

ÉCOLE THÉMATIQUE SIMUREX

octobre 2015

**Application de l'analyse de cycle de vie
à l'échelle d'un quartier**

Bruno PEUPORTIER
Mines ParisTech – CES



éco-conception des quartiers

- ▶ **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)

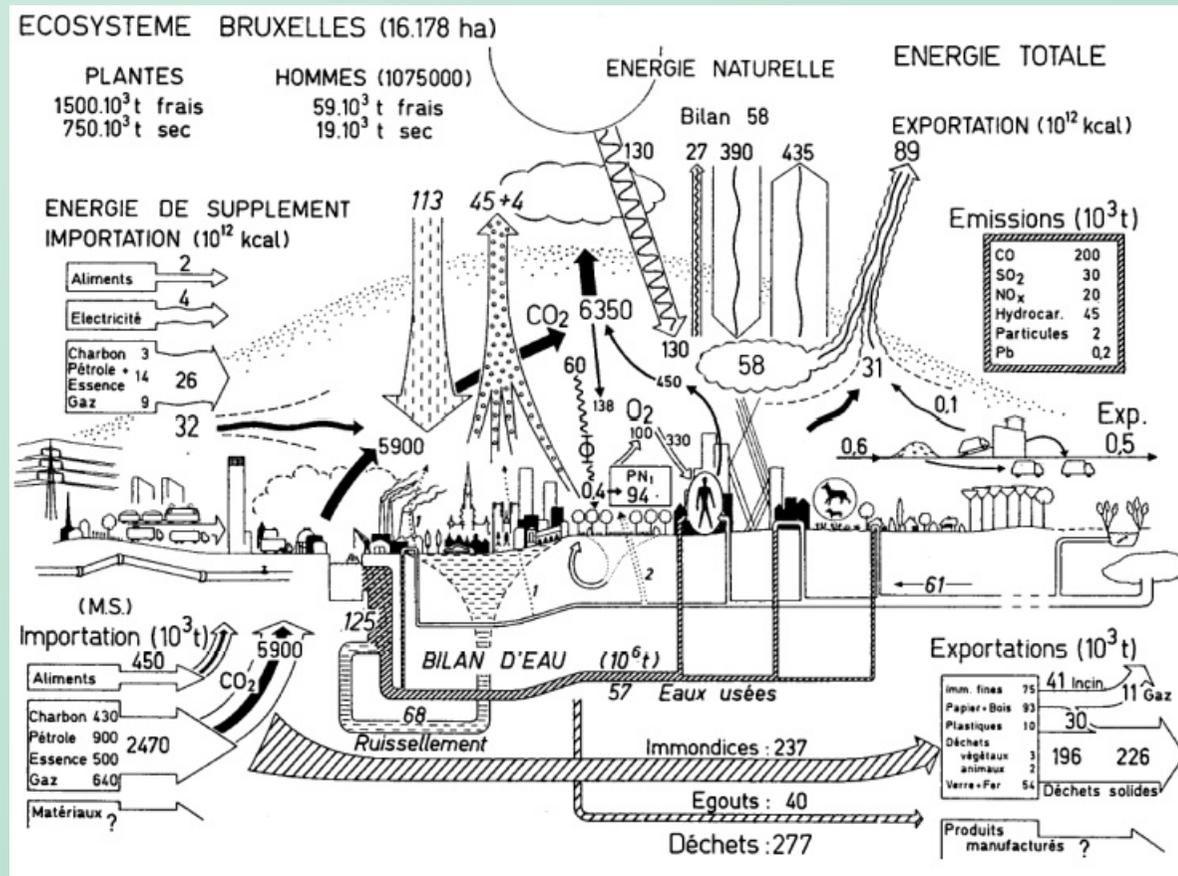
La contribution du secteur du bâtiment

- ▶ **Émissions dans l'air (22% effet de serre, COVs...)** :
- ▶ **Moisissures, bactéries, acariens (humidité)**
- ▶ **Bruit (équipements extérieurs de climatisation...)**
- ▶ **Perturbation des micro-climats : vent, température (îlot de chaleur)**

- ▶ **Quartiers : voiries et éclairage publics, réseaux (eau, chaleur...), une partie des transports, gestion de l'eau et des déchets**

Les premières analyses du « métabolisme urbain »

Abel Wolman (1965), Eugene Odum (1971)



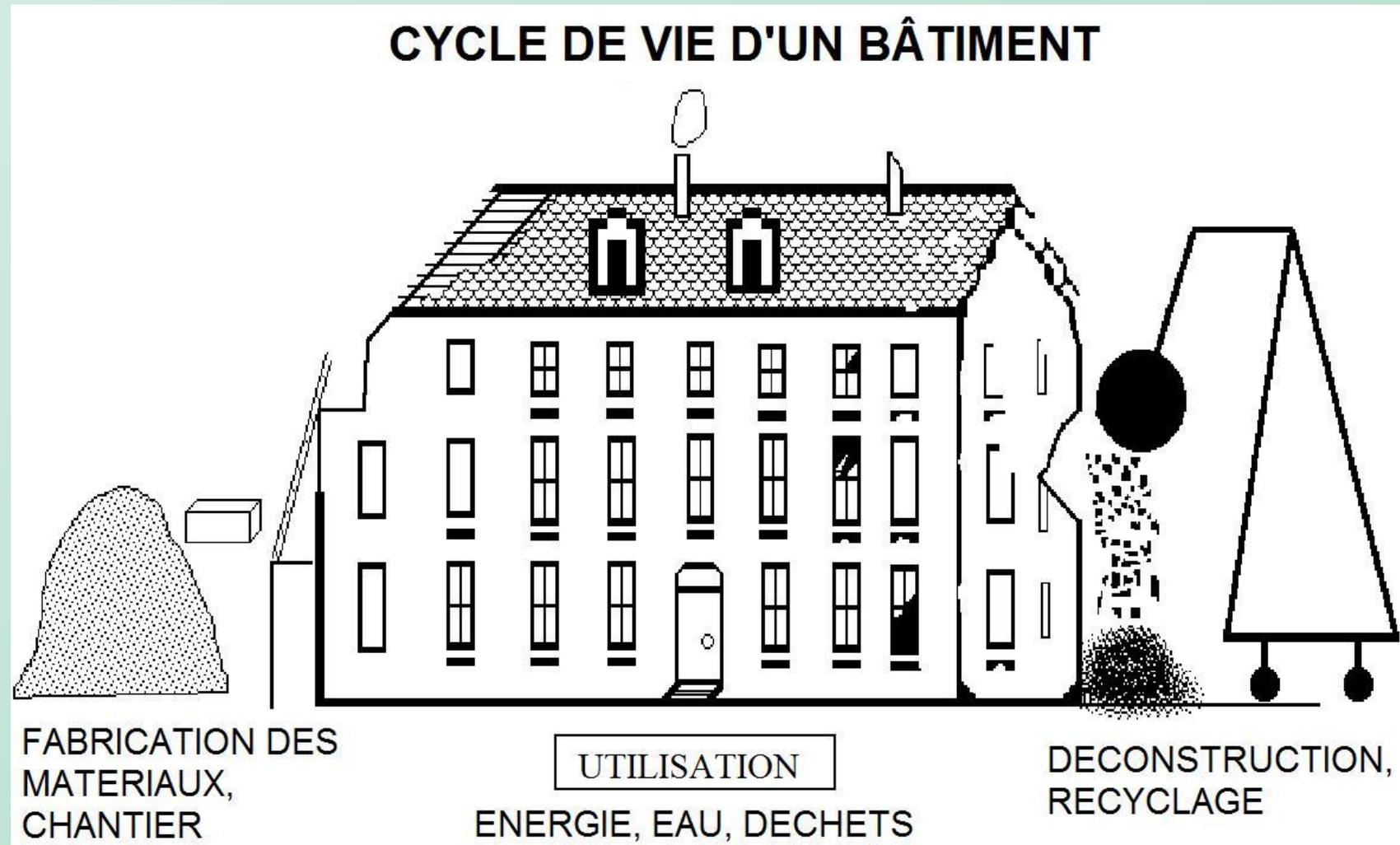
Duvigneau, Denaeyer-De Smet, 1977

Mise en veille, puis rapport Brundtland en 1987

Travaux pionniers

- ▶ **Premières ACV** : Darnay A. et Nuss G. (USA), Sundström G. (Suède), emballages de boissons, 1971
- ▶ **Premières ACV de bâtiments** :
- ▶ Kohler N., Analyse énergétique de la construction de l'utilisation et de la démolition de bâtiments, thèse de doctorat, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 1986
- ▶ Cole et al., "Buildings and the Environment", International Workshop, Cambridge, 1992
- ▶ Polster B., Contribution à l'étude de l'impact environnemental des bâtiments par analyse du cycle de vie, thèse de doctorat, MINES ParisTech, 1995
- ▶ Travaux aux Pays Bas, au Danemark, au Canada puis en Grande Bretagne, Australie...
- ▶ **Premières ACV de quartiers** :
- ▶ Popovici E., Contribution to the life cycle assessment of settlements, thèse de doctorat, Ecole des Mines de Paris, février 2006

Analyse de cycle de vie



Normes ISO 14 000

- ▶ **14001 : système de management**
- ▶ **14010 : audit**
- ▶ **14020 : labels**
- ▶ **14030 : évaluation de la perf. environ.**
- ▶ **14040 : analyse de cycle de vie**
- ▶ **14050 : glossaire**

Définition des objectifs

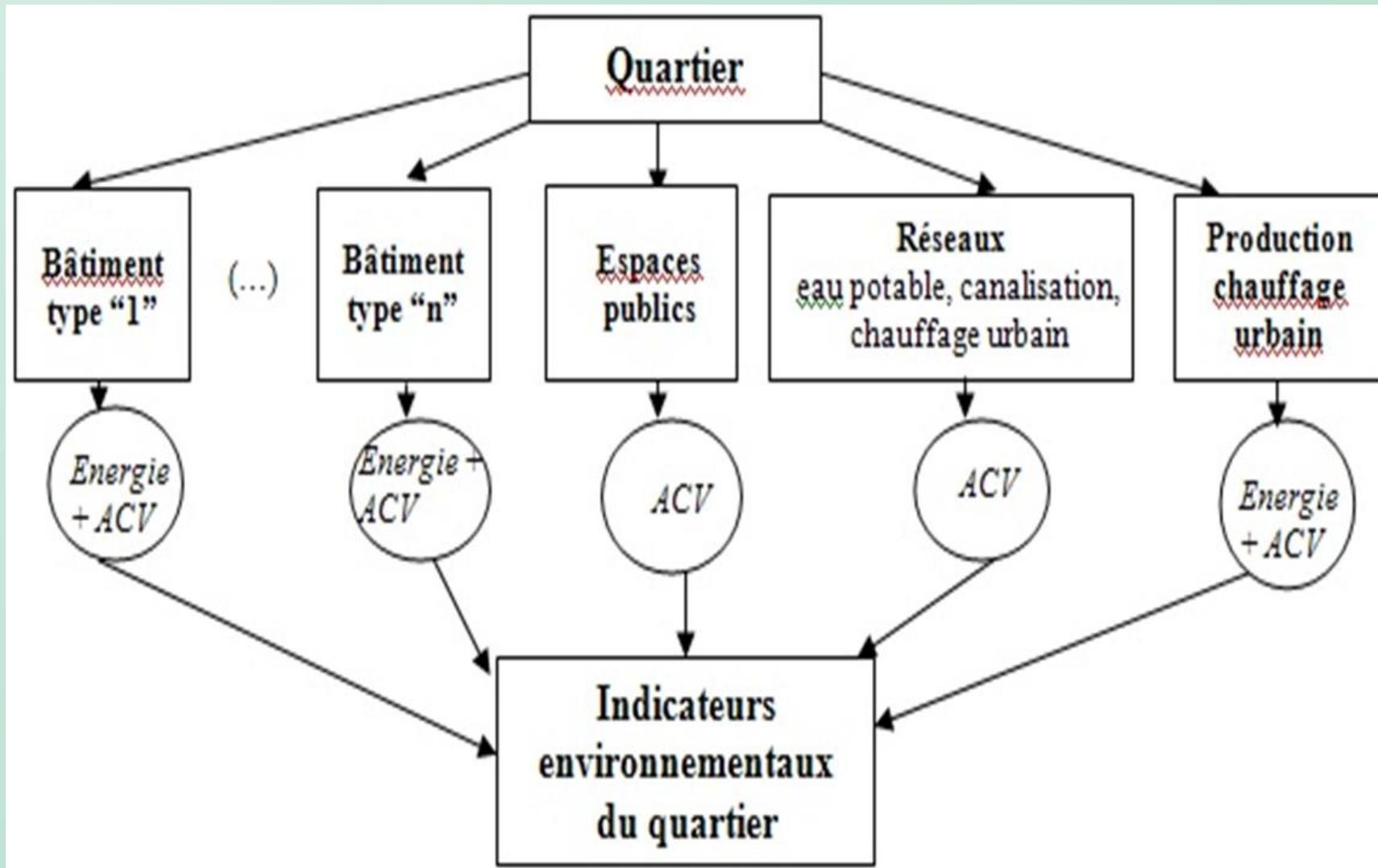
- ▶ Aide au choix d' un site
- ▶ Aide à la programmation (niveaux de performance)
- ▶ Aide à la conception, comparaison de variantes urbaines, architecturales et/ou techniques
- ▶ Aide à la réalisation (comparaison de produits)
- ▶ Aide à la gestion (études sur les usages)
- ▶ Aide à la réhabilitation (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**

- ▶ **Quartiers : plusieurs fonctions**
- ▶ **Quartier entier ou équivalent habitant ?**

Systeme étudié



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/m ³ 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 C _x H _y , 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 Ecoinvent, 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	

Base INIES : www.inies.fr

- ▶ **VRD - Assainissement - Aménagements Extérieurs**
- ▶ **Structure - Maçonnerie - Façades**
- ▶ **Couverture - Toitures-terrasses - Etanchéité**
- ▶ **Menuiseries extérieures**
- ▶ **Doublages - Cloisons – Plafonds - Isolants**
- ▶ **Revêtements de sol, Revêtements muraux et décoration**
- ▶ **Chauffage- Rafraîchissement - ECS - Régulation - Fumisterie**
- ▶ **Mais : simplification des inventaires, exemple : dioxines**
- ▶ **Pas de procédé (chauffage, etc.), fin de vie = déchets**
- ▶ **Pas de calcul matriciel (interactions entre secteurs, actualisation)**
- ▶ **Un calcul global est nécessaire pour choisir un matériau**

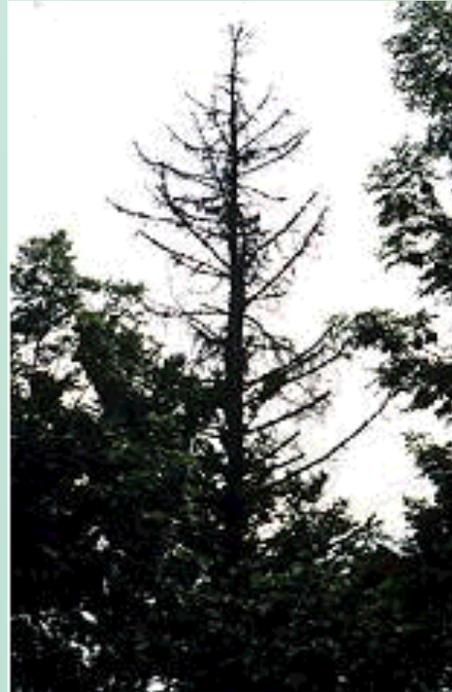
Indicateurs, exemple : contribution au changement climatique

- ▶ *Potentiel de réchauffement global*
- ▶ *propriétés optiques des gaz et durée de vie*

$$GWP_i = \frac{\int_0^T a_i c_i(t) dt}{\int_0^T a_{CO_2} c_{CO_2}(t) dt}$$

- ▶ *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)*

Contribution à l'acidification



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

Contribution à l'eutrophisation



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

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

Méthode des volumes critiques

- ▶ **Concentration maximale tolérable : C_m / 95% des individus préservés (kg/m^3)**
- ▶ **volume critique : $\text{Emissions} / C_m$ (m^3)**
- ▶ **indicateur Ecotoxicité aquatique :**
 Σ volumes critiques (m^3 d ' eau polluée)
- ▶ **idem pour écotoxicité terrestre**
- ▶ **Ex : norme AFNOR P01-010 (fiches FDES de la base INIES), limites : devenir des polluants, dommages (santé et biodiversité) et nb de flux (dioxines)**

Toxicité humaine

- ▶ Dose : kg inhalé ou ingéré / kg
- ▶ respiration 20 m³/jour, eau : 2 l/jour poids : 70 kg
- ▶ population P= 6 milliards, V_a = 3 10¹⁸ m³
- ▶ dose seuil D_s / 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 / V_a x 20 x P / D_s + Σ émis. eau / V_e x 2 x P / D_s

de « mid-point » à « end-point »

- ▶ Indicateurs mid-point (orientés effets)
- ▶ Guinée J. B. et al., Life cycle assessment; An operational guide to the ISO standards; Ministry of Housing, Spatial Planning and Environment (VROM) and Centre of Environmental Science (CML), Den Haag and Leiden, The Netherlands, 2001
- ▶ Indicateurs end-point (orientés dommages)
- ▶ Goedkoop M.J. et Spriemsma R., The Eco-Indicator 99, A damage oriented method for life cycle impact assessment, methodology report, methodology annex, manual for designers, Amersfoort, The Netherlands, 2001
- ▶ 3 grands domaines : santé, biodiversité, ressources
- ▶ Santé : DALY (Disability adjusted Life loss years)
- ▶ Biodiversité : PDF x m² x an (percentage disappeared fraction of species)
- ▶ Ressources : énergie utilisée pour extraire les ressources

Indicateurs dérivés de modèles

- ▶ European Uniform System for the Evaluation of Substances, RIVM (Institut National de Santé Publique et d' Environnement, Pays Bas), puis USETOX 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 dommages : DALY (Disability adjusted Life loss years), PDF x m2 x an (percentage disappeared fraction of species)

