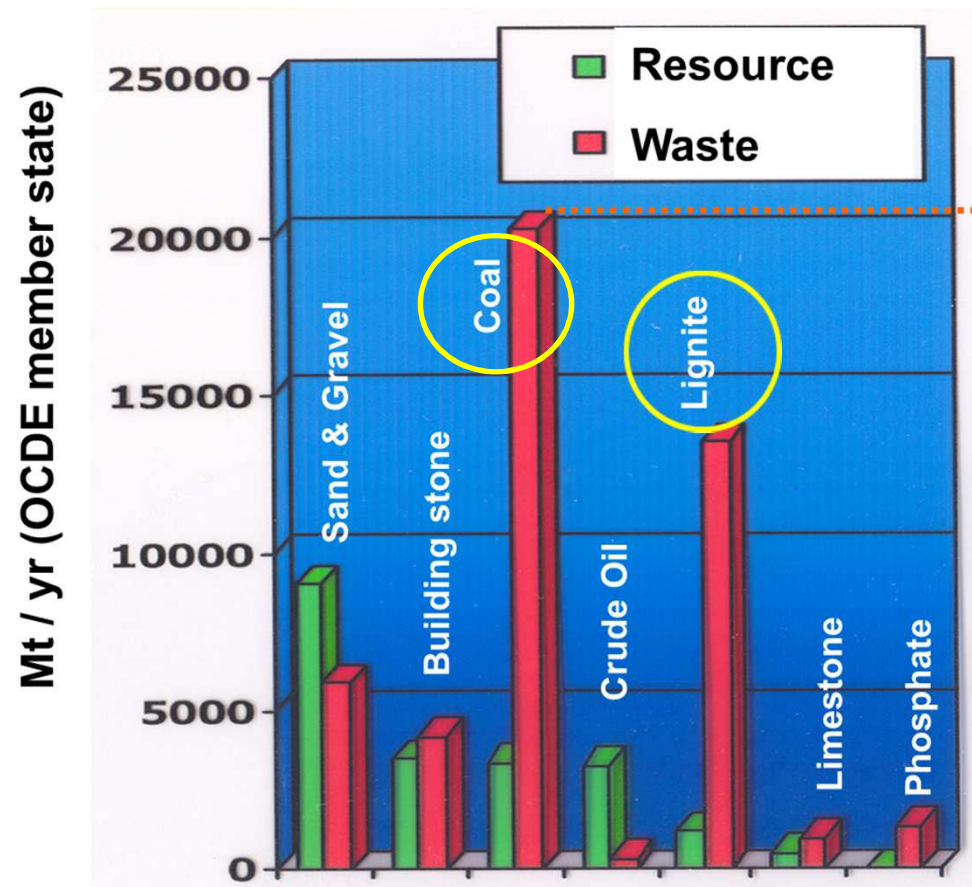
Le solde est constitué de déchets non classés



Constatation

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 !

Constatation

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

Eco-bénéficienne

les concepts et principes

Exemples de recyclage

les applications et leurs restrictions

Conclusions et perspectives

demain, les matériaux

Attitudes et conception

Stratégies de réorientation

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

- Education – sensibilisation

 - Éco-conseillers

 - Technologies propres

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

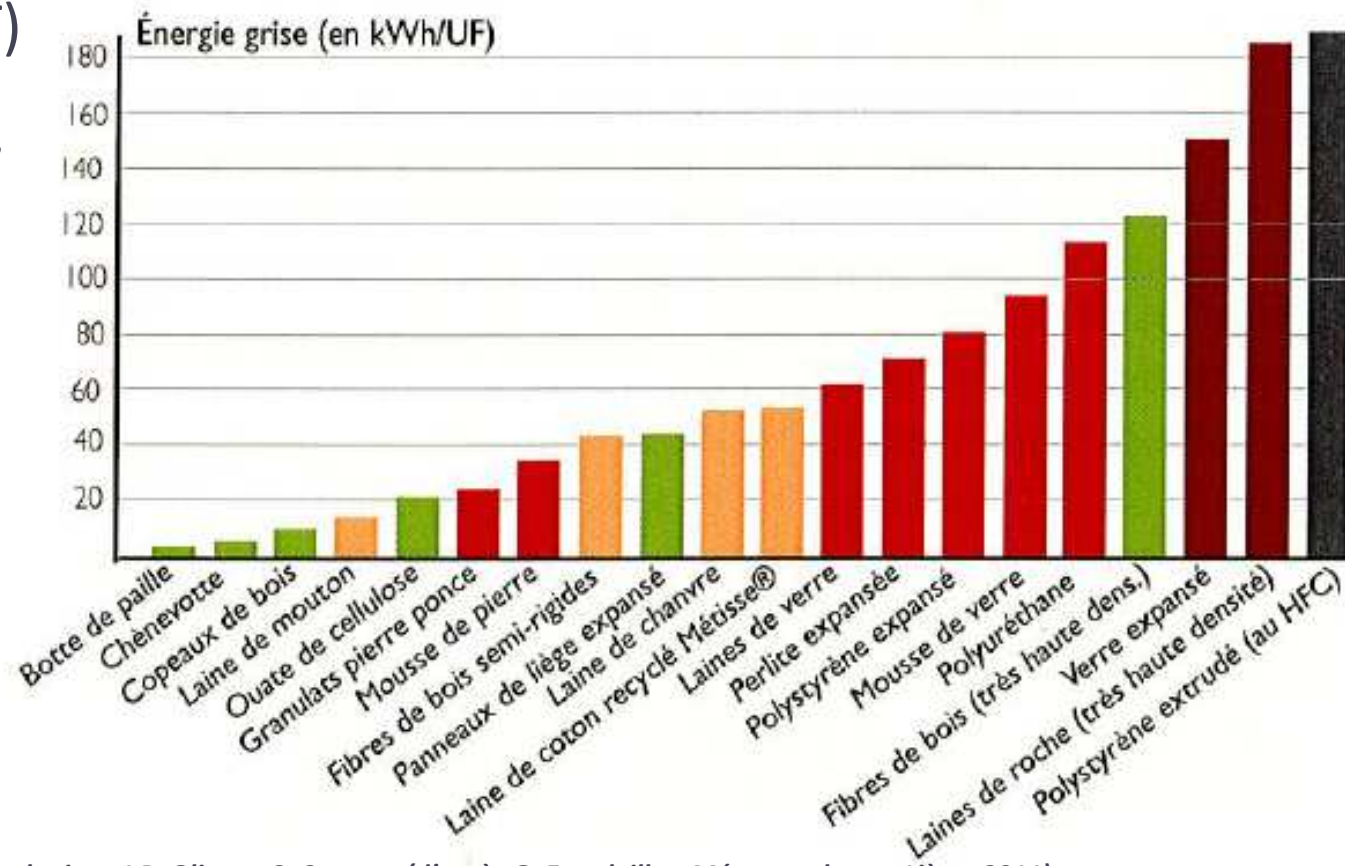
 - Réduction des risques de pollution

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

Attitudes et conception

Prévention: sélection sur base de l' énergie 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)

