



Université
de Liège



Ressources secondaires et matériaux innovants pour une construction durable

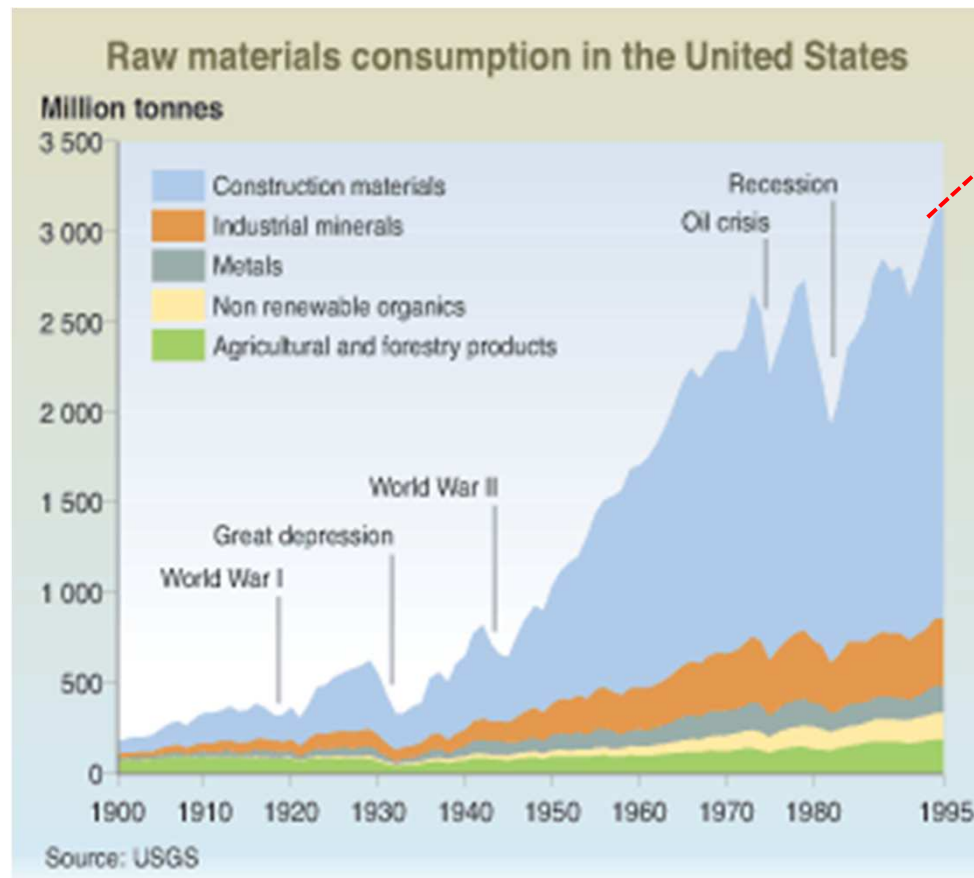
Luc COURARD, Université de Liège (B)

Arnaud EVRARD, Université Catholique de Louvain (B)

Matériaux innovants et efficacité énergétique, 10 décembre 2015

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)

Constatation

Nous produisons beaucoup de déchets

Difficile à estimer

Ce chiffre varie de 3,4 à 4 milliards de tonnes 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.

La quantité de déchets produits dans l'UE en 2010 s'élève à 2,5 milliards de tonnes

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!

<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

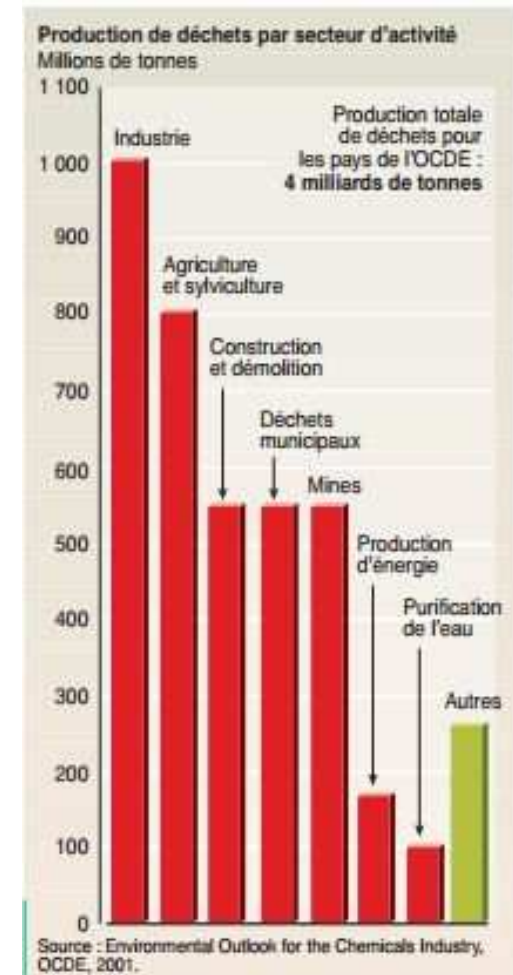
7% des déchets se trouvent sous forme liquide

Production de déchets industriels

déchets inorganiques (70%)

déchets organiques (25%)

Le solde est constitué de déchets non classés



Constatation

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

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



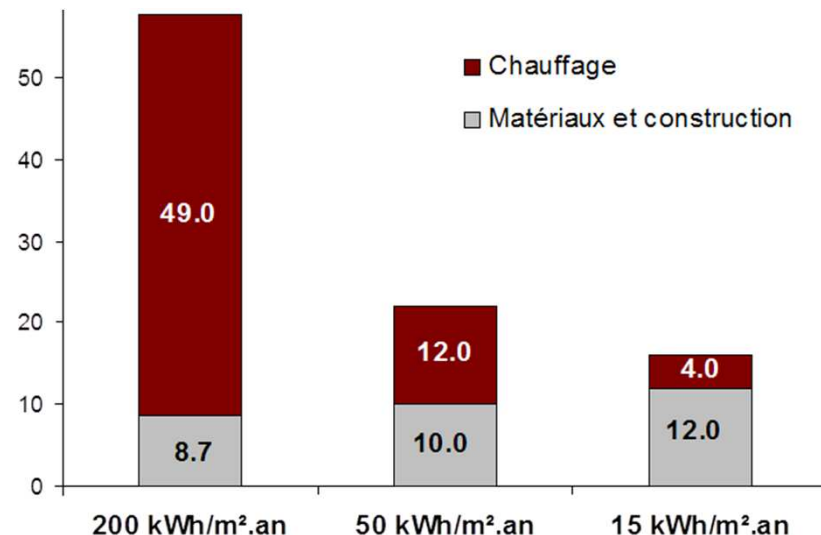
Attitudes et conception

Prévention: développement de matériaux et techniques alternatives pour le bâtiment

Amélioration des performances énergétiques des bâtiments

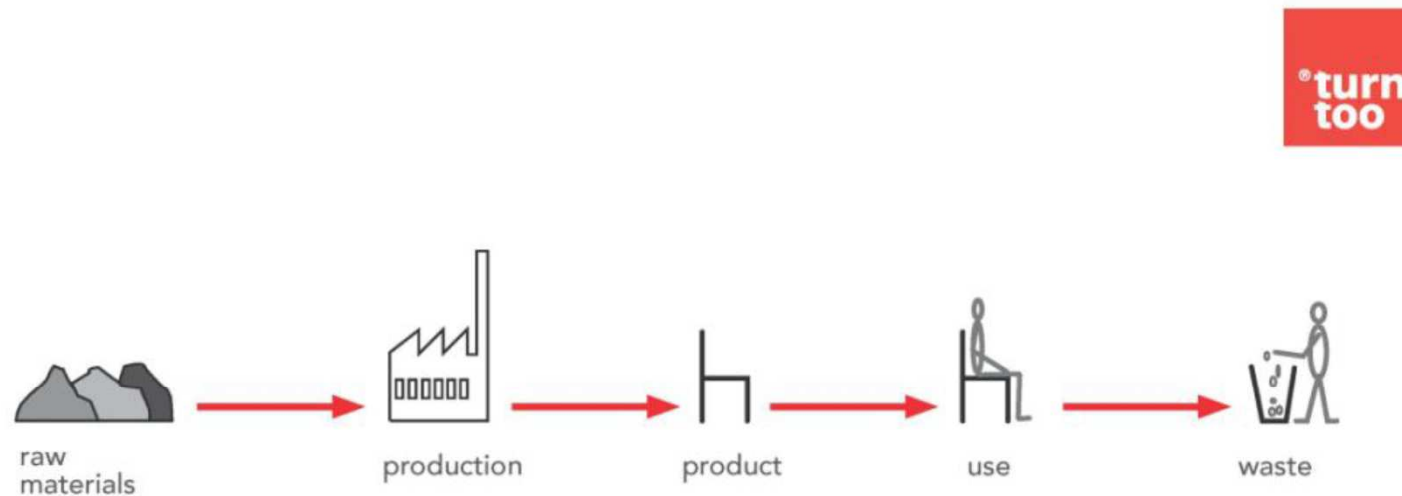
Augmentation du poids relatif des matériaux de construction / impacts environnementaux

Nécessité de développer de nouveaux matériaux



Il faut maîtriser l'approche « Matériaux »