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 ?**

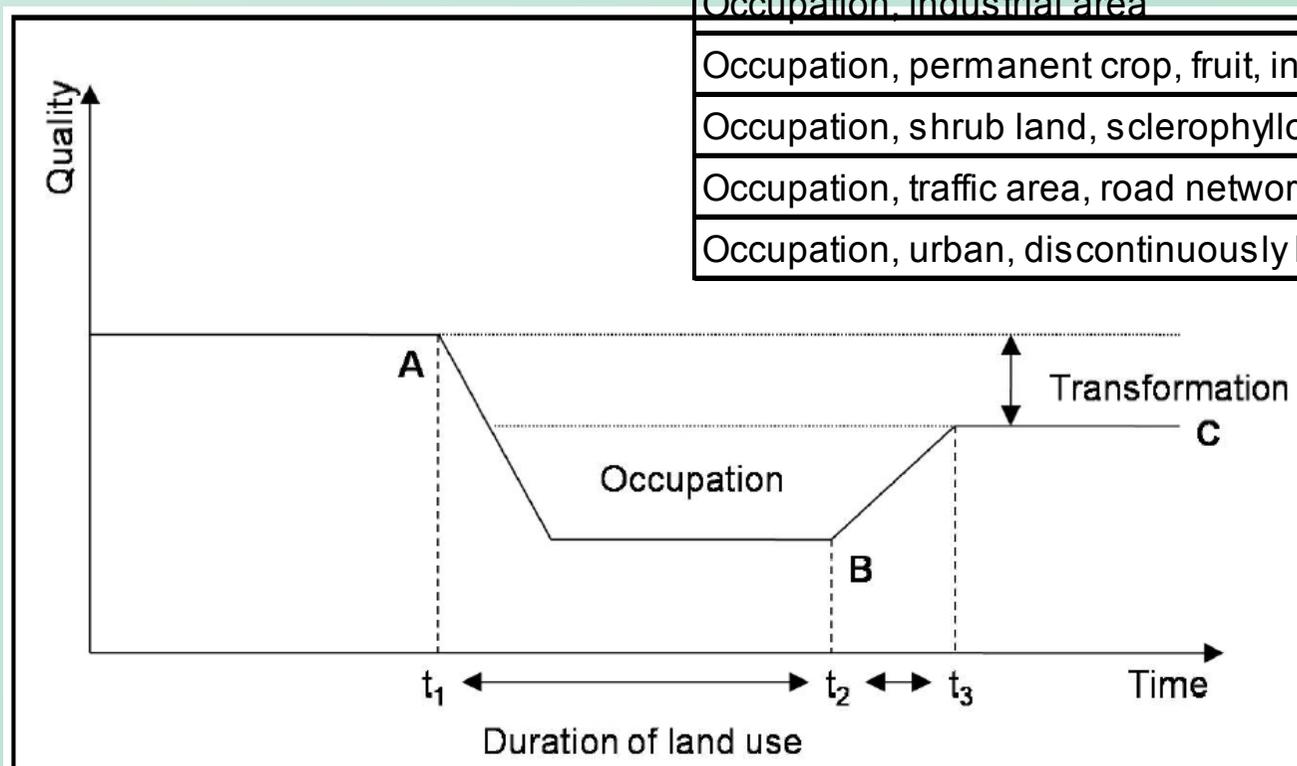
Autres indicateurs

- ▶ **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**



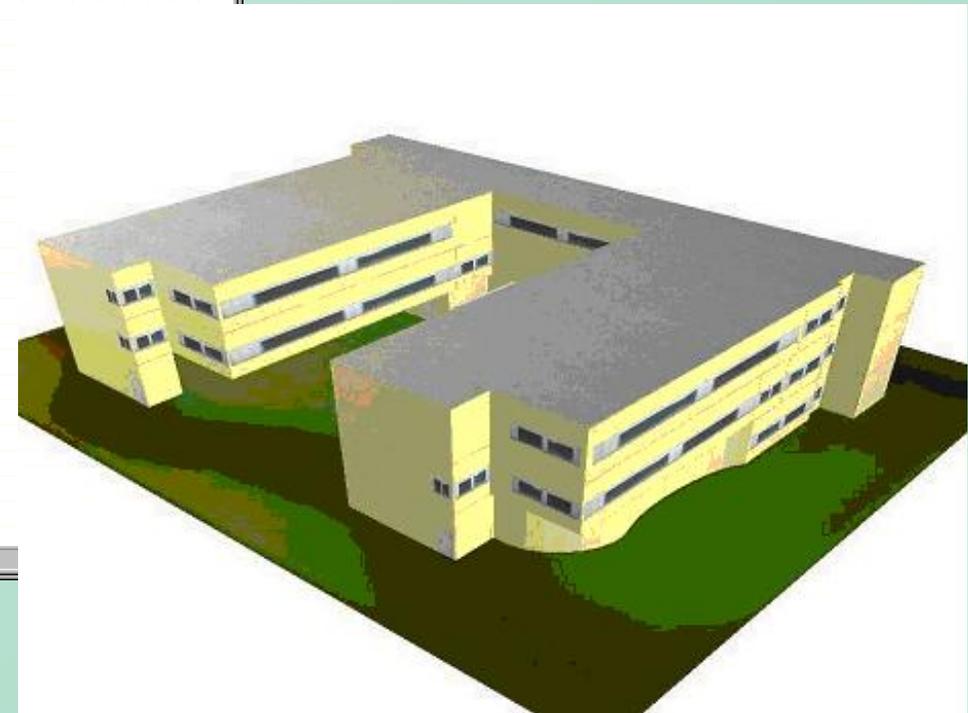
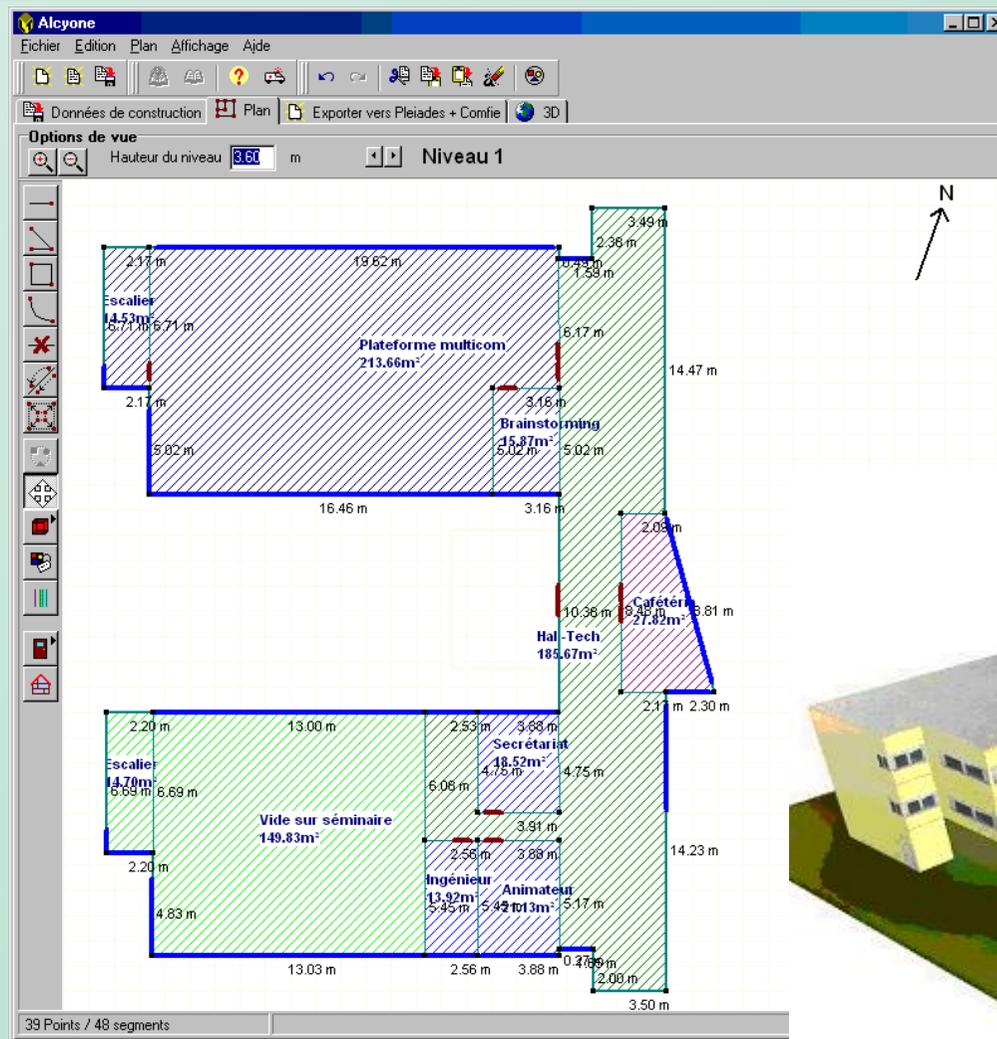
Indicateurs d'occupation et de transformation du sol

Type de sol	NDP
Occupation, arable, non-irrigated	0,7
Occupation, construction site	0,95
Occupation, dump site	0,9
Occupation, forest, intensive	0,4
Occupation, industrial area	0,95
Occupation, permanent crop, fruit, intensive	0,6
Occupation, shrub land, sclerophyllous	0,25
Occupation, traffic area, road network	0,9
Occupation, urban, discontinuously built	0,85

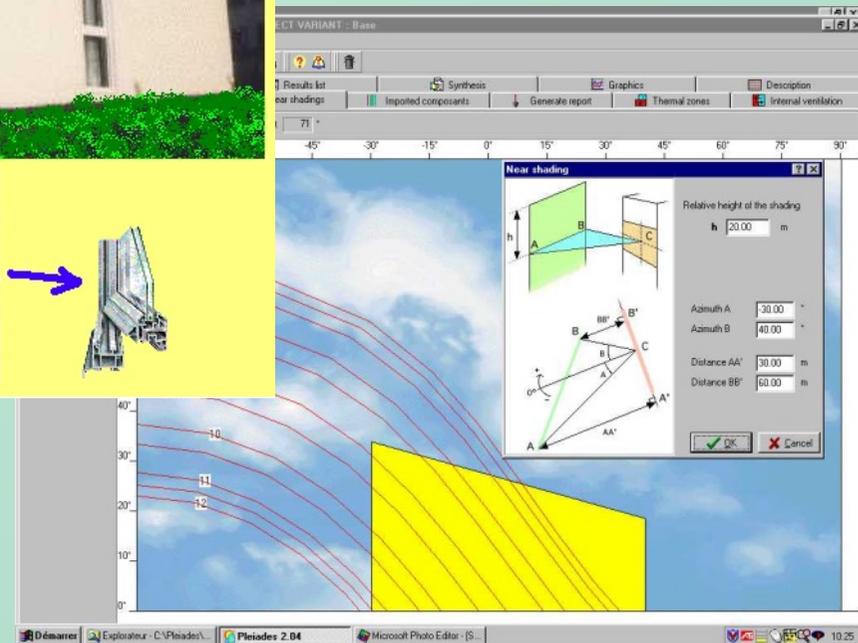
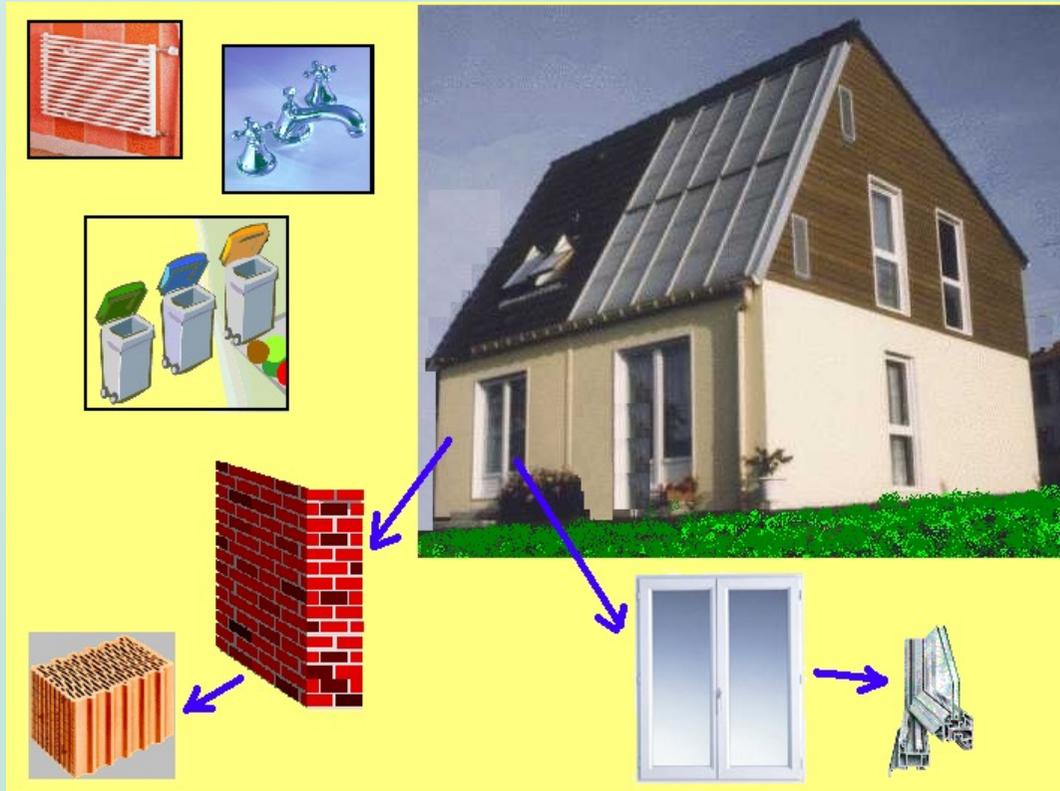


**Évaluation
pour
chaque
procédé**

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

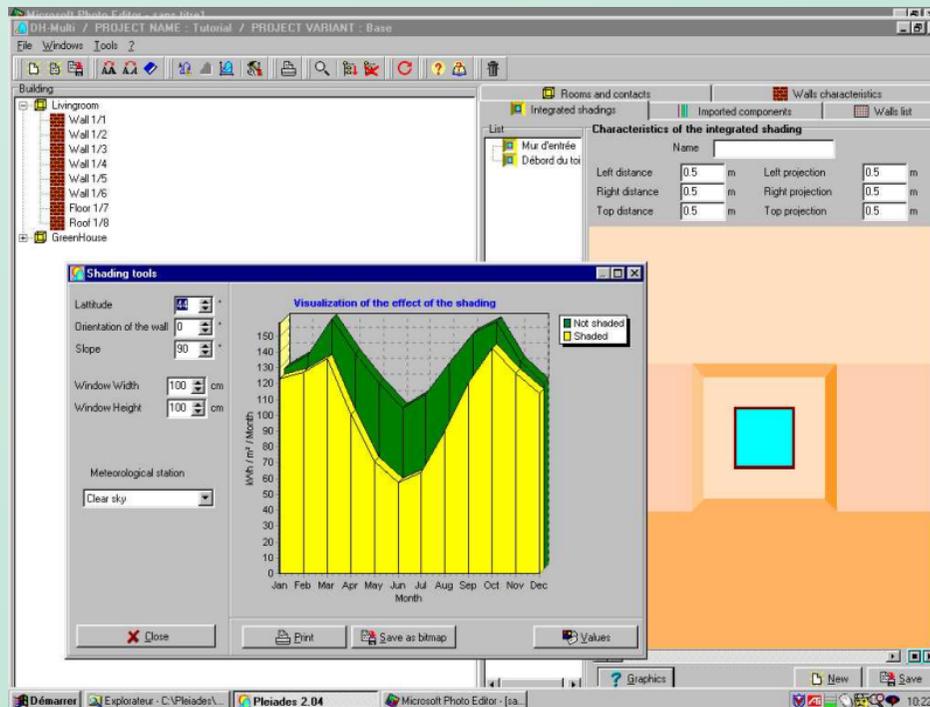


Modélisation du bâtiment

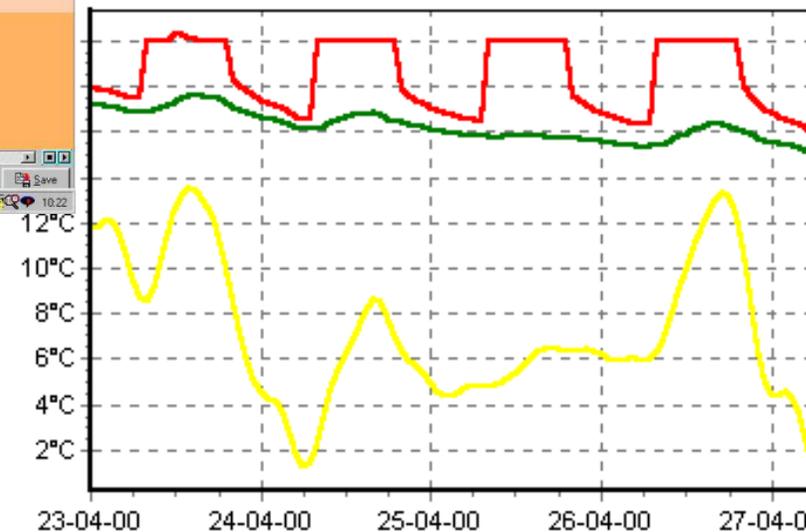


Lien avec l'outil de simulation thermique COMFIE

*Besoins de chauffage
et de climatisation*



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



*Profils de
température*

novaEquer, exemple de données

Equer

Fichier ?

Transport Eau Energie Déchets Matériaux Calcul Graphiques Comparatif

Prendre en compte le transport quotidien des occupants

Distances

 Distance domicile-commerce m
Distance au réseau de transport en commun m
Distance domicile-travail m

Usagers

 % des occupants effectuant le trajet journalier

Mode de transport

 Présence de pistes cyclables
Mode de transport journalier

Type de site

 Urbain Banlieu Rural Site isolé

novaEquer, exemple de données

The screenshot shows the Equer software interface with a 'Saisie caractéristiques' dialog box open. The dialog box contains the following information:

Saisie caractéristiques

Caractéristiques

Nom: Béton B25
 Catégorie: Mat
 Etape: F&A
 Procédé: N
 Unité: kg

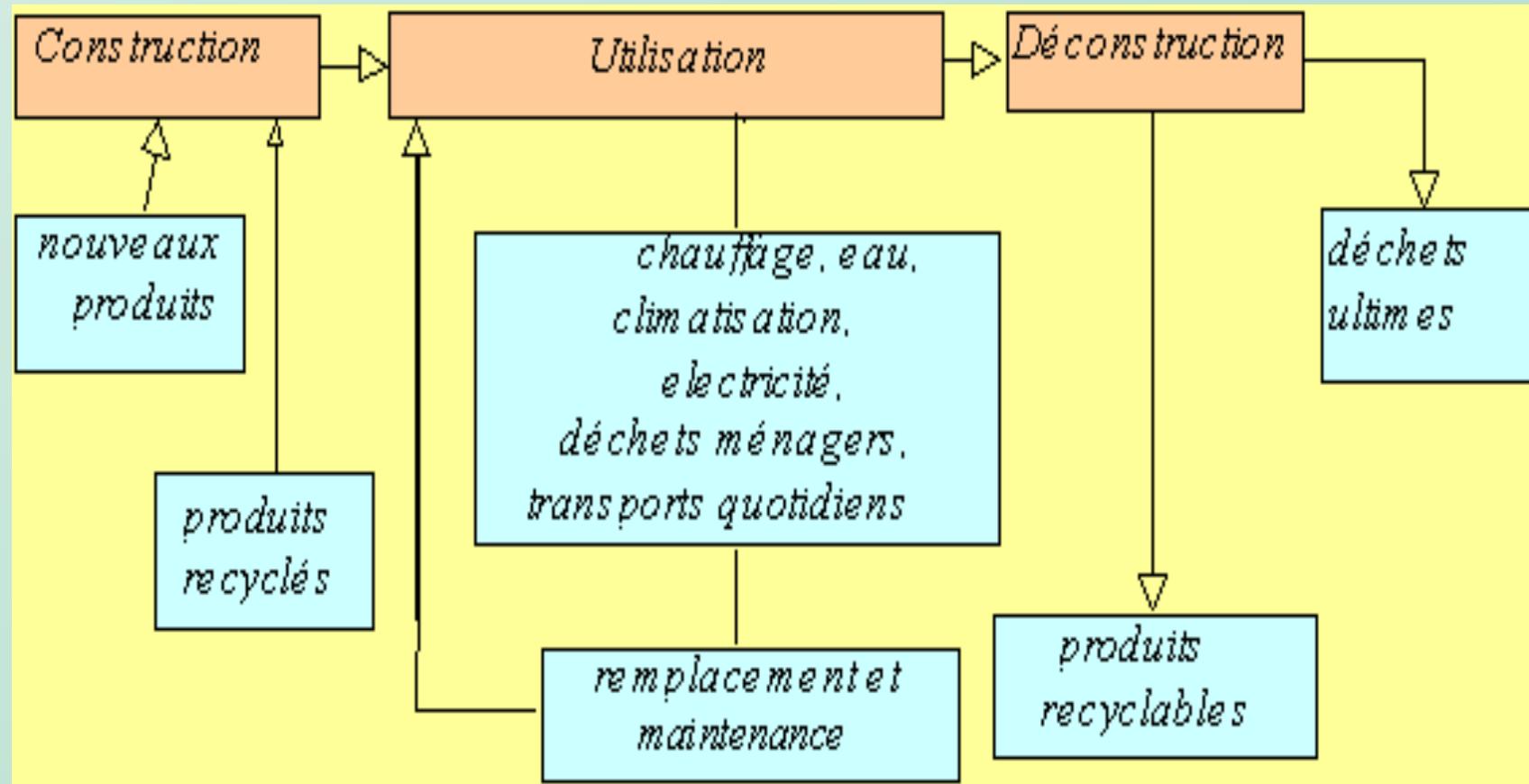
Pollution

Caractéristique	Valeur	Unité
Effet de serre (kg CO2)	0.133000	kg
Acidification (kg SO2)	0.000364	m2
Energie consommée (MJ)	1.000000	m2
Eau utilisée (litres)	0.688000	m2
Dechets inertes produits (kg eq)	0.007630	m2
Epuisement des ressources abiotiques (E-15)	0.240600	kg
Eutrophisation (kg PO4)	0.000046	kg
Production d'ozone photochimique (kg C2H4)	0.000034	kg
Ecotoxicité aquatique (m3)	0.000003	kg
Dechets radioactifs (dm3)	0.000008	tkm
Toxicité humaine (kg)	0.000964	tkm
Odeur (m3)	0.000000	kg

