

ICEB Café
23 novembre 2015

**De l'ACV des bâtiments à l'ACV des quartiers
état des lieux**

Bruno PEUPORTIER
Mines ParisTech – CES



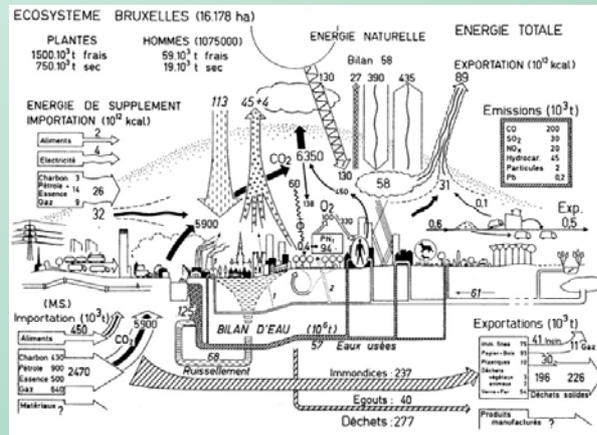
éco-conception des bâtiments et des quartiers

- ▶ **Prendre en compte les aspects environnementaux dans la conception**
- ▶ **Préserver les ressources (énergie, eau, matériaux, sol),**
- ▶ **Protéger la santé et la biodiversité**
- ▶ **Préserver les « écosystèmes », au niveau planétaire (climat, ozone), régional (forêts, rivières...), local (déchets ultimes, qualité de l'air...)**
- ▶ **Objectifs - > Indicateurs, performances et non moyens, multicritères, éviter le transfert d'impact**



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



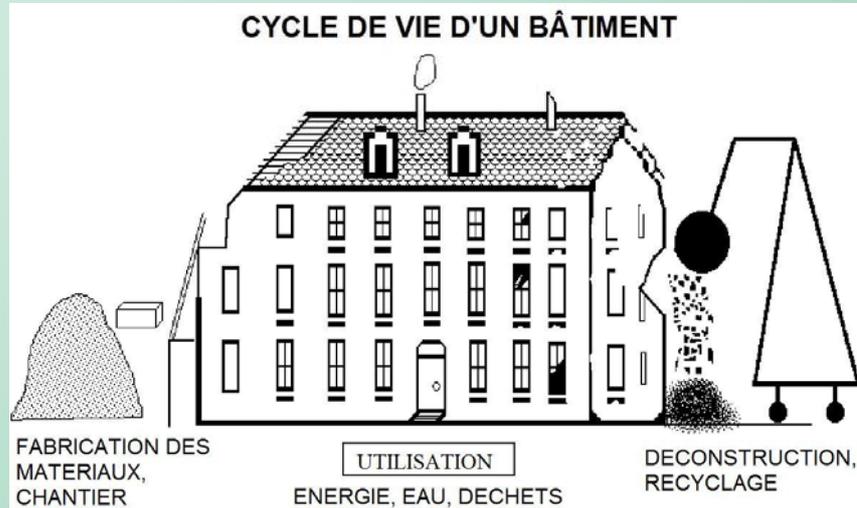
2

Travaux pionniers sur les ACV

- ▶ **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
 - ▶ Travaux en Allemagne et aux Pays Bas
 - ▶ Polster B., Contribution à l'étude de l'impact environnemental des bâtiments par analyse du cycle de vie, thèse de doctorat, école des Mines de Paris, 1995
 - ▶ Travaux au Danemark, au Canada puis en Grande Bretagne, Australie, Finlande, Autriche...
- ▶ **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



Définition des objectifs

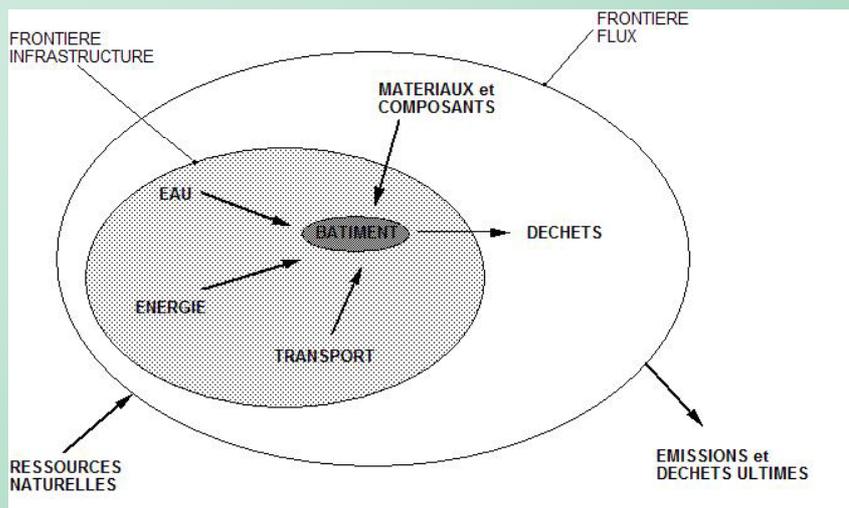
- ▶ Aide au choix d'un site
- ▶ Aide à la programmation (niveaux de performance)
- ▶ Aide à la conception, comparaison de variantes urbaines, architecturales et/ou techniques
- ▶ Aide à la réalisation (comparaison de produits)
- ▶ Aide à la gestion (études sur les usages)
- ▶ Aide à la réhabilitation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

Unité fonctionnelle

- ▶ Quantité : bâtiment d'une certaine surface ou par m²
- ▶ fonction : ex. logement
- ▶ qualité de la fonction : ex. confortable, 20°C à 27°C, clair, calme, ventilé,...
- ▶ temps : ex. 80 ans, ou par an

