
L'analyse de cycle de vie dans la construction

Bruno Peuportier¹

¹ Mines ParisTech – CEP – Centre Energétique et Procédés, 5 rue Léon Blum, 91120 Palaiseau, bruno.peuportier@mines-paristech.fr

RÉSUMÉ. Le secteur du bâtiment contribue de manière importante aux impacts environnementaux, en termes de consommation d'énergie et de matériaux, mais aussi d'émissions polluantes et de déchets. L'analyse de cycle de vie (ACV) permet de mutualiser un grand nombre de données sur les produits et les procédés impliqués dans la construction, afin de mieux cerner les relations de cause à effet entre les décisions, par exemple les choix de conception, et les impacts. Cette communication présente un état de l'art dans ce domaine, décrit la méthodologie, illustrée ensuite sur un cas d'étude, puis discute les limites des connaissances actuelles pour proposer quelques perspectives d'amélioration comme l'ACV conséquentielle et l'extension à l'échelle du micro-urbaine.

ABSTRACT. The building sector is a major contributor in the overall environmental burden, regarding energy and material resources but also pollutants and waste. Life cycle assessment (LCA) uses a large quantity of data on construction related products and processes in order to better understand the causes and effects chains between decisions, e.g. design choices, and impacts. This communication presents a state of the art in this field, and describes the methodology which is illustrated on a case study. Gaps in the present knowledge are then discussed, and perspectives are proposed like consequential LCA and an extension of the method to the micro-urban scale.

MOTS-CLÉS : Construction, environnement, analyse de cycle de vie, impacts

KEY WORDS: Construction, environment, life cycle assessment, impacts

1. Contexte

La sensibilisation des décideurs aux problématiques environnementales a suscité diverses initiatives comme le développement de la démarche « haute qualité environnementale » des bâtiments ou la création de nombreux « éco-quartiers », sans que les concepts correspondants soient toujours précisément étayés. Or l'importance des risques, du niveau local au niveau planétaire, demanderait une gestion plus rigoureuse de ces problèmes. En effet les décisions prises en matière d'architecture et d'urbanisme ont une forte influence sur les secteurs du bâtiment et des transports, qui contribuent de manière très importante à la plupart des impacts environnementaux.

Le secteur du bâtiment est par exemple en France –et en Europe- le secteur le plus consommateur d'énergie, avec à lui seul près de la moitié de la consommation totale, soit deux fois plus que l'industrie. La consommation d'eau potable représente environ 25% des prélèvements nets d'eau, mais une quantité presque aussi importante est utilisée pour la production d'électricité, consommée à 60% dans les bâtiments. Entre une et deux tonnes de matériaux sont utilisées par m² construit, ce qui fait du bâtiment l'un des plus importants débouchés pour les produits industriels. 48 millions de tonnes de déchets sont produites chaque année sur les chantiers de démolition, de réhabilitation et de construction, à comparer aux 28 millions de tonnes d'ordures ménagères. Les émissions de polluants liées au bâtiment sont très importantes, aussi bien dans l'air (22% des gaz à effet de serre par exemple) que dans l'eau (un quart des rejets eutrophisants). Il est donc essentiel de fournir aux professionnels de ce secteur des outils d'éco-conception, ce qui nécessite de progresser dans la connaissance des impacts environnementaux.

Or cette connaissance est encore largement lacunaire du fait de la multiplicité de ces activités, des polluants émis – on recense plus de 100 000 substances chimiques commercialisées -, et de la complexité des phénomènes en chaîne : transport des polluants dans les différents compartiments écologiques (air, eaux superficielles, nappes phréatiques, sols...), dégradation de ces polluants au cours du temps, transferts dans les aliments, ingestion par les organismes vivants, conséquences sur la santé et la biodiversité.

Chaque acteur ne connaît qu'une petite partie d'un ensemble nécessairement inter-disciplinaire et inter-sectoriel. En effet l'évaluation des impacts environnementaux des bâtiments mobilise des connaissances entre autre en génie civil, en écologie, en médecine, en génie des procédés et en énergétique. D'autre part, les activités humaines sont en interaction, par exemple il faut de l'énergie pour produire du ciment, il faut de l'acier et du béton pour produire de l'énergie, etc.

