

**Université Pierre et Marie Curie
Master, spécialité Energétique et Environnement**

Energétique et Eco-conception des bâtiments

**Bruno PEUPORTIER
Mines ParisTech – CEP**



éco-conception des bâtiments

- ▶ **Prendre en compte les aspects environnementaux dans la conception**
- ▶ **Préservation des ressources (énergie, eau, matériaux, sol),**
- ▶ **protection des écosystèmes, au niveau planétaire (climat, ozone), régional (forêts, rivières...), local (déchets ultimes, qualité de l'air...)**
- ▶ **Liens environnement-santé**



La contribution du secteur du bâtiment

- ▶ **45%** de la consommation d'**énergie** en France
- ▶ consommation d'**eau** : 165 litres/personne/jour, **25% du total net**
- ▶ utilisation de **ressources naturelles** (granulats, bois tropicaux...) : jusqu'à plus d'une tonne par m² construit
- ▶ Occupation des **sols (5% artificialisé)**, atteintes aux paysages...
- ▶ production de **déchets** :
 - ▶ - construction et démolition : 48 millions de tonnes / an
 - ▶ - ménagers : 28 millions de tonnes / an (1,2 kg/ha/jour)
- ▶ **40% des déchets radioactifs**
- ▶ Pollution de l'**eau** (eaux usées, éco-toxicité, nappes phréatiques : fondations)



2

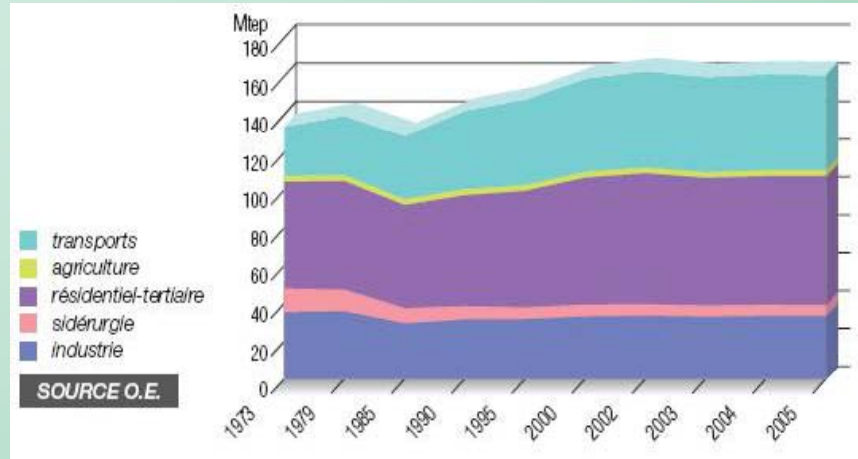
La contribution du secteur du bâtiment

- ▶ **Émissions dans l'air (22% effet de serre, COVs...)** :
 - produits de combustion : CO₂, CO, NO_x, SO₂,... (chauffage)
 - HCFC (climatisation, mousses isolantes)
 - formaldéhyde et autres COVs (bâti : colles, revêtements, préservation du bois, contreplaqués, et occupants : fumée de tabac, produits d'entretien, bricolage...),
- ▶ **Moisissures, bactéries, acariens (humidité)**
- ▶ **Bruit (équipements extérieurs de climatisation...)**
- ▶ **Perturbation des micro-climats : vent, température (îlot de chaleur)**



3

Consommation d'énergie finale en France

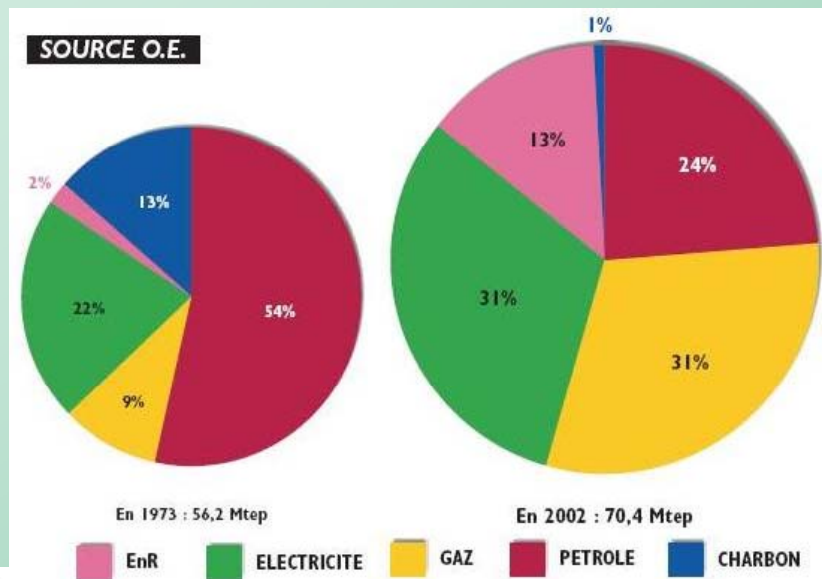


**Bâtiment (résidentiel + tertiaire) = 70 Mtep
= 45% de la consommation totale en France
(1 tep = 11 700 kWh)**



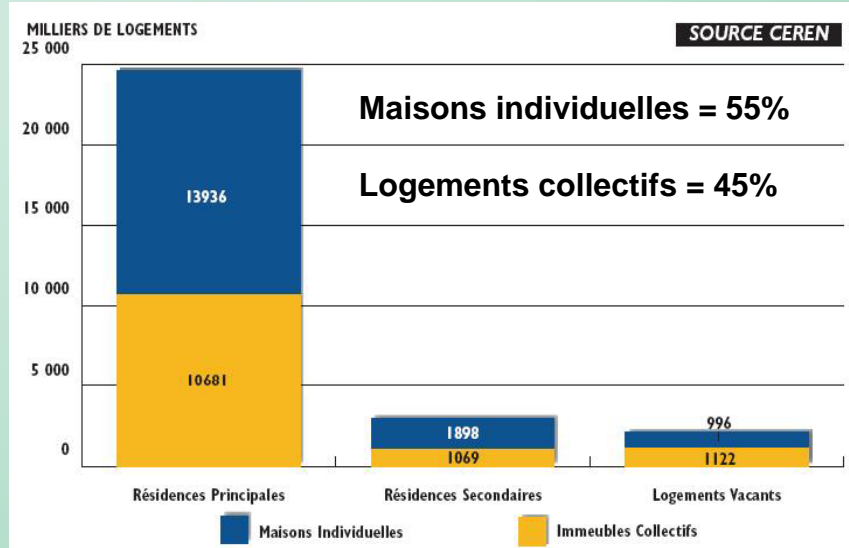
4

Consommation énergétique du secteur du bâtiment



5

Quelques données sur le parc en France

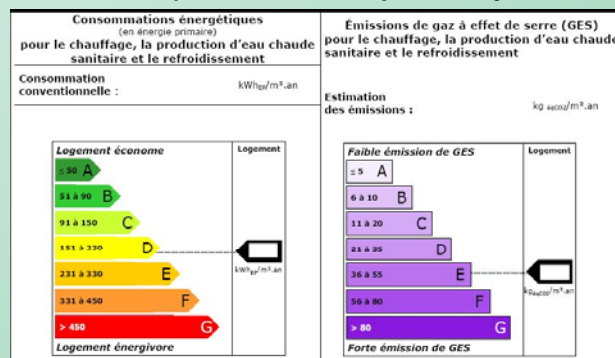


30 millions de logements en France

6

Aspects réglementaires

- ▶ RT 2005 (-15%), 2012 (-15% ou BBC) -> -40% ou EnPos en 2020
- ▶ Diagnostic de Performance Energétique (DPE) à la vente (novembre 2006), à la location à partir de juillet 2007