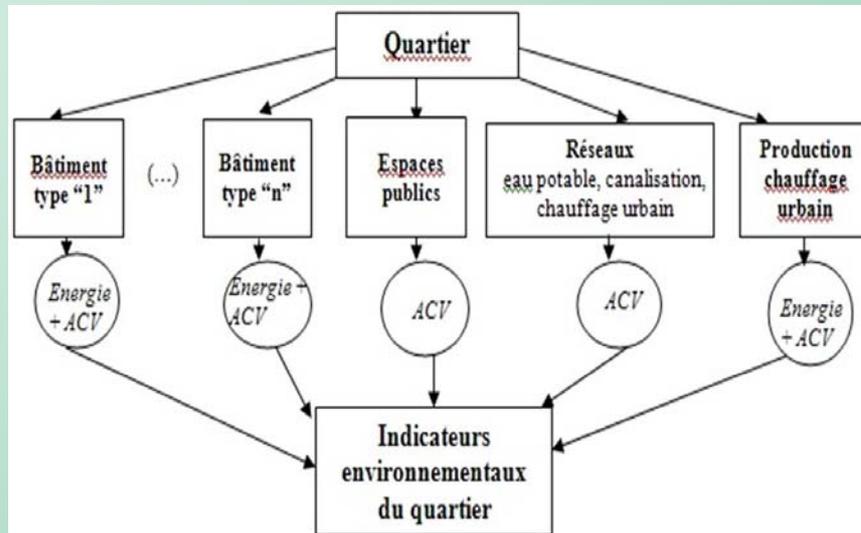
- ▶ Quartiers : plusieurs fonctions
- ▶ Quartier entier ou équivalent habitant ?

Les frontières dépendent de l'objectif de l'étude



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

Système étudié à l'échelle du quartier



thèse E. Popovivi, 2006

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

Base européenne ecoinvent : www.ecoinvent.ch

		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



10

Base française INIES : www.inies.fr (et base PEP)

- ▶ 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- Rafrâichissement - ECS - Régulation - Fumisterie
- ▶ Mais : simplification des inventaires, exemple : dioxines
- ▶ Pas de procédé (chauffage, etc.), fin de vie ex. béton 75% recyclé
- ▶ Pas de calcul matriciel (interactions entre secteurs, actualisation)
- ▶ Un calcul global est nécessaire pour choisir un matériau



11

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)*



12

Contribution à l'acidification



- ▶ **Potentiel d'acidification (eq. SO₂)**
- ▶ **Effet potentiel (concentration de fond)**
- ▶ **Sources : chaufferies (fuel, charbon), procédés**



13

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)**



16

de « mid-point » à « end-point »

- ▶ **Indicateurs mid-point (orientés effets)**
- ▶ CML, Pays Bas, 2001 : acidification, eutrophisation, smog...
- ▶ **Indicateurs end-point (orientés dommages)**
- ▶ Eco-Indicator 99, 2001 puis Recipe, 2007, Pays Bas, 3 grands domaines : santé, biodiversité, ressources
- ▶ Santé : DALY (Disability adjusted Life loss years)
- ▶ Biodiversité : PDF x m^2 x an (percentage disappeared fraction of species)
- ▶ Ressources : énergie utilisée pour extraire les ressources, ou équivalent Sb (CML) ou Fe (Recipe)



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 et modèle européen USETOX)
- ▶ Modèles orientés dommages : DALY (Disability adjusted Life loss years), PDF x m2 x an (percentage disappeared fraction of species)



18

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 ?**



19

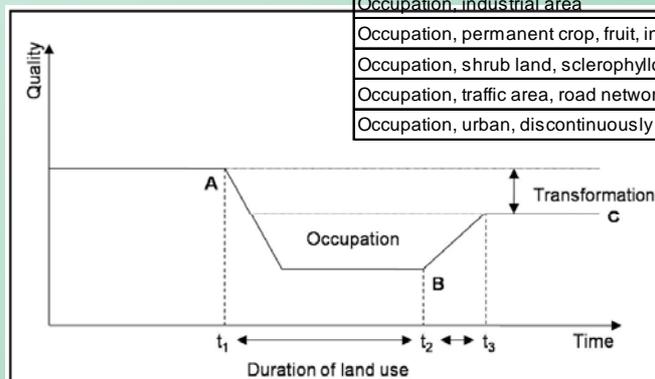
Autres indicateurs

- ▶ **Épuisement des ressources :**
 $\Sigma M_i / \text{réserves récupérables } i$, éventuellement prise en compte de la vitesse d'épuisement
- ▶ **consommation d'eau :** m^3
- ▶ **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



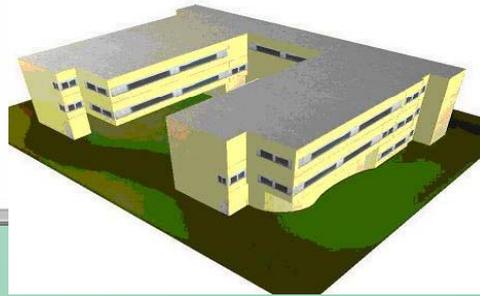
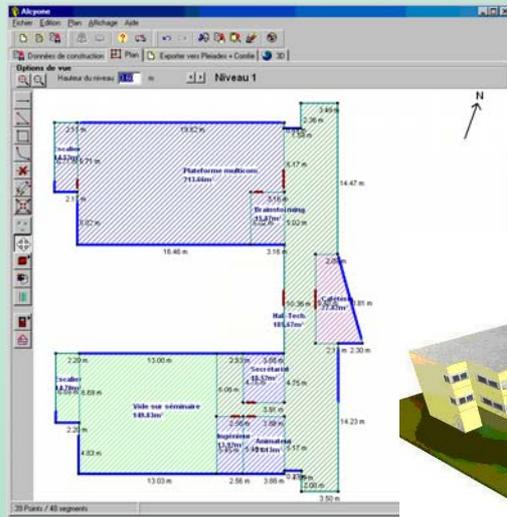
**Évaluation
pour
chaque
procédé**