The background interface shows a list of materials and their categories:

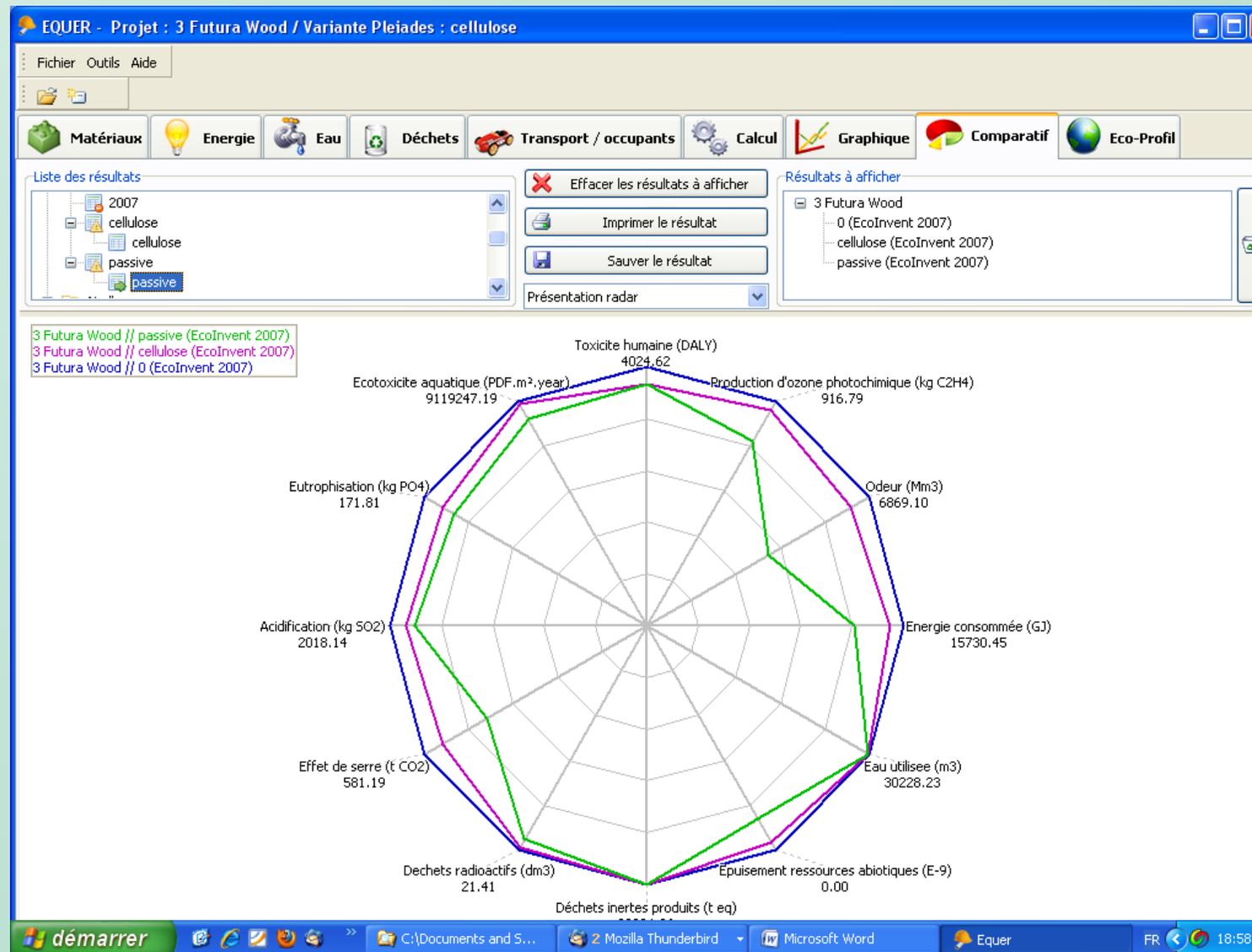
Nom	Catégorie
Béton B25	Mat
PVC double vitrage	Com
Isolant transparent 10 cm	Com
Isolant transparent 5 cm	Com
Acier de construction	Mat
Polystyrène	Mat
Bois - planche	Mat
Polyéthylène faible densité	Mat
transport M 28t	Trs
transport M train	Trs
Polystyrène	Mat
PVC dur	Mat

novaEQUER : simulation du cycle de vie

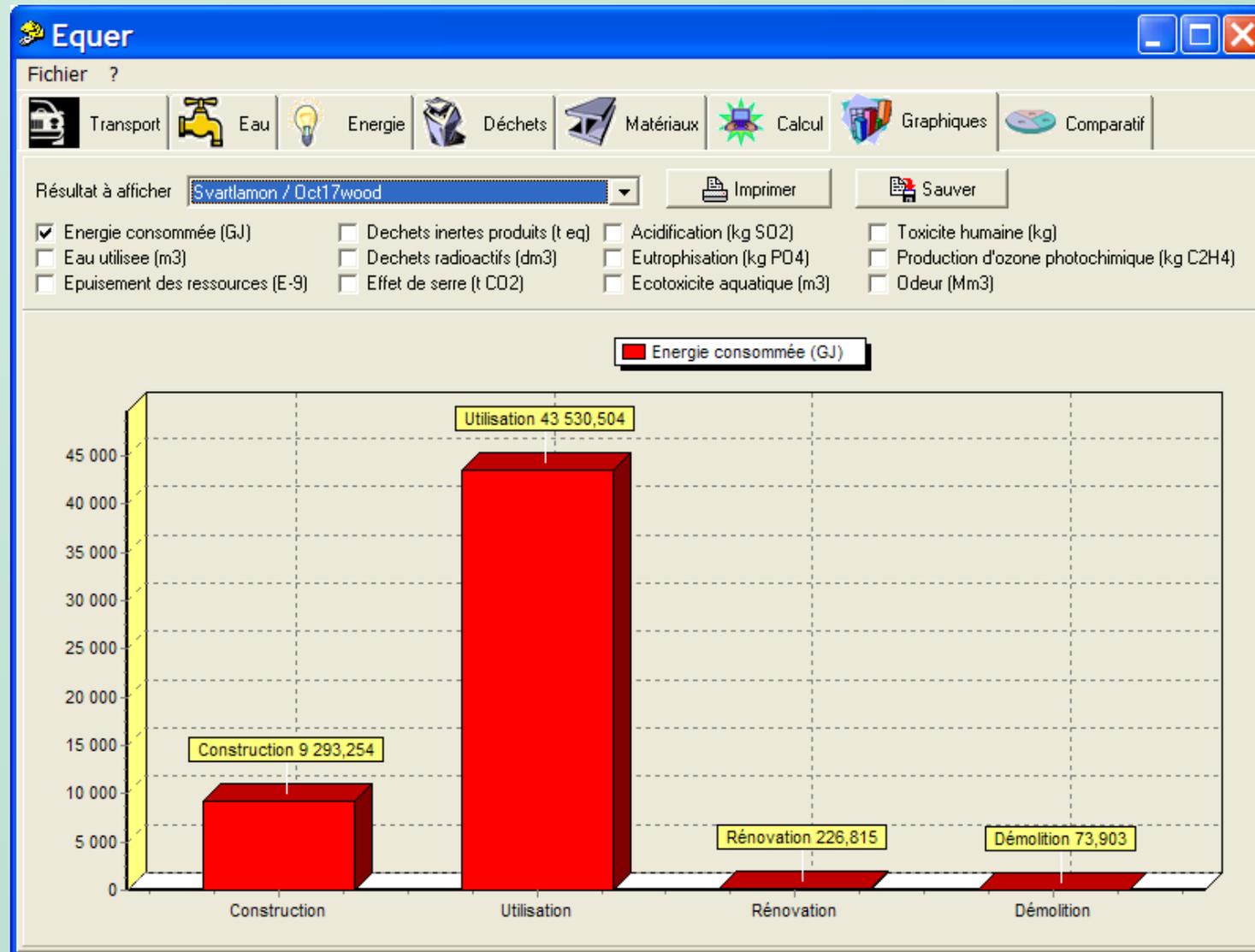


Calcul par pas de temps d'un an

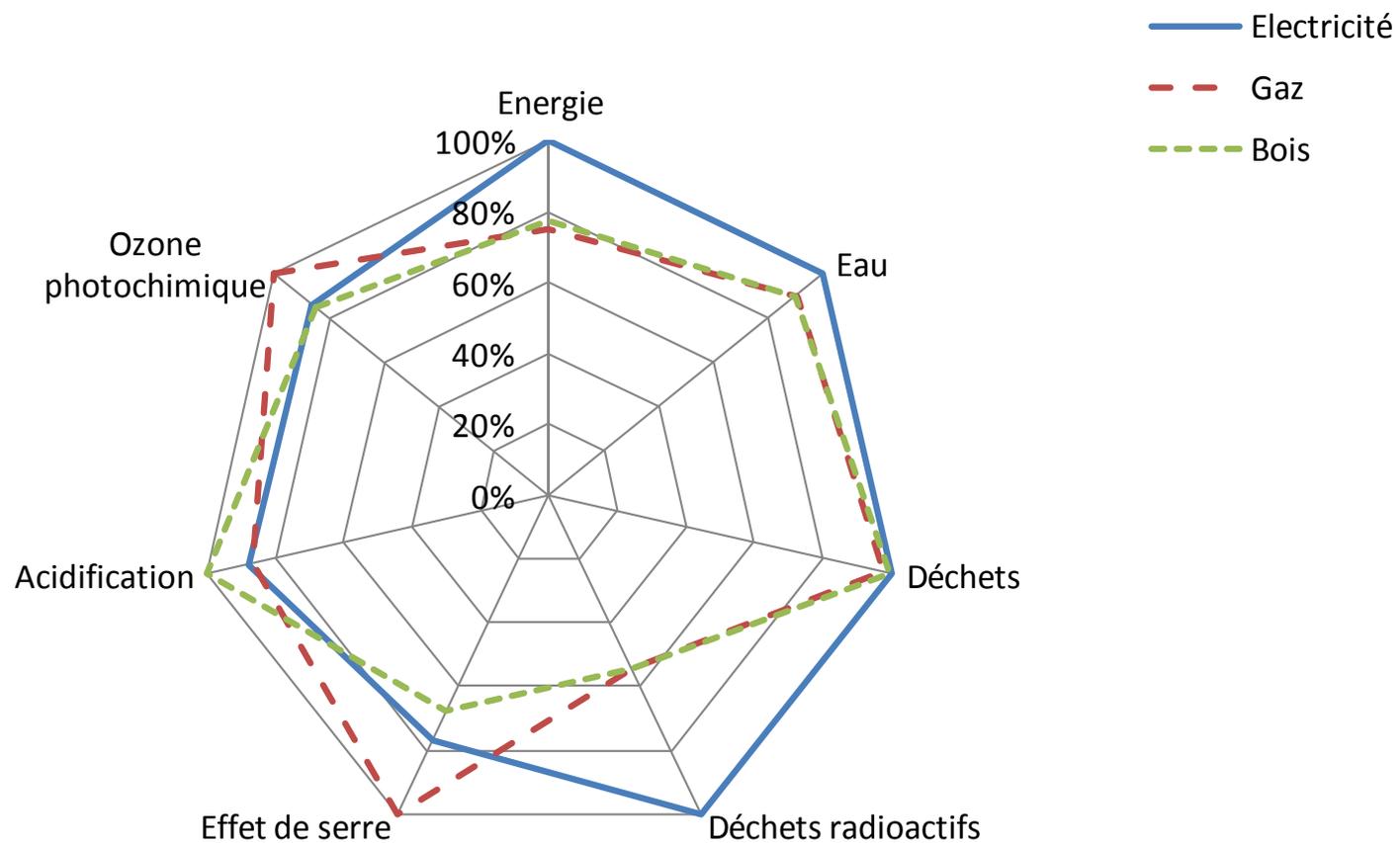
novaEQUER, exemple de comparaison de variantes



Contribution des différentes phases



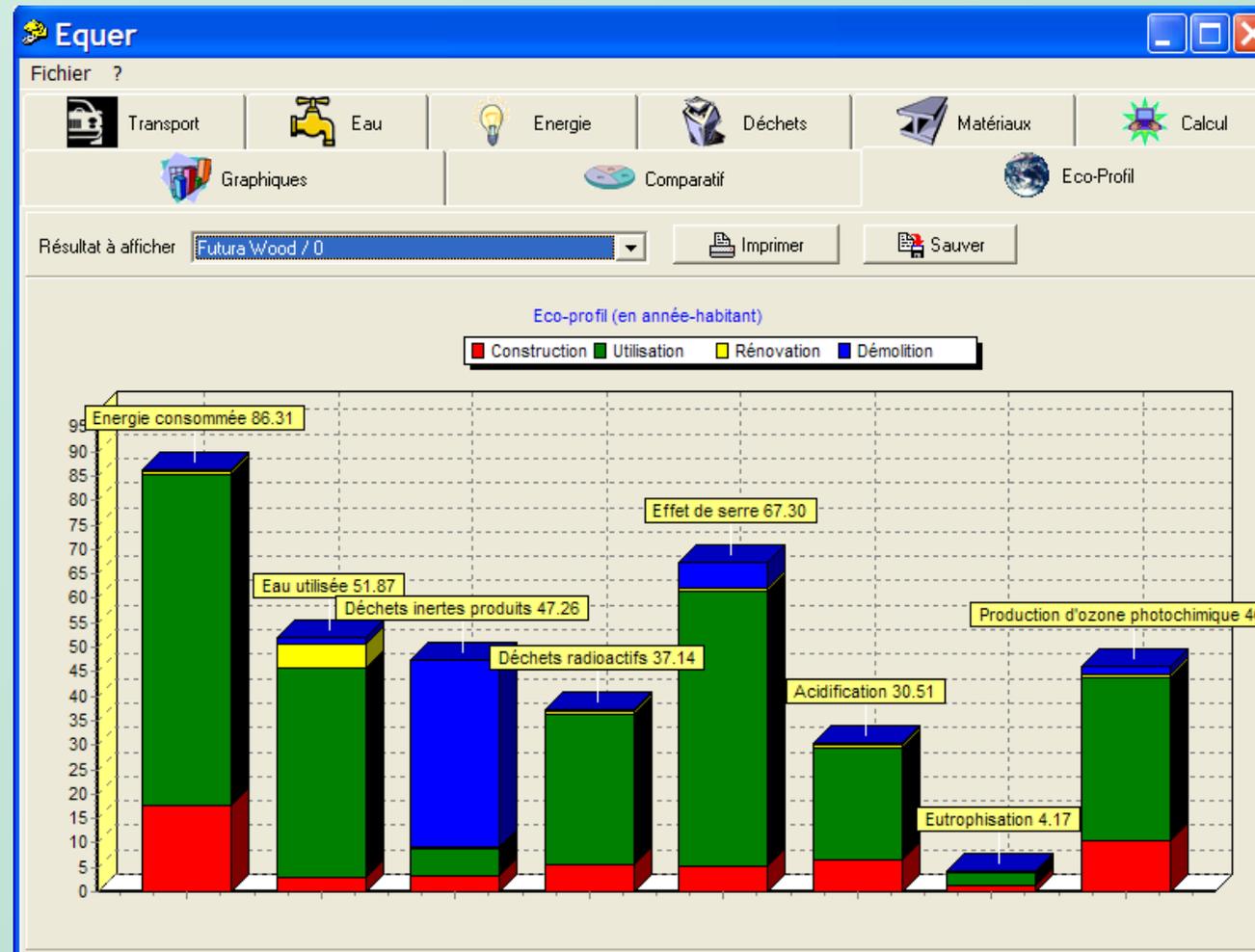
Différentes échelles et ordres de grandeur



Normalisation

- ▶ **Objectif : représenter tous les indicateurs sur une même échelle, et mieux cerner l'importance de la contribution du produit aux différents impacts**
- ▶ **Unité : équivalent habitant-année**
- ▶ **Indicateur normalisé = indicateur / indicateur correspondant à un habitant sur une année**
- ▶ **Exemple : 8 tonnes de CO₂ émis par an par habitant en France, si l'indicateur est 800 tonnes pour un produit, l'indicateur normalisé vaut 100 hab-an.**