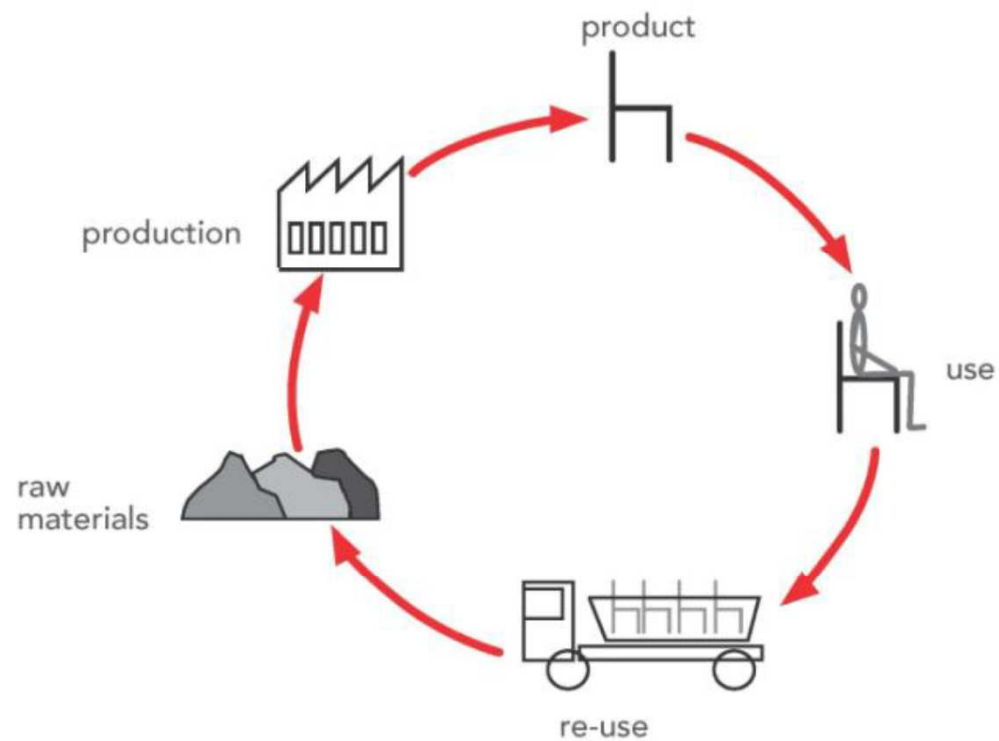
Eco-bénéficine



OLD LINEAR ECONOMY - is about ownership

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

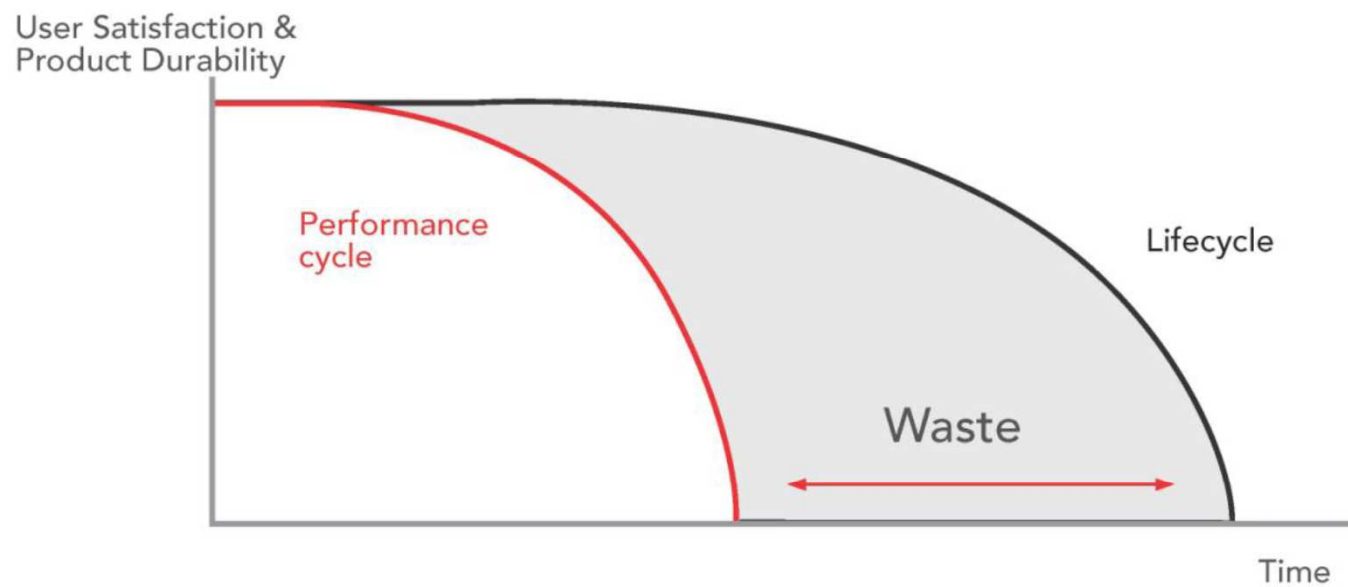
Eco-bénéficine



C2C - TECHNICAL NUTRIENT CYCLE

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

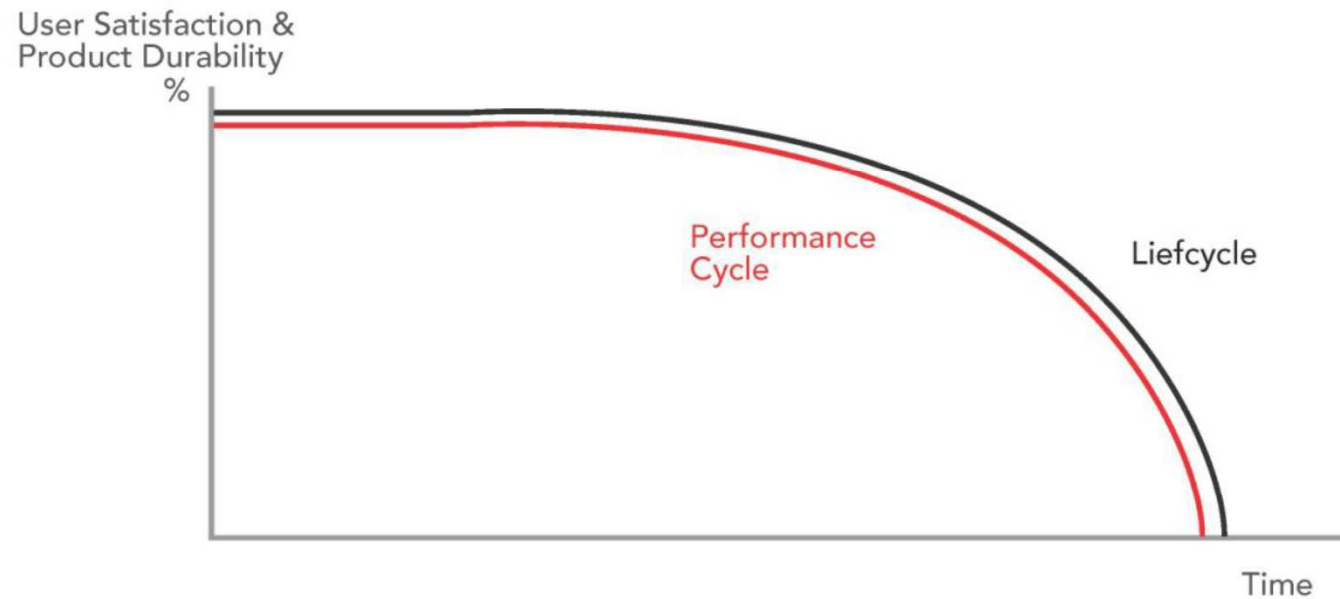
Eco-bénéfice



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 ...

Matériaux bio-sourcés

Avantages et limites

Matériaux bio-sourcés

Prévention: matériaux bio-sourcés

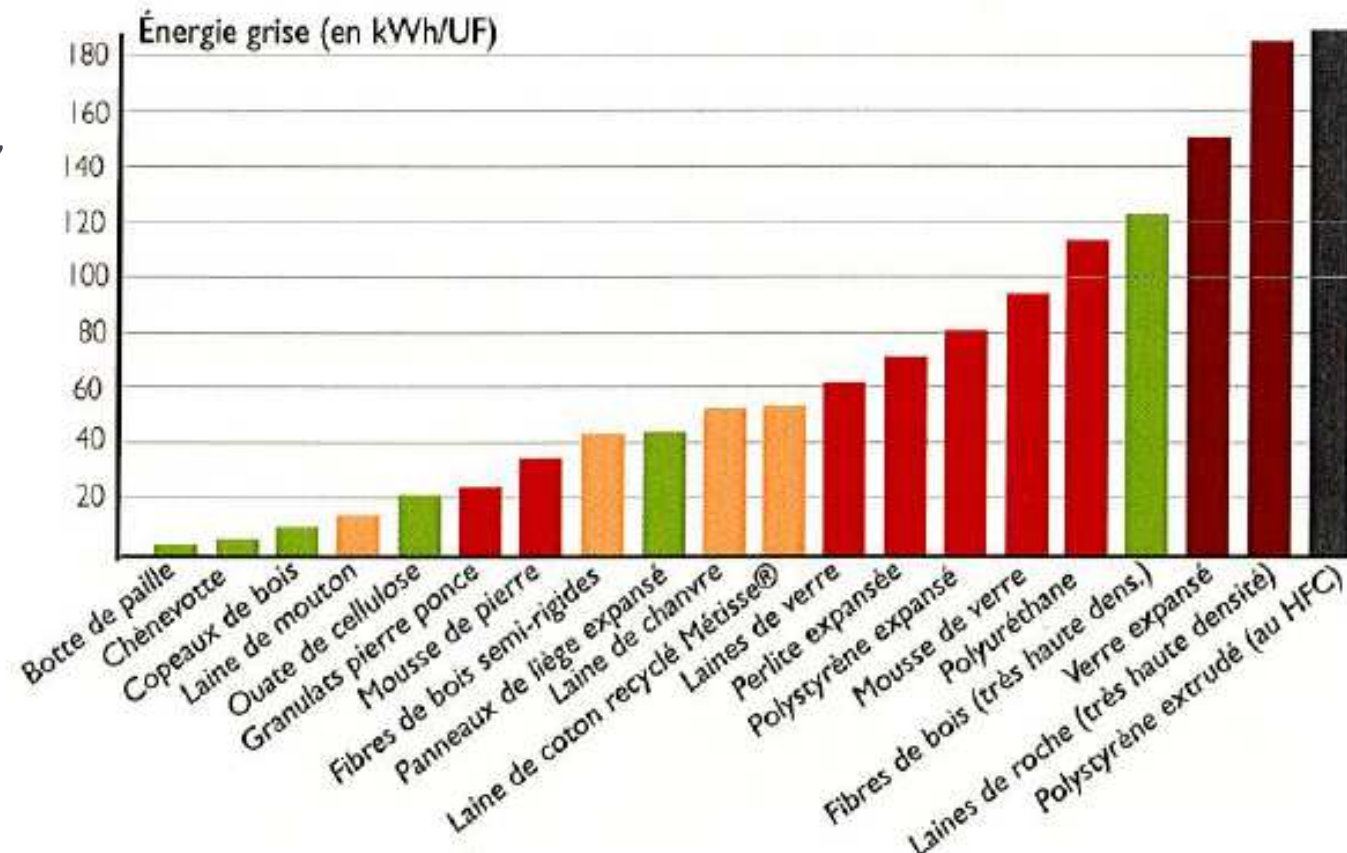
matériaux issus de la biomasse d'origine végétale ou animale. Ils couvrent aujourd'hui une large gamme de produits et trouvent de multiples applications dans le domaine du bâtiment et de la construction, en tant que :