Modeleur graphique ALCYONE

www.izuba.fr

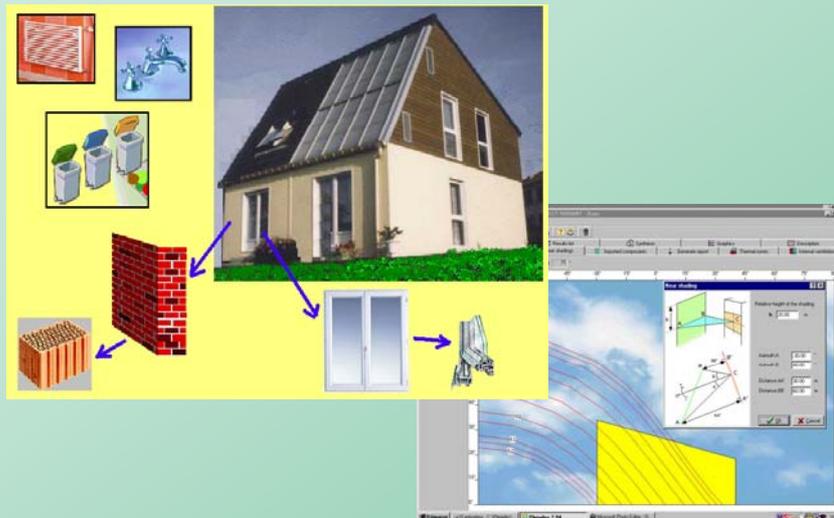
plans par niveaux

-> vue 3D



22

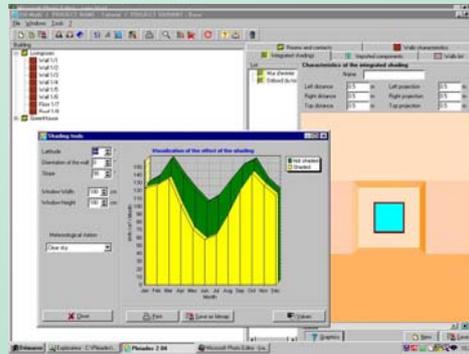
Modélisation du bâtiment



23

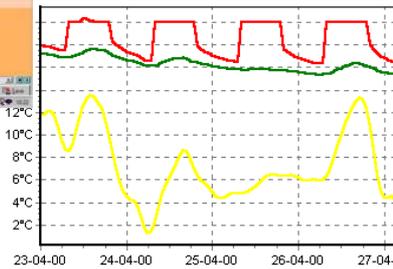
Lien avec l'outil de simulation thermique COMFIE

*Besoins de chauffage
et de climatisation*

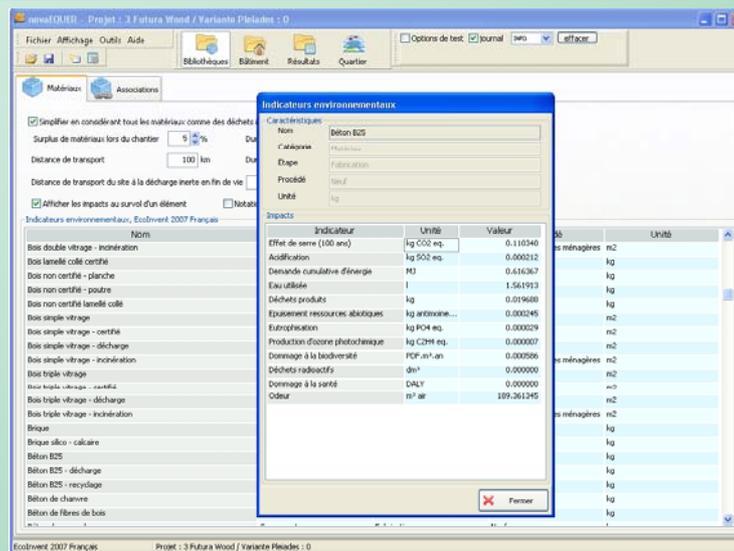


Vibre / réhabilitation + / Classes
 Vibre / réhabilitation + / Couloir
 Vibre / réhabilitation + / Extérieur