Attitudes et conception

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

Produits propres (énergie grise, réduction GWP, labels)

Produits bio-sourcés

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 $\lambda = 0.27 \text{ W/m.}^\circ\text{K}$



Attitudes et conception

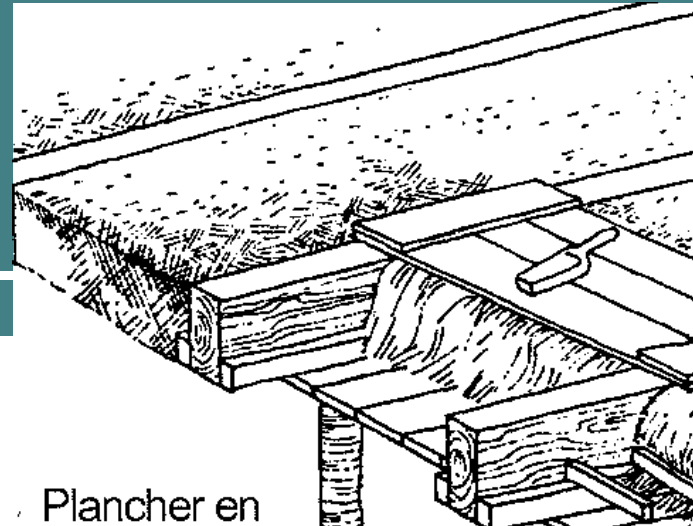


Produits bio-sourcés

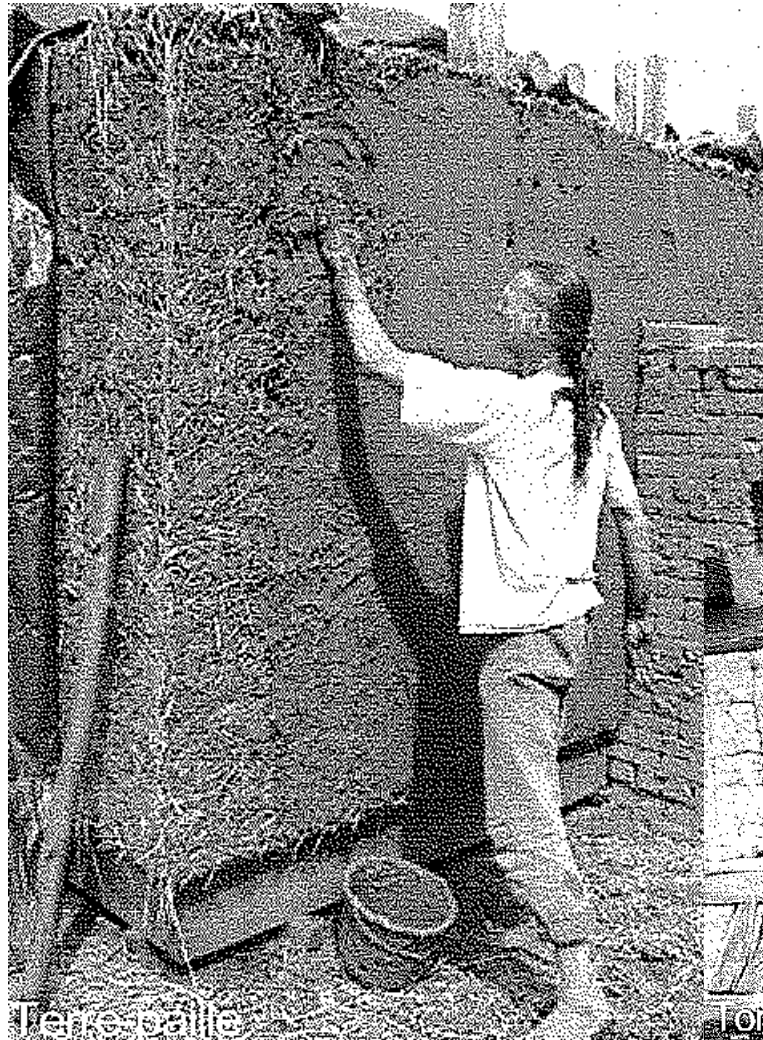
Ballots de paille



Attitudes et conception



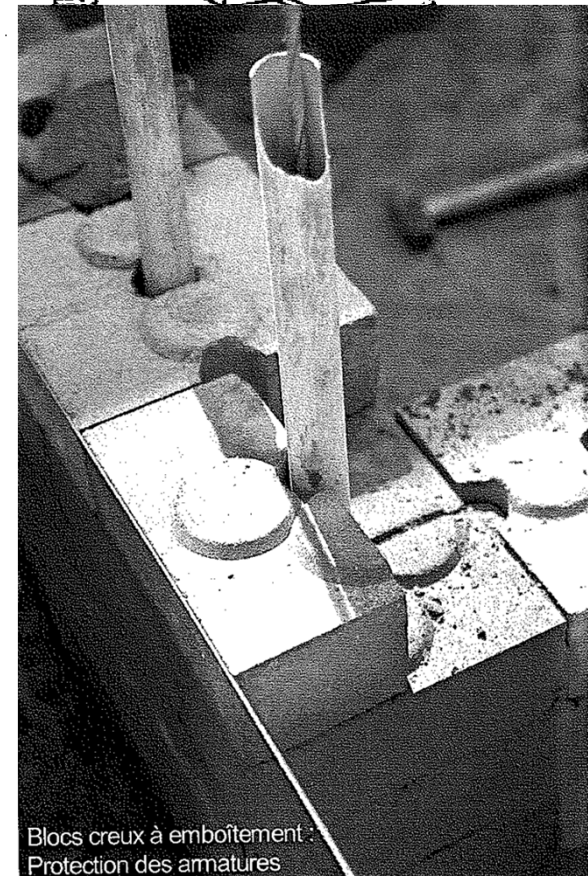
Plancher en
terre-paille
coulée



Terre-paille



Torchis ou colombage



Blocs creux à emboîtement :
Protection des armatures

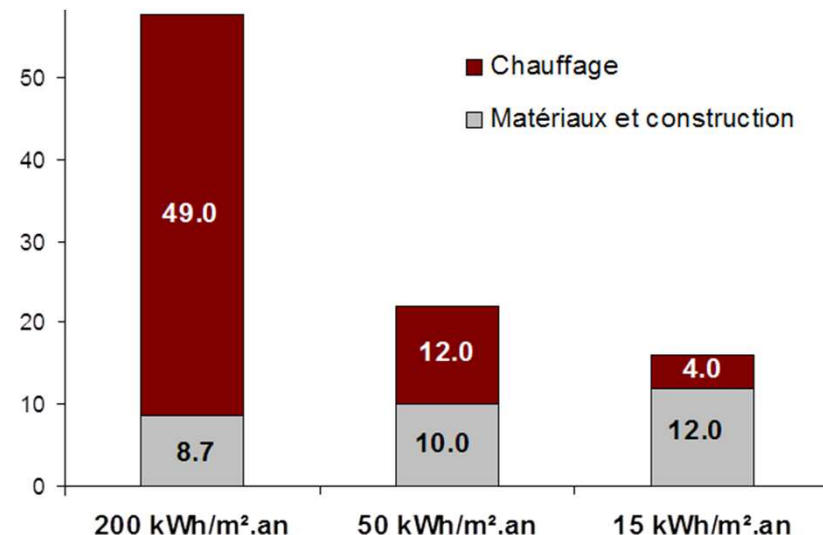