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.).

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)

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

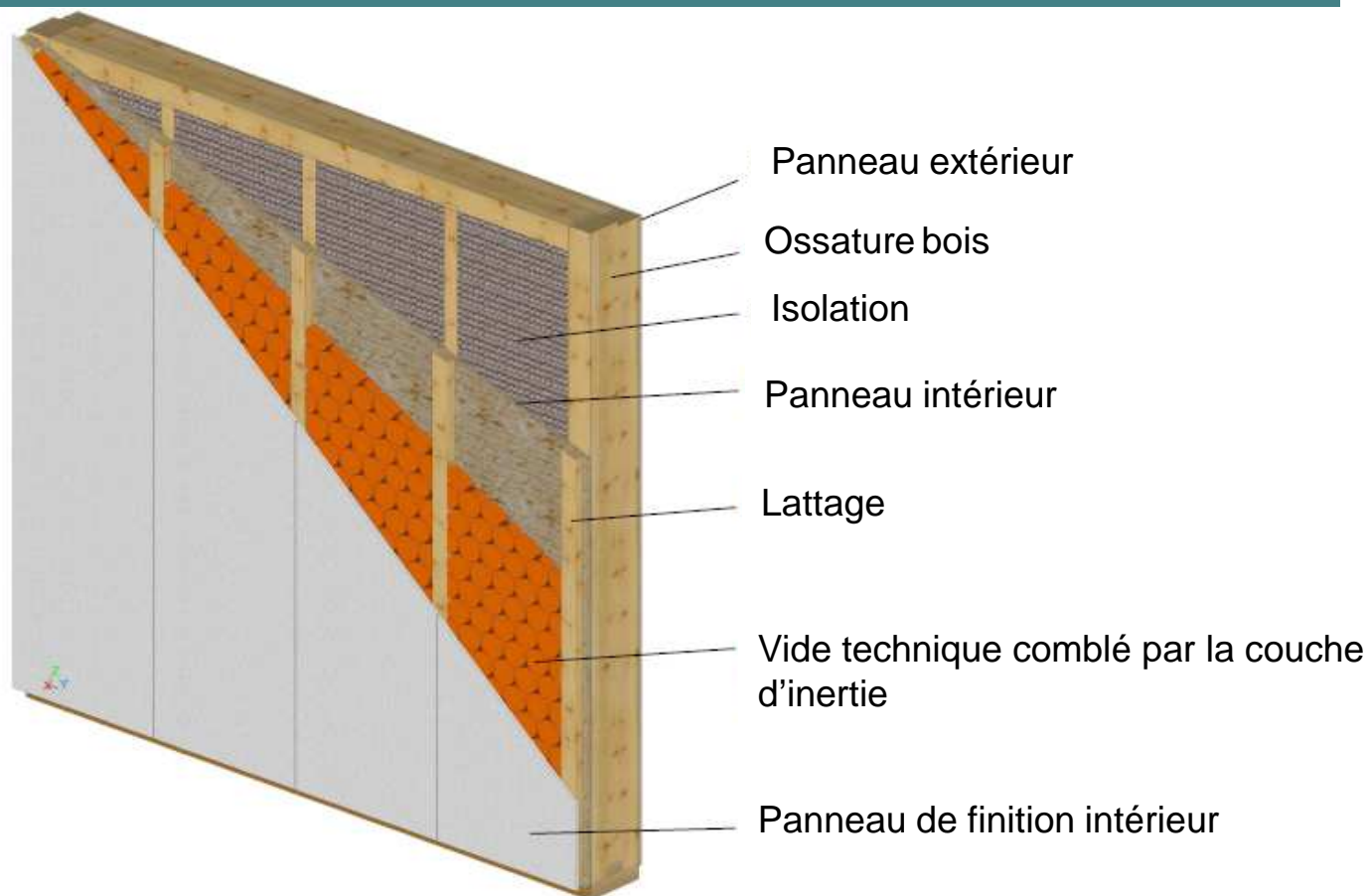
Matériaux bio-sourcés

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)