*Profils de
température*

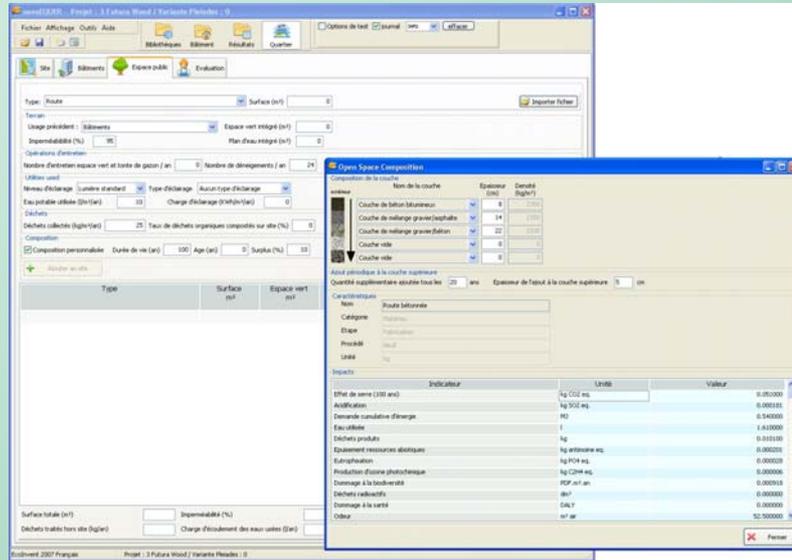


novaEquer, exemple de données

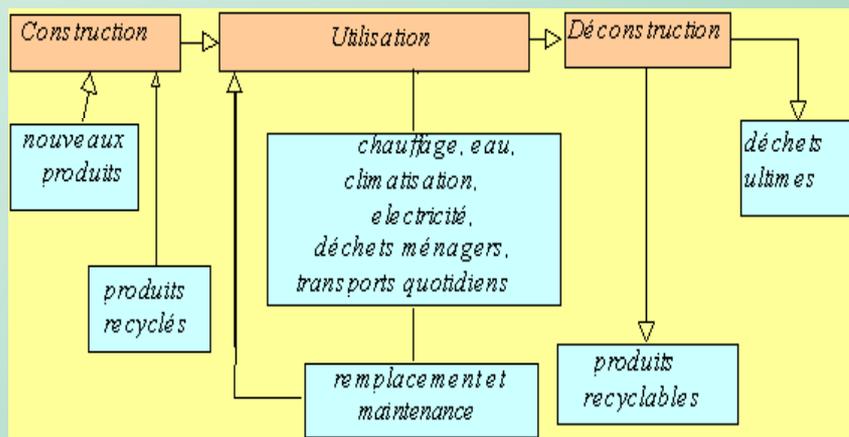


Base Oekoinventare 1996 (ETHZ) puis www.ecoinvent.ch

novaEquer, exemple de données

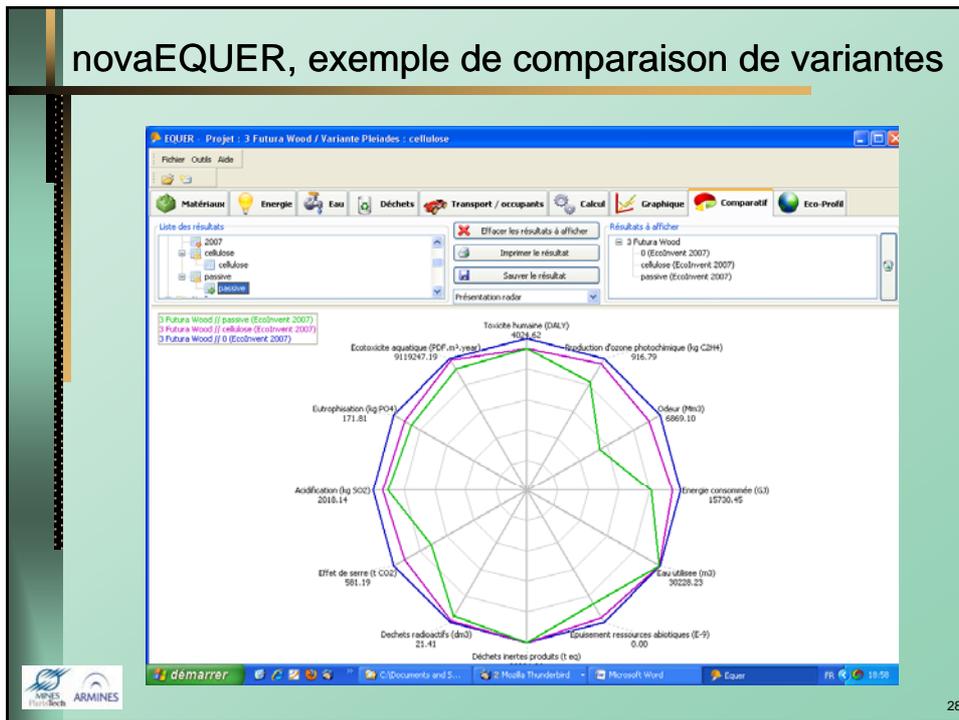


novaEQUER : simulation du cycle de vie



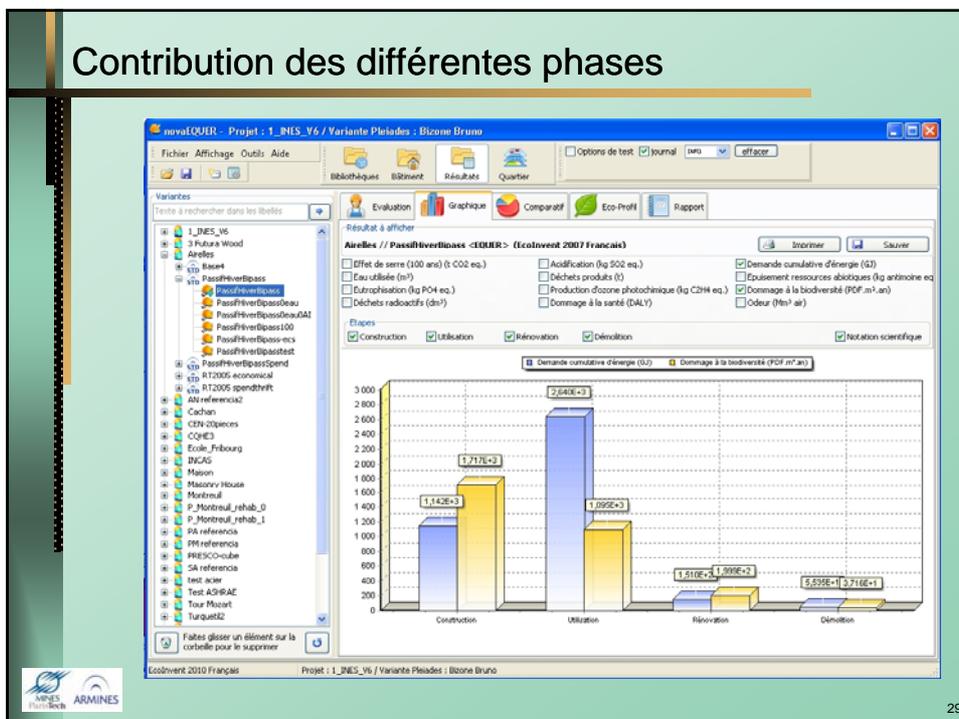
Calcul par pas de temps d'un an

novaEQUER, exemple de comparaison de variantes



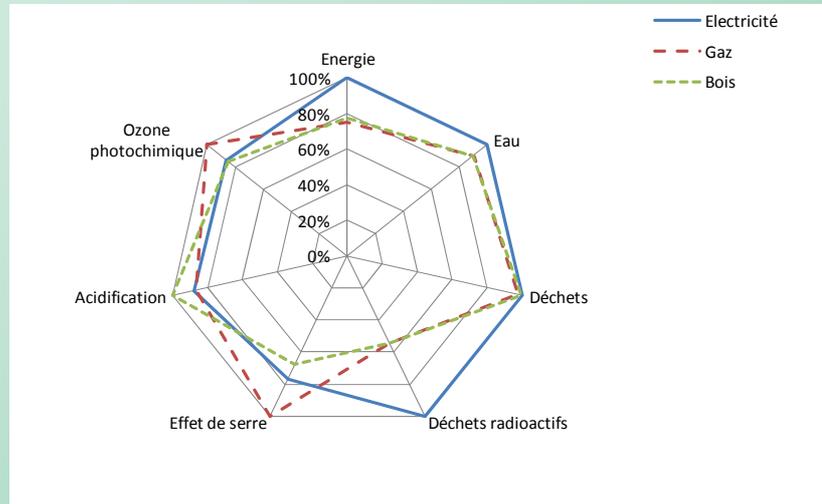
28

Contribution des différentes phases



29

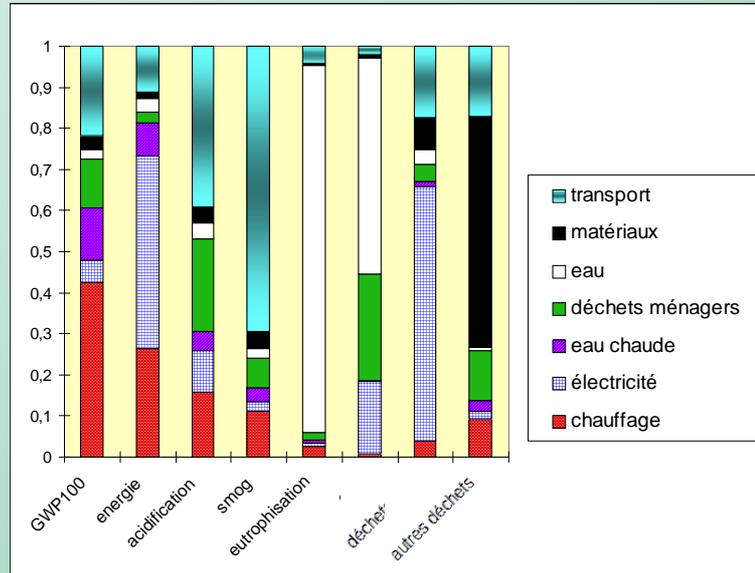
Problématique d'une comparaison multicritères