- ▶ Certificats d'économie d'énergie, quotas d'émissions de CO₂



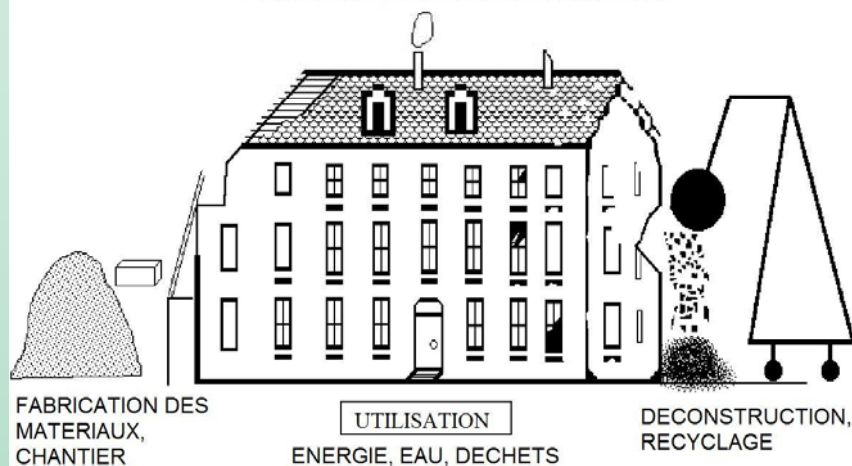
7

Différents outils d'ingénierie

- ▶ Simulation thermique -> chauffage et rafraîchissement
- ▶ Calculs d'éclairage
- ▶ Thermo-aéraulique (mouvements d'air)
- ▶ Acoustique
- ▶ Mécanique des structures
- ▶ Calculs de coûts
- ▶ Analyse de cycle de vie (impacts environnementaux)

Analyse de cycle de vie

CYCLE DE VIE D'UN BÂTIMENT



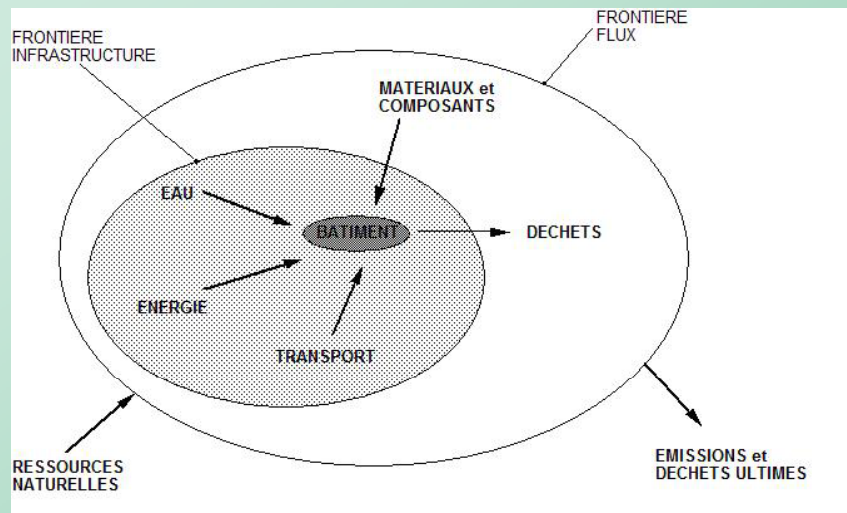
Définition des objectifs

- ▶ Aide au choix d'un site
- ▶ Aide à la programmation (niveaux de performance)
- ▶ Aide à la conception, comparaison de variantes architecturales et/ou techniques
- ▶ Aide à la réalisation (comparaison de produits)
- ▶ Aide à la gestion (études sur les usages)
- ▶ Aide à la réhabilitation (étude de solutions)
- ▶ Fin de vie (intérêt de la déconstruction – recyclage)

Unité fonctionnelle

- ▶ Quantité : ex. 1 m² de bâtiment
- ▶ fonction : ex. logement
- ▶ qualité de la fonction : ex. confortable, 20°C à 26°C, clair, calme, ventilé,...
- ▶ temps : ex. 1 an

Les frontières dépendent de l'objectif de l'étude



**Simplification : négliger les composants
< 3 ou 5% en masse du produit total**

Hypothèses

- ▶ **Energie** : mix de production d'électricité, différences selon les usages (chauffage, ecs, éclairage, froid, autres usages), mix spécifique (différents fournisseurs/tarifs) ou moyen, national ou européen, variation dans le temps, valeurs moyennes ou marginales
- ▶ **Transport** : retour à vide des camions ou gestion optimisée, prise en compte des infrastructures
- ▶ **Recyclage** : début et fin de vie, stocks ou impacts évités, boucle ouverte ou fermée

Phase d'inventaire

- ▶ Substances émises et puisées dans l'environnement
- ▶ Matières premières, combustibles...
- ▶ Émissions dans l'air
- ▶ Émissions dans l'eau
- ▶ Émissions dans le sol, déchets

Inventaire du kWh gaz

Intrants	Phases	Sortants
eau, élec., diésel, acier, béton	Exploration et extraction forage : 32 à 62 10-7 m tubes/m3 compression, transport	CO ₂ , mercure, CO, NO _x , SO ₂ , CH ₄ , COVNM, radon
aluminium, acier, béton, transport, diésel	Préparation séchage, séparation du fioul et CxHy, désulfuration	NO _x , COV, CO, particules, fuites
acier, sable, transport	Transport longue distance (70 bar) distances de transport (NL, CEI,...) turbines de compression, fuites	CO ₂ , NO _x , CO, CH ₄ , COVNM, N ₂ O, SO ₂
acier, polyéthylène, bitume, sable, ciment, béton, transport, excavation	Distribution régionale (0,1 bar) canalisations enterrées (DV 40 ans)	fuites, déchets (canalisations remplacées), CO, NO _x
polyéthylène, acier	Distribution locale (< 0,1 bar) canalisations enterrées (plastiques)	fuites, remblai, déchets (canalisations remplacées)
gaz, électricité, eau, acier, aluminium, béton, laine minérale, cuivre, peinture, carton, polyéthylène, soudure, transport	Combustion type de chaudière : puissance, âge, bas NO _x , condensation fabrication, emballage, utilisation, traitement des déchets	SO ₂ , CO ₂ , NO _x , poussières, CO, CH ₄ , COVNM, dioxines, N ₂ O, mercure, formaldéhyde, déchets solides (béton, laine minérale, cuivre, peinture, carton, polyéthylène, soudure)