Attitudes et conception

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 »

Attitudes et conception

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.



Attitudes et conception

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



Attitudes et conception

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.

Attitudes et conception

Stocker les déchets ultimes

Centres d'enfouissement techniques

Choix et sélection des sites de stockage

Matériaux d'étanchéité et de drainage

Traitement des lixiviats

Récupération des gaz

Production d'énergie

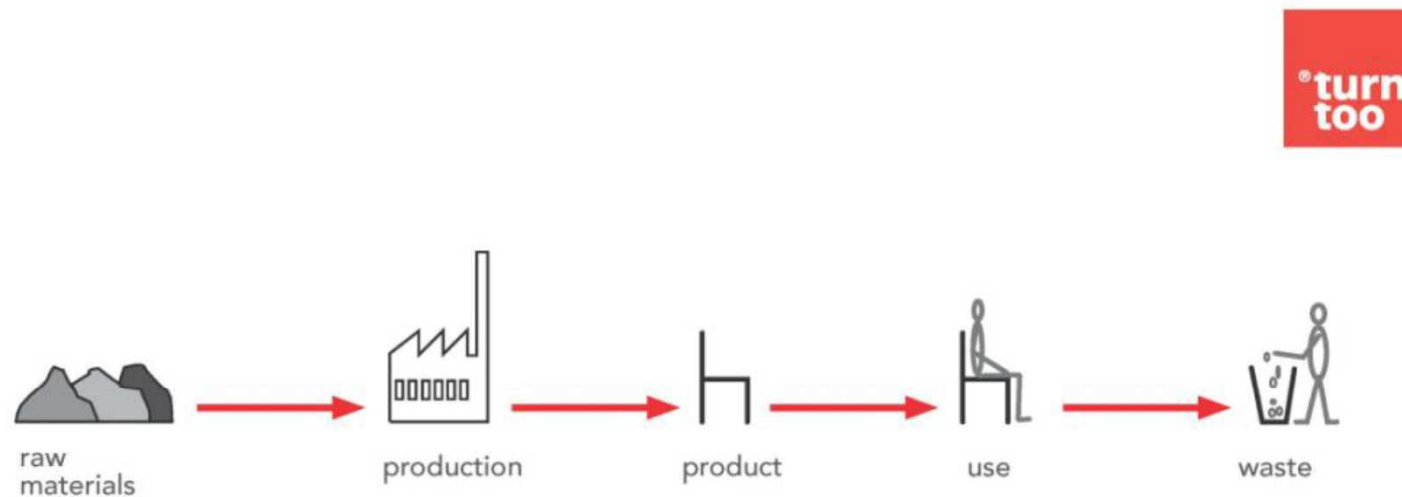
Techniques d'inertification des déchets dangereux