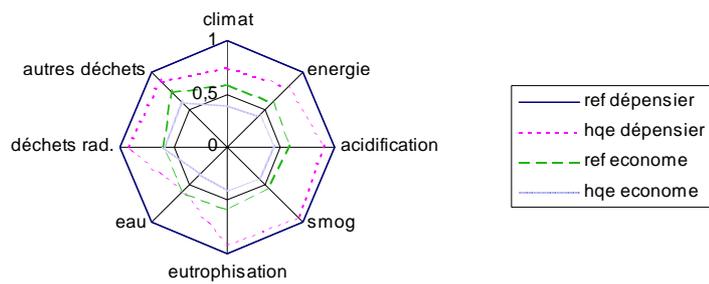
Normalisation

- ▶ **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** = $\text{indicateur} / \text{indicateur correspondant à un habitant sur une année}$
- ▶ **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.

Exemple d'application : contributeurs aux impacts



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)



36

Comparaison, réseau européen PRESCO

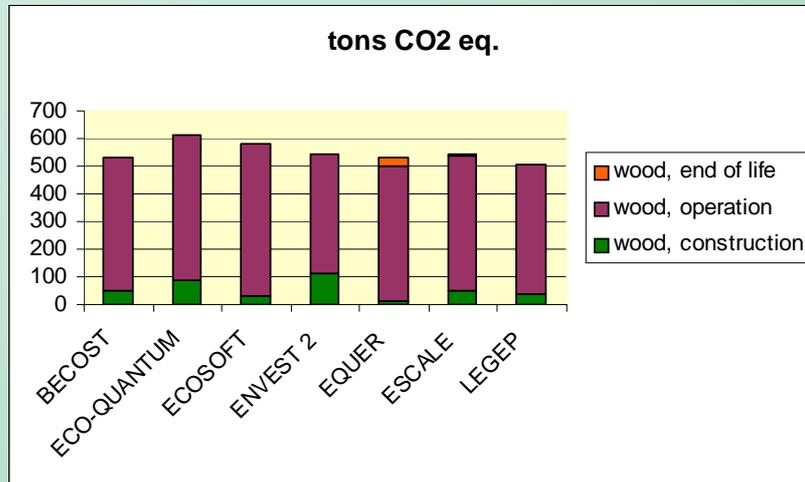


Maison suisse FUTURA, 210 m², ossature bois,
Chauffage gaz, 80 ans



37

Comparaison d'outils ACV européens, PRESCO

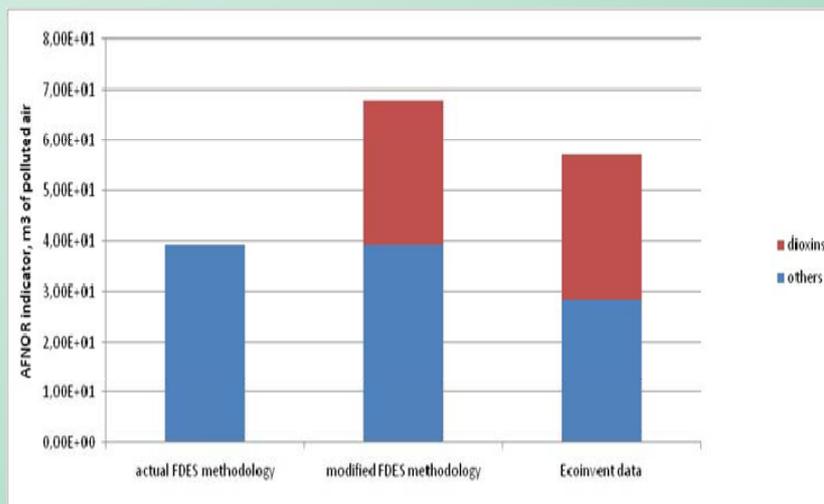


Écarts +/- 10% sur le cycle de vie
Cf. <http://www.etn-presco.net/>



38

Influence de la prise en compte des dioxines

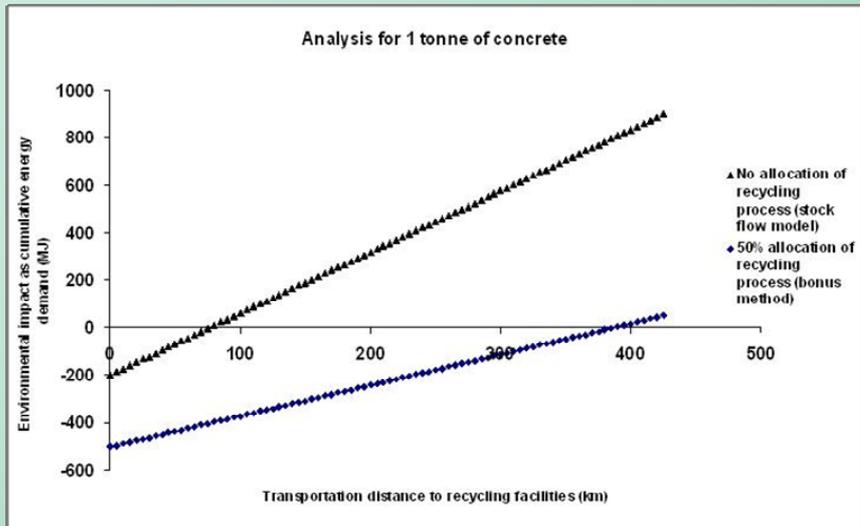


G. Herfray, B. Peuportier, Life Cycle Assessment applied to urban settlements, Sustainable Building Conference 2010, Madrid, avril 2010