Exemple : base Oekoinventare, Ecole Polytechnique de Zürich

		Laine minérale	Manganèse	Minerai de Fer	Mousse dure PUR	NaCl	NaOH
Cd Cadmium m	kg	1.26E-10	5.65E-11	1.98E-11	4.14E-10	1.11E-10	8.94E-11
Cd Cadmium p	kg	1.96E-08	1.53E-08	1.15E-09	1.21E-08	3.61E-10	2.50E-09
Cd Cadmium s	kg	2.08E-08	1.05E-07	3.40E-09	8.81E-07	1.03E-08	2.32E-08
CF4 p	kg	1.70E-08	2.58E-07	1.21E-08	1.72E-07	5.31E-09	4.25E-08
CH3Br p	kg	0	0	0	0	0	0
CH4 Methan m	kg	9.74E-07	2.94E-06	6.66E-06	7.12E-06	3.51E-07	6.72E-07
CH4 Methan p	kg	0.00379	0.00929	0.000246	0.00871	0.000196	0.00153
CH4 Methan s	kg	1.41E-05	0.000116	3.25E-06	0.000176	4.88E-06	2.03E-05
CN Cyanide p	kg	3.60E-16	1.73E-15	1.41E-16	2.80E-08	2.88E-15	2.39E-15
CN Cyanide s	kg	1.56E-08	1.09E-08	9.56E-10	8.79E-09	2.24E-10	1.74E-09
Co Cobalt m	kg	6.74E-10	4.63E-09	7.27E-09	4.89E-09	1.01E-10	7.58E-10
Co Cobalt p	kg	1.56E-09	1.83E-09	3.06E-10	1.60E-09	6.12E-11	2.73E-10
Co Cobalt s	kg	4.03E-08	6.38E-07	6.63E-09	1.17E-06	1.24E-08	1.05E-07
CO Kohlenmonoxid m	kg	3.03E-05	7.73E-05	0.000139	0.000146	1.86E-05	2.50E-05
CO Kohlenmonoxid p	kg	0.0747	0.000314	7.71E-05	0.00774	7.58E-06	3.54E-05
CO Kohlenmonoxid s	kg	0.000453	0.00141	0.000126	0.00142	5.30E-05	0.000193
CO2 Kohlendioxid m	kg	0.0135	0.0412	0.0647	0.0699	0.0073	0.0114
CO2 Kohlendioxid p	kg	0.975	0.0342	0.00517	0.174	0.00161	0.00518
CO2 Kohlendioxid s	kg	0.39	5.03	0.0591	4.91	0.0854	0.809
Cr Chrom m	kg	5.32E-10	3.65E-09	5.74E-09	3.86E-09	7.99E-11	5.98E-10
Cr Chrom p	kg	3.88E-08	1.77E-08	3.18E-09	1.77E-08	7.04E-10	2.98E-09
Cr Chrom s	kg	2.76E-08	4.82E-07	4.51E-09	6.65E-07	1.14E-08	8.09E-08
Cu Kupfer m	kg	1.15E-07	3.44E-07	5.10E-07	8.11E-07	6.36E-09	5.56E-08
Cu Kupfer p	kg	1.11E-08	3.50E-08	1.64E-09	2.55E-08	8.37E-10	5.81E-09
Cu Kupfer s	kg	1.02E-07	1.03E-06	2.88E-08	1.82E-06	2.28E-08	1.71E-07
Cycloalkane p	kg	0	0	0	0	0	0
Dichlormethan p	kg	1.27E-09	4.11E-09	5.54E-11	1.16E-07	2.68E-11	3.80E-06
Dichlormonofluormethan p	kg	4.44E-08	3.17E-08	6.46E-09	3.07E-07	3.65E-08	5.43E-06



16

Indicateurs, exemple : contribution au changement climatique

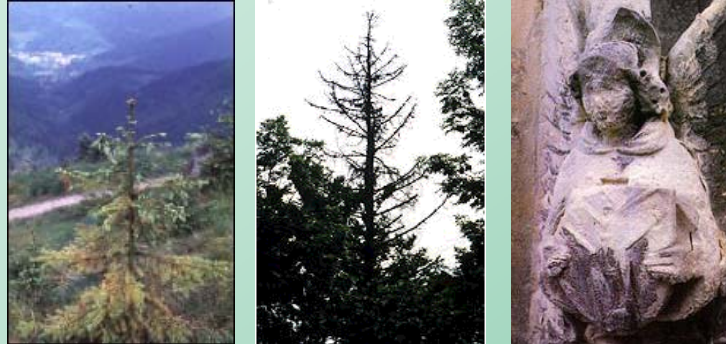


- ▶ *Potentiel de réchauffement global*
- ▶ *propriétés optiques des gaz*
- ▶ *équivalent CO₂, sur une durée, 100 ans*
- ▶ $GWP_{100} = kg\ CO_2 + 25 \times kg\ CH_4 + 300 \times kg\ N_2O + \sum GWP_i \times kg\ CFC\ ou\ HCFC_i$
- ▶ *effet (potentiel) et non impact (réel)*



17

Contribution à l'acidification



- ▶ Potentiel d'acidification (eq. SO_2)
- ▶ Effet potentiel (concentration de fond)
- ▶ Sources : chaufferies (fuel, charbon), procédés



18

Contribution à l'eutrophisation



- ▶ Potentiel d'eutrophisation (eq. PO_4^{3-})
- ▶ Phénomène naturel et dystrophisation
- ▶ Sources : eaux usées



19

Qualité de l'air et ozone



- ▶ ozone et altitude
- ▶ atteinte à la couche d'ozone (eq. CFC-11)
- ▶ Sources : climatisation
- ▶ smog d'été (formation d'ozone), eq. C_2H_4
- ▶ Sources : chaufferies, procédés



20

Méthode des volumes critiques

- ▶ Concentration maximale tolérable : C_m / 95% des individus préservés (kg/m^3)
- ▶ volume critique : $Emissions / C_m$ (m^3)
- ▶ indicateur Ecotoxicité aquatique :
 Σ volumes critiques (m^3 d'eau polluée)
- ▶ idem pour écotoxicité terrestre



21

Toxicité humaine

- ▶ Dose : kg inhalé ou ingéré / kg
- ▶ respiration 20 m³/jour, eau : 2 l/jour poids : 70 kg
- ▶ population P= 6 milliards, Va = 3 10¹⁸ m³
- ▶ dose seuil Ds / 1 cancer pour 1000 ha soumis toute leur vie à cette dose ou / pas d'effet observé pour les maladies avec seuil
- ▶ indicateur = Σ émissions air / Va x 20 x P / Ds + Σ émis. eau / Ve x 2 x P / Ds



22

Indicateurs dérivés de modèles

- ▶ European Uniform System for the Evaluation of Substances, RIVM (Institut National de Santé Publique et d'Environnement, Pays Bas), cf. <http://ecb.jrc.it/>
- ▶ Émissions, compartiments écologiques (air, eau douce, eau de mer, sédiments, sol nat. agri. et ind.), transport (vent, diffusion air/eau, absorption, sédimentation, érosion, déposition, écoulements...), (bio)dégradation (photochimie, hydrolyse...) -> concentration, transferts (eau potable, nourriture : bioaccumulation) -> dose -> effet (risques), interactions entre substances non prises en compte
- ▶ 100 000 substances commercialisées, quelques milliers (inventaires), 250 (modèle européen EUSES)
- ▶ Modèles orientés effets : DALY (Disability adjusted Life loss years), PDF x m² x an (percentage disappeared fraction of species)