Intégrer les aspects environnementaux dans la prise de décision nécessite alors des outils capitalisant un ensemble très vaste de connaissances tout en le mettant à la portée d'acteurs disposant d'un temps limité pour de telles études. L'analyse de cycle de vie (ACV) est l'un des outils développés pour répondre à ce cahier des

charges. Il s'agit d'un outil d'ingénierie ayant pour but d'évaluer les impacts environnementaux d'un système sur son cycle de vie, c'est-à-dire depuis sa fabrication jusqu'à sa fin de vie, en incluant un recyclage éventuel d'où la notion de cycle, correspondant à l'idée d'une gestion raisonnable des ressources. Cette méthode a été appliquée d'abord dans l'industrie depuis les années 70, puis dans le secteur du bâtiment dès les années 80 en Suisse sur les aspects énergétiques [KOH 86].

2. Etat de l'art

Quelques premiers outils sont apparus au début des années 90 en Allemagne, aux Pays Bas et en France [COL 92]. Le projet européen REGENER [PEU 97] a permis de proposer les grandes lignes d'une méthodologie commune pour l'application de l'ACV aux bâtiments, et d'étudier l'intérêt de l'intégration des énergies renouvelables au bâti. Du matériel pédagogique a ensuite été élaboré grâce au projet EASE [PEU 96]. D'autres outils sont apparus en Grande Bretagne, en Finlande, en Suisse et en Autriche. La plupart des outils ont été comparés dans le cadre du réseau thématique PRESCO [PEU 04]. Le projet E-CO-HOUSING a concerné l'extension de l'ACV à l'échelle de l'îlot [POP 06]. Le projet ENSLIC Building a consisté à disséminer les résultats et à promouvoir l'ACV dans le secteur de la construction [MAL 11]. L'action de coordination de la recherche LoRe-LCA a permis de mieux cerner les limites des pratiques actuelles et de proposer des actions de R&D [PEU 11]. Une norme européenne définit une méthode et des indicateurs communs de manière à harmoniser l'application de l'ACV dans le secteur du bâtiment [CEN 11]. Certains aspects, en particulier la santé et la biodiversité, ne sont cependant pas intégrés faute de consensus, les indicateurs correspondants étant jugés trop incertains. Au niveau mondial, il existe des travaux principalement au Canada, en Australie, en Nouvelle Zélande et aux USA [IEA 04].

En France, un premier outil, EQUER, a été développé en 1995 à l'école des Mines de Paris [POL 95] en utilisant des données collectées dans le cadre du projet européen REGENER, puis la base européenne Ecoinvent (impacts des matériaux de construction et des procédés) [FRI 07]. Des consultants, en particulier Ecobilan, ont réalisé des études pour les fabricants de produits de construction. Le CSTB de Grenoble a élaboré une base de données française sur les produits de construction, INIES¹, puis le logiciel ELODIE a été développé en 2008. Une base commune aux secteurs du bâtiment et des infrastructures de transport, DIOGEN, est en cours de développement. L'association HQE (« Haute Qualité Environnementale ») a longtemps préféré à l'ACV un référentiel basé sur 14 « cibles » abordant séparément les questions de matériaux, d'énergie, d'eau, de déchets etc. Une variante « HQE Performance » est apparue fin 2010, intégrant cette fois l'ACV.

¹ www.inies.fr

3. Méthodologie

Les approches mono-critères présentent le risque de remplacer un problème environnemental par un autre : par exemple la focalisation actuelle sur le bilan carbone risque de déplacer les problèmes vers des risques sanitaires liés par exemple aux filières nucléaire ou biomasse. Des grilles multicritères ont été étudiées dans différents projets européens et nationaux comme Eco-housing [PEU 05], Adequa [CHE 05] et Lense [LEN 06]. L'appropriation des critères et des indicateurs de performance par les acteurs peut être facilitée par l'explicitation des objectifs qui les sous-tendent : par exemple l'indicateur d'acidification est évalué dans le but de préserver les forêts, menacées par les pluies acides.