39

Influence de la modélisation du recyclage



Lasvaux S., Peuportier B., Chevalier J., Towards the development of a simplified LCA-based model for buildings: recycling aspects, CISBAT 2009, Lausanne, sept. 2009

40

Exemple d'application : Formerie (Oise)

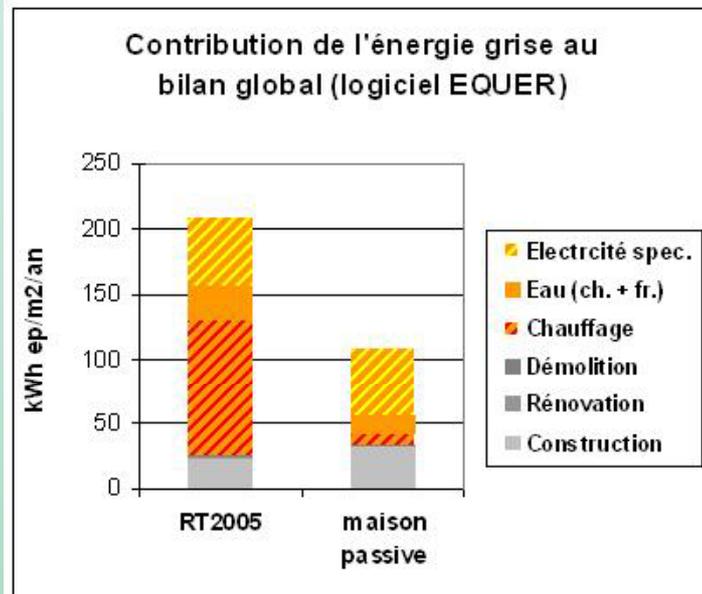


2 maisons passives, Oise, 2 x 135 m²
Entreprise : Les Airelles
EN ACT architecture

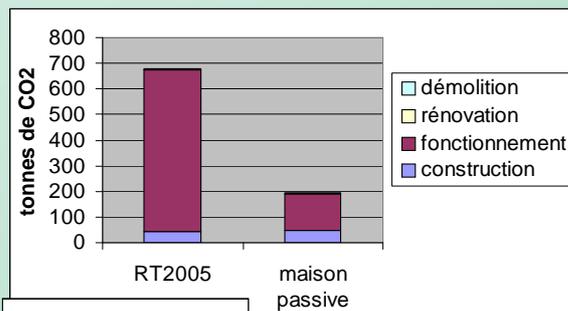


41

Contribution de l'énergie « grise » au bilan global

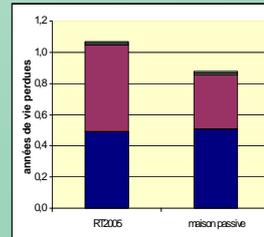
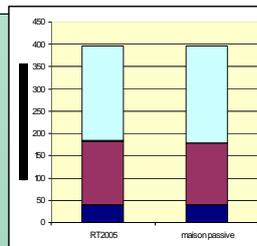
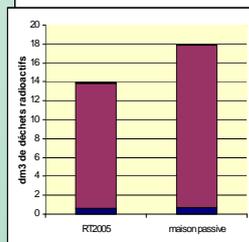


Résultats de l'analyse de cycle de vie



**2 maisons
Sur 80 ans**

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



Intérêt de l'énergie positive

Bâtiment HLM à Montreuil

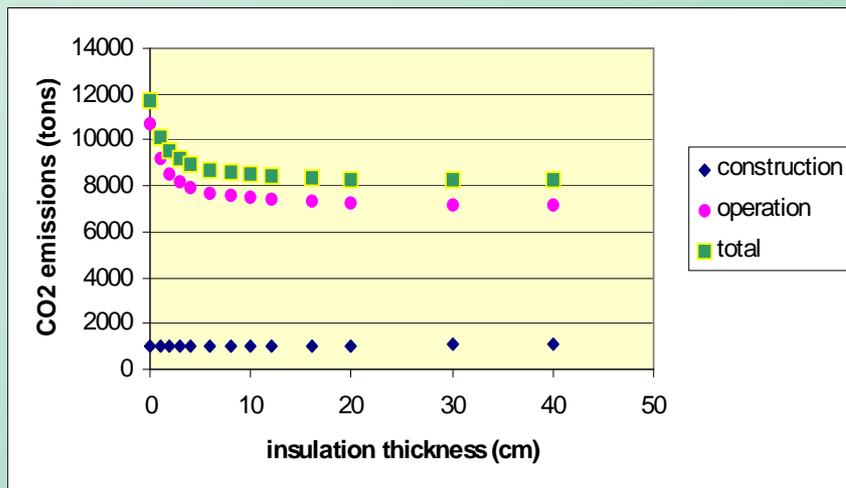


Construction : 1969, non isolé, simple vitrage
Besoins de chauffage : 160 kWh/m²/an



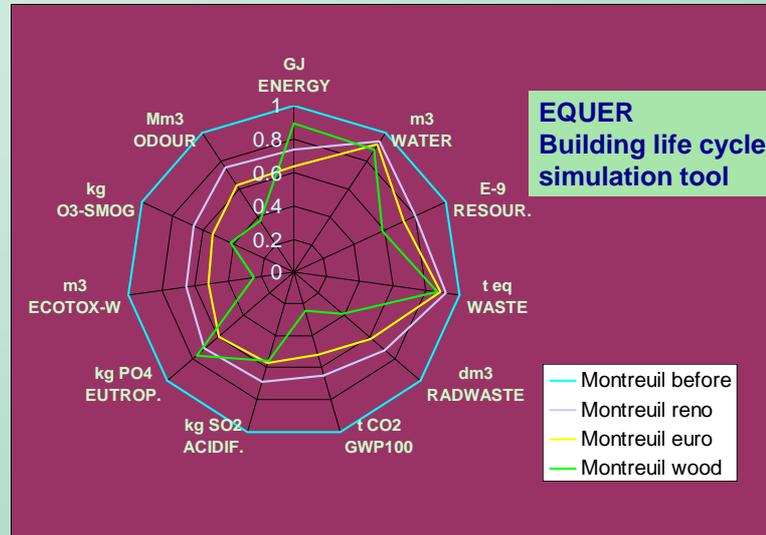
44

Epaisseur d'isolation



45

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



Exemple d'application : Lyon Confluence



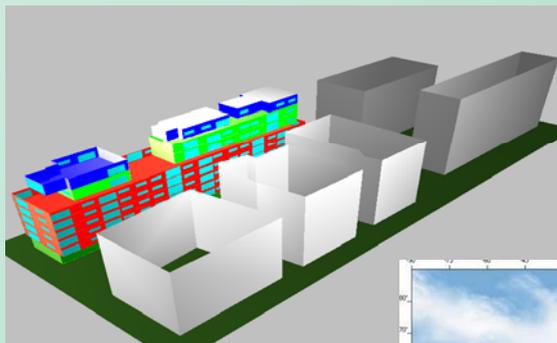
Îlots A, B et C, environ 60 000 m² de logements et 15 000 m² de bureaux, 70 000 m² d'espaces verts, rues, quais...