23

Energie primaire

- ▶ **Pouvoir calorifique supérieur (PCS)**
- ▶ **énergie de l'uranium appauvri incluse ?**
7.58 kg d'Unat (0.7% U₂₃₅) -> 1 TJe
1 kg U₂₃₅ -> 128 TJ
8.2 kWh primaire pour 1 kWh électricité nucléaire
sinon 3.5 kWh primaire
- ▶ **hydraulique : énergie potentielle**
- ▶ **énergies renouvelables incluses ?**



24

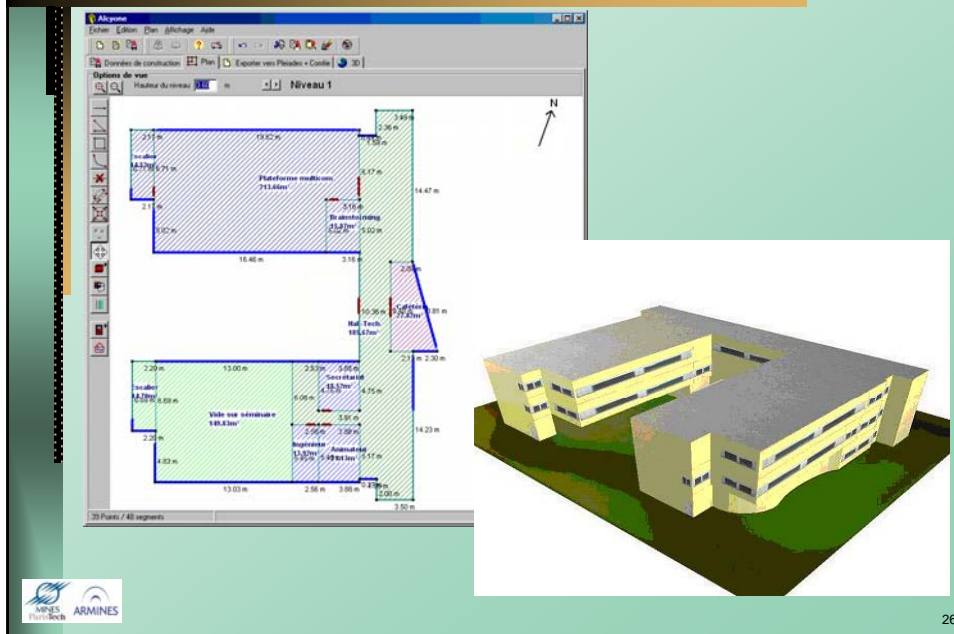
Autres indicateurs

- ▶ **Epuisement des ressources :**
 $\Sigma M_i / \text{réserves récupérables } i$, éventuellement prise en compte de la vitesse d'épuisement
- ▶ **consommation d'eau : m³**
- ▶ **déchets produits : tonnes, différents types**
- ▶ **déchets radioactifs**



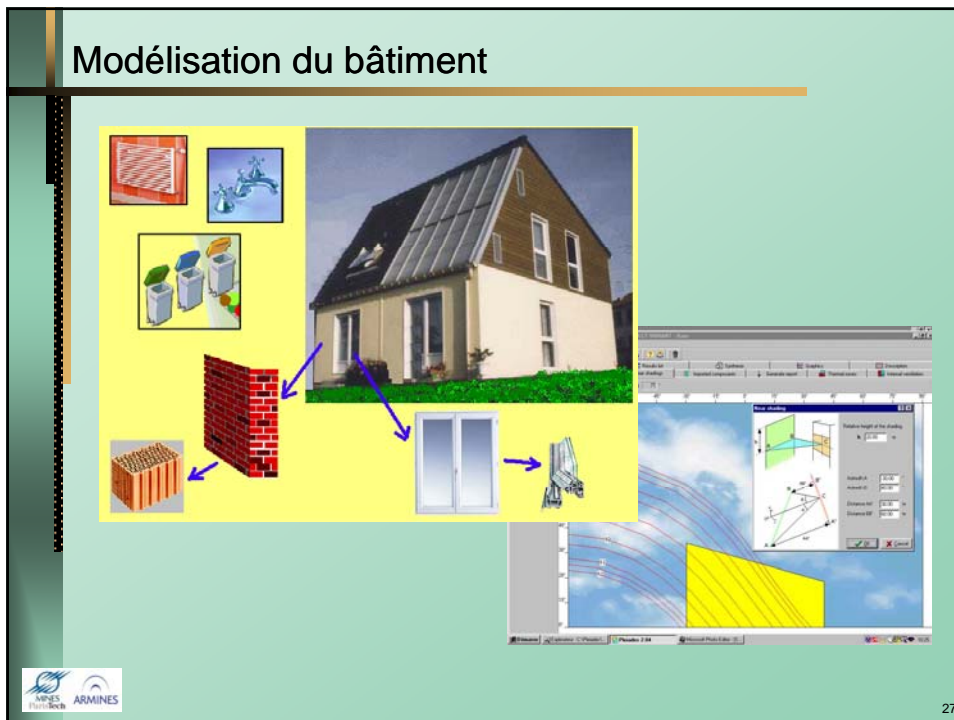
25

Description 2D – 3D : ALCYONE, www.izuba.fr



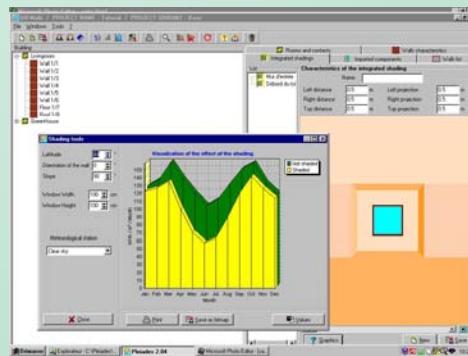
26

Modélisation du bâtiment



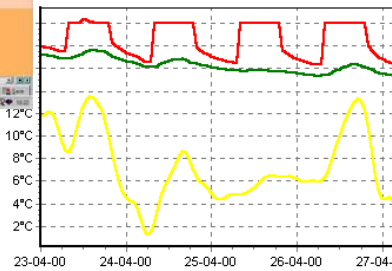
27

Lien avec l'outil de simulation thermique COMFIE



*Besoins de chauffage
et de climatisation*

ole Vabre / réhabilitation + / Classes
ole Vabre / réhabilitation + / Couloir
ole Vabre / réhabilitation + / Extérieur



*Profils de
température*



Equer, exemple de données

The screenshot shows the Equer software interface. It has a menu bar with options: Transport, Eau, Energie, Déchets, Matériaux, Calcul, Graphiques, and Comparatif. The main area contains several sections:

- Distances:** A checkbox 'Prendre en compte le transport quotidien des occupants' is checked. Below it are input fields for 'Distance domicile-commerce' (10000 m), 'Distance au réseau de transport en commun' (5000 m), and 'Distance domicile-travail' (10000 m). There are also buttons for 'Défaut: Urbain', 'Défaut: Barlieu', 'Défaut: Rural', and 'Défaut: Isolé'.
- Usagers:** A field for '% des occupants effectuant le trajet quotidien' is set to 0.
- Mode de transport:** A checkbox 'Présence de pistes cyclables' is checked. Below it is a dropdown menu for 'Mode de transport journalier'.
- Type de site:** Radio buttons for 'Urbain', 'Barlieu', 'Rural', and 'Site isolé'. 'Urbain' is selected.