L'évaluation correspondant à ces critères nécessite des informations provenant des fabricants de matériaux, des producteurs d'énergie et d'eau, des entreprises de traitement des déchets etc. Les interactions entre secteurs peuvent être intégrées en résolvant un système matriciel, ce qui est mis en œuvre dans la base Ecoinvent mais pas dans Inies, qui ne concerne que les produits de construction. Or du fait des interactions entre les éléments du bâti, le choix d'un produit devrait se baser sur l'ACV globale du bâtiment, ce qui nécessite des données sur les procédés, en particulier énergétiques.

Les bases de données fournissent, pour chaque produit ou procédé, un inventaire de cycle de vie indiquant les quantités des différentes substances puisées ou émises dans l'environnement (plusieurs milliers de flux dans la base Ecoinvent, environ 160 dans la base Inies). Simplifier les analyses rend l'approche plus accessible aux nombreuses PME présentes sur le marché des produits de construction, mais nécessite une validation. Par exemple le fait de regrouper les dioxines, très toxiques, dans un groupe de composés organiques volatils réduit la précision des impacts sanitaires évalués avec la base française. Des indicateurs environnementaux sont ensuite évalués, par exemple le potentiel de réchauffement global permet d'agréger les différents gaz à effet de serre selon leurs propriétés optiques et leur durée de vie dans l'atmosphère.

Certains aspects environnementaux nécessitent des modèles plus sophistiqués, dont la marge d'incertitude reste importante. C'est le cas en particulier de la toxicité humaine. Un modèle élaboré au niveau européen consiste à mailler le territoire et à étudier le devenir des polluants émis dans chaque maille en intégrant le transport de ces substances entre compartiments écologiques (air, eau de surface, nappes phréatiques, sols, océans, sédiments...), leur transfert vers l'eau potable et la nourriture, les doses reçues par les populations par inhalation et ingestion, et les risques sanitaires en fonction de ces doses, exprimés en années de vie perdues ajustées par le handicap (DALY, disability adjusted life loss) [GOE 00]. Un indicateur similaire est défini pour la biodiversité en pourcentage d'espèces disparues sur une surface de territoire et sur une certaine durée (PDF.m2.an, PDF : Potentially Disappeared Fraction) [GOE 00].

Les inventaires de cycle de vie et les indicateurs d'impact sont rapportés à une « unité fonctionnelle » définie par une quantité (par exemple 1 m²), une fonction (par exemple l'isolation thermique d'une façade), la qualité de la fonction (par exemple la résistance thermique de l'isolant, ses propriétés acoustiques, etc.) et une durée (par exemple 30 ans).

Ces différentes données permettent alors d'appliquer l'ACV à des systèmes plus complexes, en particulier les bâtiments. Mais les impacts d'un bâtiment ne sont pas la simple addition des impacts de ses composants. En effet, il existe des interactions entre composants : par exemple le rayonnement solaire transmis par un vitrage est partiellement stocké dans l'enveloppe et, selon le système de chauffage et sa régulation, induit une diminution de la consommation de chauffage et des impacts correspondants. L'importance des aspects énergétiques dans le bilan environnemental justifie l'association de l'ACV et de la simulation thermique dynamique, qui permet d'autre part d'évaluer le niveau de confort du bâtiment étudié [SAL 04].

Pour effectuer l'ACV d'un bâtiment, il faut modéliser un système plus large, variable en fonction des objectifs de l'étude. Si par exemple l'objectif est de comparer différents sites pour une construction, il convient d'inclure les transports induits (par exemple domicile-travail), la gestion des déchets ménagers, les réseaux d'énergie (électricité, gaz, éventuellement chaleur...) et d'eau, car ces éléments peuvent différer d'un site à l'autre.

4. Exemple d'application

Afin d'illustrer la démarche, une application est présentée concernant les premières maisons passives construites en France, en 2007 à Formerie (Oise) par l'entreprise Les Airelles Construction (Figure 1). Une maison passive mobilise davantage de matériaux qu'une maison standard (isolant plus épais, triple vitrage, chauffe eau solaire etc.). L'analyse de cycle de vie permet alors d'évaluer l'intérêt global de ce concept, en prenant en compte l'impact supplémentaire de la fabrication des produits mais aussi l'énergie économisée dans la durée.