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

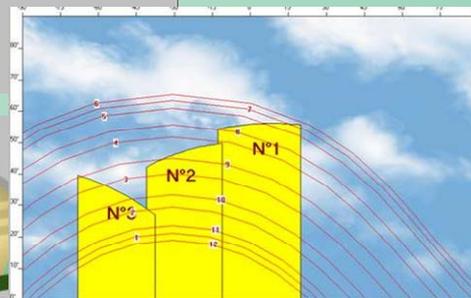
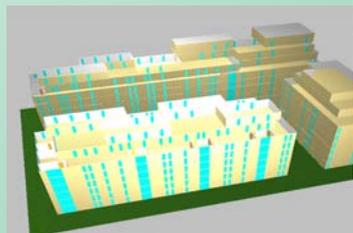
Démarche adoptée

- ▶ **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 »)**

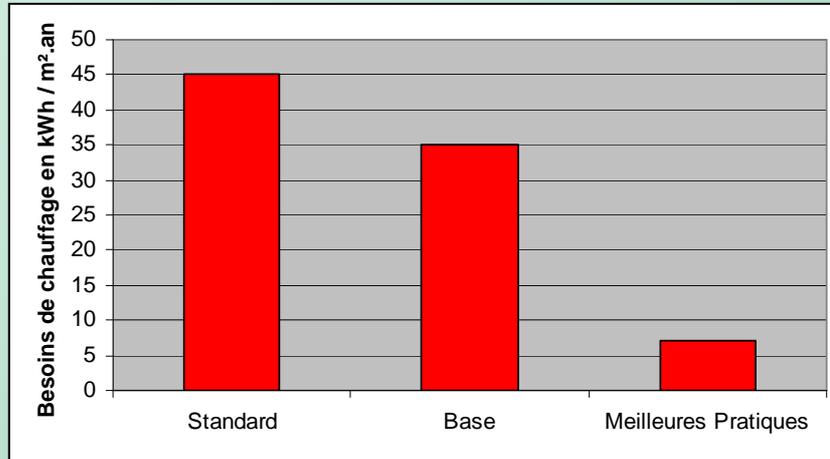
Description par ALCYONE : 3 îlots, 20 bâtiments



Prise en compte des masques générés par les bâtiments adjacents



Résultats de l'analyse thermique, logiciel COMFIE

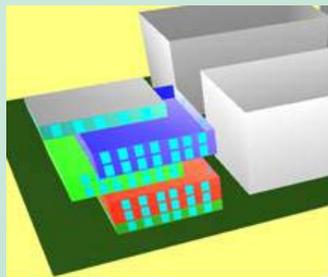


Moyenne sur l'ensemble des bâtiments
Variation de 1 à 3 selon l'architecture
(bâtiments 1 et 10 de l'îlot B, mêmes technologies)



50

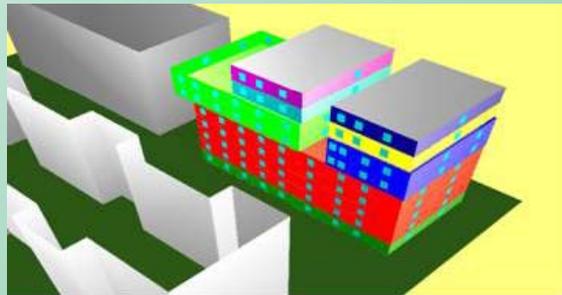
Différentes morphologies, îlot B



Bâtiment 1, peu compact,
Exposition Nord

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

Bâtiment 10, orienté Sud

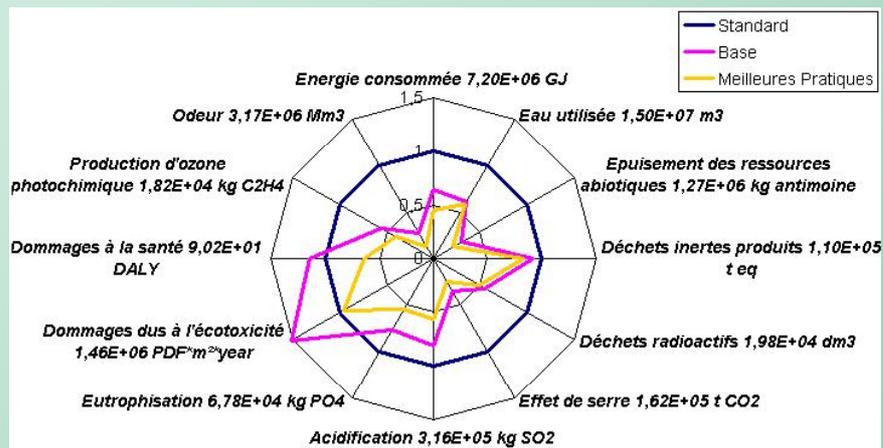


51

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

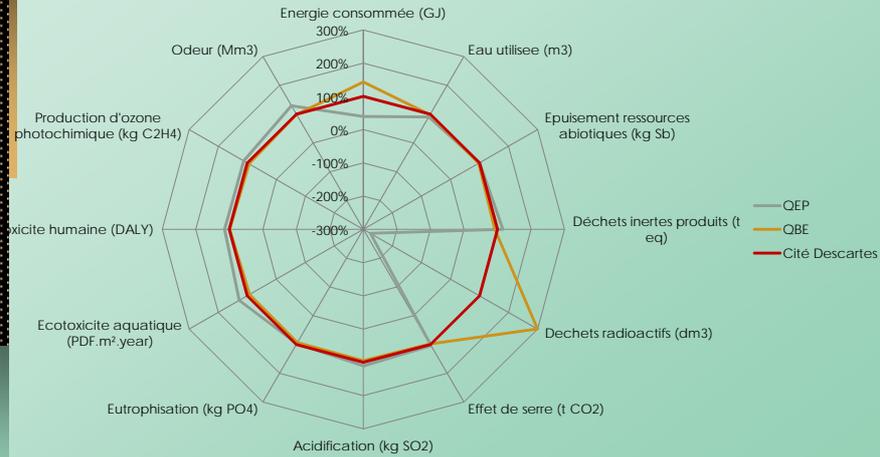
Quartier Energie Positive (Architecte Rolf Disch)	Quartier Basse Consommation (Quartier Vauban)	Cité Descartes