Eco-bénéficine

Concepts et principes

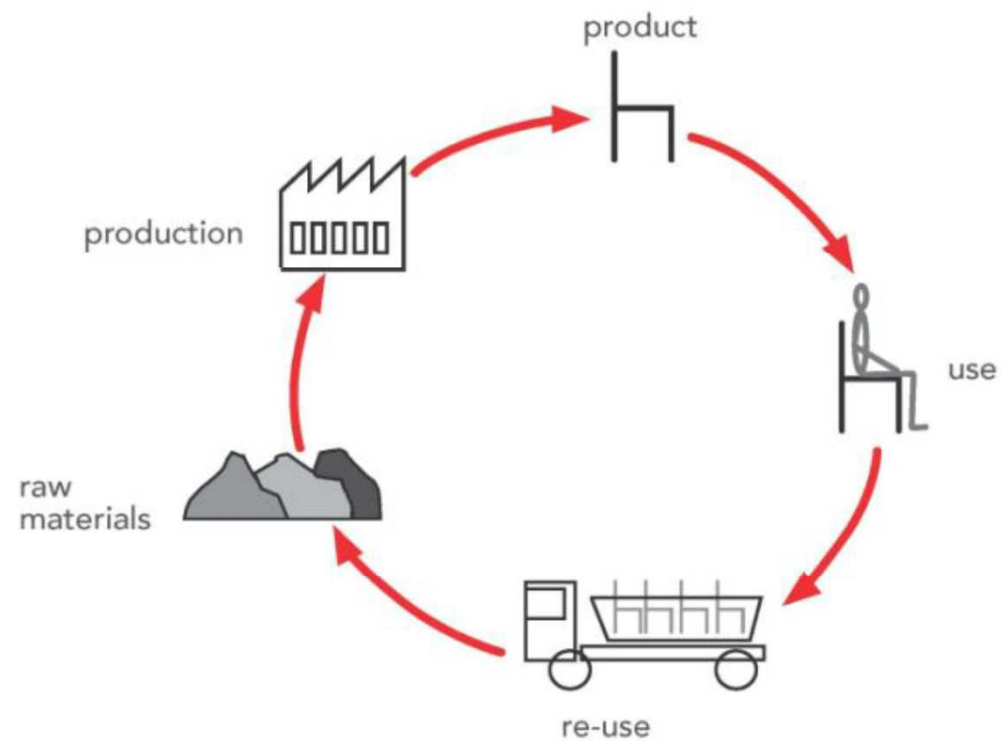
Eco-bénéfice



OLD LINEAR ECONOMY - is about ownership

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

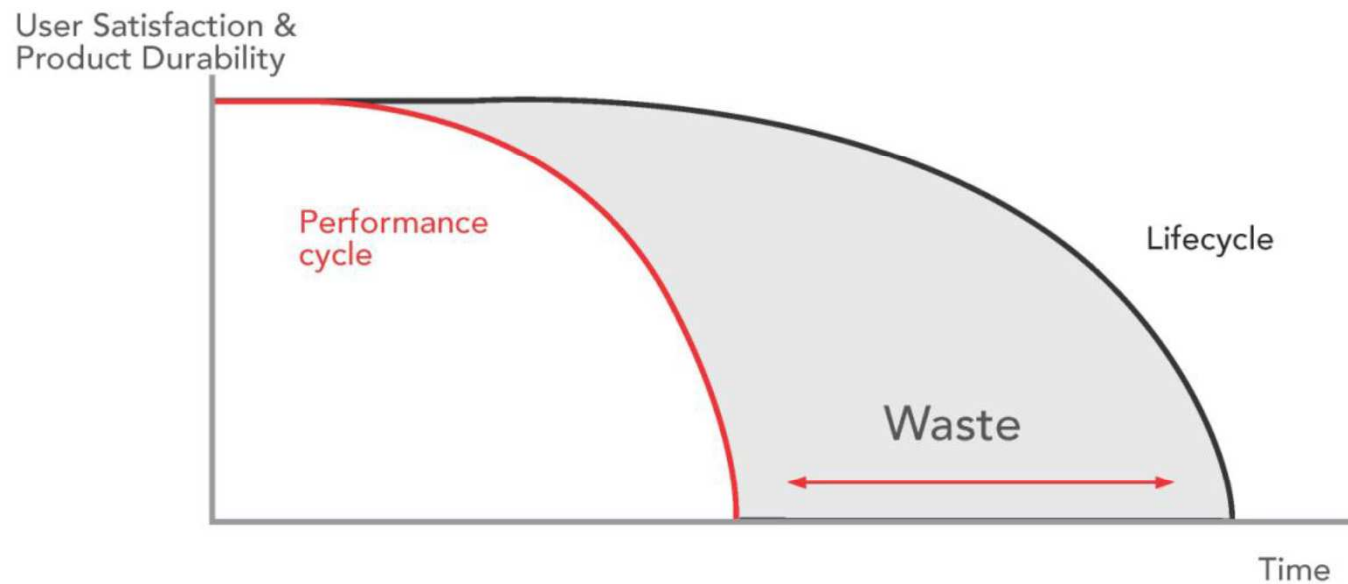
Eco-bénéfice



C2C - TECHNICAL NUTRIENT CYCLE

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

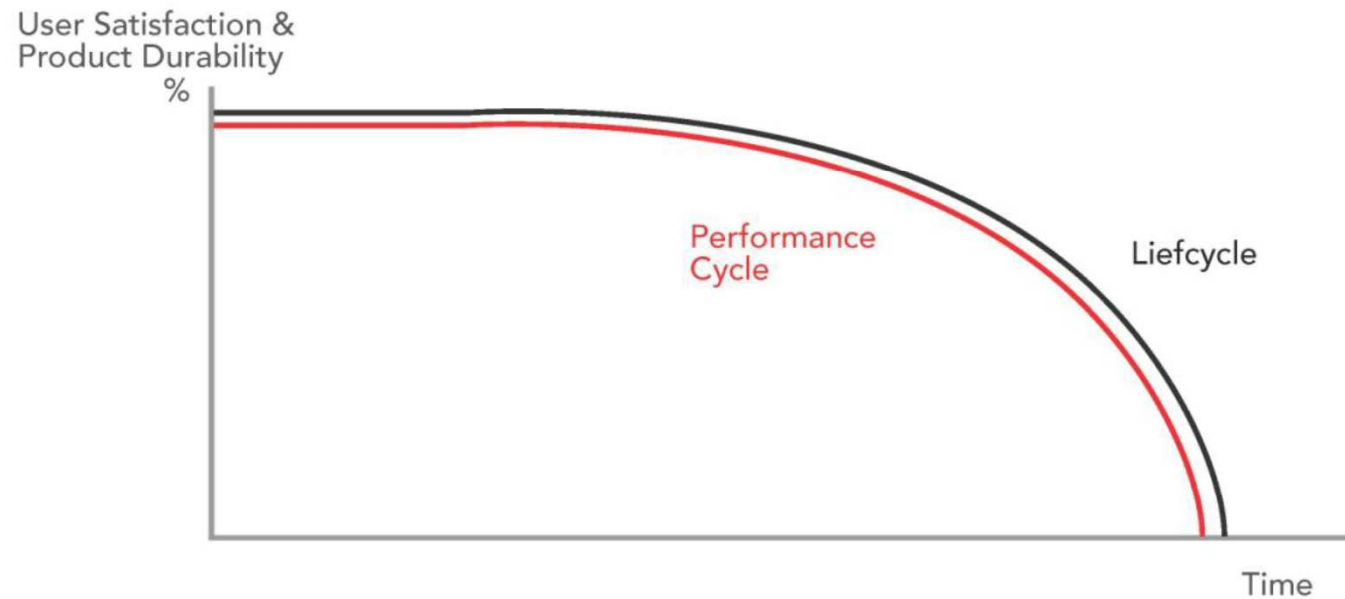
Eco-bénéfice



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 ...

Exemples de recyclage

Applications et restrictions

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



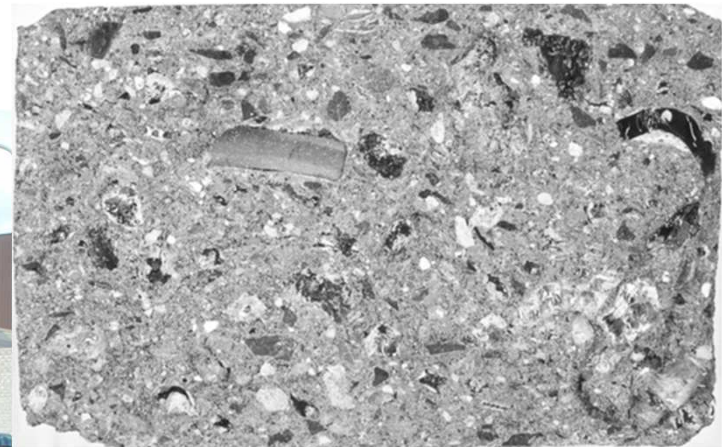
Séparation
magnétique



Maturation
(10 – 20 semaines)