Solution mise en œuvre

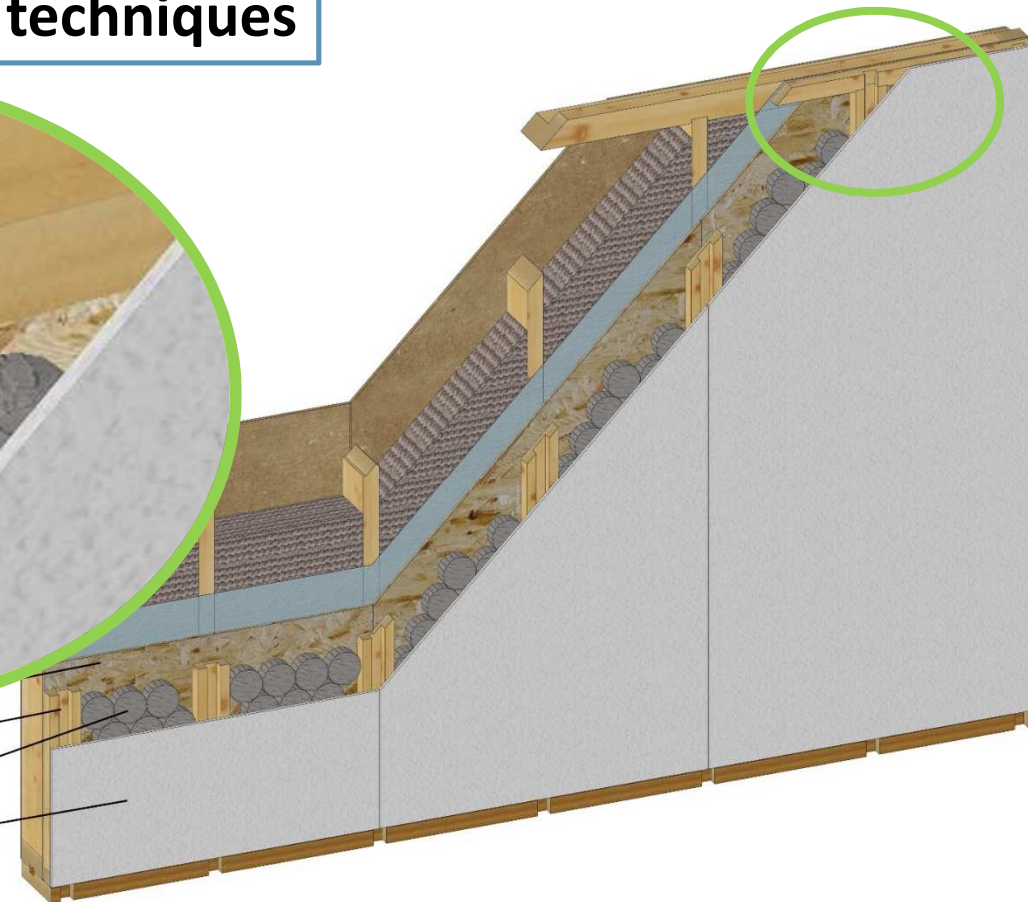


Solution mise en œuvre

Passage des éléments techniques



Montant profilé
Galets d'argile
Panneau de plâtre



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



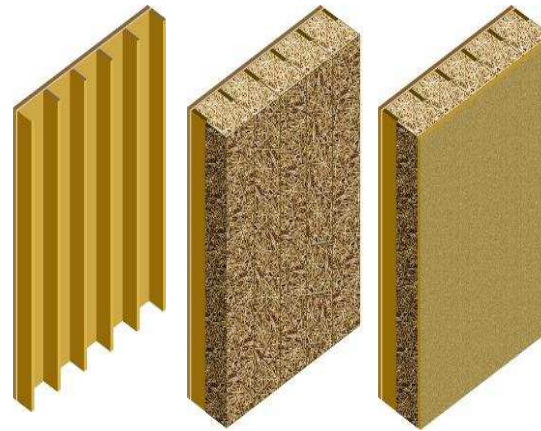
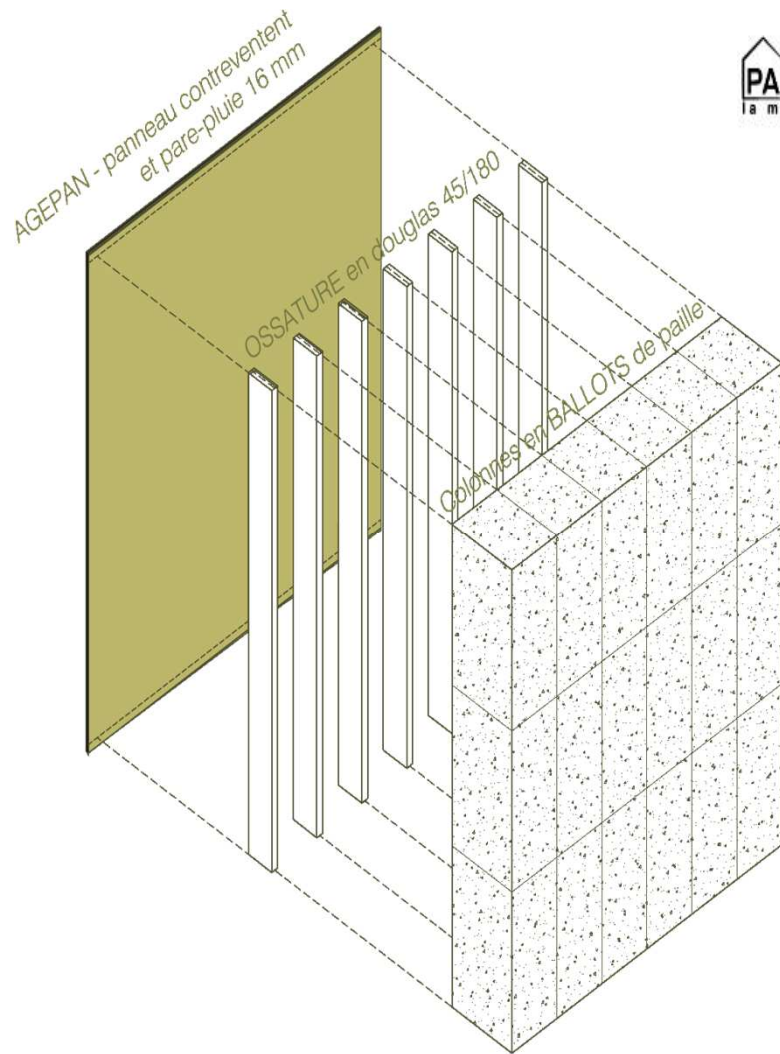
Ballots de paille

aPROpaille - Recognition of straw-bales use in buildings

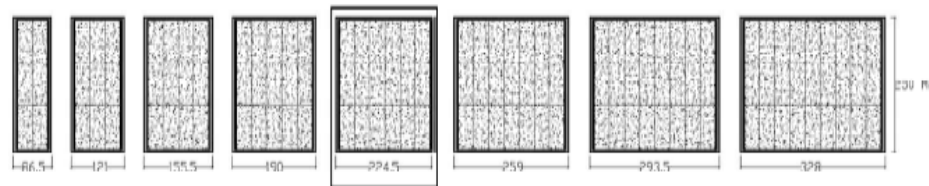
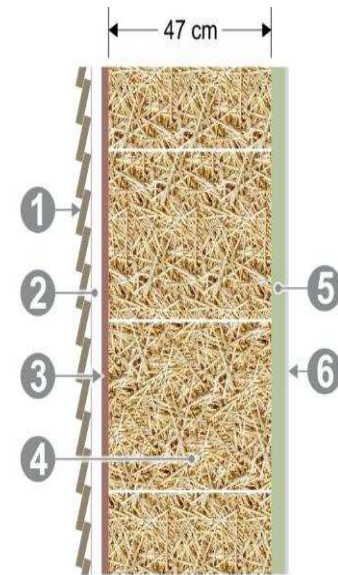
Research partners

- Dr Ir Arch Arnaud Evrard et Prof André De Herde
Architecture et Climat / LOCI / SST / UCL, Louvain-la-Neuve
 - Ir Gauthier Keutgen et Arch Benjamin Biot
Institut de conseil et d'étude en développement durable – ICEDD, Namur
 - Prof Frédéric Lebeau et Ir Arnaud Louis
Biose / ULg, Gembloux
 - Prof Luc Courard et Ir Arnaud Louis
GeMMe / ULg, Liège
 - Arch Antoine Bonnert
Paille-Tech, Franière
-
- Laurence Polain
DGO4 / SPW, Jambes
 - Olivier Dierckx
DGO6 / SPW, Jambes

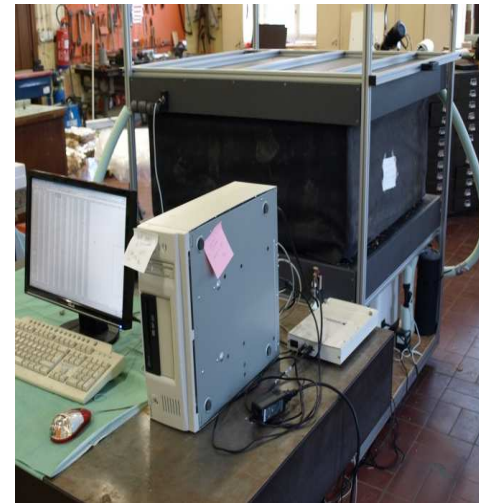
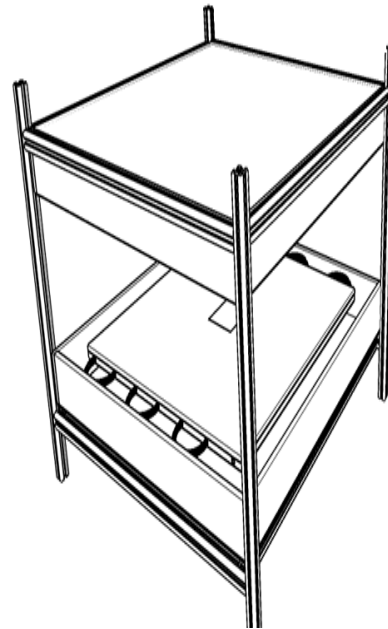
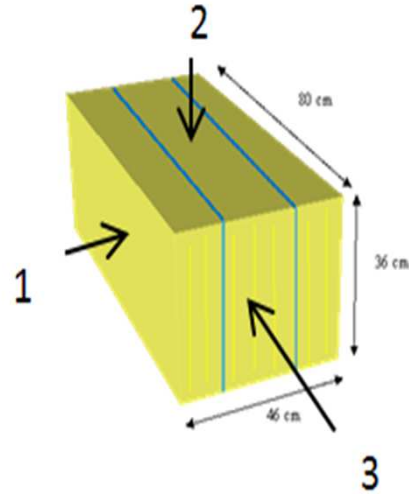
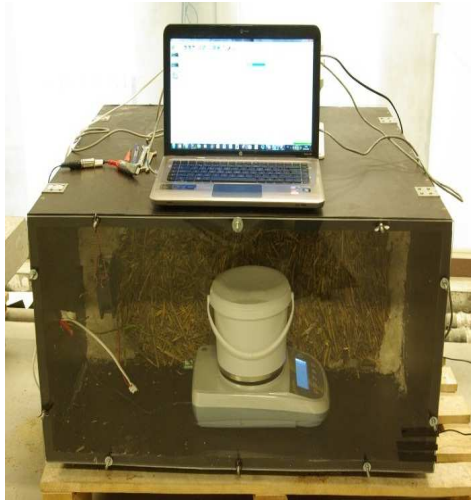




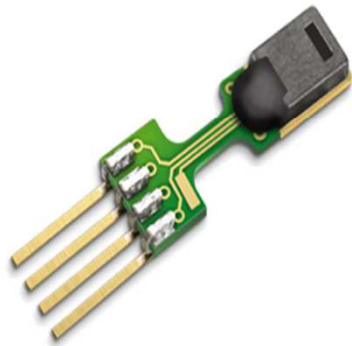
- ① Wood cladding
- ② Air layer
- ③ Bracing panel
- ④ Straw bale
- ⑤ Earth plaster
- ⑥ Lime plaster