Equer, exemple de données

The screenshot shows the Equer software interface. A dialog box titled 'Saisie caractéristiques' is open, displaying the following data for 'Béton B25':

Caractéristiques	Valeur
Nom	Béton B25
Catégorie	Mat
Etape	FAB
Procédé	N
Unité	kg

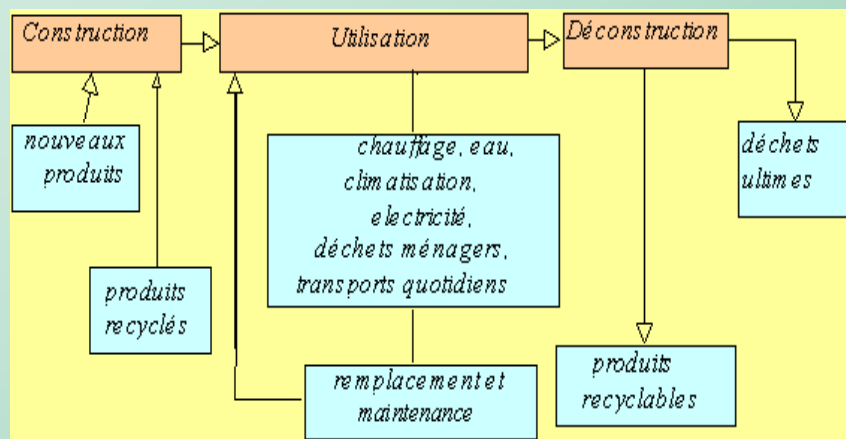
Below the dialog box, a table lists various materials and their associated environmental impact factors:

Nom	Catégorie	Effet de serre (kg CO2)	Unité
Béton B25	Mat	0.133000	kg
PVC double vitrage	Com	0.000364	m2
Isolant transparent 10 cm	Com	1.000000	m2
Isolant transparent 5 cm	Com	0.688000	m2
Acier de construction	Mat	0.007630	m2
Polystyrène	Mat	0.240600	kg
Bois - planche	Mat	0.000046	kg
Polyéthylène faible densité	Mat	0.000034	kg
transport M 28t	Trs	0.000003	kg
transport M train	Trs	0.000008	tkm
Polystyrène	Mat	0.000964	tkm
PVC dur	Mat	0.000000	kg