Figure 1. *Vue des maisons étudiées (Arch.: En Act architecture)*

Chaque maison a une surface habitable de 132 m². Une comparaison a été effectuée avec un bâtiment de forme identique mais comportant des technologies correspondant aux valeurs de référence RT 2005 (cf. tableau 1). Des stores extérieurs assurent une protection solaire efficace. Les maisons passives sont équipées d'un puits climatique de 30 m de longueur, permettant de rafraîchir l'air neuf en été en bénéficiant de la fraîcheur du sol.

Standard RT 2005	Maisons passives
Isolation : 13 cm (murs), 14 cm (plancher) et 22,5 cm (toit)	Isolation : 37 cm (murs), 20 cm (plancher) et 40 cm (toit)
Fenêtres double vitrage basse émissivité	Fenêtres triple vitrage
Renouvellement d'air 0,6 vol/h (y compris les infiltrations)	Efficacité globale de la récupération de chaleur : 70% (intègre les infiltrations)
Chaudière gaz (rendement 87%)	Pompe à chaleur (COP 3), solaire thermique (fraction solaire de 50%)

Tableau 2. Principales caractéristiques des maisons

Le climat de Trappes est considéré. Dans ce bilan global, qui inclut l'éclairage et l'électroménager, la phase de construction de la maison représente un tiers des émissions de gaz à effet de serre, une durée de vie de 80 ans étant considérée.

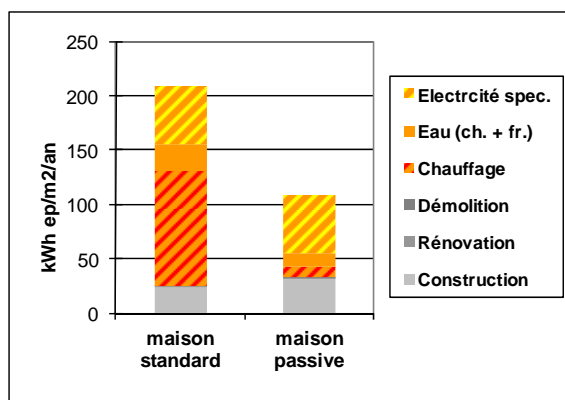


Figure 2. Bilan énergétique sur le cycle de vie du bâtiment

La figure 3 ci-dessous montre que la conception passive réduit globalement la plupart des impacts: l'augmentation liée à la fabrication des matériaux est largement compensée par les économies d'énergie sur la durée de vie du bâtiment. La pompe à chaleur utilisée pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire réduit les émissions de gaz à effet de serre (ceci étant, la demande d'électricité de pointe lors des journées froides d'hiver oblige à recourir à des moyens de production thermiques, fortement générateurs de CO₂), mais génère une quantité plus importante de déchets

radioactifs que la chaudière gaz. La production d'électricité renouvelable, par exemple avec une toiture photovoltaïque, permettrait d'améliorer le bilan : de nombreuses études par ACV montrent que la quantité d'électricité produite par un module photovoltaïque sur sa durée de vie est très supérieure à l'énergie nécessaire pour sa fabrication.

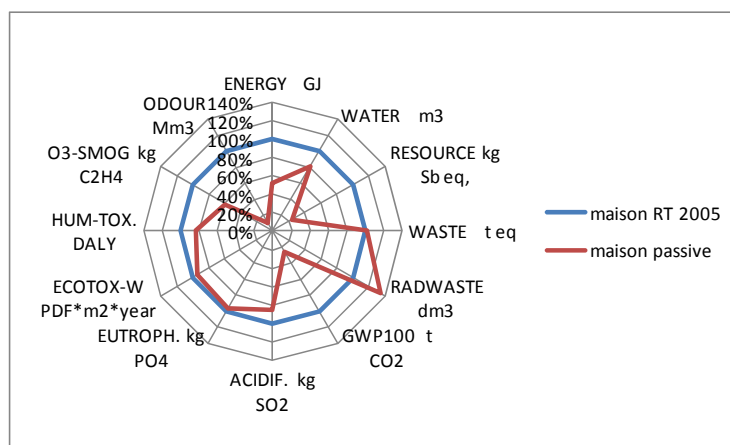


Figure 3. Comparaison des impacts environnementaux

Des études de sensibilité ont été menées sur la durée de vie des bâtiments (entre 50 et 100 ans), et sur le comportement des habitants. Ces paramètres influencent le bilan environnemental de manière très importante, mais ne remettent pas en question la comparaison ci-dessus.