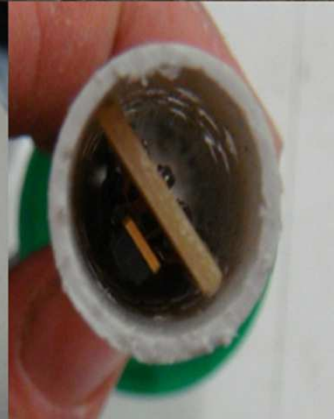
Analyse d'une solution préfabriquée



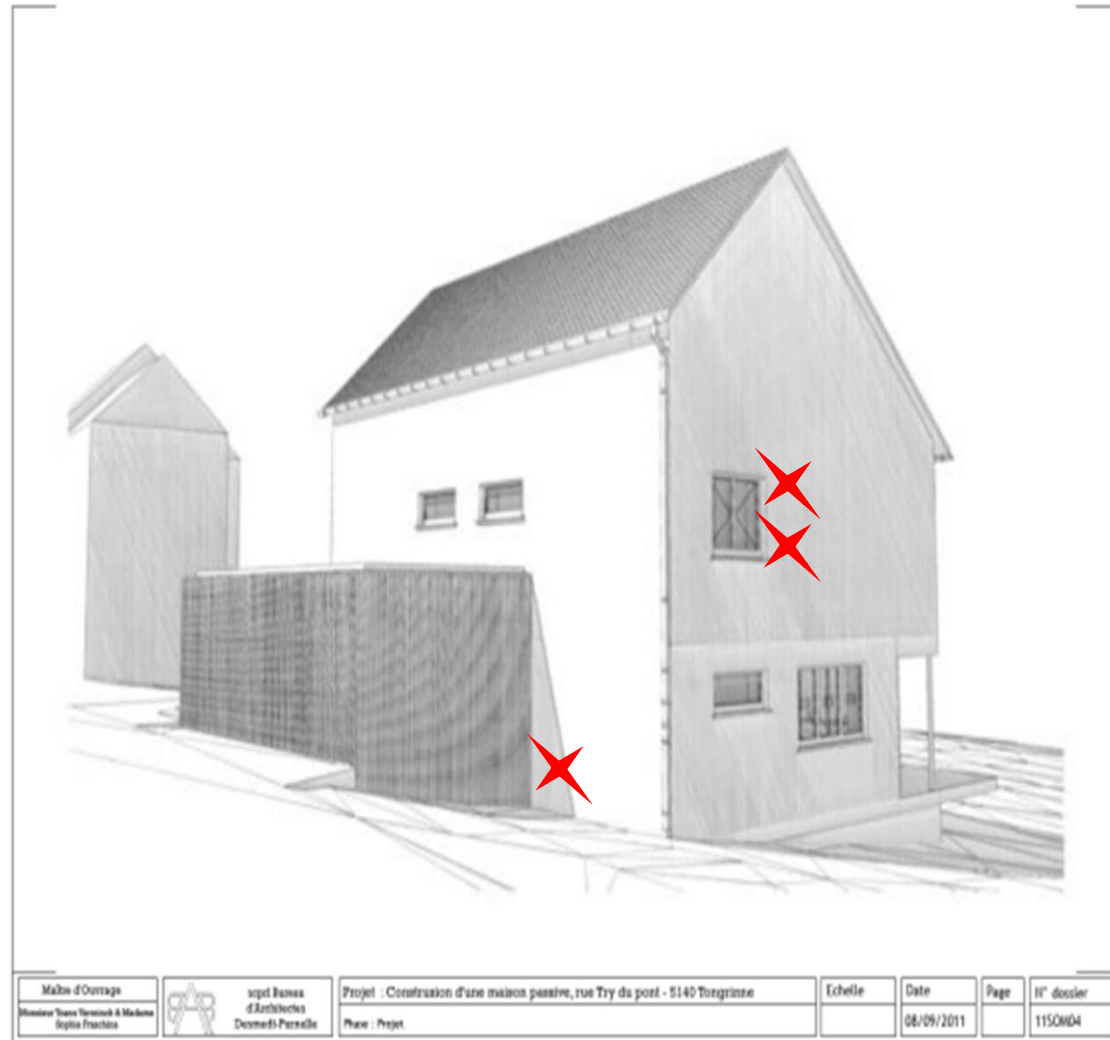
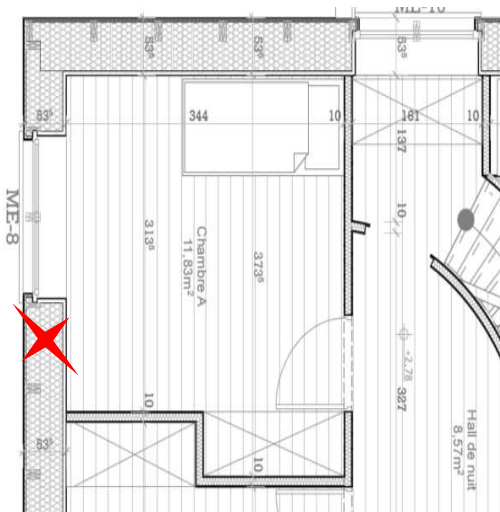
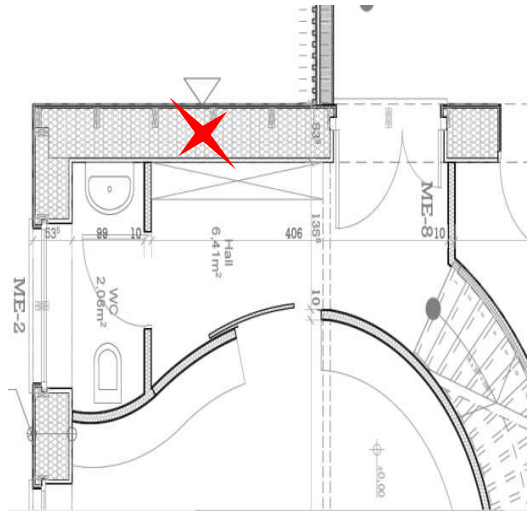
Mesure de l'ensemble des paramètres hygrothermiques



SENSIRION
THE SENSOR COMPANY
SHT75 - Digital Humidity Sensor (RH&T)



Développement de chaines de capteurs et système d'acquisition



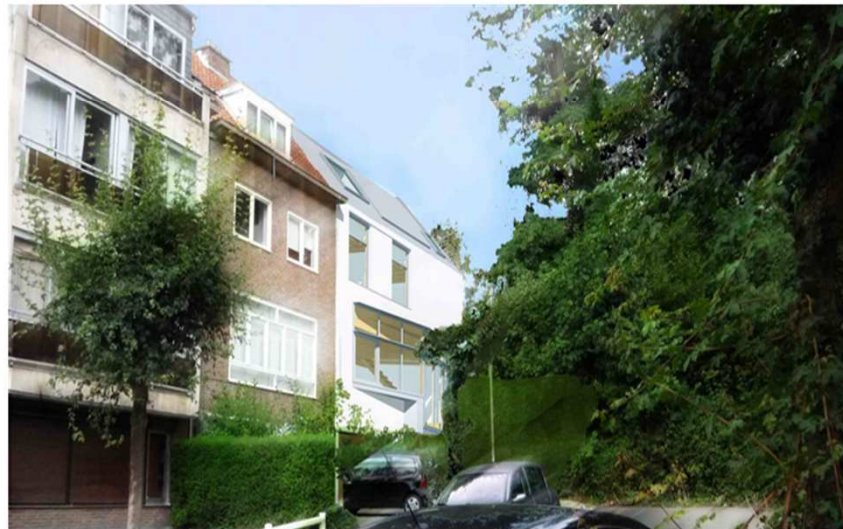
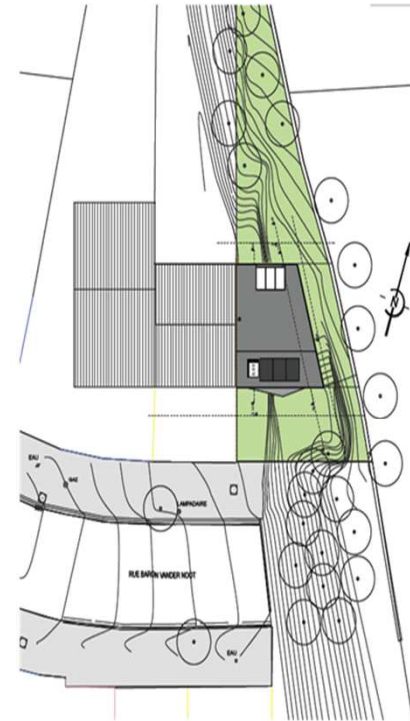
Monitoring de 3 bâtiments: Maison à Tongrinne

PAILLE

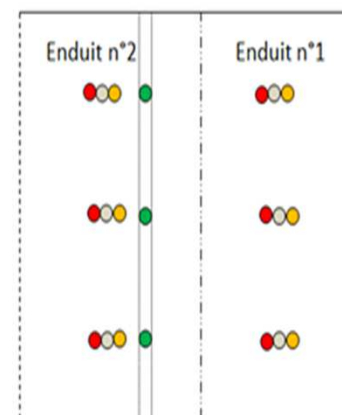
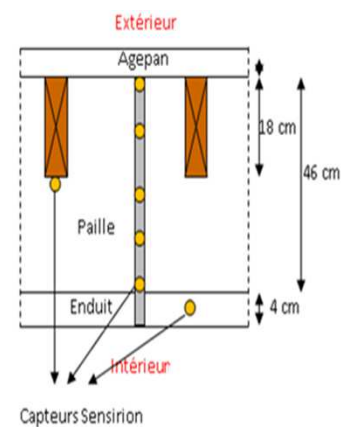
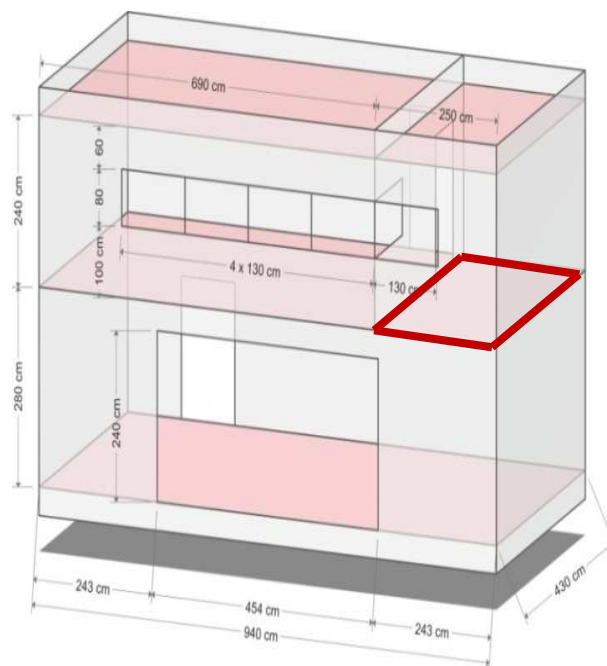
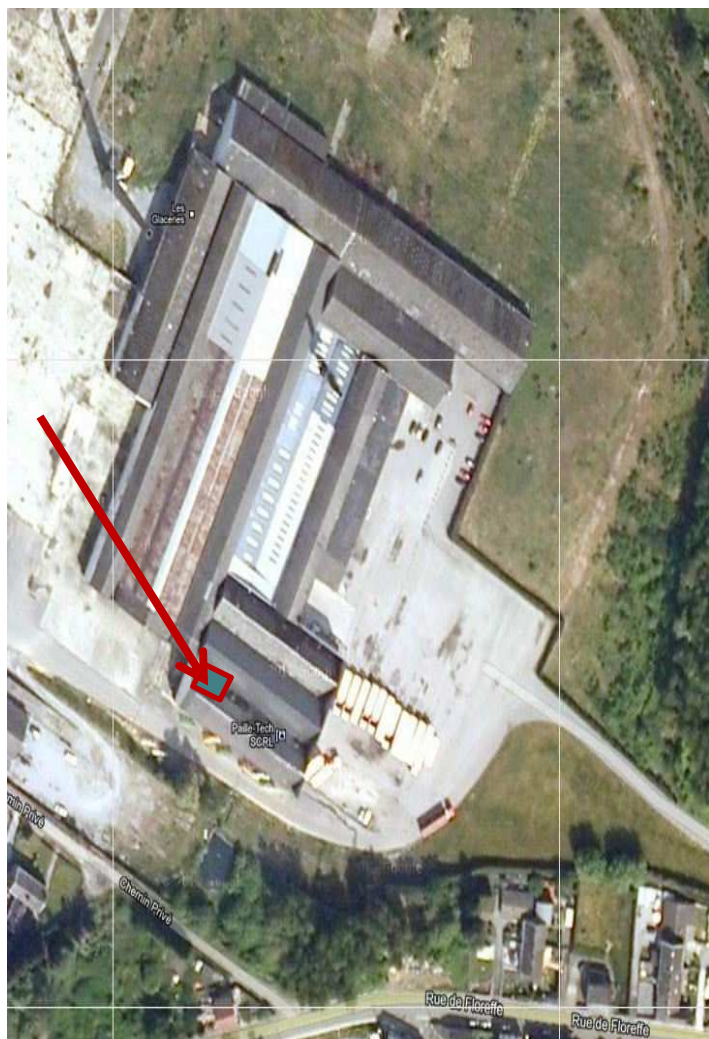
BETON DE CHANVRE