EQUER, exemple d' éco-profil

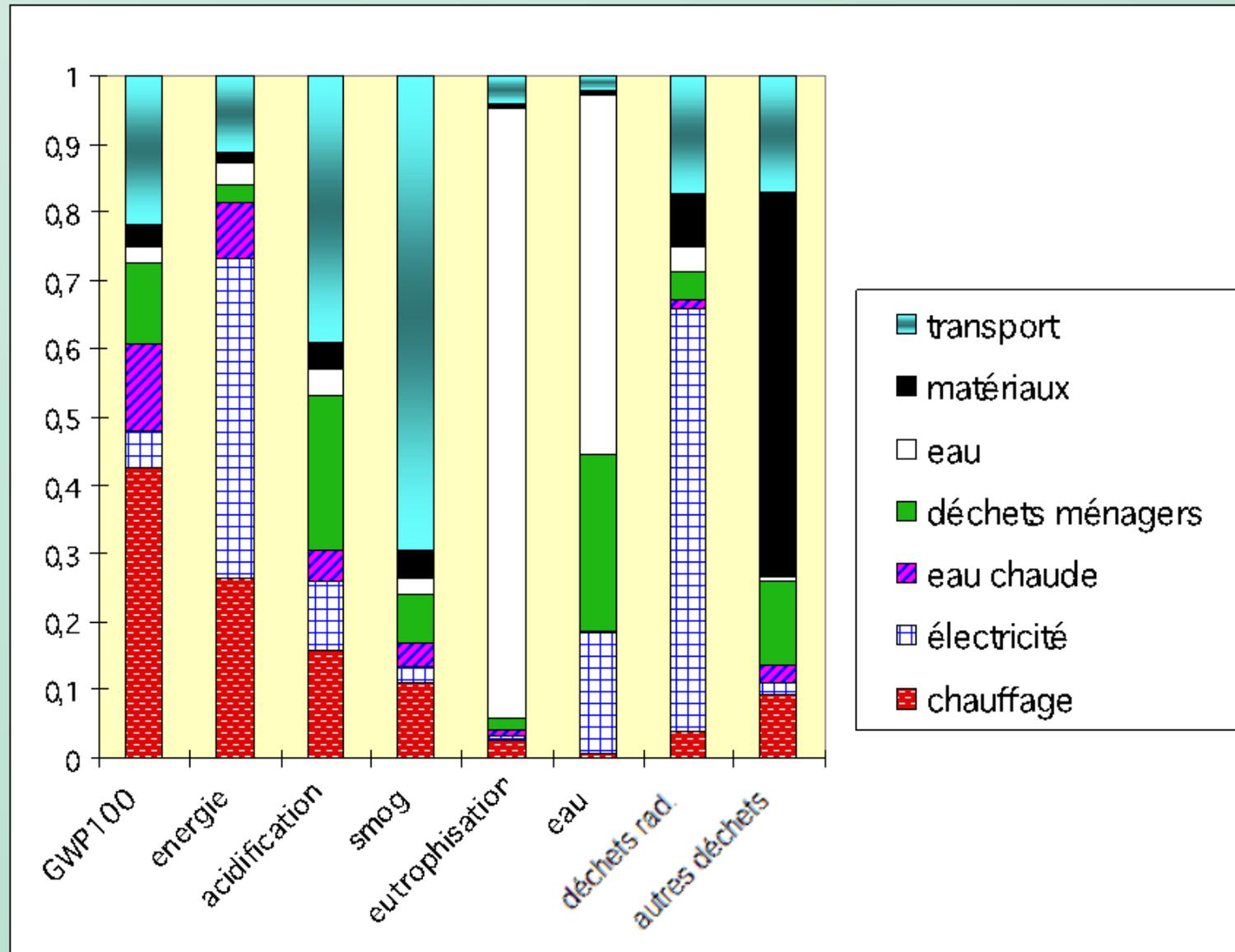


*Unité commune à tous les indicateurs :
Équivalent-habitant-année*

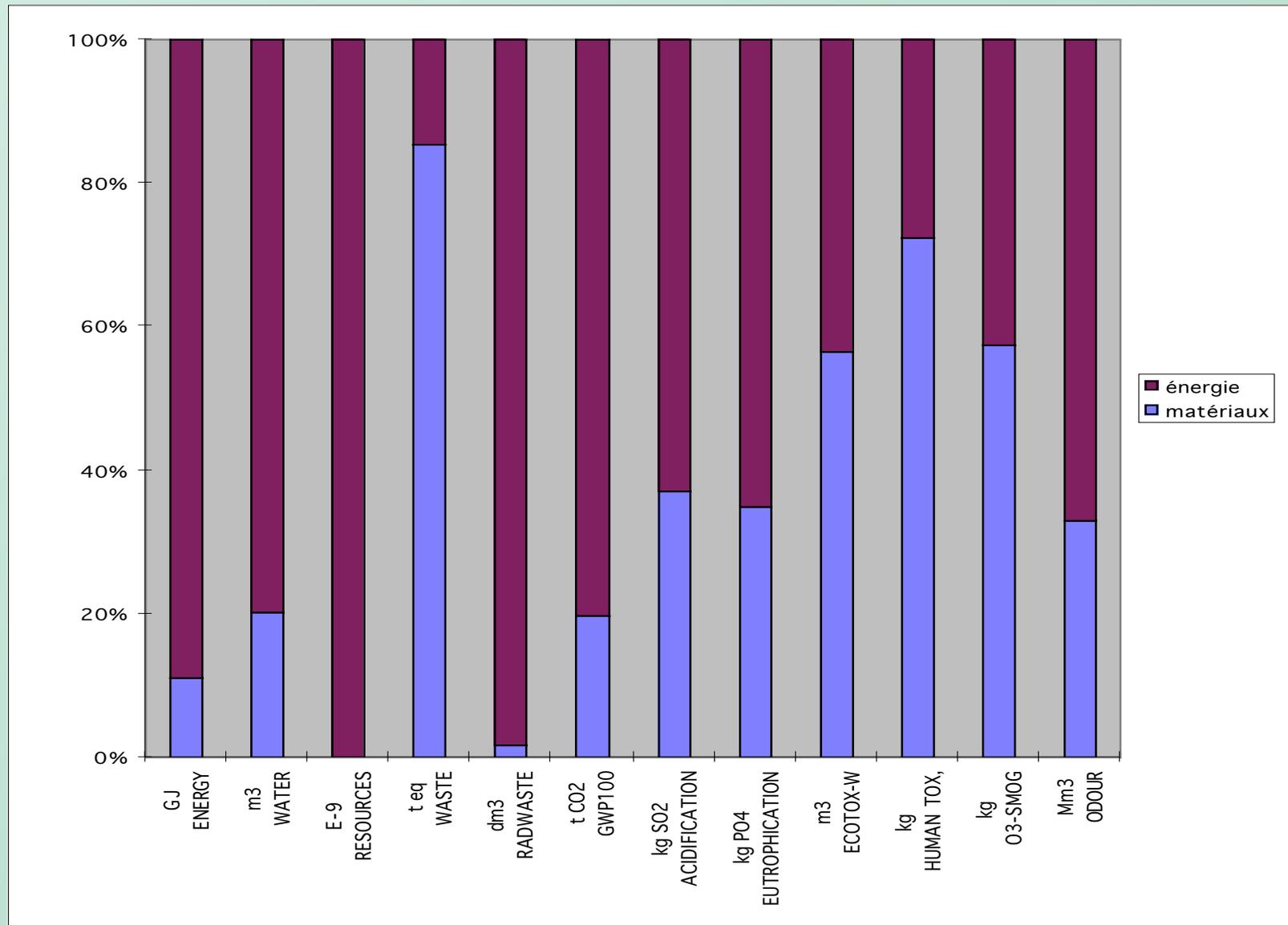
Phase d'interprétation

- ▶ **Exemple, comparaison de deux variantes A et B**
- ▶ **Impacts de A < ou > Impacts de B ?**
- ▶ **Différence > incertitudes ?**
- ▶ **Vrai pour tous les impacts ? Sinon, vrai pour les impacts les plus élevés en équivalents habitants ?**
Évaluation multi-critères à mener avec les autres acteurs (maître d'ouvrage, parties concernées)
- ▶ **Vrai si on change certaines hypothèses (durée de vie du bâtiment, scénario de fin de vie...) -> analyses de sensibilité**

Exemple d'application : contributeurs aux impacts



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

Conception et comportement des occupants

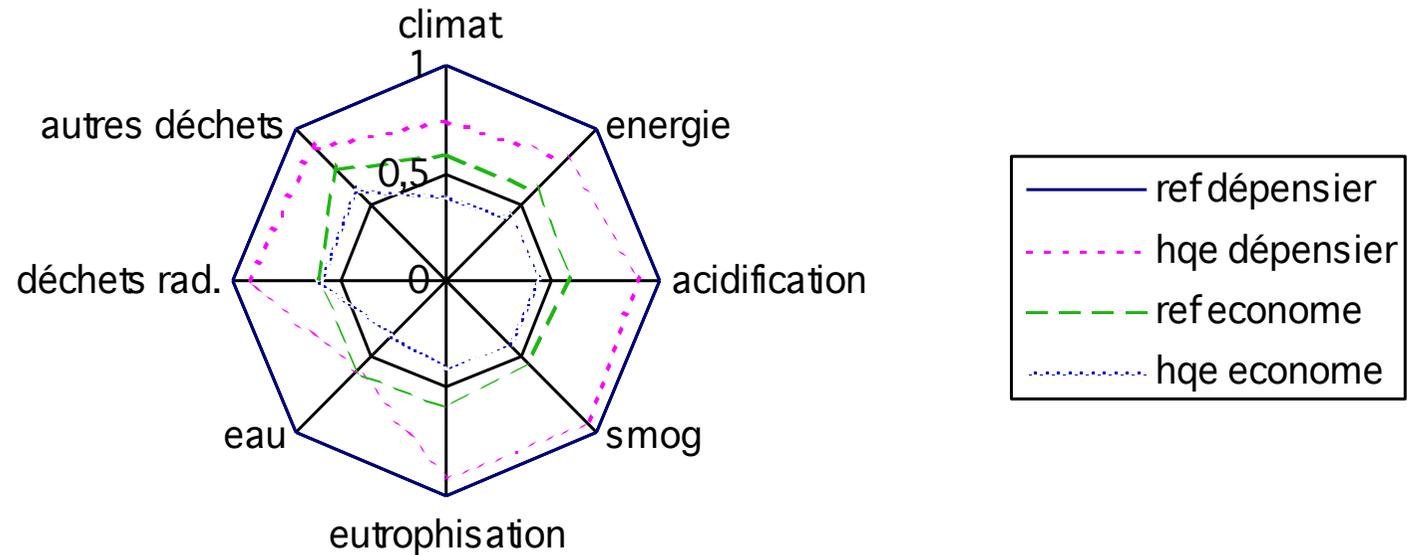
COMPORTEMENT DES OCCUPANTS : ECONOMOME/GASPILLEUR

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

Conception et comportement des occupants



Limites de la méthode d' ACV

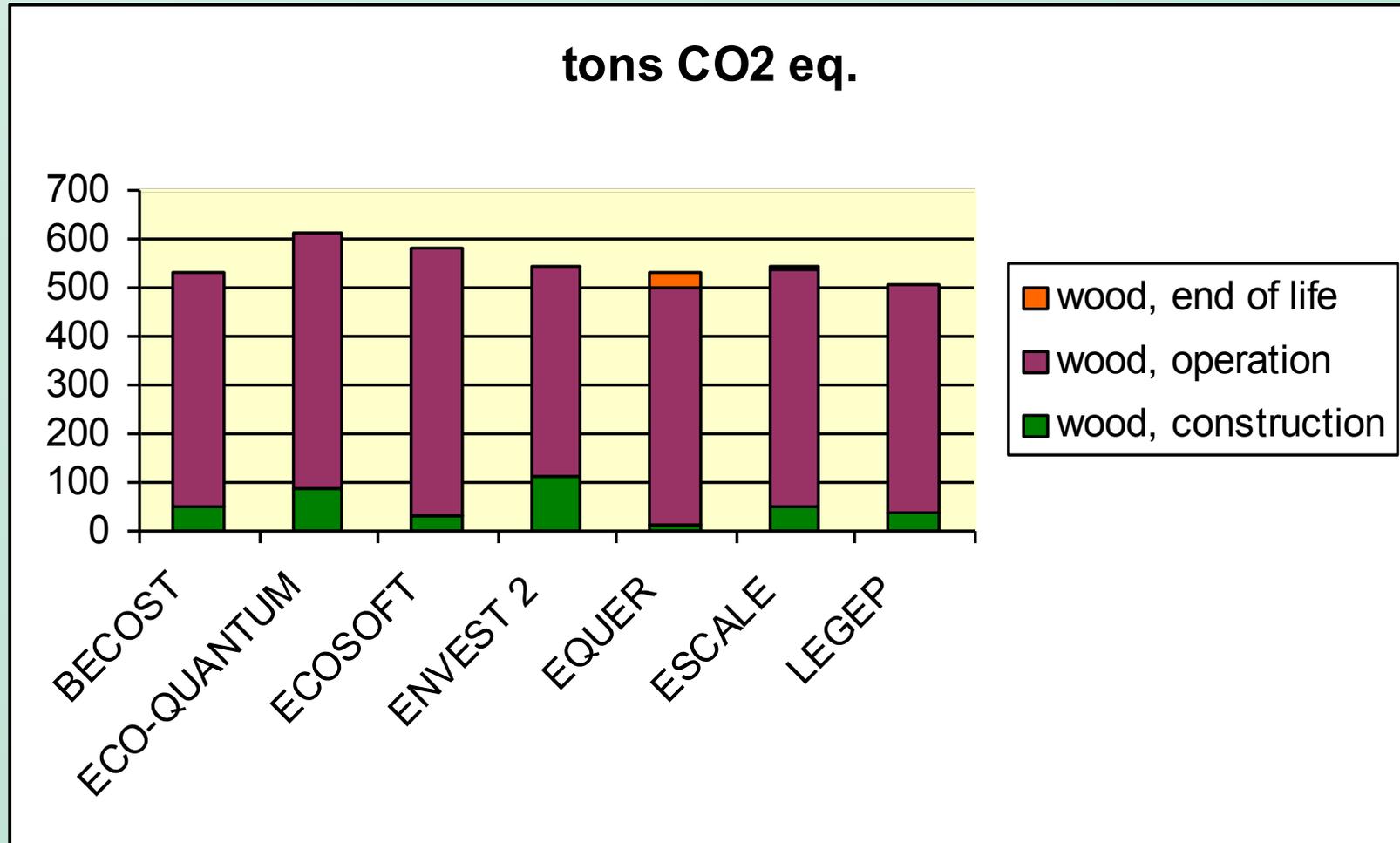
- ▶ **Manque de données sur certains produits / procédés**
- ▶ **incertitude sur le futur (gestion des déchets en fin de vie, mix électrique)**
- ▶ **incertitude sur les indicateurs (ex. 35% sur le GWP des gaz autres que le CO₂)**
- ▶ **analyse multicritères**
- ▶ **Non localisation des émissions, pistes : 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

Comparaison d'outils ACV européens, PRESCO



Écart \pm 10% sur le cycle de vie

Cf. <http://www.etn-presco.net/>

Complémentarité avec d'autres outils

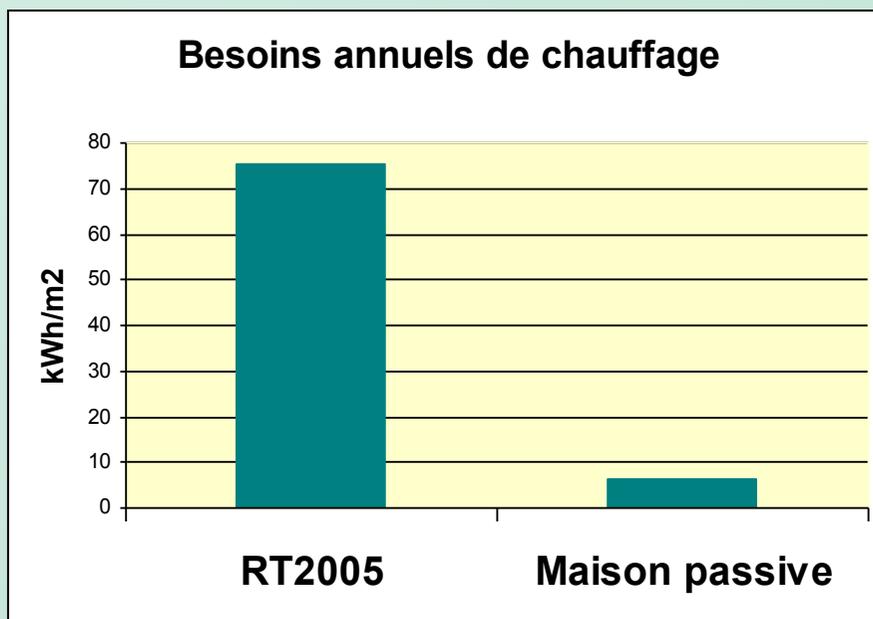
- ▶ Evaluation des impacts environnementaux locaux (ISO 14030)
- ▶ Emissions -> dispersion et dégradation -> concentrations -> exposition (doses) -> risques
- ▶ La plupart des impacts ont lieu hors du quartier (matériaux, énergie, eau, déchets), mais impact des transports, éventuellement incinération...
- ▶ Analyse de la biodiversité (trames vertes et bleues)

Exemple d'application : Formerie (Oise)



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

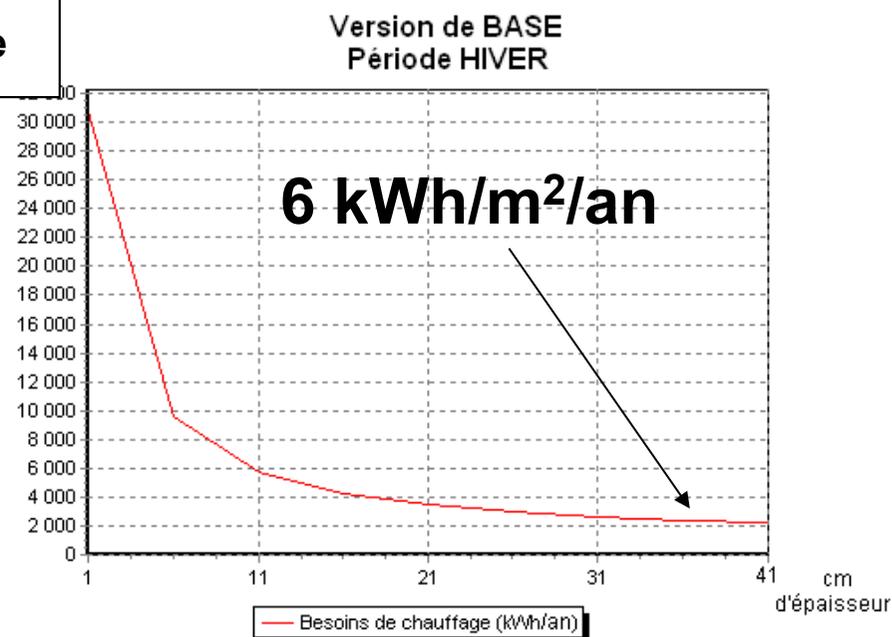
Résultats des simulations, hiver



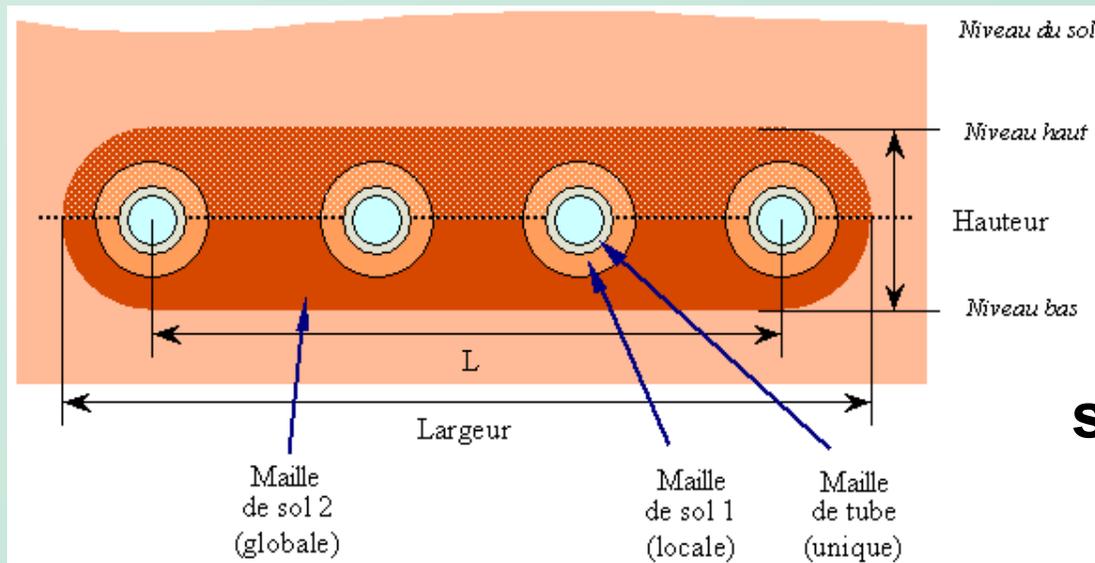
Comparaison à la référence RT2005 avec la même géométrie

Chauffage à 19°C

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

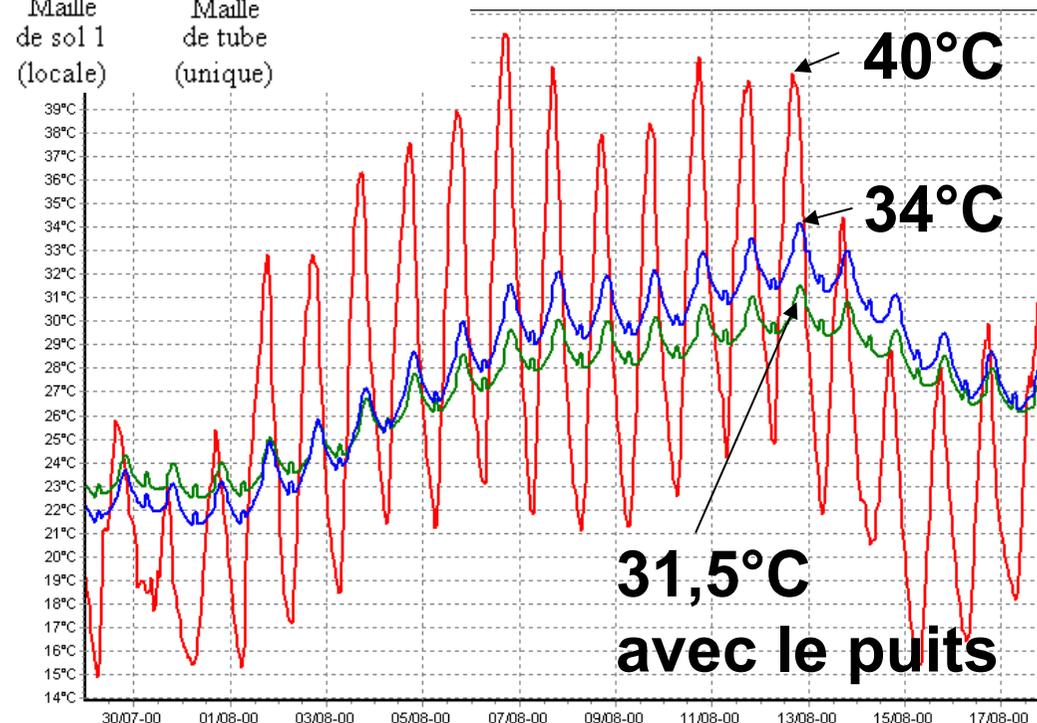


Résultats des simulations, été (canicule 2003)