Recyclage des déchets urbains

Economiser les ressources



1 cm

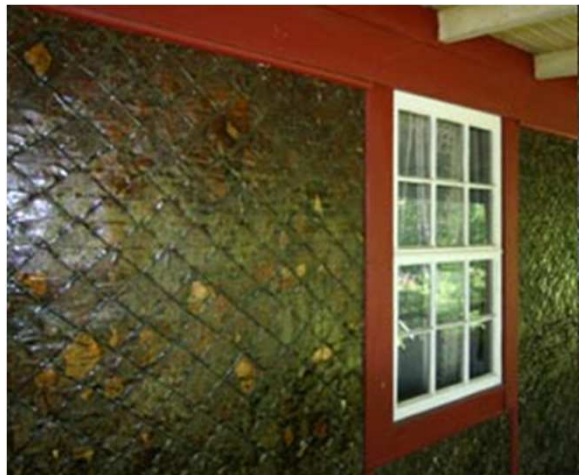
Industrial process – 10% MSW slags

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

Source : 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

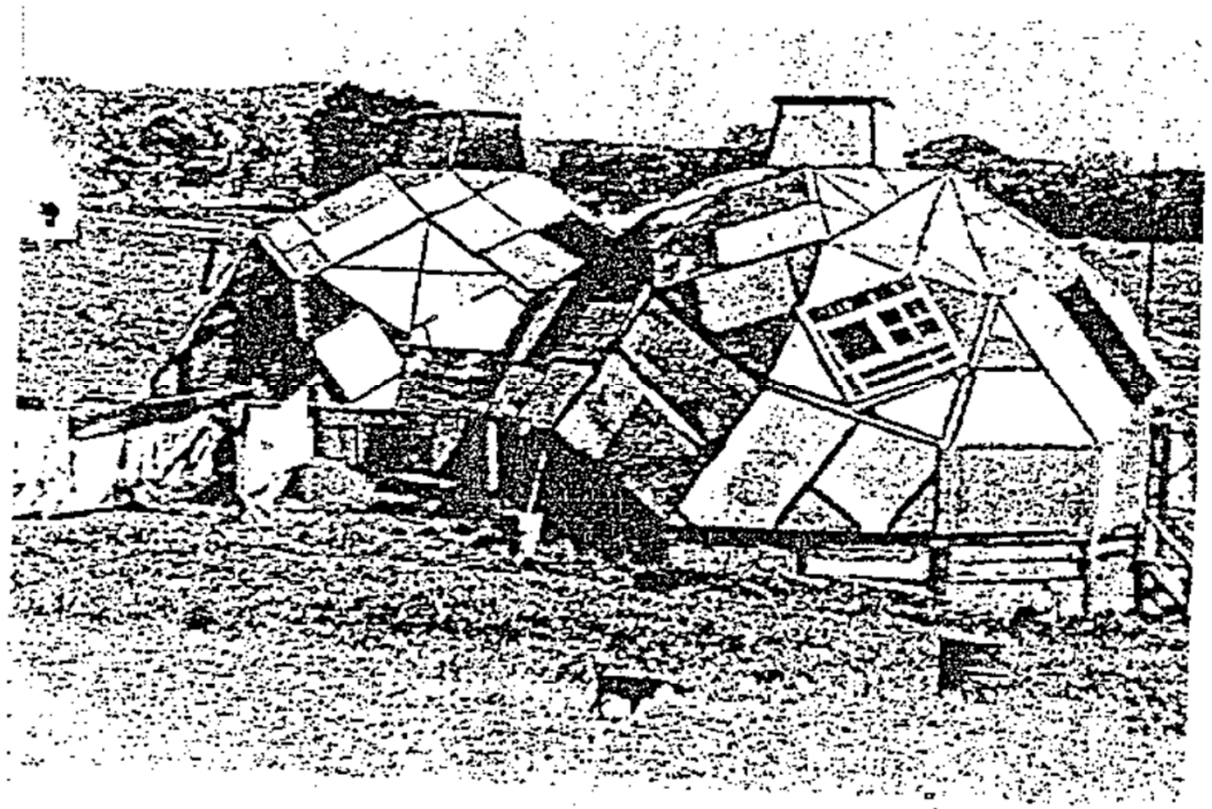
Le panneau acoustique PAN TERRE NATURE de Acoustix est composé de **ouate de cellulose** et de *fibres de lin* compressées ce qui donne un panneau rigide avec des caractéristiques mécaniques et acoustiques exceptionnelles. Ces matériaux sont issus du recyclage et sont 100% recyclables.



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



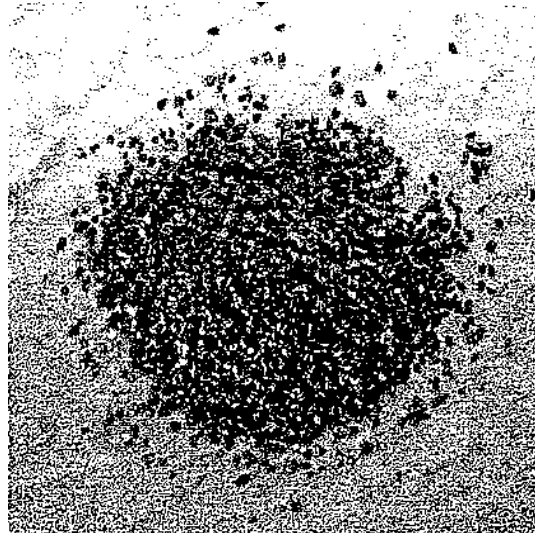
AJADD (Association Jeunesse
et Actions pour le
Développement Durable) est
née en 1996 à l'initiative de
jeunes aidés par le maire de
Kaya au Burkina-Faso.

Recyclage des déchets industriels

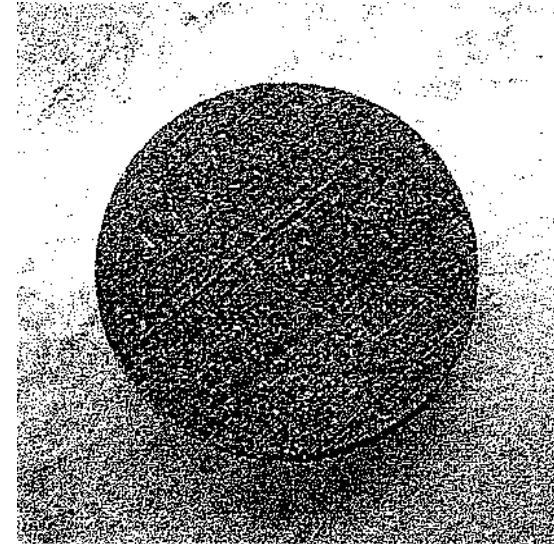
Caoutchoucs: poudrettes



pneus usagés



poudrette de caoutchouc



tapis de sol

transformation des pneus usagés

Recyclage des déchets industriels

Caoutchoucs: ouvrages de soutènement (procédé PNEUSOL)