Base Oekoinventare 1996 (ETHZ) puis www.ecoinvent.ch

30

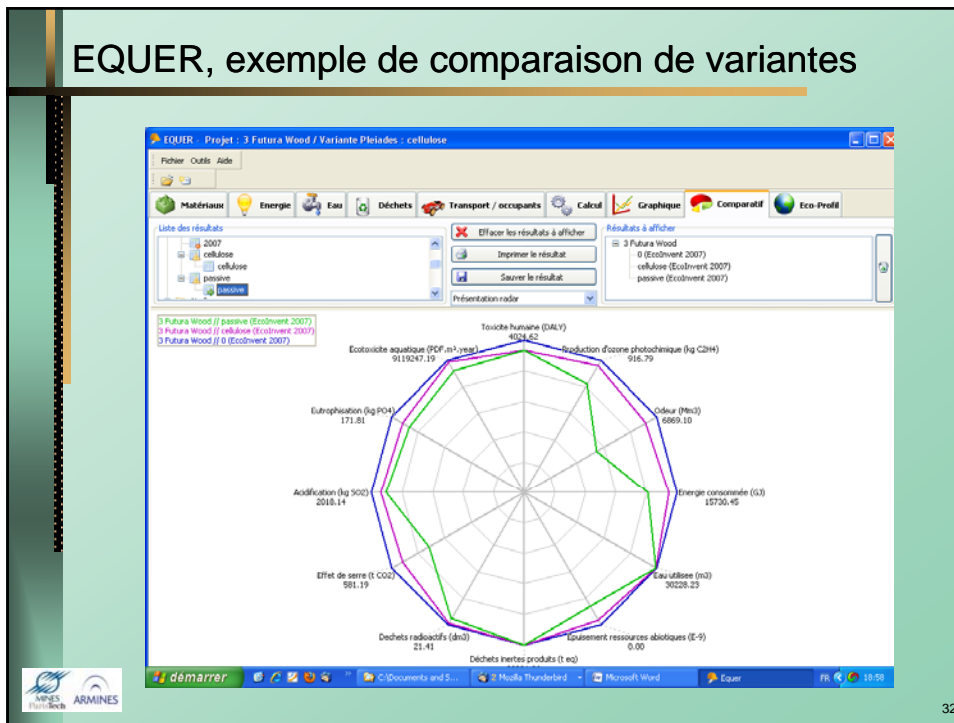
EQUER : simulation du cycle de vie



Calcul par pas de temps d'un an

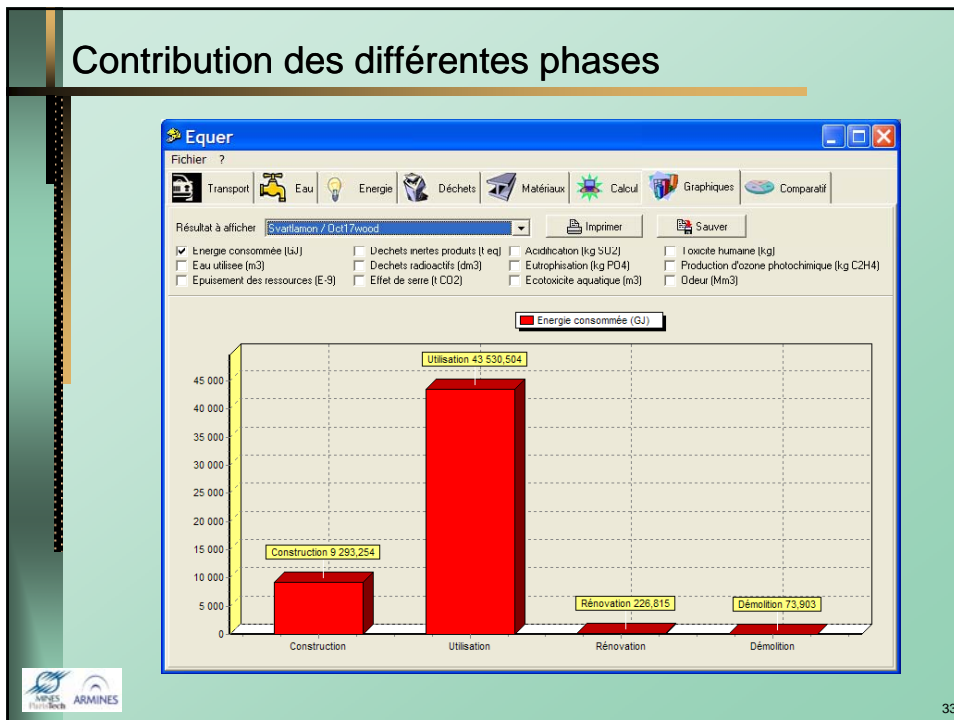
31

EQUER, exemple de comparaison de variantes



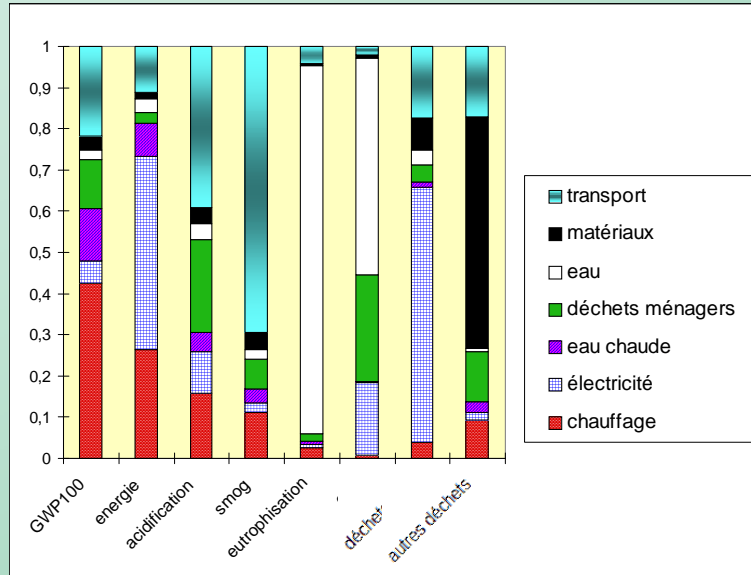
32

Contribution des différentes phases

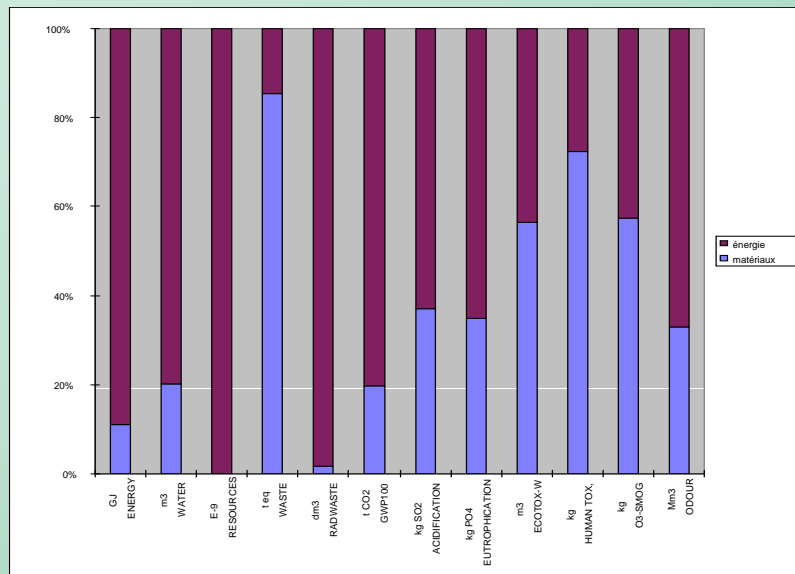


33

Exemple d'application : sources d'impact



L'énergie dans le bilan environnemental



Conception et comportement des occupants

CONCEPTION : REFERENCE/HQE

COMPOSANT	REFERENCE (1)	"HAUTE QUALITE ENVIRONNEMENTALE" (2)
ISOLATION	8 CM INTERIEURE	12 CM EXTERIEURE
SURFACE VITREE	10 M2, ORIENTATION NORD	25 M2, ORIENTATION SUD
VENTILATION	VMC SIMPLE FLUX	DOUBLE FLUX, EFFICACITE 0,5
EQUIPEMENTS SANITAIRES	STANDARD	A DEBIT REDUIT (DE 50%)
EQUIPEMENTS POUR LE TRI DES DECHETS	POUR LE VERRE SEULEMENT	POUR LE PAPIER ET LE VERRE



36

Conception et comportement des occupants

COMPORTEMENT DES OCCUPANTS : ECONOME/GASPILLEUR

PARAMETRES	"ECONOME" (E)	"GASPILLEUR" (G)
TEMPERATURE DE CONSIGNE	VARIABLE ENTRE 14°C ET 19°C	21°C CONSTAMMENT
VENTILATION	0,5 VOLUME PAR HEURE	1 VOLUME PAR HEURE
ELECTRICITE SPECIFIQUE	150 W	300 W
EAU CHAUDE	40 L/PERSONNE/JOUR ^A	60 L/PERSONNE/JOUR ^A
EAU FROIDE	80 L/PERSONNE/JOUR ^A	150 L/PERSONNE/JOUR ^A
DECHETS MENAGERS	0,8 KG/PERSONNE/JOUR	1,5 KG/PERSONNE/JOUR
TRI DU PAPIER	60% ^B	0%
TRI DU VERRE	80%	0%

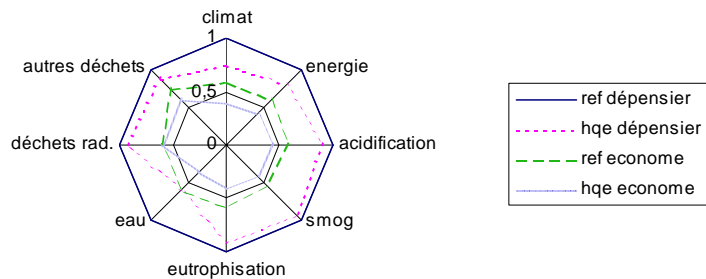
^A diviser par deux pour la conception "hqe", grâce a la réduction de débit

^B 0% dans la solution de référence car le tri du papier n'y est pas prévu



37

Conception et comportement des occupants



Limites de la méthode d'ACV

- ▶ Manque de données sur certains produits / procédés
- ▶ incertitude sur le futur (gestion des déchets en fin de vie, mix électrique)
- ▶ incertitude sur les indicateurs (ex. 35% sur le GWP des gaz autres que le CO₂)
- ▶ analyse multicritères
- ▶ Non localisation des émissions, pistes : adapter les facteurs de caractérisation en fonction de la localisation (ex urbain/péri-urbain/rural, sol/hauteur)

