

Les éco-technologies dans la construction

Des outils ont été développés pour évaluer les impacts environnementaux des bâtiments, en intégrant la fabrication des matériaux de construction, le chantier, les procédés liés à l'utilisation (comme le chauffage et la consommation d'eau), ainsi que la démolition, le traitement des déchets et leur recyclage éventuel. Ces outils visent à apporter une aide à la décision, et permettent d'étudier des innovations techniques sous l'angle de la qualité environnementale.

par **Bruno PEUPORTIER***

DES OUTILS, PROCESS ET
MÉTHODES EN QUESTIONS

Le secteur du bâtiment contribue de manière importante aux impacts environnementaux des activités humaines. C'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 plus de 10 % des prélèvements, et une quantité cinq fois plus importante est utilisée pour la production d'électricité, qui est 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 en équivalent phosphate). Il est donc essentiel de mobiliser l'ensemble de la filière pour préserver les générations futures et la biodiversité. Face à ce contexte, certaines technologies peuvent contribuer à réduire les impacts environnementaux des bâtiments. Mais 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 renou-

velle 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 tels que la division par 4 des émissions de gaz à effet de serre à l'horizon 2050. Peut-on affirmer pour autant que le bâtiment le moins polluant est celui qu'on ne construit pas ? Ce n'est pas si simple : certes, rénover un bâtiment ancien évite la fabrication d'une quantité importante de matériaux, qui serait nécessaire pour une construction neuve, mais il est difficile d'atteindre le même niveau de performance que dans le neuf, en particulier en matière d'énergie. Les impacts évités peuvent être alors compensés par ceux générés, année après année, pour le chauffage (par exemple). Il faut, d'autre part, assurer les besoins du présent, et répondre aux besoins des demandeurs de logement (notamment des 100 000 personnes sans domicile fixe).

Relever ces défis demande de modifier en profondeur les pratiques professionnelles et les technologies. Les décisions influençant le plus la performance d'une construction sont prises durant les phases amont, d'où l'importance de la programmation, qui devrait inclure des exigences de performance environnementale, et de l'éco-conception, consistant à prendre en compte les aspects environnementaux lors de la conception.

* MINES PARISTECH, Centre Energétique et Procédés.

Domaine	Critères
Ecologique	Préservation des ressources (énergie, eau, matières premières, sol) Emissions dans l'air, l'eau et le sol (gaz à effet de serre, atteinte à la couche d'ozone, acidification (1), eutrophisation (2), toxicité sur l'homme, la faune et la flore...) Production de déchets (inertes, banals, dangereux, radioactifs)
Economique	Coût d'investissement, de fonctionnement, d'entretien et de maintenance, de démantèlement Durabilité, valeur patrimoniale
Socioculturel	Fonctionnalité, adaptabilité Confort (visuel, thermique, acoustique, olfactif) Santé (cancers, autres maladies, accidents) Image, mémoire, valorisation personnelle et emploi, démocratie locale, équité...

Tableau 1 : Exemple de grille multicritères.

VERS UNE GESTION INTERSECTORIELLE DE L'ENVIRONNEMENT

La performance d'un bâtiment est la résultante d'un programme établi par le maître d'ouvrage (respectant a minima la réglementation), du choix du site, de la compétence de l'architecte et des bureaux d'études, de l'usage de technologies adaptées, du soin apporté par les entreprises à la réalisation et du comportement citoyen des occupants. Le secteur du bâtiment est alors en interaction avec ceux de l'industrie des matériaux et composants de construction, de l'énergie et des transports. Selon certains, il ne sera pas possible d'améliorer le parc existant et, par conséquent, les efforts doivent porter sur la fourniture d'énergie « propre ». A l'autre extrême, les contraintes pèsent entièrement sur le bâtiment, qui devient producteur d'énergie. La densification urbaine est parfois proposée pour réduire les problèmes environnementaux liés aux transports. L'innovation technique, quant à elle, peut être axée plutôt sur l'enveloppe ou plutôt sur les équipements. En fonction du type de bâtiment, de son usage, du contexte local (en particulier, climatique), une approche peut s'avérer plus pertinente qu'une autre. Il s'agit alors pour les acteurs impliqués de partager des critères de performance communs pour comparer entre elles différentes solutions, architecturales et techniques. La multiplicité des fonctions du bâtiment complique la caractérisation de cette performance, qui intègre des aspects écologiques, économiques et socioculturels. Les approches monocritères présentent le risque de remplacer un problème environnemental par un autre : par exemple, la préservation de la couche d'ozone a conduit à sélectionner de nouveaux fluides frigorigènes contribuant à l'effet de serre. Une liste de critères est donnée dans le tableau 1 à titre d'exemple. De telles grilles ont été étudiées dans différents projets européens et nationaux, comme Eco-housing, Adequa et Lense. 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. Mais la fabrication des produits nécessite des matières premières et de l'énergie, et