Modélisation du puits canadien

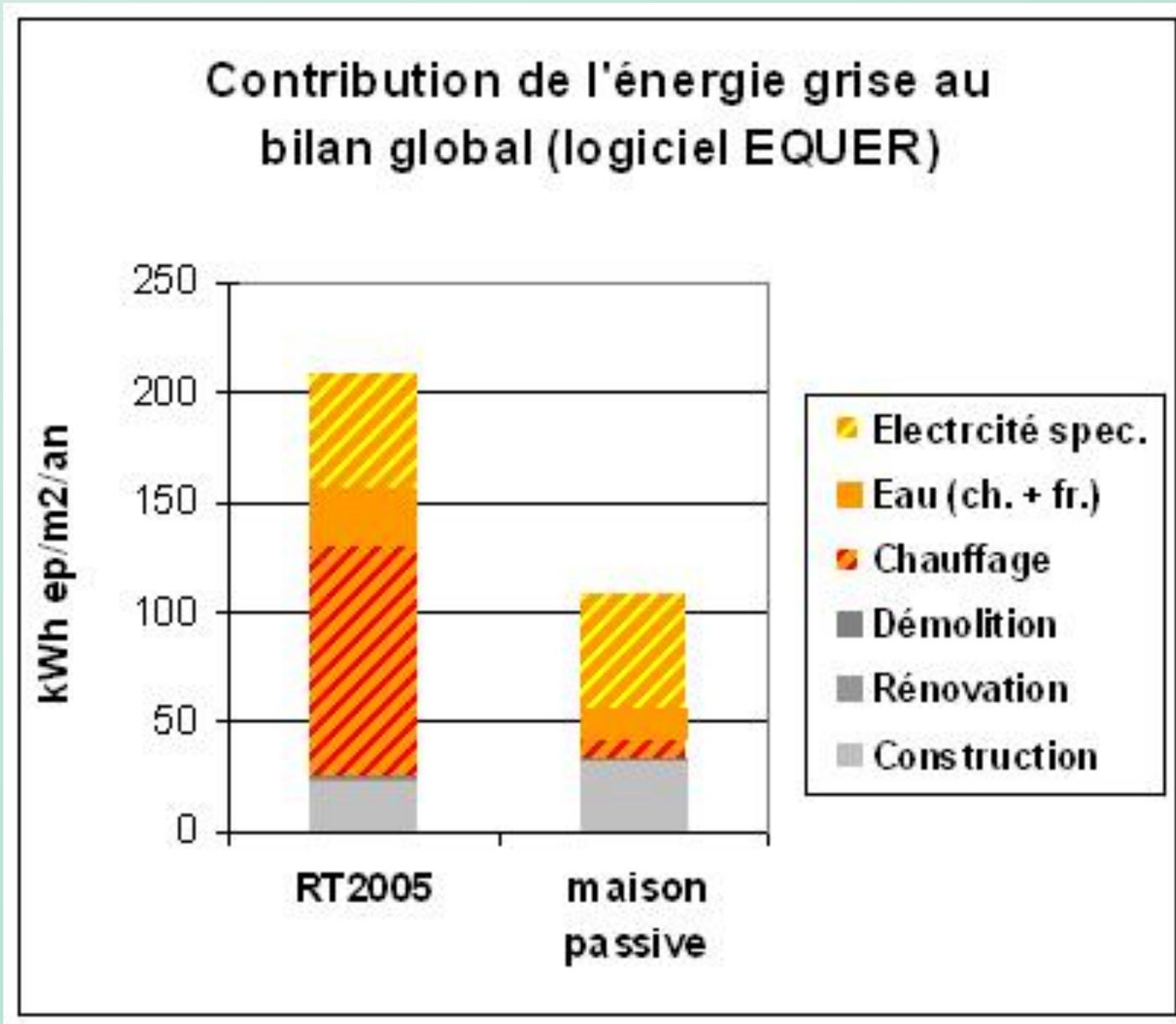
sans climatisation :



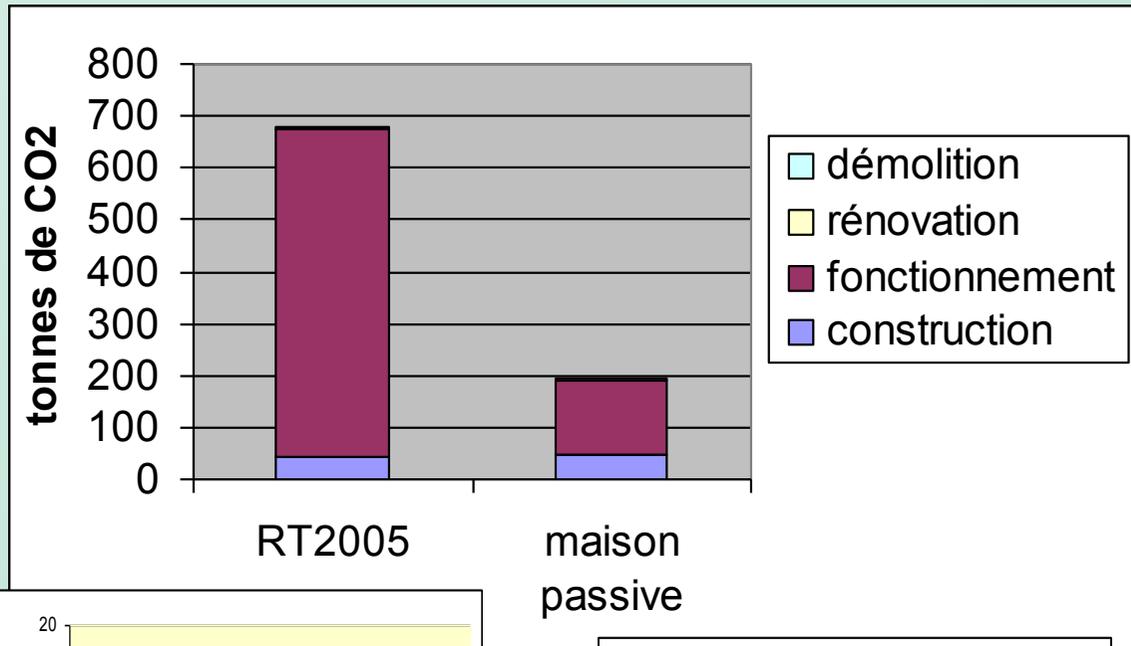
Températures en période caniculaire, degrés-jours $>27^{\circ}\text{C}$ divisés par 2 avec le puits canadien

Climatisation :
 $2,5 \text{ kWh/m}^2$

Contribution de l'énergie « grise » au bilan global

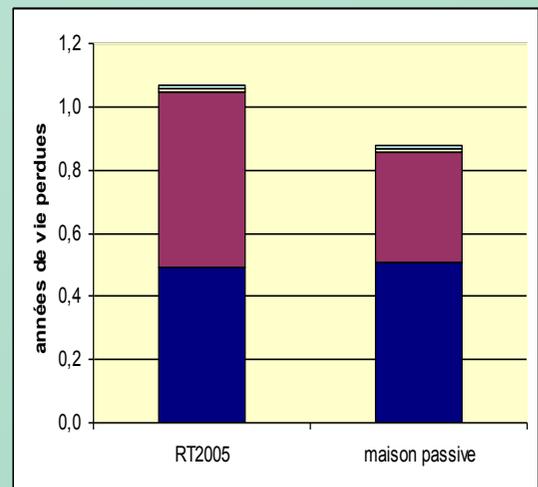
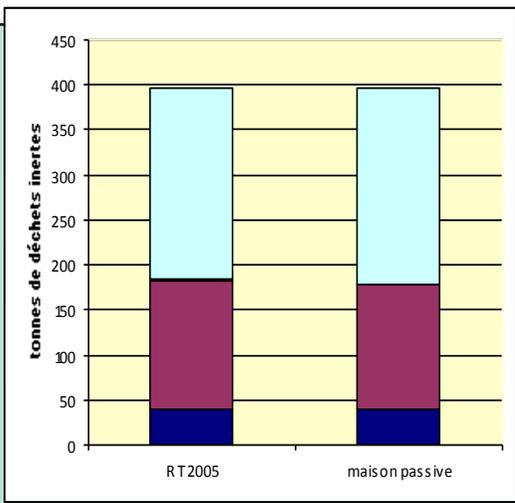
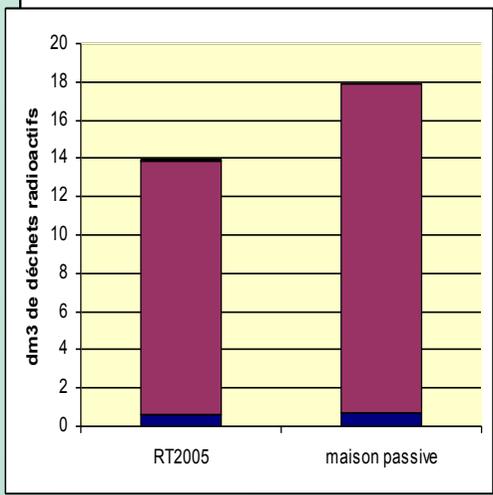


Résultats de l'analyse de cycle de vie



**2 maisons
Sur 80 ans**

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



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

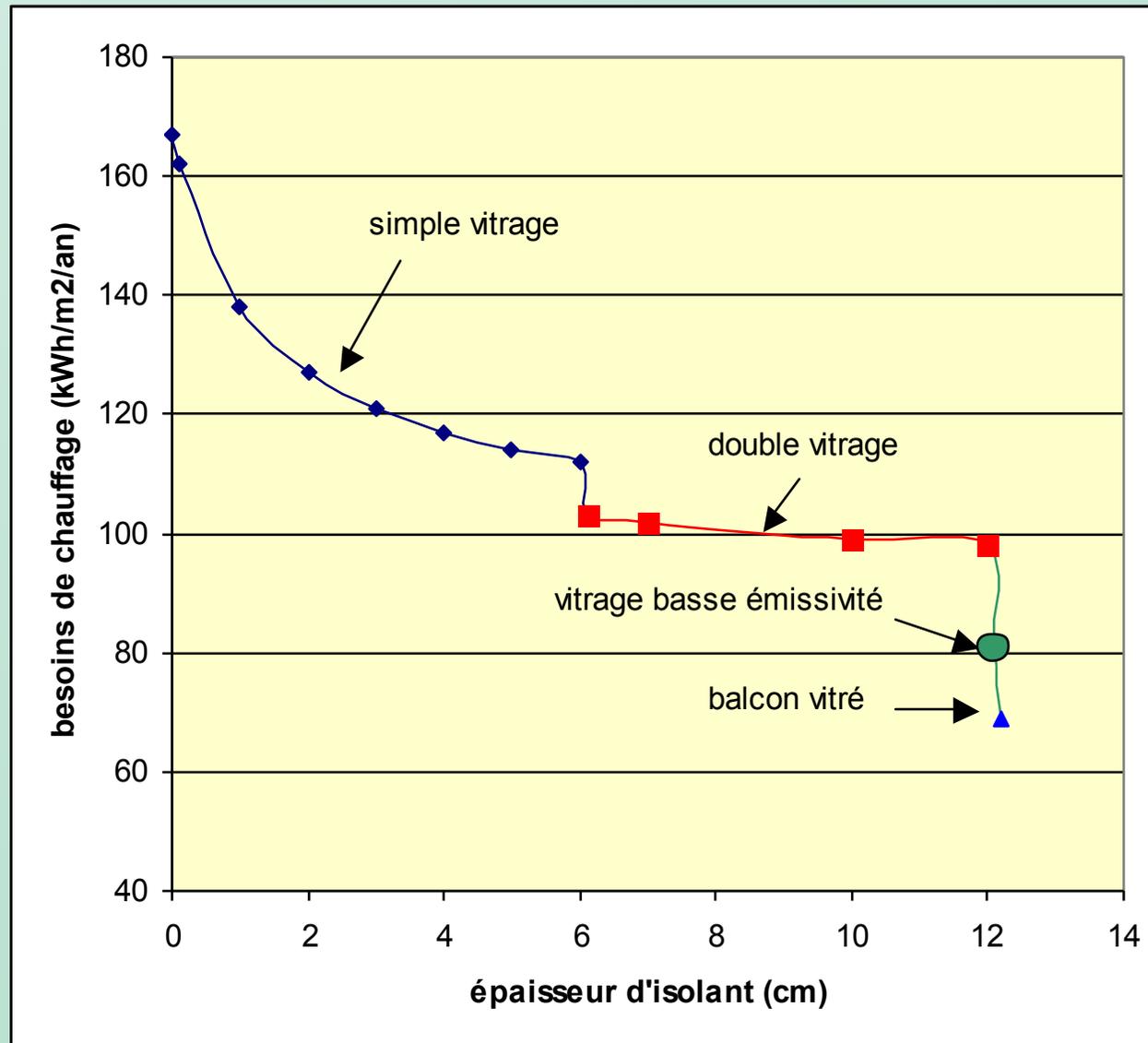
-> bilan positif en énergie primaire

Bâtiment HLM à Montreuil

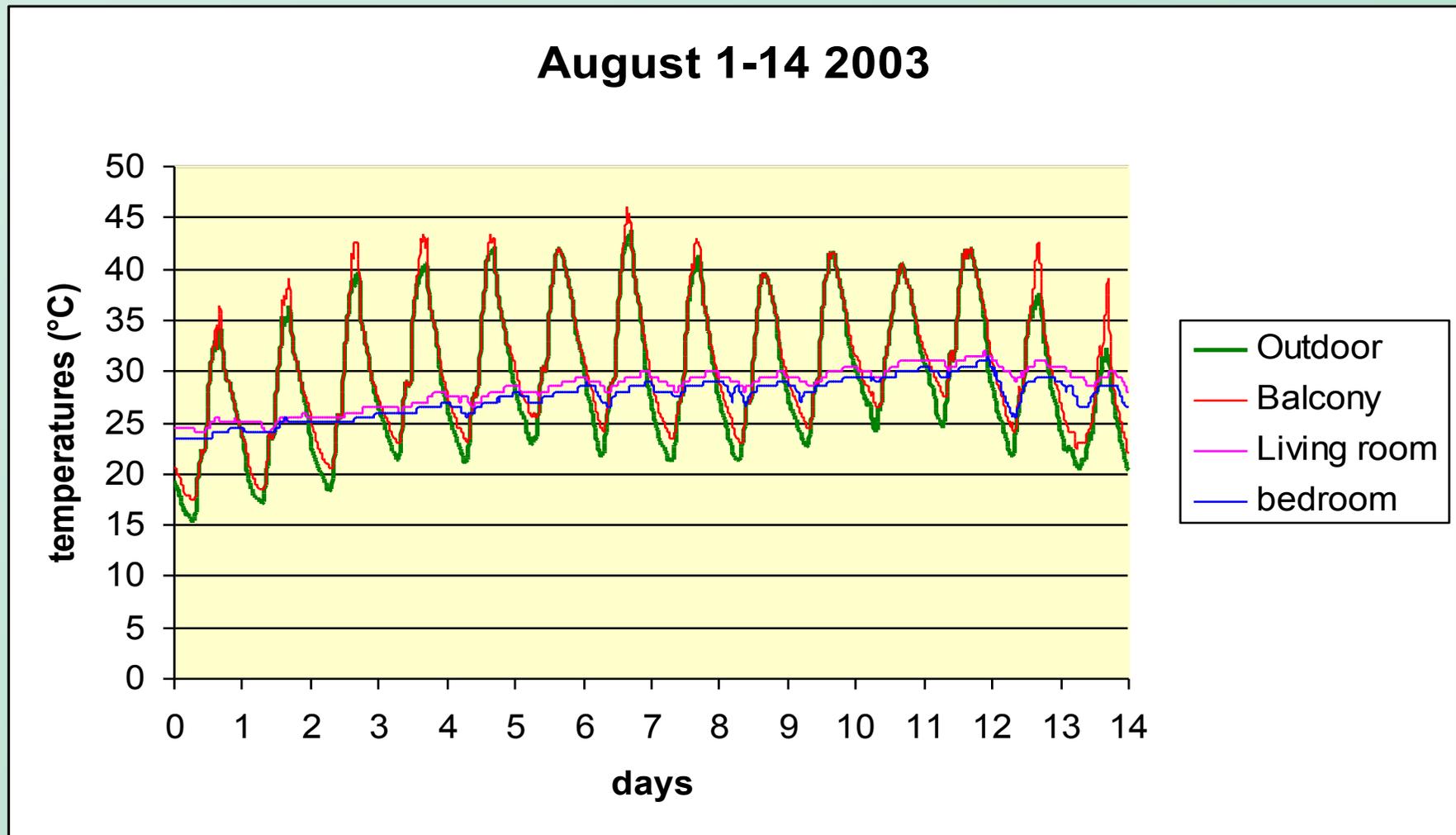


Construction : 1969, non isolé, simple vitrage
Besoins de chauffage : 160 kWh/m²/an

Résultats de l'analyse thermique

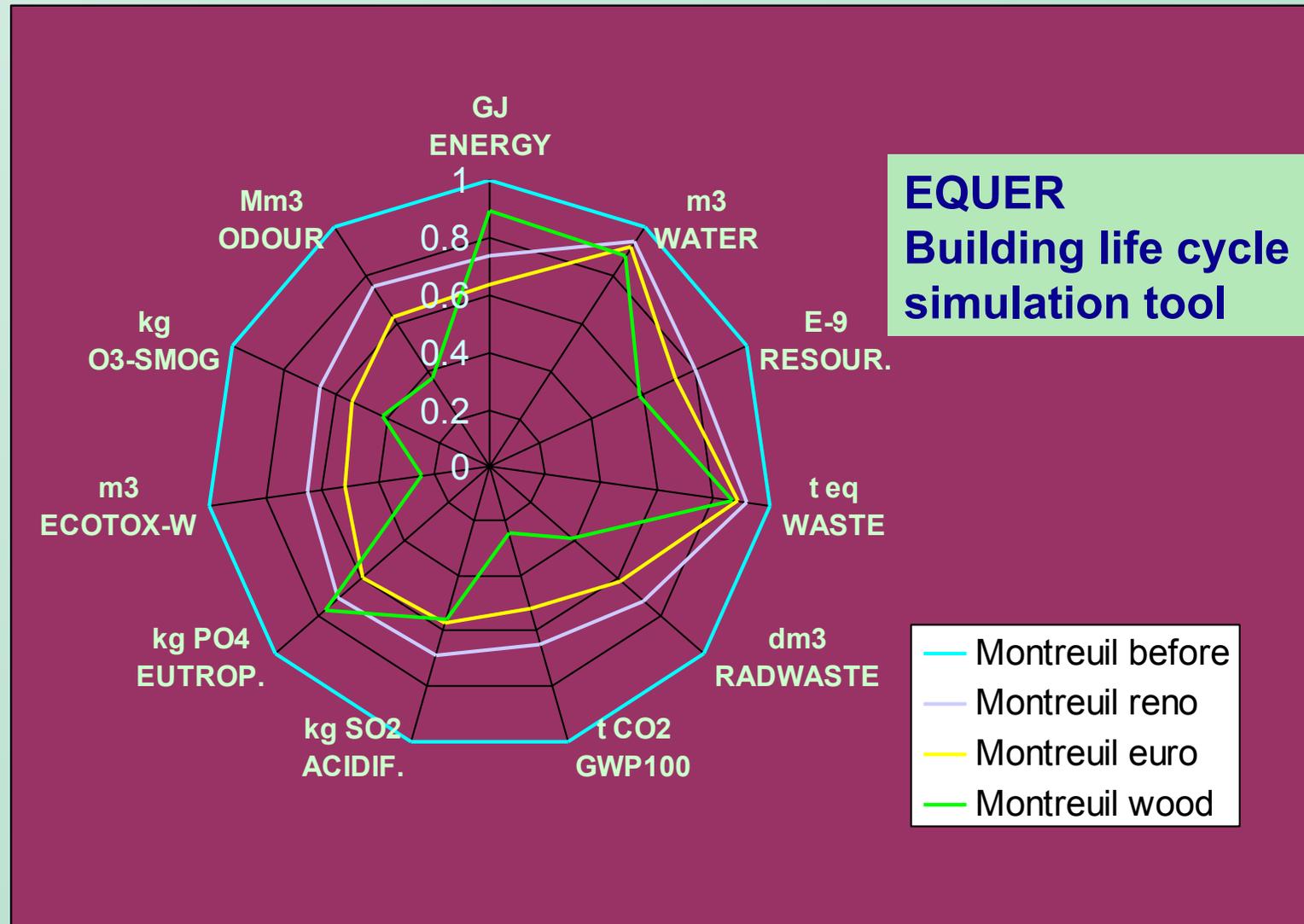


Canicule 2003 (15 000 décès)