5. Discussion et limites de la méthodologie

Issus d'une démarche interdisciplinaire et complexe, les résultats d'une ACV doivent être interprétés avec soin. Une analyse de sensibilité peut concerner certaines hypothèses comme la durée de vie du bâtiment et les procédés considérés pour la fin de vie (mise en décharge, incinération ou recyclage par exemple). La performance environnementale d'un bâtiment dépend d'autre part du comportement de ses occupants, concernant en particulier le réglage des températures, la consommation d'eau et le tri des déchets.

Il est souvent difficile de connaître la marge d'incertitude sur les données et les résultats, mais elle peut être élevée. Un premier niveau d'imprécision concerne l'évaluation des flux de matière et d'énergie (données d'inventaire). Des procédures de vérification sont alors mises en œuvre au niveau des bases de données. Un deuxième niveau correspond à l'agrégation en effets (impacts potentiels). Par exemple l'incertitude sur le potentiel de réchauffement global des gaz à effet de serre autres que le CO₂ a été estimée à 35%. Le CO₂ représente plus de 80% de l'impact global, ce qui limite l'effet des incertitudes sur les autres gaz. Enfin, un

troisième niveau concerne le passage des effets aux dommages (années de vie perdues par exemple).

Une autre cause d'incertitude est liée à la durée de la période d'analyse. Il est par exemple difficile de prévoir l'évolution des techniques de traitement de déchets, en particulier pour la démolition qui peut se produire à une échéance lointaine. Peut-être vaudrait-il mieux envisager une analyse statistique, basée sur des scénarios affectés d'une probabilité. Le caractère multi-critères de l'évaluation nécessite enfin d'aborder la question des priorités, qui dépendent du contexte local (rareté de l'eau dans certaines régions par exemple) et des choix des décideurs.

Pour mieux cerner ces limites, huit outils européens ont été comparés dans le cadre du réseau thématique européen PRESCO [PEU 04]. Dans l'exemple d'une maison suisse à ossature bois, la contribution à l'effet de serre calculée sur 80 ans diffère de +/- 10% selon les outils. Ces travaux européens se poursuivent dans le cadre de nouveaux projets, par exemple sur certains aspects plus spécifiques comme la modélisation du recyclage, l'intégration du CO₂ biogénique dans les bilans, en particulier dans le cas du matériau bois, ou la prise en compte des émissions à l'intérieur des bâtiments.

La pratique actuelle de l'ACV, dite « attributionnelle », pourrait d'autre part évoluer vers l'ACV dite « conséquentielle », prenant en compte les conséquences des décisions concernant le système étudié sur le système d'arrière plan. L'usage de l'ACV peut en effet dans certains cas conduire au développement d'une technologie qui induit une modification des impacts environnementaux considérés comme hypothèse de départ pour les procédés d'arrière plan. Par exemple le bilan carbone au niveau d'un bâtiment (système étudié) incite à développer le chauffage électrique, mais ce développement induit une forte demande de pointe, qui modifie le mix de production de l'électricité (système d'arrière plan) et donc les impacts correspondants. Il semble alors judicieux de faire évoluer les modèles afin de prendre en compte ces effets dynamiques. Enfin à l'échelle d'un quartier, il serait utile de mieux cerner l'influence sur les déplacements et sur les impacts environnementaux correspondants, des choix en termes de morphologie urbaine et de stationnement.

6. Conclusions

L'ACV constitue un outil au service de l'éco-conception, qui doit encore évoluer en fonction de l'amélioration des connaissances. La problématique environnementale est systémique, elle ne peut pas être abordée de manière sectorielle : il faut intégrer l'ensemble des produits et des procédés impliqués dans la construction. D'autre part la construction neuve ne représente par an qu'environ 1% du parc existant, qui constitue donc un enjeu essentiel dans une politique de long terme. En effet la démolition ne concerne chaque année que de l'ordre de 0,03% du parc, qui se renouvelle ainsi beaucoup plus lentement que celui des véhicules par exemple. Il ne suffit donc pas d'agir sur la construction neuve pour

atteindre des objectifs comme la réduction par 4 des émissions de gaz à effet de serre à l'horizon 2050. L'ACV peut alors être appliquée très utilement aux projets de réhabilitation.