Comparaison, réseau européen PRESCO

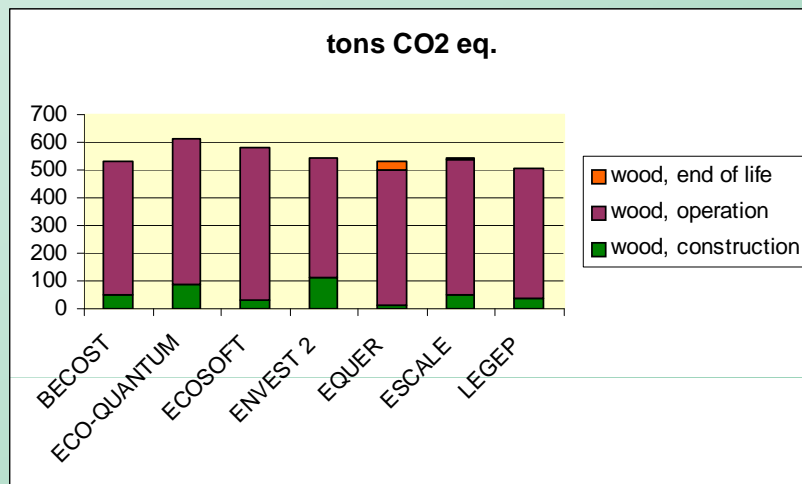


Maison suisse FUTURA, 210 m², ossature bois, Chauffage gaz, 80 ans



40

Comparaison d'outils ACV européens, PRESCO



Écart ± 10% sur le cycle de vie
Cf. <http://www.etn-presco.net/>



41

Exemple d'application : Formerie (Oise)

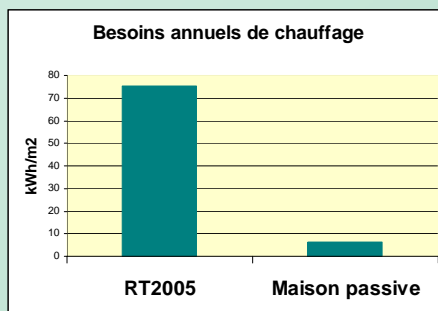


2 maisons passives, Oise, 2 x 135 m²
Entreprise : Les Airelles
EN ACT architecture



42

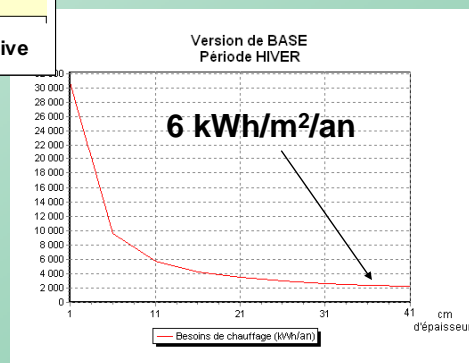
Résultats des simulations, hiver



Comparaison à la référence RT2005 avec la même géométrie

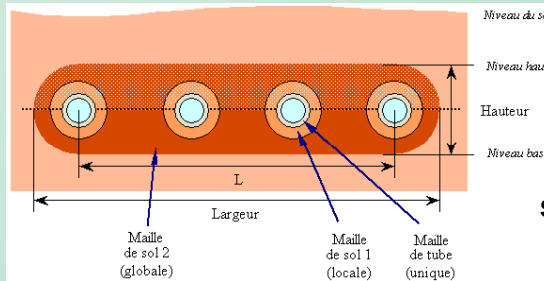
Chauffage à 19°C

Variation des besoins de chauffage en fonction de l'épaisseur d'isolation



43

Résultats des simulations, été (canicule 2003)

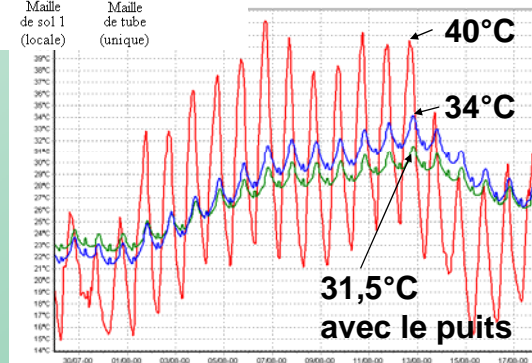


Modélisation du puits canadien

Températures en période caniculaire, degrés-jours >27°C divisés par 2 avec le puits canadien

Climatisation : 2,5 kWh/m²

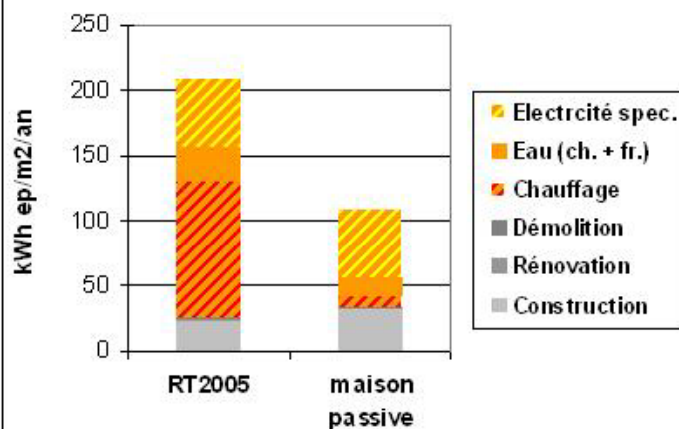
sans climatisation :



44

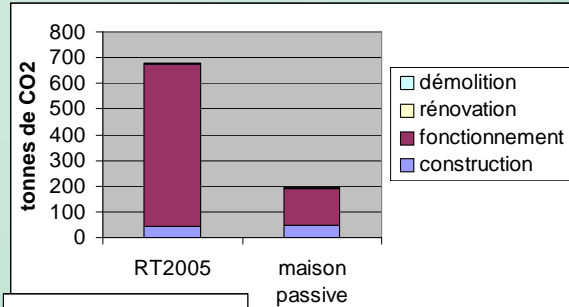
Contribution de l'énergie « grise » au bilan global

Contribution de l'énergie grise au bilan global (logiciel EQUER)



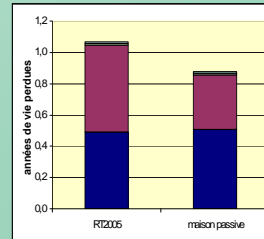
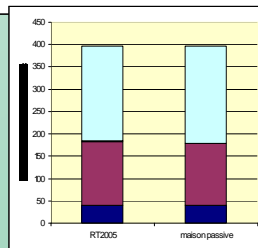
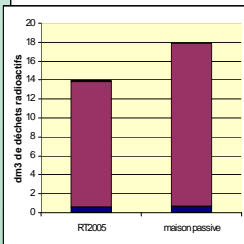
45