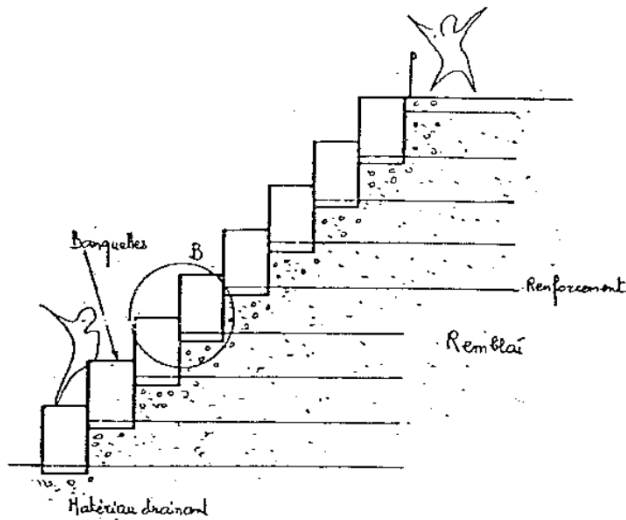
protection des pentes en Suisse



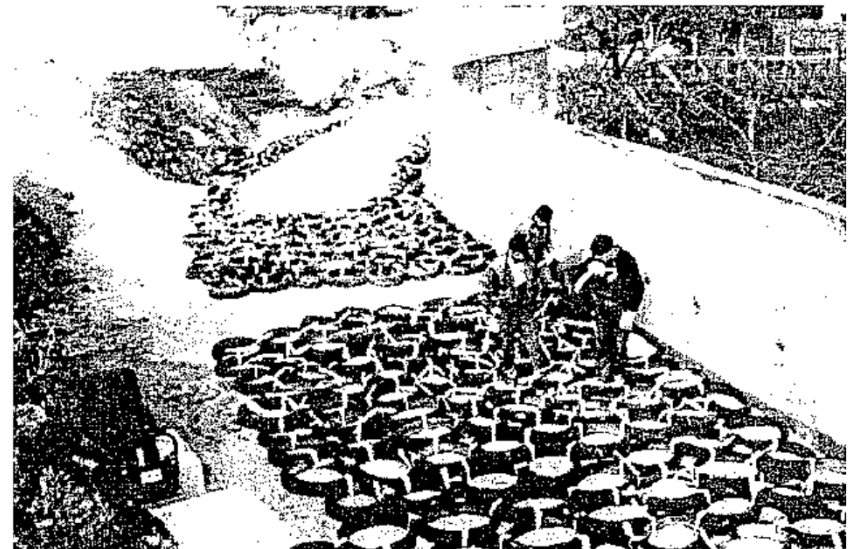
rampe pour véhicules

Recyclage des déchets industriels

Caoutchoucs: ouvrages de soutènement (procédé PNEUSOL)



stade en plein air (France)



réducteur de poussée à Mende (France)

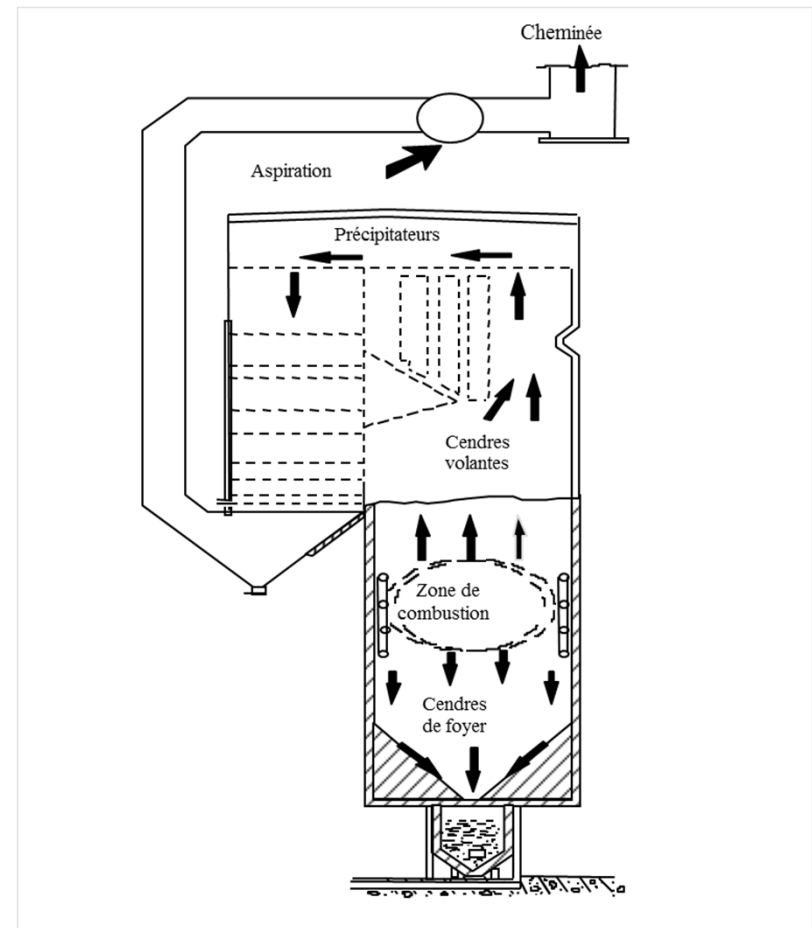
Recyclage des déchets industriels

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: 800.10^6 tonnes



Recyclage des déchets industriels

Cendres volantes: propriétés physiques

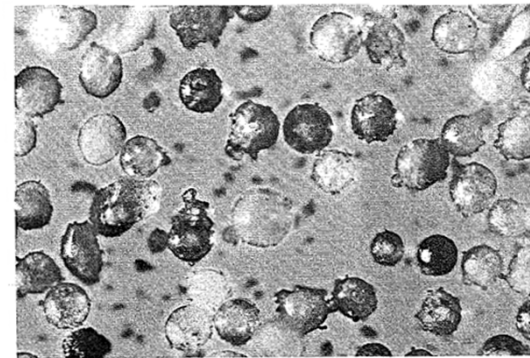
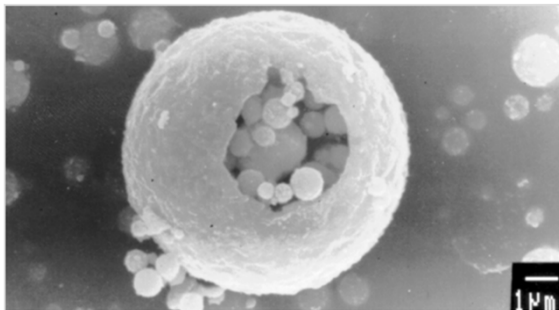
Forme: poudre fine - microsphères noires et dures, creuses (cénosphères) ou remplies d'autres sphères plus petites (plérosphères).