L'extension de l'ACV à l'échelle micro-urbaine (îlot par exemple) ouvre de nouvelles possibilités d'application. L'intérêt est double : d'une part cette échelle permet d'étudier un certain nombre de choix urbanistiques ayant une influence importante sur les performances environnementales, en particulier l'orientation des voiries (et donc des bâtiments) et la compacité, liée à la densité ; d'autre part certaines options techniques sont décidées à cette échelle, en ce qui concerne par exemple les réseaux de chaleur, les transports et le traitement des déchets. Ces nouveaux outils peuvent donc utilement enrichir les compétences des acteurs du bâtiment et de la ville afin de prendre en compte les aspects environnementaux dans les décisions.

7. Remerciements

Ces travaux ont été menés avec le soutien du PUCA, de l'ADEME, de la Commission Européenne, de l'ANR et de la Chaire ParisTech, en association avec VINCI, Eco-conception des ensembles bâtis et des infra-structures.

8. Bibliographie

[CEN 11] Comité Européen de Normalisation, Norme EN 15978:2011 Sustainability of construction works - Assessment of environmental performance of buildings - Calculation method

[CHE 05] Cherqui F., Méthodologie d'évaluation d'un projet d'aménagement durable d'un quartier, method ADEQUA, Thèse de l'Université de La Rochelle, décembre 2005

[COL 92] Cole R. et al., "Buildings and the Environment", Proceedings of the International Research Workshop, Cambridge, sept. 1992

[FRI 07] Frischknecht R., Jungbluth N. et al., Overview and Methodology, ecoinvent report No. 1, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, 2007

[GOE 00] Goedkoop M, Spriensma R., The Eco-indicator 99: a damage oriented method for life cycle impact assessment. Amersfoort: PRé Consultants. Available on line at, <http://www.pre.nl/eco-indicator99>, 2000

[GUI 01] 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

[IEA 04] International Annex 31, Energy-Related Environmental Impact of Buildings, ECBCS Bookshop, Birmingham, 2004

[KOH 86] 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

[LEN 06] LEnSE, Stepping stone 1, Sustainability assessment of buildings, issues, scope and structure, LEnSE partners, St Stevens Woluwe (Belgique), Novembre 2006

[MAL 11] Malmqvist T., Glaumann M. et al., Life cycle assessment in buildings: The ENSLIC simplified method and guidelines, Energy Volume 36, Issue 4, April 2011, Pages 1900–1907

[PEU 96] Peuportier B., Kohler N., Platzer W. et al., EASE : Education of architects in solar energy and environment, Altener Conference, Sitges, novembre 1996

[PEU 97] Peuportier B., Kohler N. and Boonstra C., European project REGENER, life cycle analysis of buildings, 2nd International Conference « Buildings and the environment », Paris, 1997

[PEU 04] Peuportier B., Kellenberger D., Anink D., Mötzl H., Anderson J., Vares S., Chevalier J., and König H., Inter-comparison and benchmarking of LCA-based environmental assessment and design tools, Sustainable Building 2004 Conference, Warsaw

[PEU 05] Peuportier B., Towards sustainable neighbourhoods, the eco-housing project, IV International Conference “Climate change – energy awareness – energy efficiency”, Visegrad, 2005

[PEU 11] Peuportier B., Herfray G. et al., Life cycle assessment methodologies in the construction sector: the contribution of the European LORE-LCA project, Sustainable Building Conference, Helsinki, October 2011

[POL 95] Polster B., Contribution à l'étude de l'impact environnemental des bâtiments par analyse de cycle de vie, thèse de doctorat. Ecole des Mines de Paris, Décembre 1995

[POP 06] Popovici E., Contribution to the Life Cycle Assessment of settlements, thèse de doctorat, MINES ParisTech, février 2006

[SAL 04] Salomon T. et al., PLEIADES + COMFIE, logiciel de simulation thermique dynamique couplé avec EQUER, outil d'analyse d'impact environnemental, Conférence IBPSA France, Toulouse, octobre 2004

[STO 05] Støa E. and Nesje A., Supporting participation in the development process of sustainable neighbourhoods, IV International Conference “Climate change – energy awareness – energy efficiency”, Visegrad, juin 2005