PAILLE-TECH



Monitoring de 3 bâtiments: Maison à Uccle

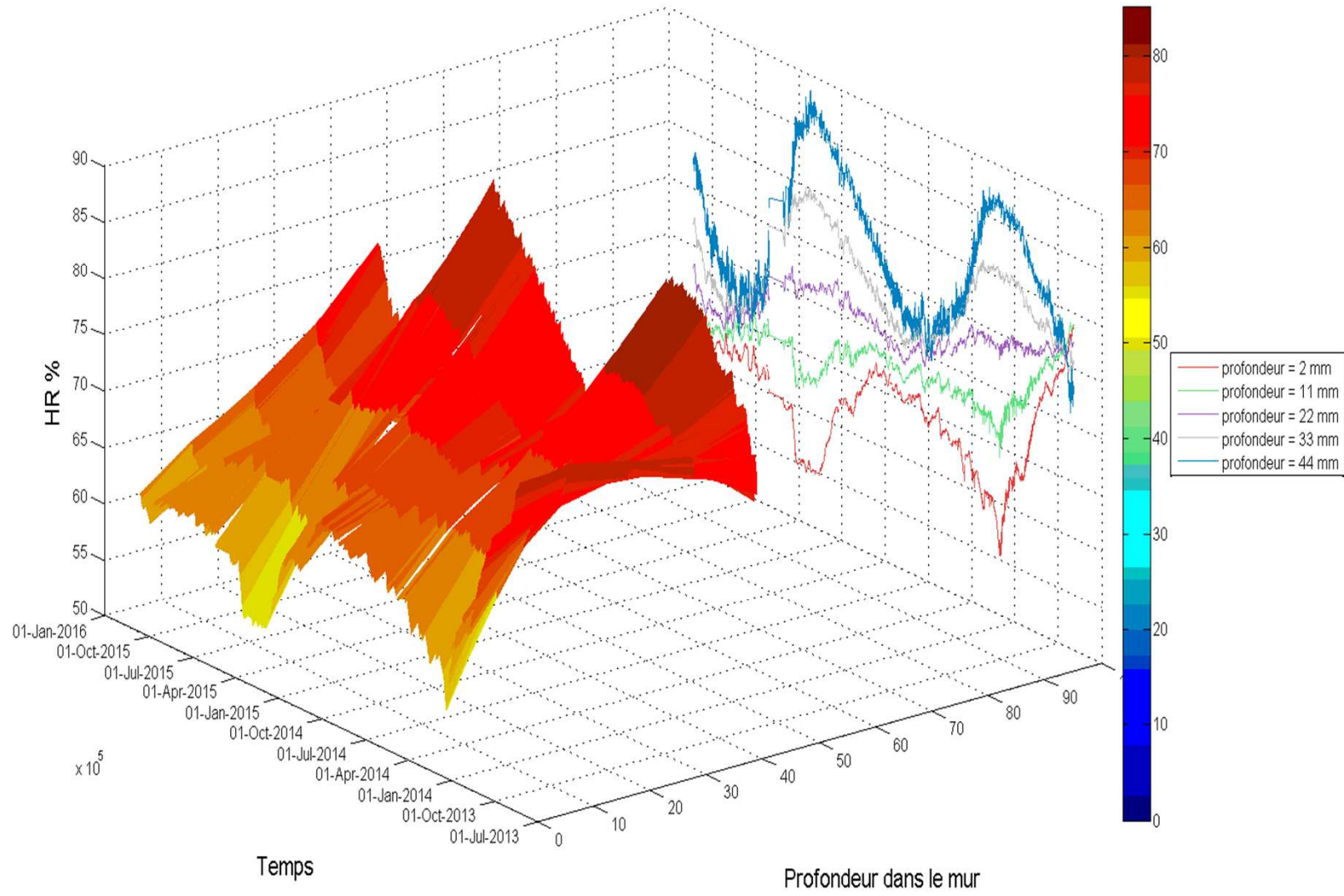


- Tubes PVC (5 capteurs)
- Capteurs dans l'enduit
- Capteurs sur l'enduit
- Capteurs sur l'ossature