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

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

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

Densité: $1.9 - 2.4$



b) fraction 37-45 μm

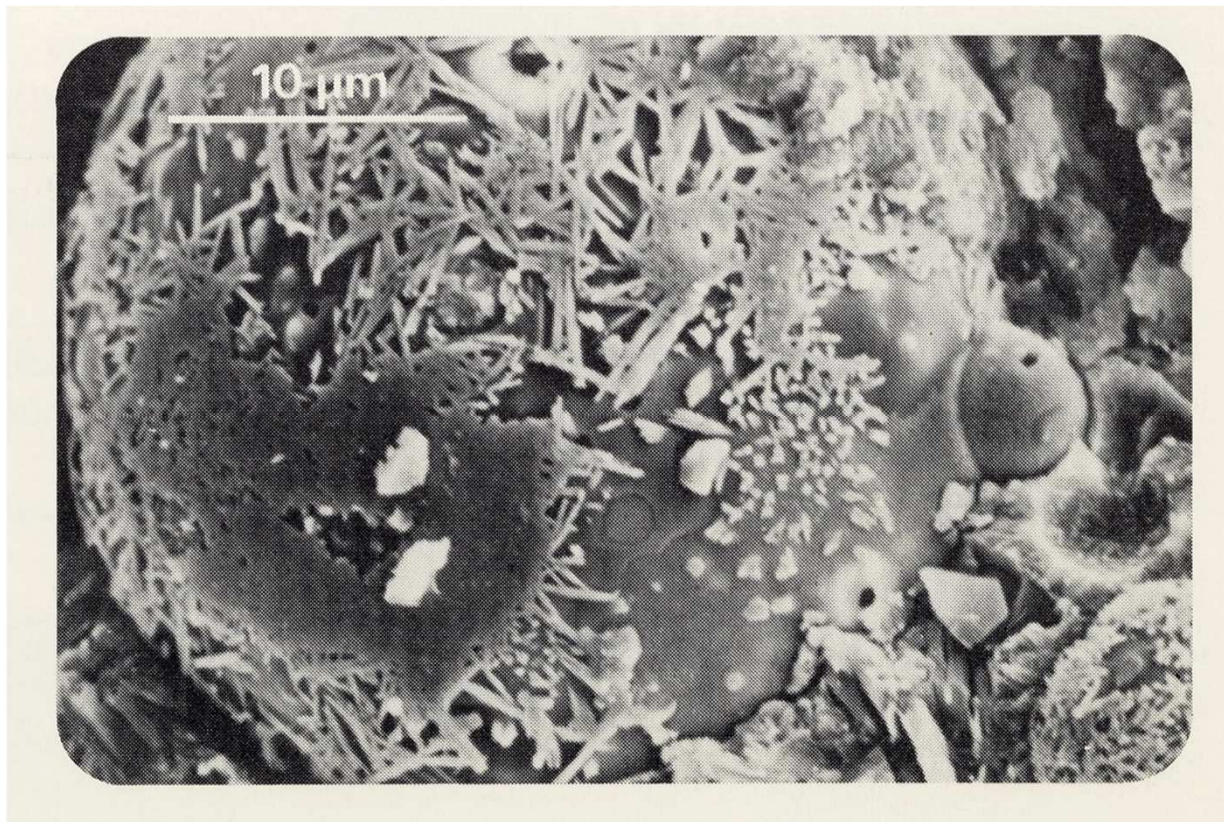
CRR n° 1788-19

40 μm

Recyclage des déchets industriels

Cendres volantes: pouzzolanité

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

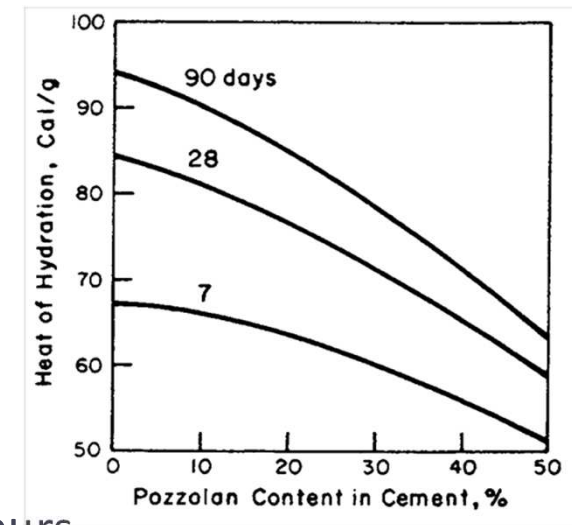
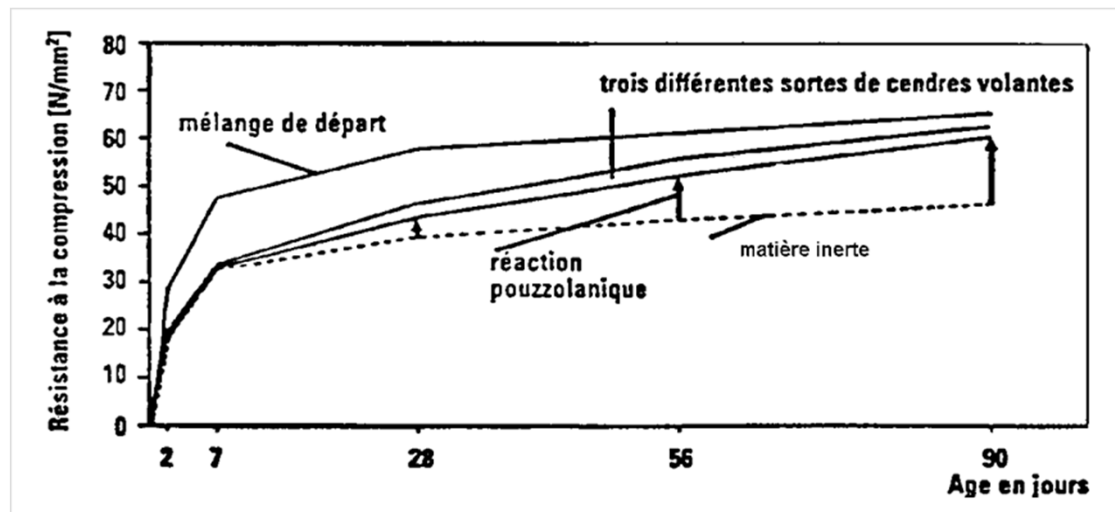