Résultats de l'analyse de cycle de vie



**2 maisons
Sur 80 ans**

**Comparaison
à la référence
RT2005 avec
chauffage gaz**



Intérêt de l'énergie positive

46

Maisons à énergie positive, Freiburg



Architecte : Rolf Disch

Consos de chauffage+ecs mesurées (U. Wuppertal) : 25 kWh/m²/an

Consommation élec : 21 kWh/m²/an Production PV : 43 kWh/m²/an

-> bilan positif en énergie primaire



47

Bâtiment HLM à Montreuil

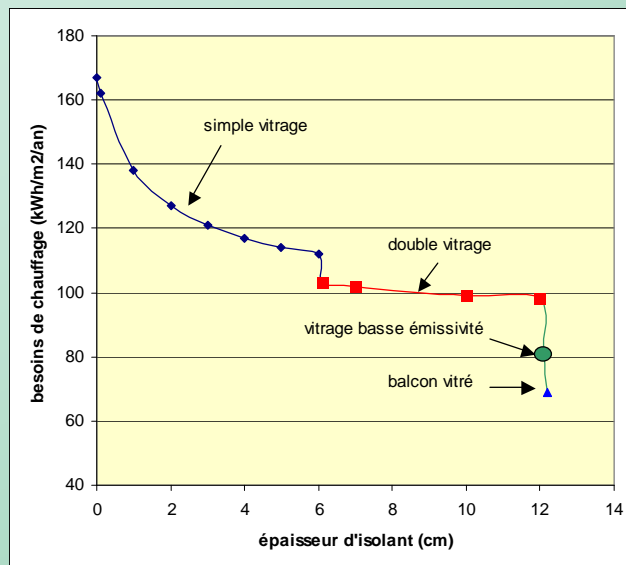


Construction : 1969, non isolé, simple vitrage
Besoins de chauffage : 160 kWh/m²/an



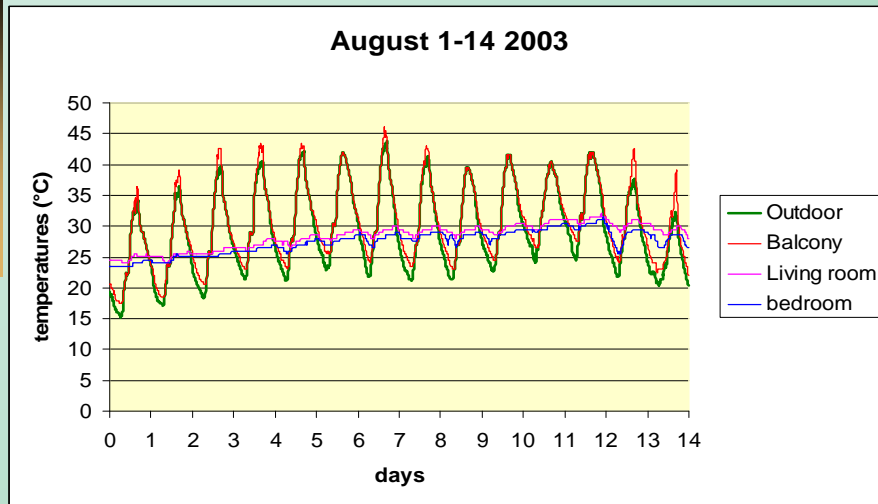
48

Résultats de l'analyse thermique



49

Canicule 2003 (15 000 décès)

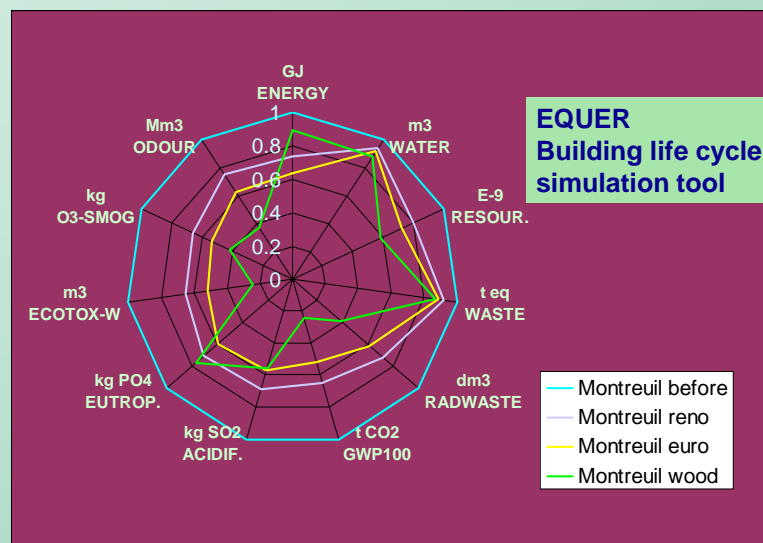


Écart de 10°C entre extérieur et intérieur grâce à la forte inertie
L'isolation thermique protège du froid mais aussi du chaud



50

Résultats de l'analyse de cycle de vie, outil EQUER



51

Bâtiment après rénovation



Besoins de chauffage : - 32% et non -50% car température des logements +3°C (de 20°C à 23°C), action en cours de l'OPHLM
Emissions : - 76 tonnes CO₂ par an



52

Projet européen SOLANOVA, Hongrie



Ventilation double flux
Traitement des ponts thermiques
Consommation de chauffage mesurée : 39 kWh/m²/an



53

5 étapes (énergie, eau, matériaux)

- ▶ Limiter les besoins par la sobriété (chauffage à 19°C, douches/bains, emballages),
- ▶ l'efficacité (isolation, débit réduit, enveloppe légère au nord)
- ▶ Utiliser les ressources renouvelables
- ▶ Compléter en minimisant les impacts
- ▶ Informer les utilisateurs (régulation, gestion, maintenance)

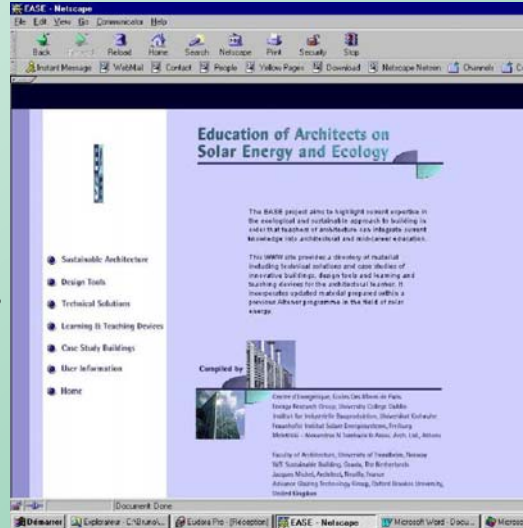
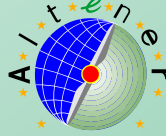
Bibliographie

- ▶ La maison des négawatts, T. Salomon et S. Bedel, Terre Vivante, 1999
- ▶ Guide de l'habitat sain, S. et P. Déoux, Medieco, 2004
- ▶ L'architecture écologique, Dominique Gauzin-Müller, Ed. Le Moniteur, 2001
- ▶ Guide de l'architecture bioclimatique (tomes 1 à 6), Observ'ER, 1996-2004
- ▶ Eco-conception des bâtiments et des quartiers, B. Peuportier, Presses de l'EMP, 2008

Projet européen EASE : www-cenerg.ensmp.fr/ease


Partners :

EMP, Paris
IFIB, Karlsruhe
Fhg ISE, Freiburg
W/E, Gouda
ERG, Dublin
MELETITIKI, Athens
Univ. of Trondheim
etc.



56

Supported by

Intelligent Energy  Europe

Training for Renovated Energy Efficient Social housing (TREES)



site web : <http://www.cep.ensmp.fr/trees/>

Matériel pédagogique (transparents et textes) :

- Techniques (isolation, vitrages, ventilation, solaire, équipements)
- Outils (calculs thermiques, ACV, coûts...)
- Etudes de cas (Allemagne, Suède, Norvège, Pays Bas, Hongrie et France)



57