Monitoring de 3 bâtiments: Bureaux à Franière

PailleTech : Humidité Relative Enduit 2 - Haut



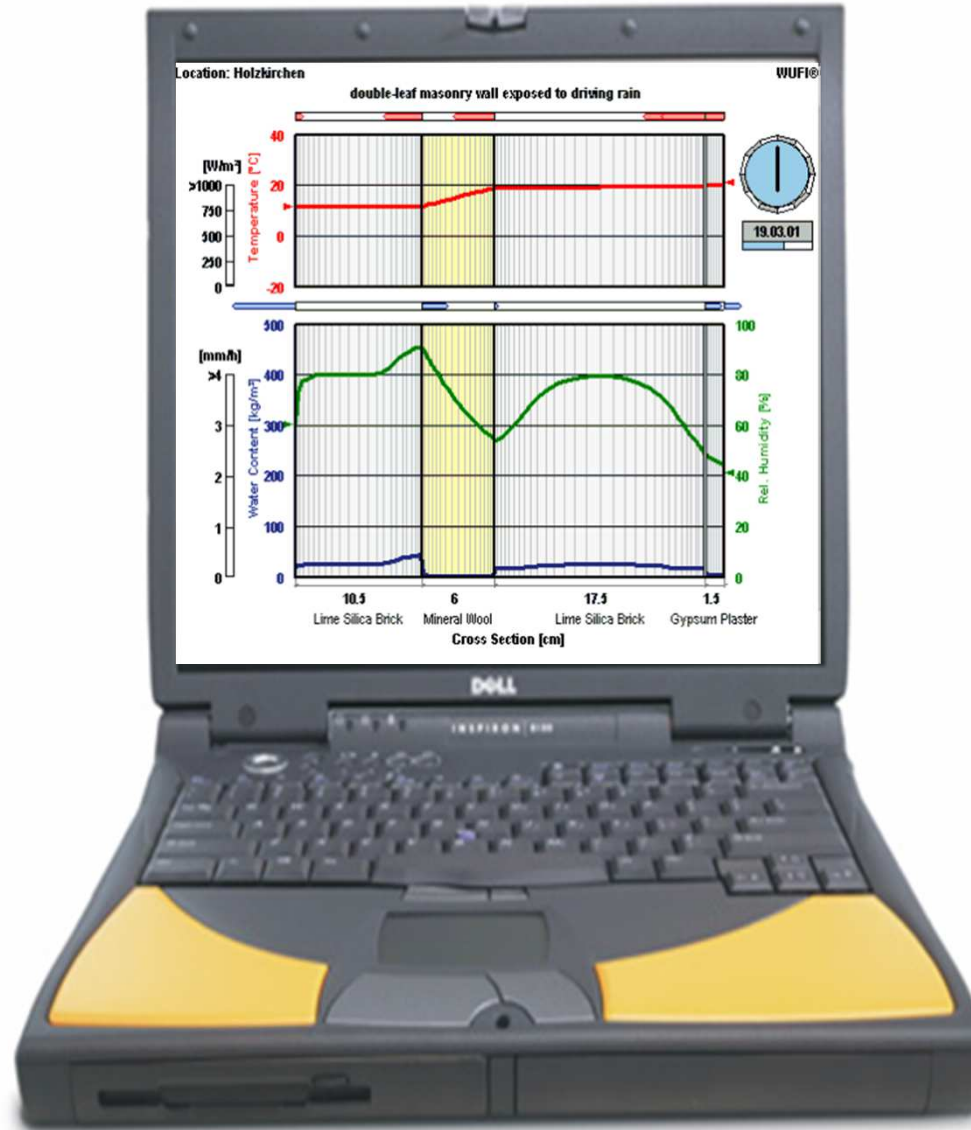
Analyse des résultats des monitorings

Heat Balance

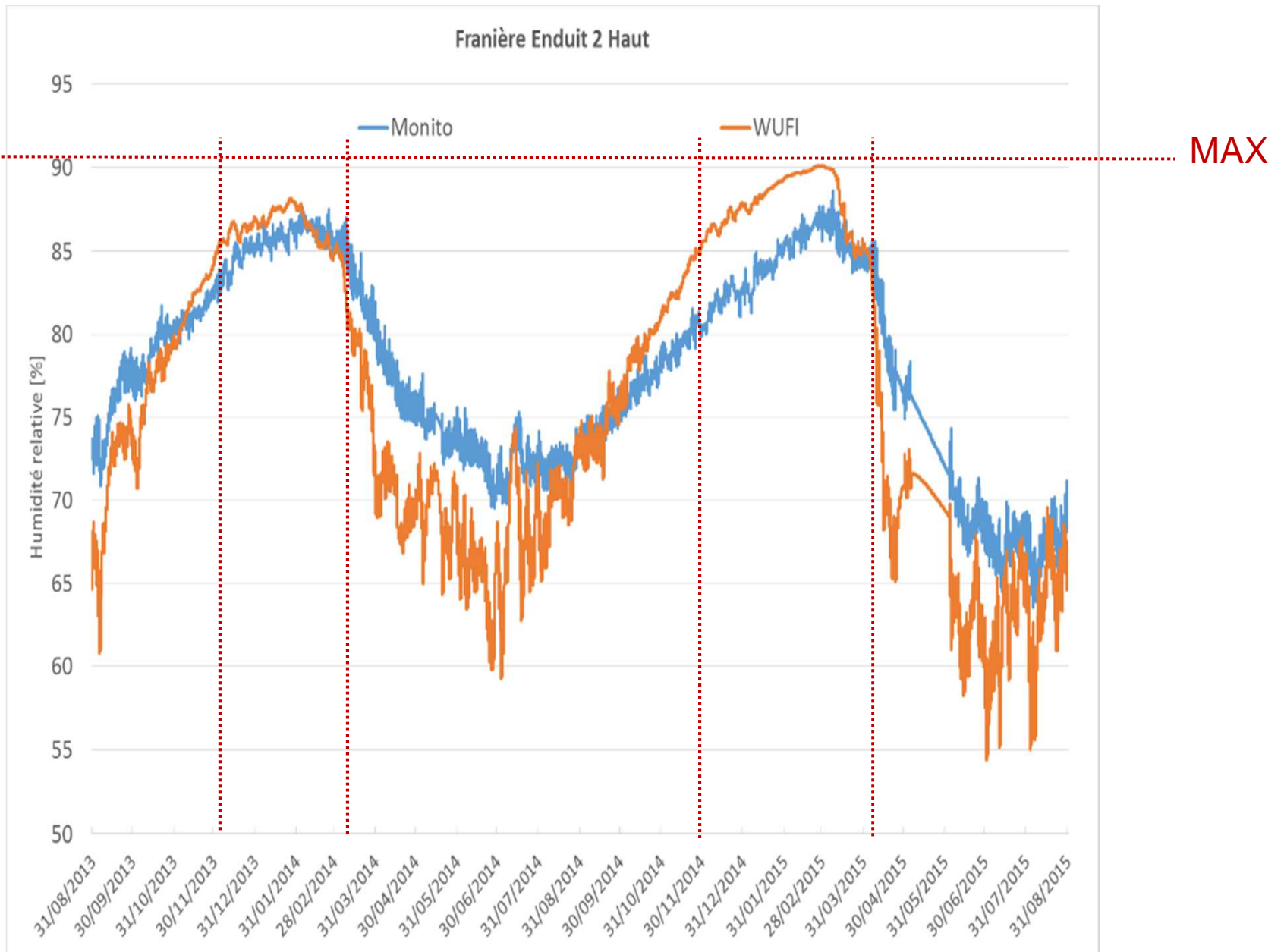
$$\frac{\partial H}{\partial t} \cdot \frac{\partial T}{\partial x} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + h_v \nabla \cdot (\delta_p \nabla (\phi p_{sat}))$$

Moisture Balance

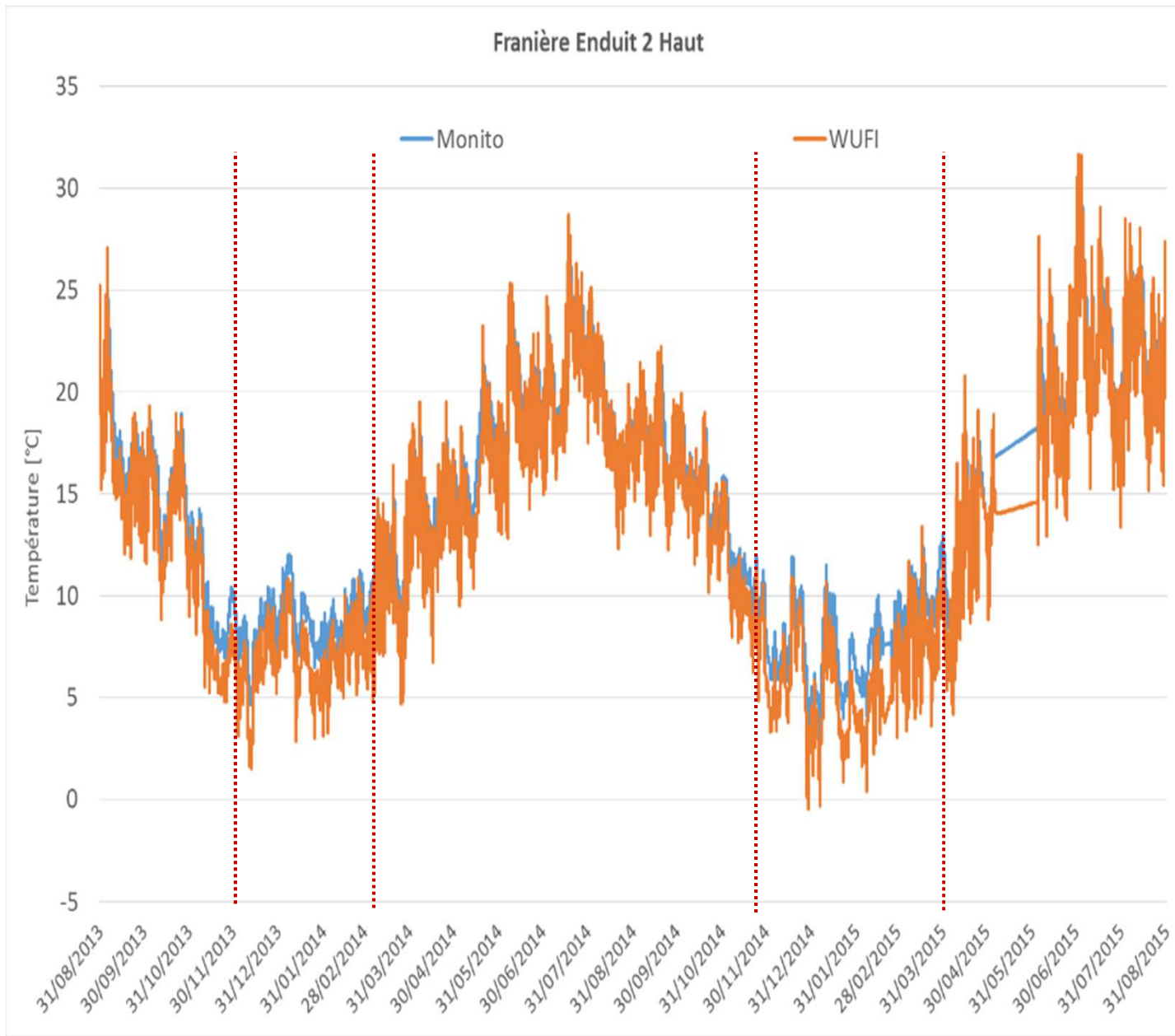
$$\frac{\partial v}{\partial \phi} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial t} = \nabla \cdot (D_\phi \nabla \phi + \delta_p \nabla (\phi p_{sat}))$$



Simulations numériques avec WUFI



Simulations numériques: Performance d'un mur à Franière (WUFI Pro)



Simulations numériques: Performance d'un mur à Franière (WUFI Pro)

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

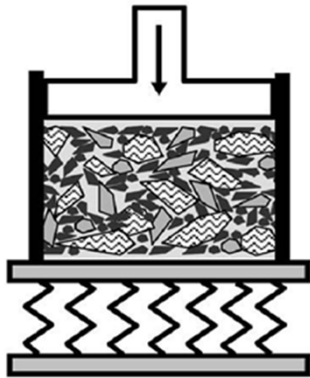
Cultivar	Energie requise [GJ/ha]	Energie produite [GJ/ha]	Ratio [-]
Miscanthus	9223	300000	+32.53
Saule	6003	180000	+29.99
Chanvre	13298	112500	+8.46
Blé	21465	189338	+8.82
Colza	19390	72000	+3.76