Febelcem, 2003

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

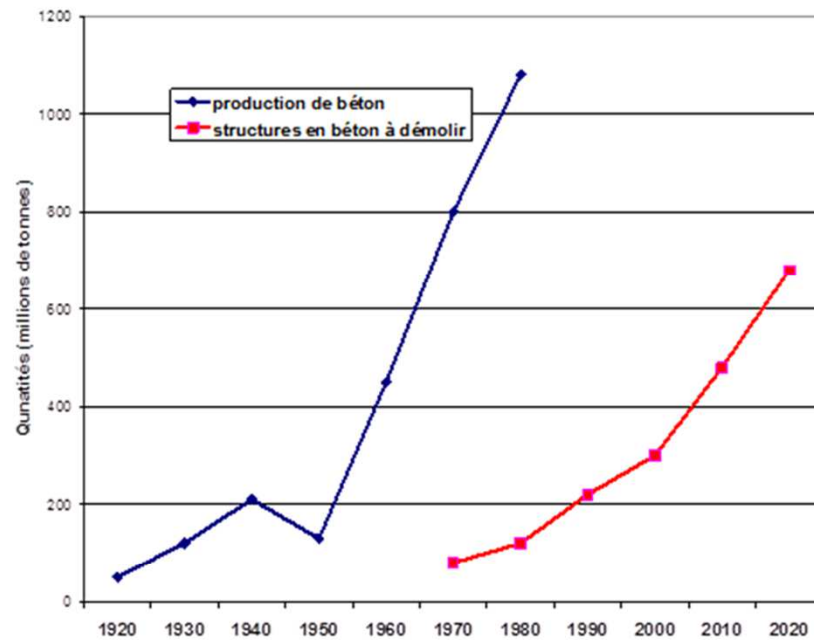
$$i = \frac{f_{25}}{f_0}$$

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

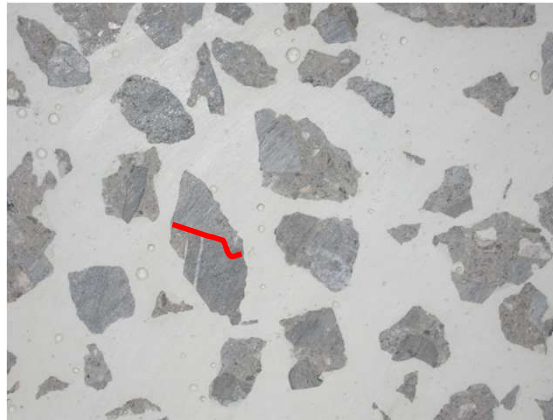
Photo F. Debieb, Université de Médéa, Algérie



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?

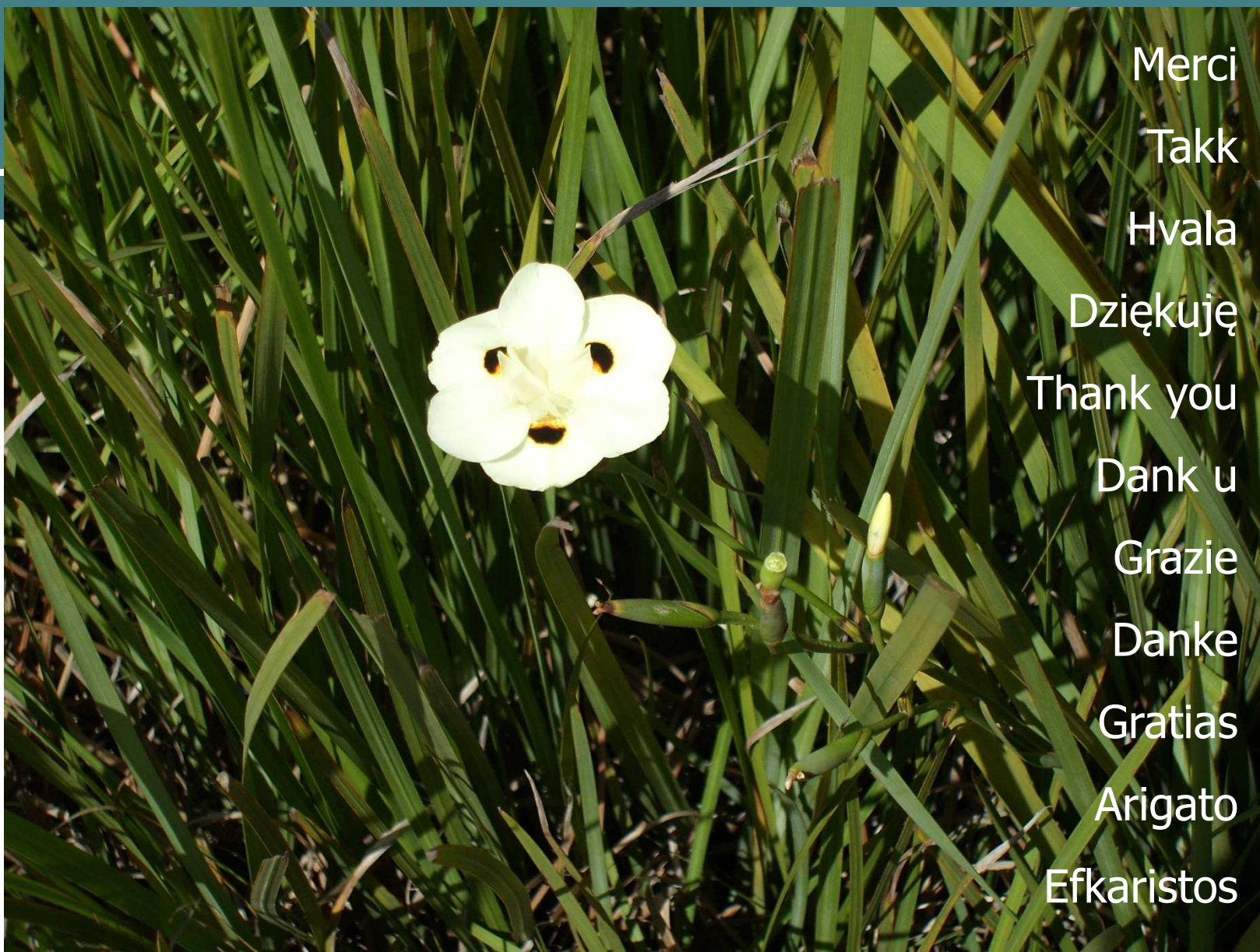
Références

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

Takk

Hvala

Dziękuję

Thank you

Dank u

Grazie

Danke

Gratias

Arigato

Efkaristos