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

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



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*

Projet européen e-co-housing

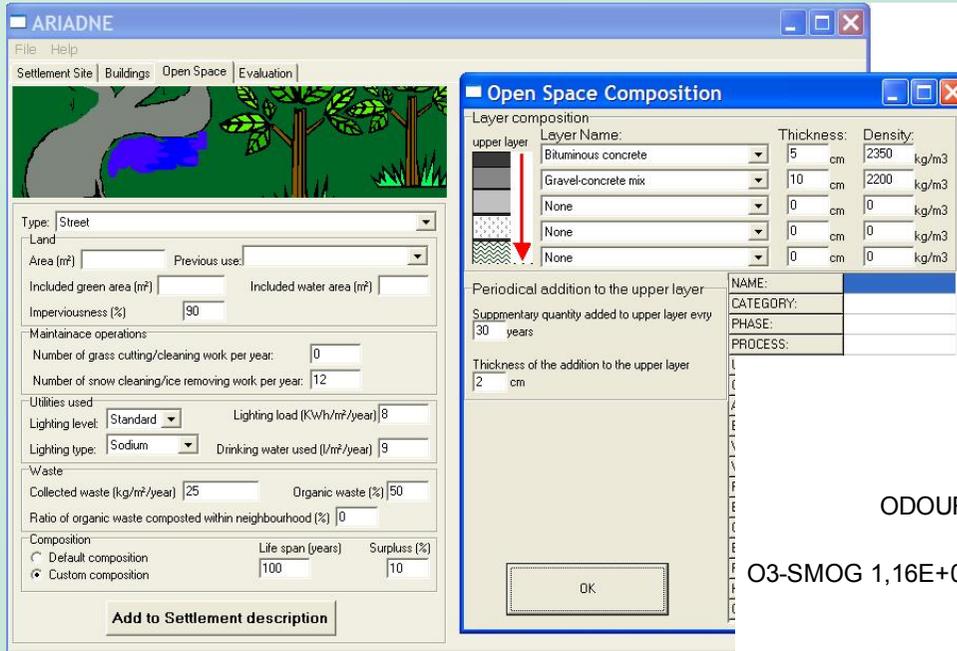


Montreuil (arch. J. Brûlé)

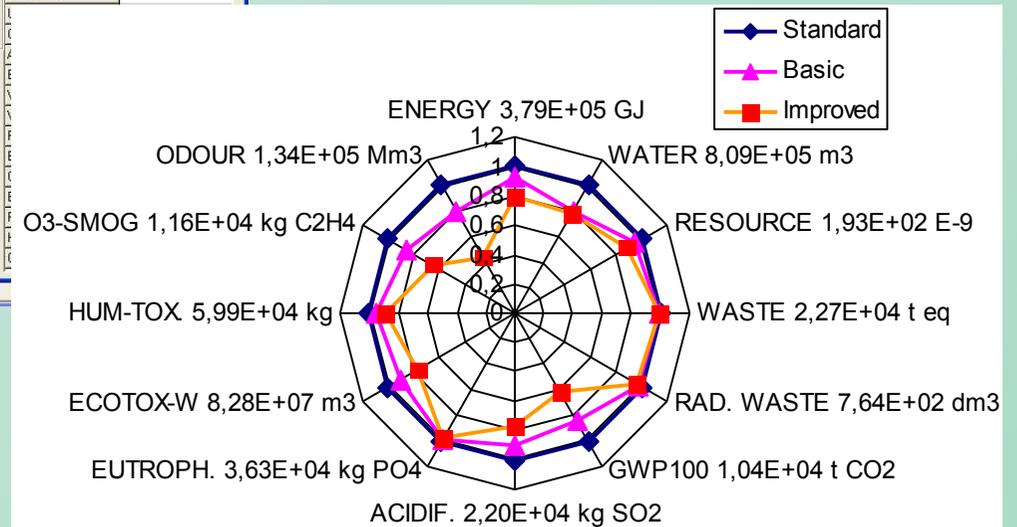
Trondheim (Norvège)



novaEquer, échelle des quartiers



Comparaison d'alternatives



Projet	Besoins de chauffage KWh/m2/an	Energie primaire GJ/m ² /an	Emissions de CO ₂ kg CO ₂ /m ² /an
Svartlamon	60	0.78	4
Montreuil	50	1.25	30
Dunaujvaros	30	0.93	35

Exemple d'application : Lyon Confluence



Îlots A, B et C, environ 60 000 m² de logements et 15 000 m² de bureaux, 70 000 m² d'espaces verts, rues, quais...

Quelle est la performance environnementale de ce projet, pourrait-on l'améliorer ?

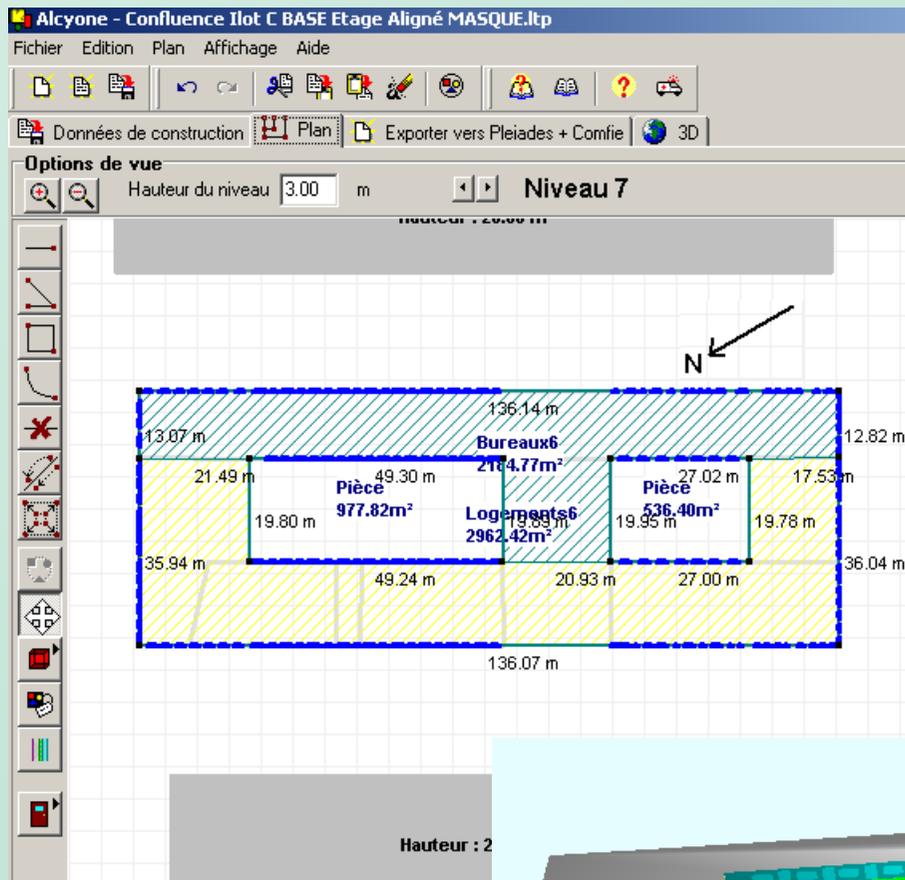
Objectifs fixés pr la SEM Lyon Confluence

- ▶ programme européen Concerto, 35% de subventions :
 - Réduction de 40% des besoins par rapport à la RT 2000,
 - consommation énergie finale par an : logements bureaux
 - chauffage 60 kWh / m² 40kWh / m²
 - électricité 25 kWh / m² 35 kWh / m²
 - eau chaude sanitaire 25 kWh / m² 5 kWh / m²
 - besoins couverts à 80% par les énergies renouvelables
- ▶ émissions de CO₂ < 7 kg/m², déchets radioactifs < 2 g/m²
- ▶ confort et la qualité de vie (confort thermique d'hiver et d'été, confort acoustique, visuel et olfactif, maîtrise des risques sur la santé et aménagement des espaces extérieurs),

Démarche adoptée

- ▶ **Projet, selon les objectifs du programme européen CONCERTO : RT 2000 – 40%, 80% de chaleur et 50% d' électricité (parties communes) par ENR**
- ▶ **Standard actuel : réglementation thermique, matériaux et techniques usuels**
- ▶ **Meilleures pratiques : sur-isolation, triple vitrage, traitement des ponts thermiques, double flux (« maisons passives »)**

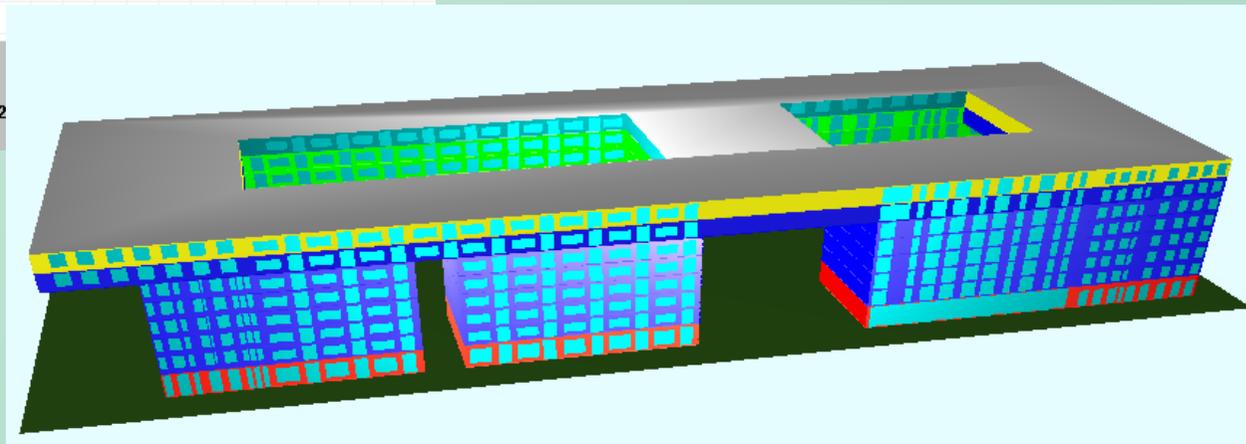
Modélisation des bâtiments, logiciel ALCYONE