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

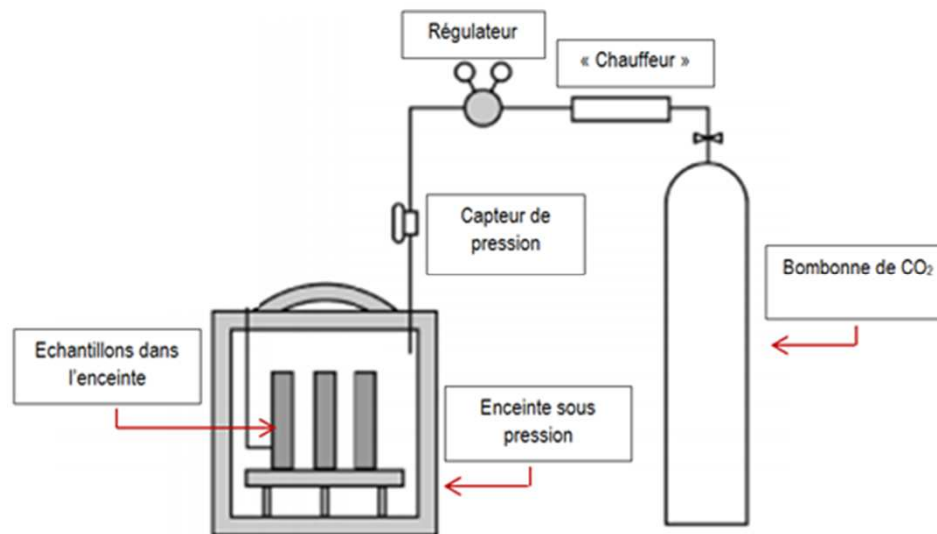
Blocs à base de miscanthus



Matériaux bio-sourcés

Captation du CO₂

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



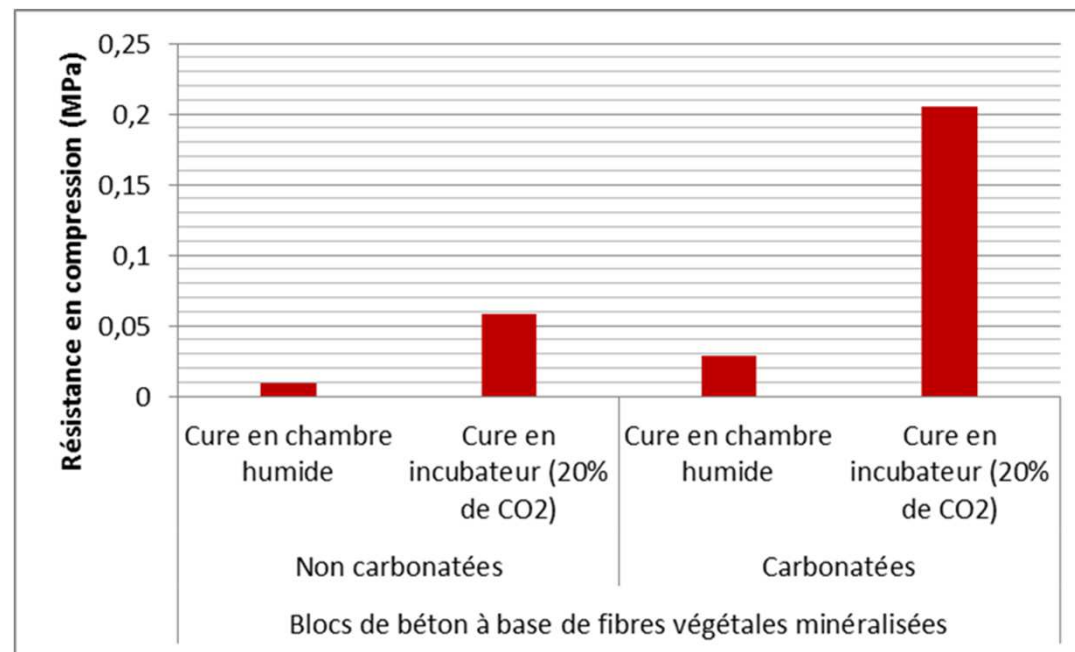
Matériaux bio-sourcés

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

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



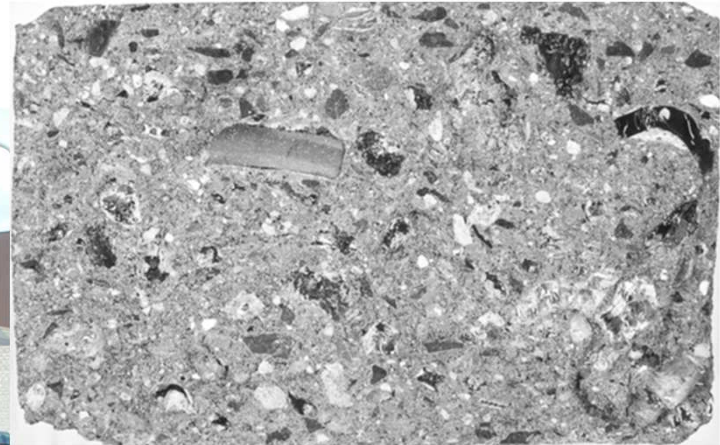
Séparation
magnétique



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

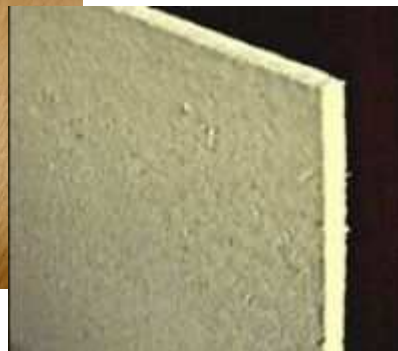
Mobilier dans la maison en papier d'Elis Stenman (Pigeon Cove, Massachusets
Source: Elfers, J. & Schuyt, M., « Les bâtisseurs de rêves »



Recyclage des déchets urbains

Papiers et cartons

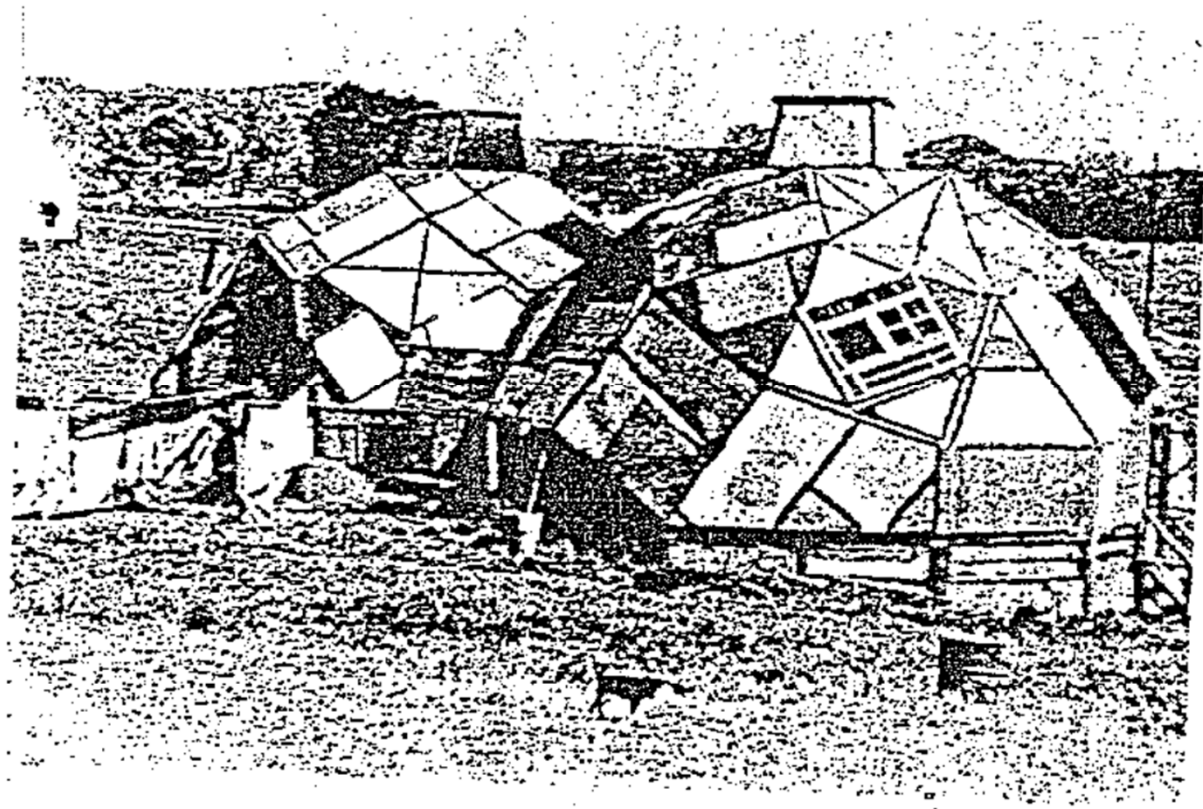
Le panneau acoustique PAN TERRE NATURE de Acoustix est composé de **ouate de cellulose** et de *fibres de lin* compressées ce qui donne un panneau rigide avec des caractéristiques mécaniques et acoustiques exceptionnelles. Ces matériaux sont issus du recyclage et sont 100% recyclables.



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

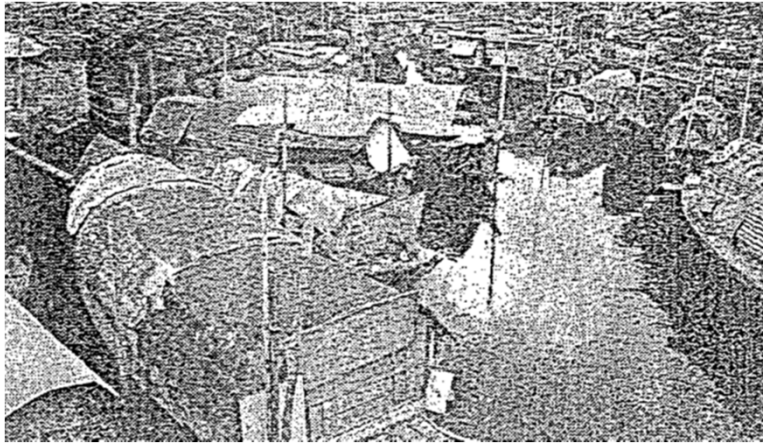
**Baldaccini, César - "Compression" -
Compression 1960 - Métal compressé,
pots d'échappement d'automobiles**



**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.

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