55

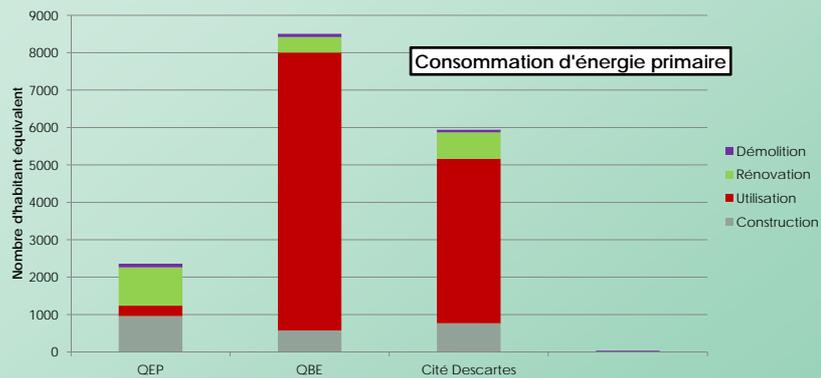
Résultats de l'analyse de cycle de vie

Comparatif global des 3 quartiers sur les 12 indicateurs



56

Résultats, énergie primaire

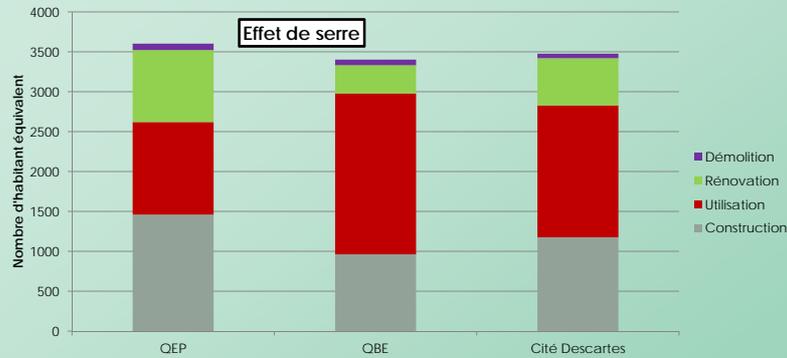


- Utilisation = 12% du total pour le QEP contre 87% pour le QBE et 74% pour la Cité Descartes
- QEP: 23 kWh EP/m²/an (énergie grise, éclairage public...)
- QBE: 107 kWh EP/m²/an
- Cité Descartes: 75 kWh EP/m²/an



57

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

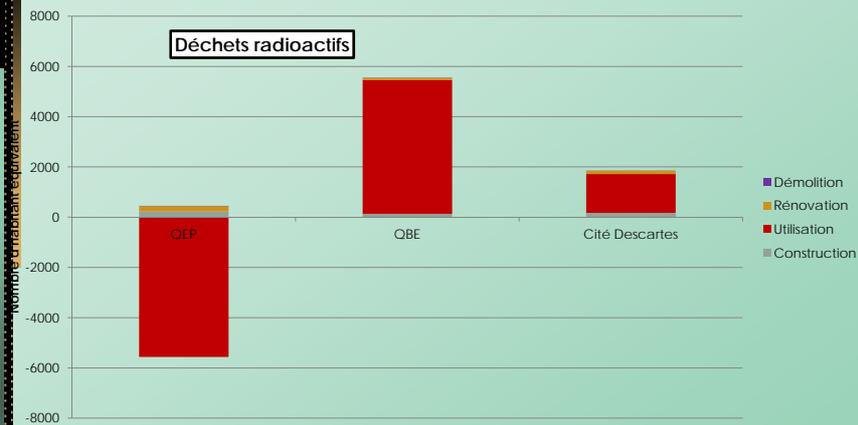
- QBE: 8 kg CO₂ eq/m²/an

Cité Descartes: 8 kg CO₂ eq/m²/an



58

Résultats, déchets radioactifs



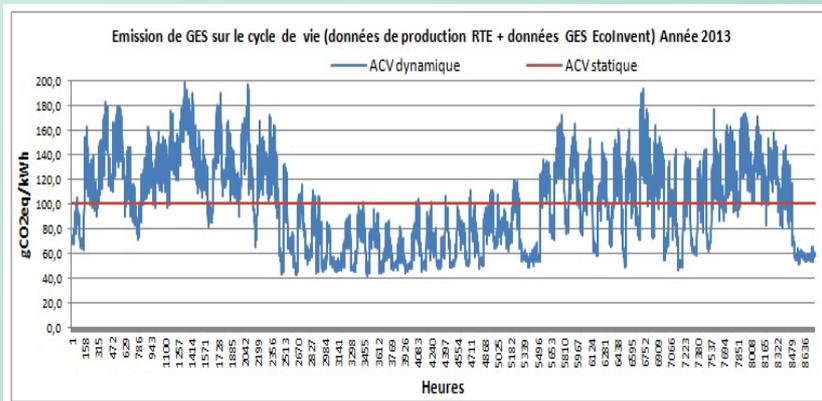
- Impact négatif pour le QEP

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



59

ACV Dynamique (thèse G. Herfray, 2011)



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

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 en particulier)
- ▶ Intégrer des niveaux de performance dans les programmes, ex. Lyon Confluence (CO₂ et rad.)
- ▶ Loi sur la transition énergétique -> bilan CO₂ des constructions neuves en 2018 (article L111-9 code construction) -> travaux en cours GT DHUP

Merci de votre attention