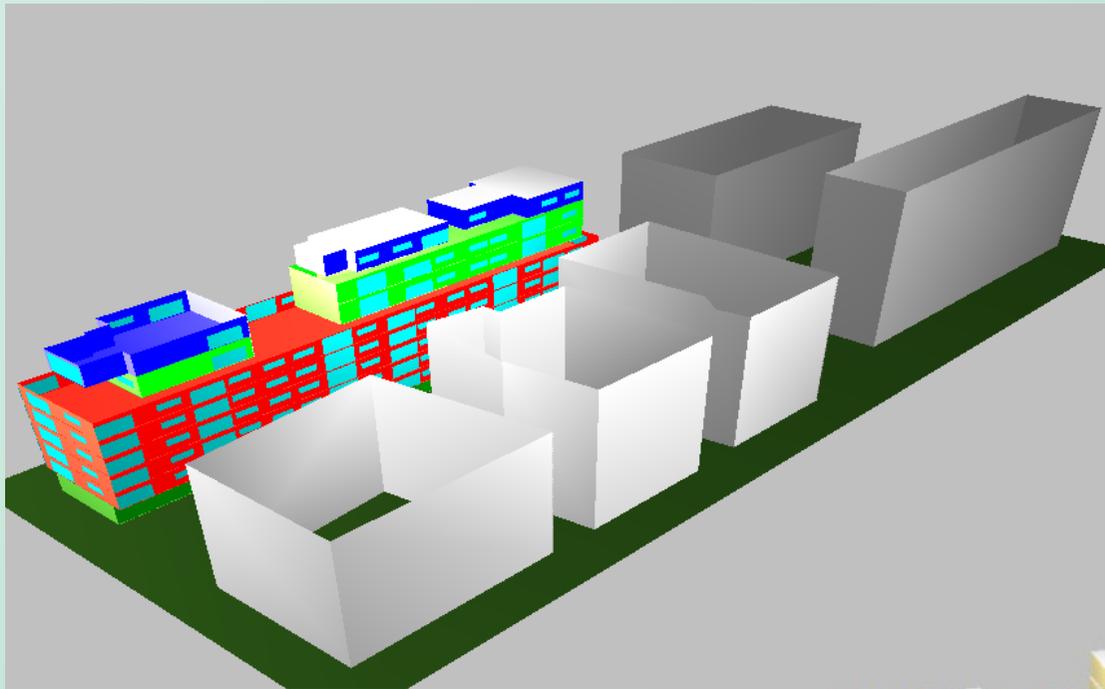
www.izuba.fr

plans par niveaux

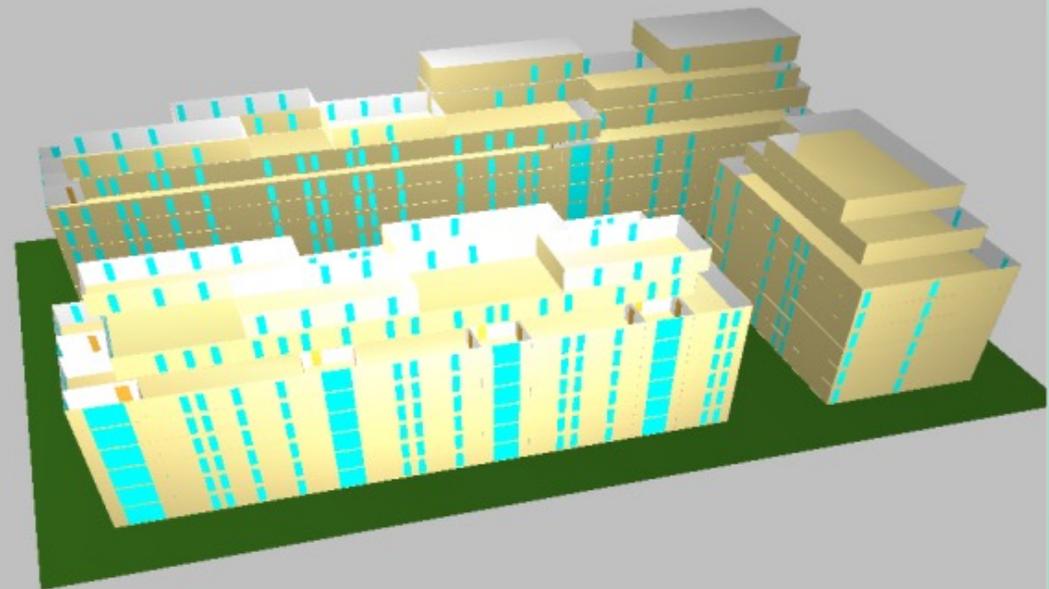
-> vue 3D



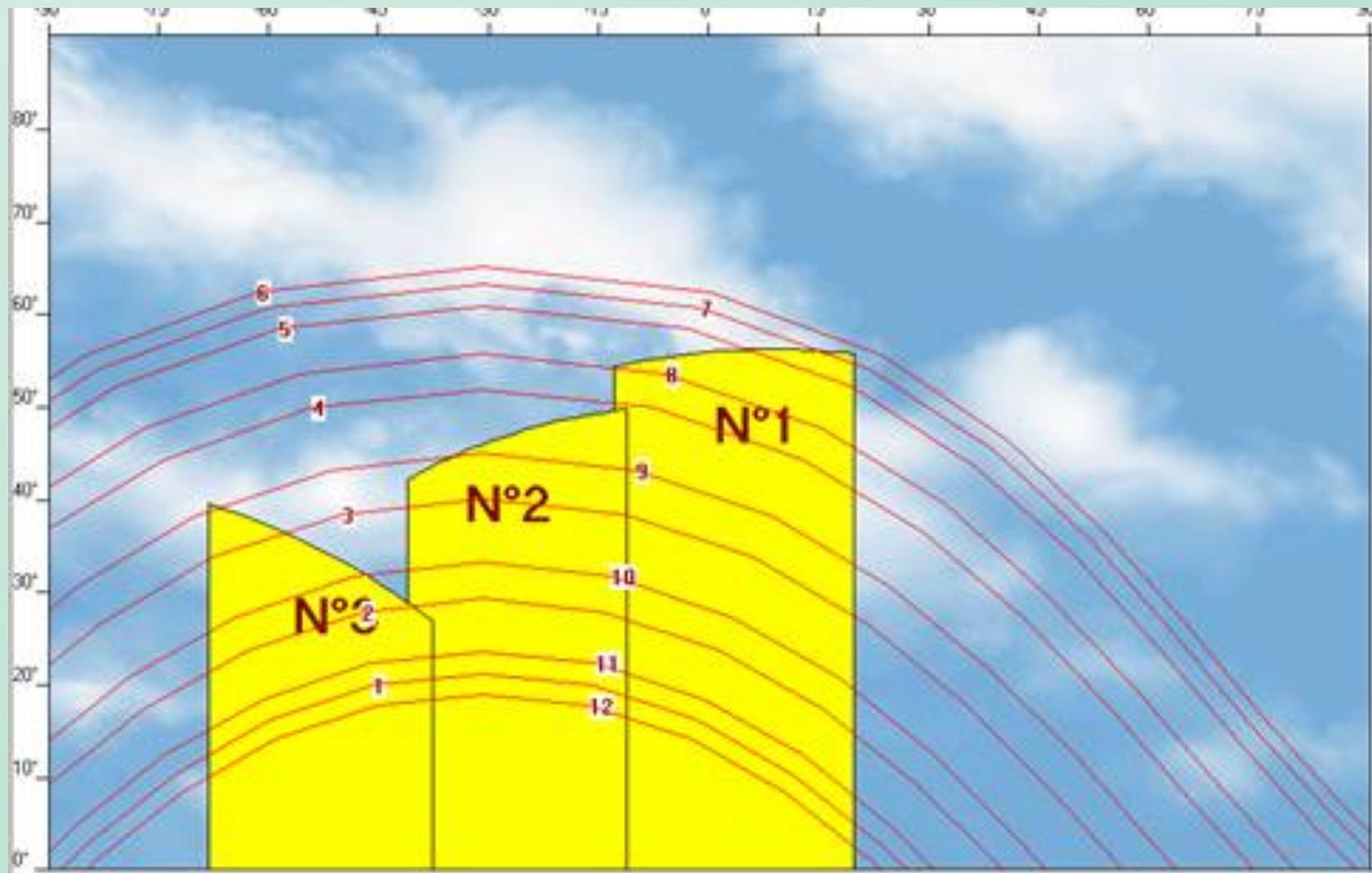
3 îlots, 20 bâtiments



**Prise en compte
des masques
générés par les
bâtiments
adjacents**

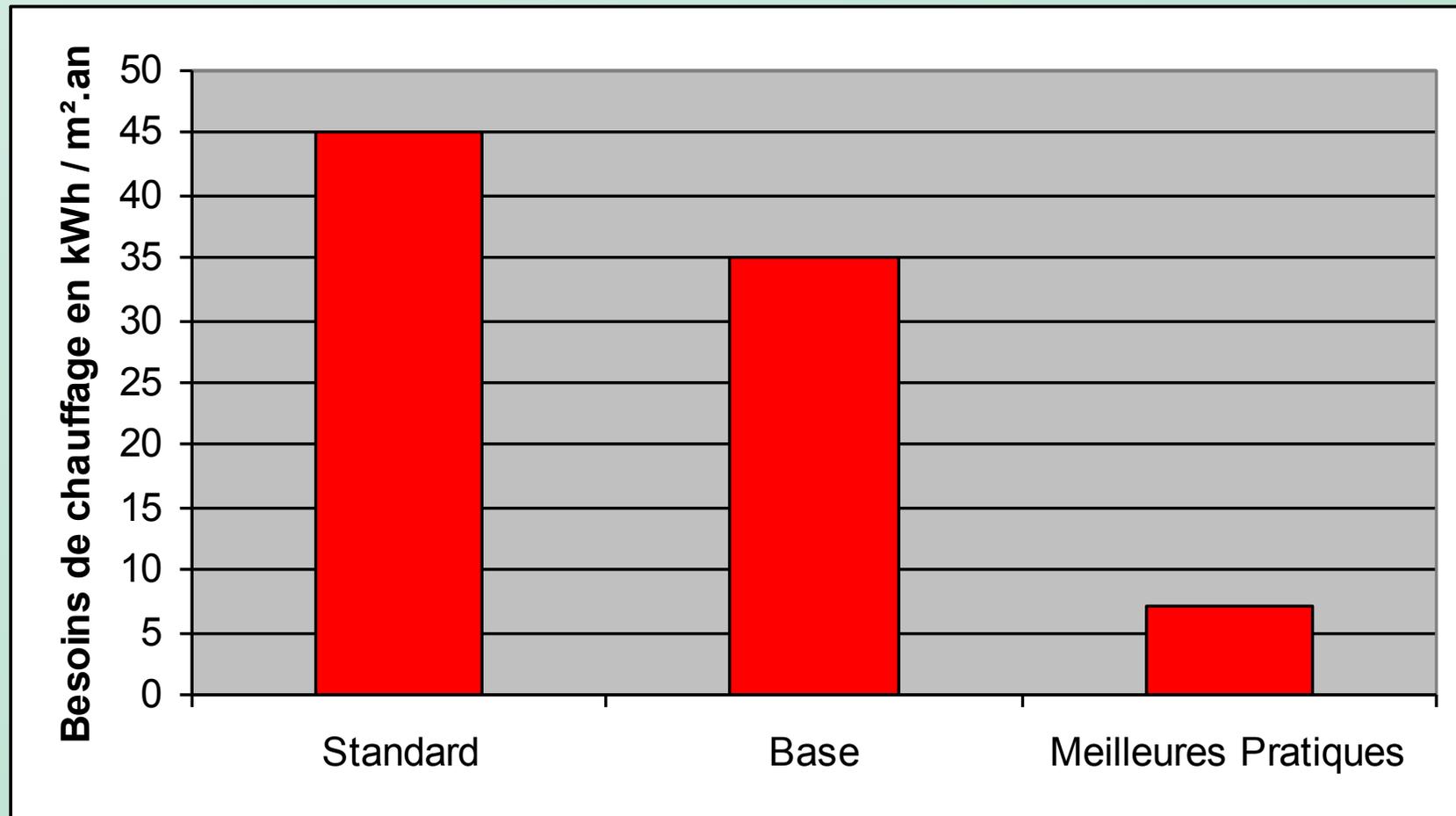


Prise en compte des masques



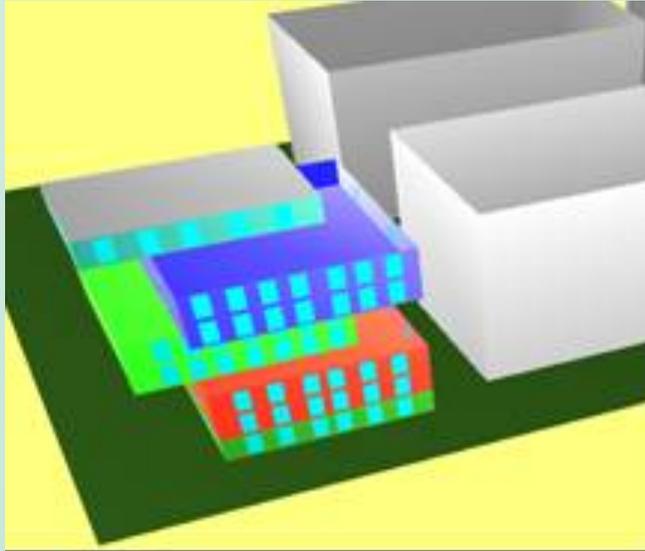
Ilot A, Masques engendrés par les bâtiment A, B et C sur la façade sud du bâtiment D

Résultats de l'analyse thermique, logiciel COMFIE



**Moyenne sur l'ensemble des bâtiments
Variation de 1 à 3 selon l'architecture
(bâtiments 1 et 10 de l'îlot B, mêmes technologies)**

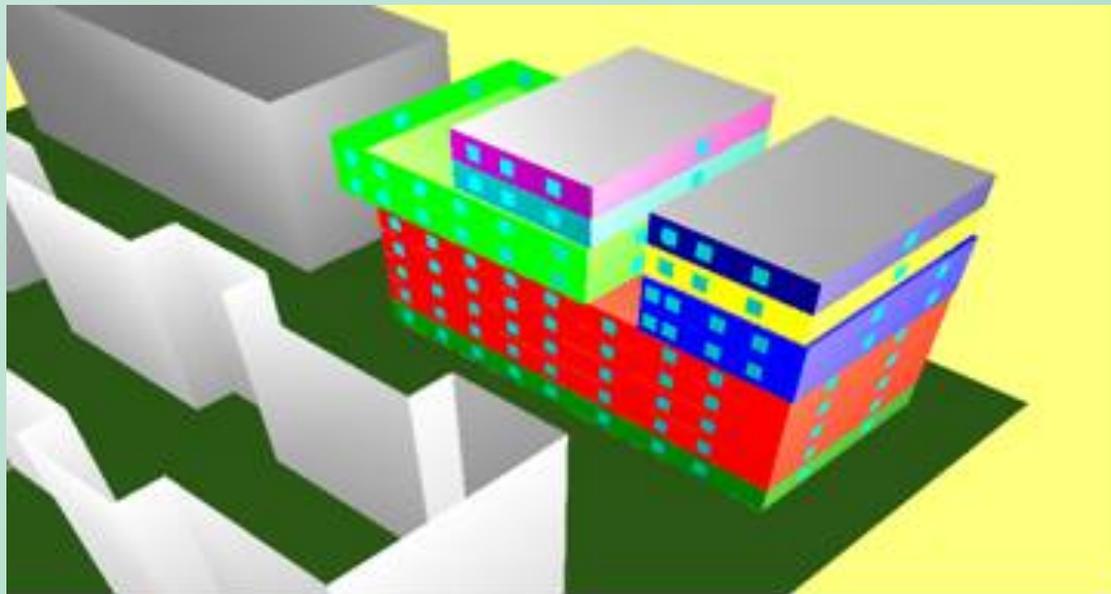
Différentes morphologies, îlot B



**Bâtiment 1, peu compact,
Exposition Nord**

**Variation de 1 à 3 selon
l'architecture : bâtiments 1 et 10
(mêmes technologies)**

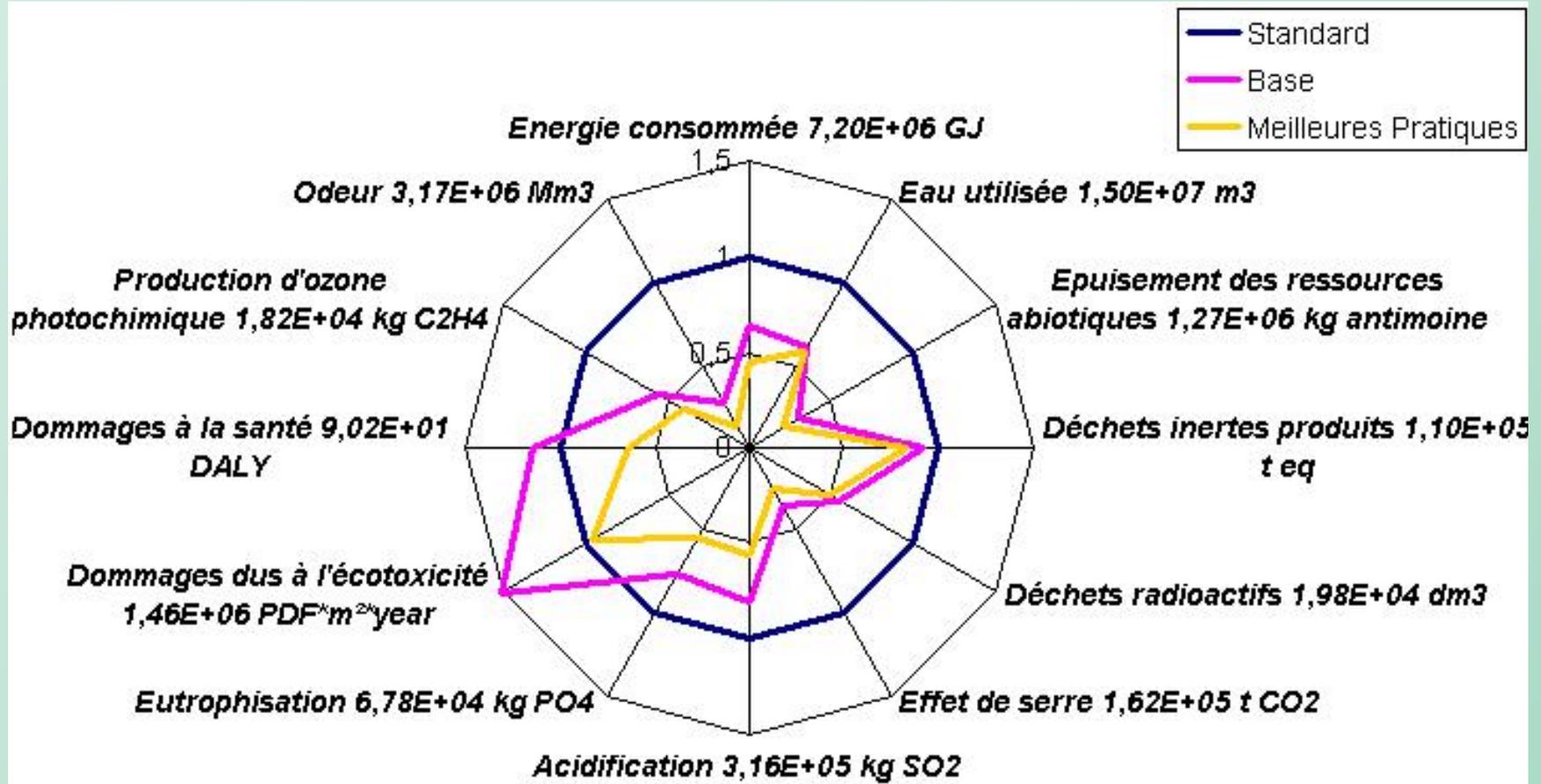
Bâtiment 10, orienté Sud



Principales hypothèses de l'analyse de cycle de vie

- ▶ Variante standard chauffée au gaz, 80% bois et 20% gaz dans les 2 autres variantes
- ▶ Électricité du réseau en standard, 50% photovoltaïque dans les 2 autres variantes
- ▶ 40% d'économie d'eau et 40% ECS solaire
- ▶ Éclairage public au sodium
- ▶ Quais et dalle ouest de l'îlot C plus perméables
- ▶ Rétention de 90% des eaux pluviales, utilisation pour l'arrosage des espaces verts

Résultats de l'analyse de cycle de vie



Base : impacts environnementaux réduits sauf éco-toxicité et toxicité humaine (chaudière bois)
Meilleures pratiques, réduction de tous les impacts

Exemple d'application : Cité Descartes (77)

- ▶ Etude d'un nouvel îlot au sein de la Cité Descartes à Marne la Vallée
- ▶ 23 000 m² de logements, 10 000 m² de bureaux, 5 000 m² de commerces, école 2 000 m², espaces verts : 38 000 m², voiries : 13 000 m²
- ▶ Objectif : aide à la conception en phase amont (plan masse, esquisse)
- ▶ Situer les performances par rapport aux meilleures pratiques : quartier Vauban, quartier basse énergie ou à énergie positive ?

Comparaison à des références

**Quartier Energie Positive
Positive
(Architecte Rolf Disch)**



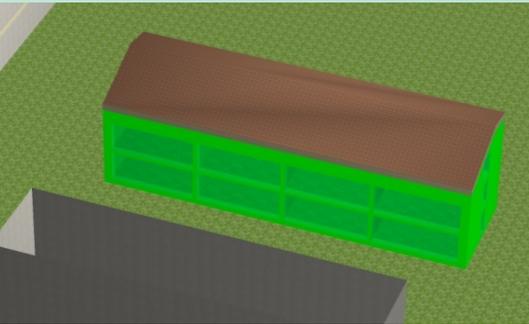
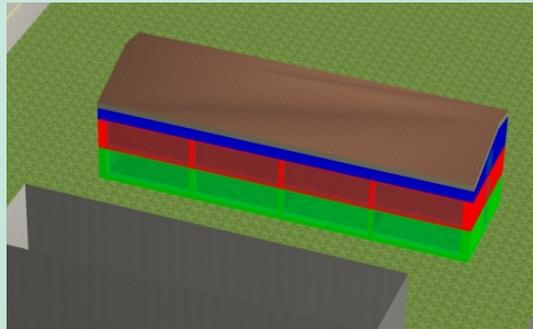
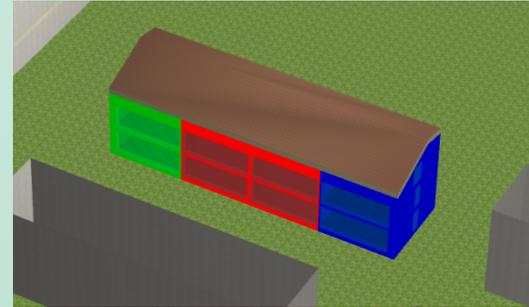
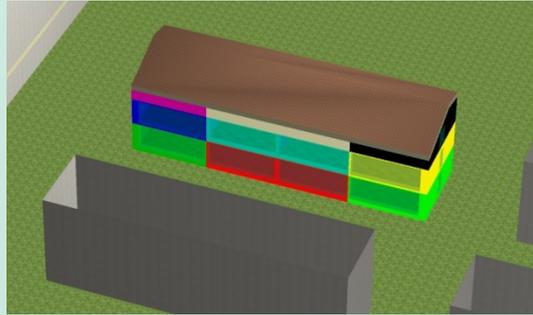
**Quartier Basse Consommation
(Quartier Vauban)**



Cité Descartes



Découpage en zones



	1 zone	3 zones (par étages)	3 zones (par colonnes)
Besoins de chauffage	-12%	-3%	-10%

Comparaison par rapport au modèle à 9 zones

Principales hypothèses de l'analyse de cycle de vie

Durée de l'analyse: 80 ans

Durée de vie des portes et fenêtres: 30 ans, revêtements: 10 ans, solaire : 25 ans

Matériaux considérés inertes en fin de vie sauf les métaux qui sont recyclés

Surplus lors du chantier: 5%

Distance de transport : 100 km (fabrication -> site), 20 km (site -> décharge)

Mix électrique français : nucléaire : 78%, hydroélectrique : 14%, gaz : 4%,
charbon : 4%, fuel : 0%, Pertes du réseau: 9%

Chauffage urbain (alimenté par une cogénération, rendement : 61% thermique et
26% électrique), Gaz : 20%, Bois : 80%, assure le chauffage et 50% de l'ECS
(50% solaire thermique)

Climatisation (bureaux): COP=3, rendement PV : 15% (et onduleur : 90%)

Rendement du réseau d'eau: 80%

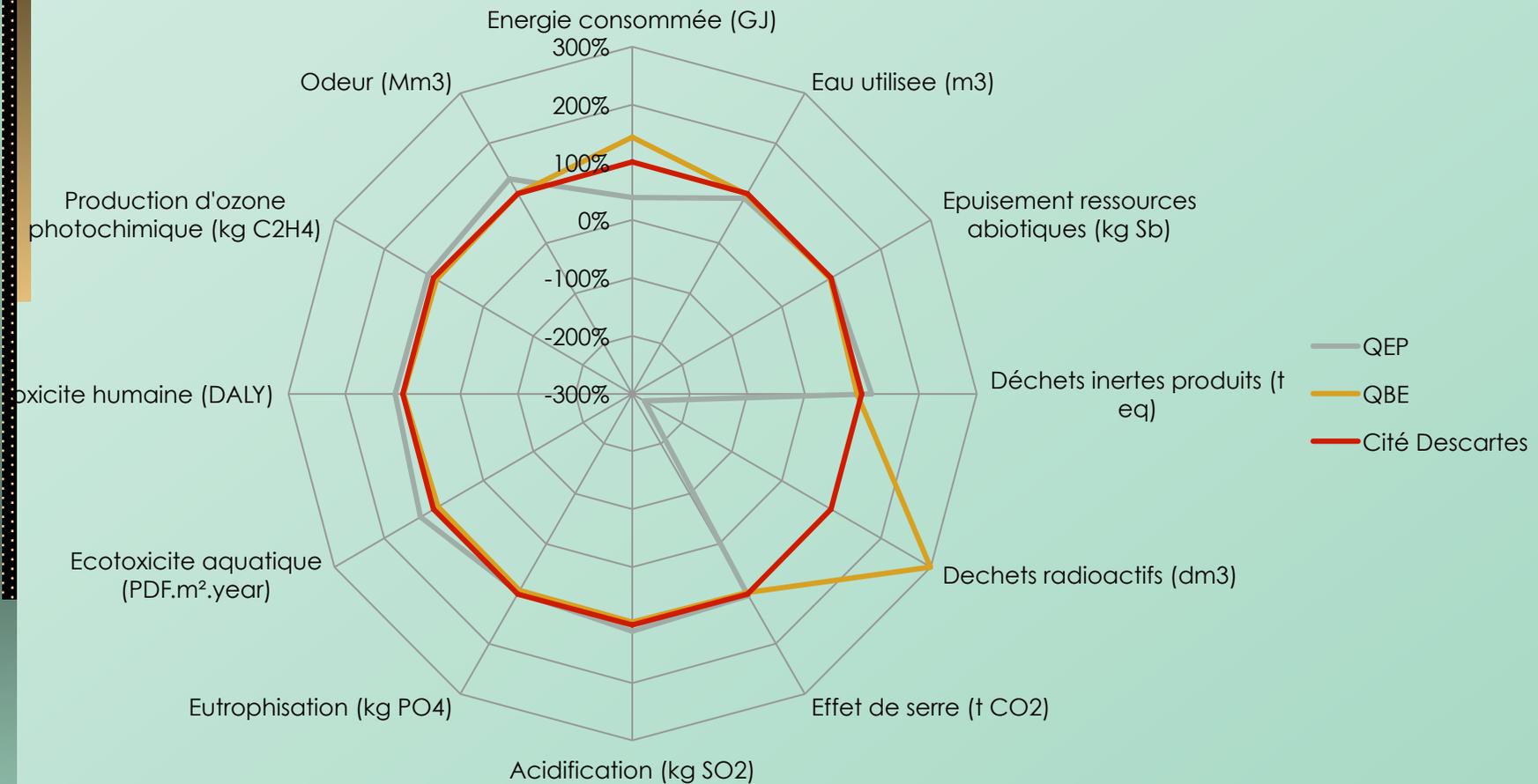
Besoins ECS en l/pers/j: Logements : 40, Bureaux : 4, Commerces : 0, Ecole : 10

Besoins en eau froide en l/pers/j: Logements : 100, Bureaux : 50, Commerces :
40, Ecole : 30

Déchets et transports non pris en compte (identiques pour toutes les variantes)

Résultats de l'analyse de cycle de vie

Comparatif global des 3 quartiers sur les 12 indicateurs

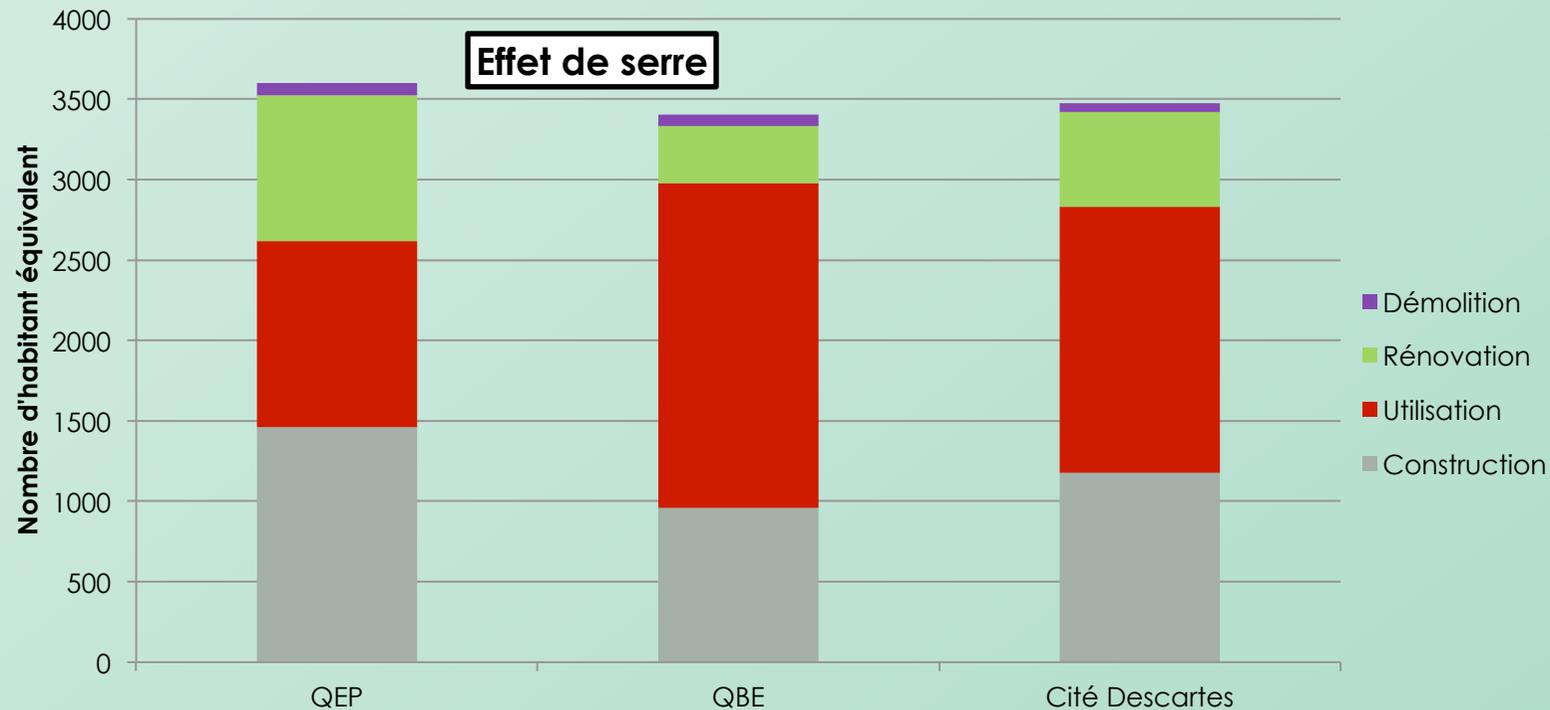


Résultats, énergie primaire



- Utilisation = 12% du total pour le QEP contre 87% pour le QBE et 74% pour la Cité Descartes
- QEP: 23 kWh EP/m²/an (énergie grise, éclairage public...)
- QBE: 107 kWh EP/m²/an
- Cité Descartes: 75 kWh EP/m²/an

Résultats, effet de serre



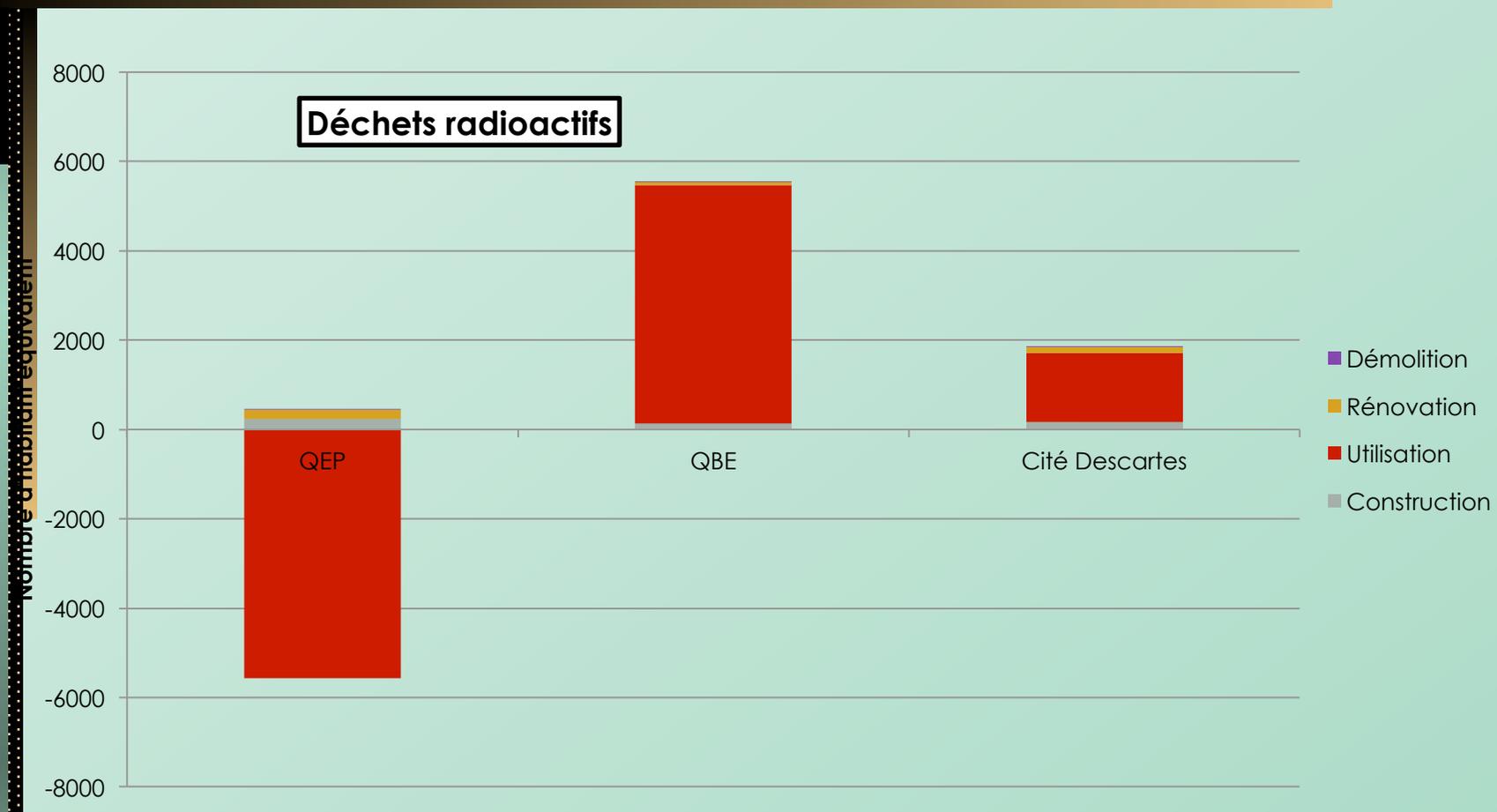
- Importance du poids des phases de construction et de rénovation (66% pour le QEP, 39% pour le QBE et 51% pour la Cité Descartes)

- QEP: 6 kg CO₂ eq/m²/an

- QBE: 8 kg CO₂ eq/m²/an

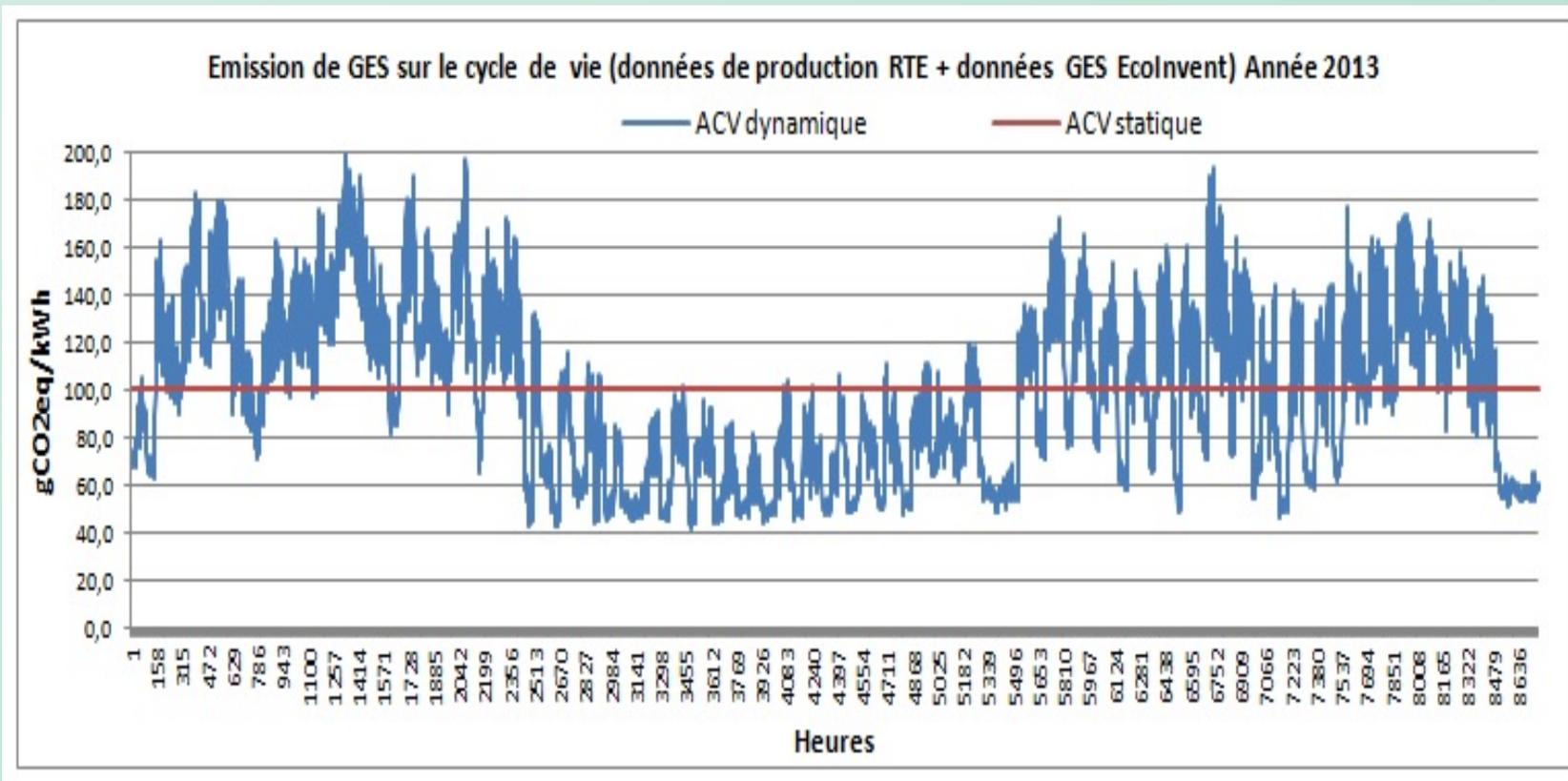
Cité Descartes: 8 kg CO₂ eq/m²/an

Résultats, déchets radioactifs



- Impact négatif pour le QEP
- Niveaux globalement faibles même pour les autres quartiers
5800 habitants équivalent sur 80 ans -> 75 habitants

ACV Dynamique (thèse G. Herfray, 2011)



Exemple : variation temporelle du mix de production d'électricité, et des impacts correspondants
Mix par usage ? Mix marginal ?

Recherches en cours : évaluation des impacts

- ▶ European Commission Joint Research Centre, International Reference Life Cycle Data System (ILCD), General guide for life cycle assessment
- ▶ Rosenbaum et al., USEtox - the UNEP-SETAC toxicity model: recommended characterisation factors for human toxicity and freshwater ecotoxicity in life cycle impact assessment
- ▶ Hellweg et al., Integrating indoor air pollutant exposure within life cycle impact assessment
- ▶ Van Caneghem et al., Abiotic depletion due to resource consumption in a steelwork assessed by five different methods
- ▶ Brentrup et al., Life Cycle Impact Assessment of Land Use Based on the Hemeroby Concept
- ▶ Bösch et al., Applying Cumulative Exergy Demand (CExD) Indicators to the ecoinvent Database

Recherches en cours : fiabilité des modèles

▶ **Fiabilité, incertitudes et sensibilité en ACV**

- ▶ Padey et al, Understanding LCA results variability developing global sensitivity analysis with sobol indices: a first application to photovoltaic systems
- ▶ Weidema, Uncertainty reduction in consequential LCA models
- ▶ Lloyd and Ries, Characterizing, Propagating, and Analyzing Uncertainty in Life-Cycle Assessment
- ▶ Williams et al., Hybrid Framework for Managing Uncertainty in Life Cycle Inventories
- ▶ Gregory, A methodology for analyzing uncertainty in comparative life cycle assessments: a case study of hand drying systems
- ▶ Zamagni et al., Main R&D lines to improve reliability, significance and usability of standardised LCA

▶ **Calibrage des ACV**

- ▶ Collinge et al., Enabling dynamic life cycle assessment of buildings with wireless sensor networks
- ▶ Russell-Smith and Lepech, Dynamic Life Cycle Assessment of Building Design and Retrofit Processes

Recherches en cours : variation temporelle

▶ **ACV dynamique**

- ▶ Ben Amor et al., Implications of Modeling Temporal Aspects of Electricity Supply: LCA of renewable distributed generation in the Northeastern American market
- ▶ Herfray G. et al., Evaluation of electricity related impacts using a dynamic LCA model
- ▶ Pehnt, Dynamic life cycle assessment (LCA) of renewable energy technologies
- ▶ Levasseur et al., Considering Time in LCA: Dynamic LCA and Its Application to Global Warming Impact Assessments
- ▶ Bergman et al., Developing a dynamic life cycle carbon emission methodology for wood building products in the United States

▶ **ACV conséquentielle**

- ▶ Weidema et al., Marginal production technologies for life cycle inventories
- ▶ Finnveden G., On the limitations of Life Cycle Assessment and Environmental Systems Analysis Tools in General
- ▶ Finnveden G. et al., Recent developments in Life Cycle Assessment

Recherches en cours : méthodologie

Optimisation

Verbeeck G. and Hens H., Life cycle inventory of buildings: A calculation method

Aste N. et al., Beyond the EPBD: The low energy residential settlement Borgo Solar

Rivallain et al., Genetic multi-criteria optimization for existing buildings holistic retrofit

Bases de données

Frischknecht et al., Overview and Methodology,ecoinvent report No. 1, Swiss Centre for Life Cycle Inventories

Simplification des inventaires et des indicateurs

Lasvaux et al., Relevance of simplification in LCI database used in buildings LCA applications

Lasvaux et al., Towards a reduced set of indicators in buildings LCA applications: a statistical based method

Kellenberger D, Althaus H- J., Relevance of simplifications in LCA of building components

Échanges européens (coordination de la recherche)

Peuportier et al., Life cycle assessment methodologies in the construction sector: the contribution of the European LORE-LCA project

Recherches en cours : extension spatiale

- ▶ Kohler N., LCA of buildings, groups of buildings and urban fragments, 2006
- ▶ Popovici E., Contribution to the LCA of settlements, PhD thesis, MINES, 2006
- ▶ Herfray G., Contribution à l'évaluation des impacts environnementaux des quartiers, PhD thesis, MINES ParisTech, 2011
- ▶ Vorger E., Application de l'analyse de cycle de vie à la comparaison de morphologies urbaines, rapport Master de Sciences et Technologies de l'UPMC
- ▶ Lotteau M., Critical review of life cycle assessment (LCA) for the built environment at the neighborhood scale, 2015
- ▶ Colombert et al., Analyse de cycle de vie à l'échelle du quartier : un outil d'aide à la décision ? Le cas de la ZAC Claude Bernard à Paris, 2011
- ▶ Chester, Transit Infrastructure Investment and Urban Environmental Effects
- ▶ Wright et al., The role of carbon footprinting in the development of global 'low-carbon' cities
- ▶ Chavez, Two GHG Emissions Accounting Methods: Trans-Boundary Infrastructure Supply Chain (TBIS) and Consumption-Based Evaluated for Multiple U.S. Cities

5 étapes (énergie, eau, matériaux)

- ▶ **limiter les besoins par la sobriété (chauffage à 19°C, douches/bains, emballages, mode de transport),**
- ▶ **l'efficacité (isolation, débit réduit, enveloppe légère au nord, équipements, véhicules)**
- ▶ **Utiliser les ressources renouvelables**
- ▶ **Compléter en minimisant les impacts**
- ▶ **Informer les utilisateurs (régulation, gestion, maintenance, tri des déchets, co-voiturage...)**

Conclusions

- ▶ Pas de « HQE » ni d' éco-quartiers sans performance énergétique, intérêt des ENR
- ▶ Matériaux deviennent importants, évaluation par un bilan sur le cycle de vie
- ▶ Quelques outils, incertitudes, données françaises encore imprécises
- ▶ Santé : encore plus de lacunes
- ▶ Intégrer des niveaux de performance dans les programmes, ex. Lyon Confluence (CO₂ et rad.)

Conclusions et perspectives

- ▶ Communauté scientifique importante, mais petite par rapport à l'étendue des questions à étudier
- ▶ Chaire Eco-conception des ensembles bâtis et des infrastructures, intégration intersectorielle: énergie, bâtiments, transports, eau, déchets, agriculture)
- ▶ Aspects dynamiques et consécutifs
- ▶ Fiabilité, incertitudes sur les entrées et sorties ?
- ▶ Applications dans l'ITE Efficacy : diagnostic territorial et aide à la conception de projets urbains
- ▶ Outils opérationnels, améliorations -> utilisateurs
- ▶ Demande de simplification, mais conserver la sensibilité aux paramètres de conception/décision

Bibliographie

- ▶ **Guide de l'habitat sain, S. et P. Déoux, Medieco, 2004**
- ▶ **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**
- ▶ **Eco-conception des ensembles bâtis et des infrastructures, coord. B. Peuportier, Presses de l'EMP, 2013**
- ▶ **www.chaire-eco-conception.org**

Merci de votre attention

Ateliers cet après-midi, 2 outils : novaEquer et NEST

**Pour l'outil novaEquer, télécharger les logiciels
Pleiades+comfie (SED) et novaEquer (ACV) depuis
www.izuba.fr**