la production d'énergie nécessite, aussi, des matériaux pour la construction des infrastructures de production. Les impacts environnementaux peuvent être évalués en résolvant un système matriciel prenant en compte cet ensemble d'interactions. Cette approche est mise en œuvre dans la base de données *Ecoinvent* (3), élaborée en Suisse, mais contenant des données européennes sur certains matériaux, et même des données de différents pays (dont la France) concernant certains procédés (comme, par exemple, la production d'électricité). Les impacts environnementaux liés aux services (banques, assurances...) peuvent être affectés aux différents produits, sur la base de systèmes matriciels utilisés en économie. Simplifier les analyses rend l'approche plus accessible aux nombreuses PME présentes sur le marché des produits de construction, mais cela nécessite une validation.

En France, les fabricants de matériaux et de composants de construction ont élaboré une norme permettant de caractériser la performance environnementale de ces produits selon une méthode harmonisée. Chaque fabricant connaît les émissions de polluants liées aux procédés de fabrication qu'il contrôle, mais il doit faire appel à d'autres données (généralement issues de la base suisse) pour les matières premières et l'énergie qu'il consomme. Cette approche offre l'avantage d'une gestion décentralisée de ces évaluations, chaque industriel choisissant le prestataire de son choix, mais une réflexion plus globale sur la mutualisation de certaines informations et leur traitement matriciel pourrait être utile.

La base de données française *Inies* (4) ne concerne que les produits de construction. Or, le choix d'un produit influence souvent la consommation d'énergie du bâtiment où il est mis en œuvre ; donc, des données sur les

(1) L'acidification est liée aux pluies acides, entraînant le dépérissement des forêts.

(2) L'eutrophisation est liée à l'apport d'engrais dans les eaux de surface, pouvant entraîner la prolifération d'algues et l'appauvrissement du milieu aquatique en oxygène.

(3) www.ecoinvent.ch

(4) www.inies.fr

impacts liés à la production d'énergie sont nécessaires. Les perspectives, en termes de débouchés pour les produits issus du recyclage, faciliteront peut-être une telle gestion intersectorielle des questions d'environnement, ce qui permettrait de dépasser les optima locaux.

L'ÉVALUATION DE LA QUALITÉ ENVIRONNEMENTALE DES BÂTIMENTS

L'objectif est de mieux cerner les liens de cause à effet induisant les impacts environnementaux, de manière à aider les acteurs à réduire ces impacts. Le plus souvent au niveau international, l'approche par analyse de cycle de vie (ACV) est adoptée pour évaluer les impacts environnementaux des produits. Cette méthode consiste à établir l'inventaire des substances puisées et émises dans l'environnement : ressources utilisées, émissions dans l'air, l'eau et le sol, déchets. Des indicateurs environnementaux sont ensuite évalués. Par exemple, le potentiel de réchauffement global est défini par le Groupe intergouvernemental d'experts sur le changement climatique. Cet indicateur permet d'exprimer une équivalence en CO₂ des 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 (DALY (5)). Un indicateur similaire est défini pour la biodiversité, en pourcentage d'espèces disparues sur une surface de territoire et une durée déterminées (PDF.m².an) (6).

Nous avons appliqué cette méthode au produit «bâtiment» (7), en tenant compte de ses spécificités par rapport aux produits industriels : chaque bâtiment est en général unique, et il entretient des liens forts tant avec ses occupants qu'avec le site dans lequel il est intégré. Nous avons choisi de développer un outil informatique, le logiciel EQUER (8), pour faciliter les comparaisons de variantes et constituer ainsi une aide à la décision. Un chaînage a été réalisé avec l'outil de simulation thermique COMFIE, ce qui établit un lien entre l'analyse énergétique et l'analyse environnementale.

Un tel outil d'analyse est utilisable par différents professionnels du bâtiment. Il peut fournir des éléments aux architectes souhaitant justifier leurs projets auprès des maîtres d'ouvrage en présentant un bilan environnemental rigoureux. L'élargissement des missions des

BET aux aspects environnementaux peut leur permettre d'intervenir plus en amont dans le processus de conception, avec un effet bénéfique sur la qualité technique. Les industriels peuvent promouvoir de nouveaux produits, car un bilan global énergie-environnement peut contribuer à caractériser la qualité d'un composant. La méthode pourrait également être utilisée pour constituer une base de connaissances sur la construction à faible impact environnemental, et pour mieux informer les occupants.

Le principe général que nous suivons consiste à assurer une qualité satisfaisante de l'ambiance intérieure, tout en réduisant les impacts environnementaux externes. Nous nous fixons ainsi un objectif fonctionnel – le bâtiment doit abriter un certain nombre d'activités pour lesquelles il est prévu, avec un certain niveau de confort, de qualité de la vie, etc.–, puis nous cherchons à minimiser l'impact environnemental, en comparant des variantes répondant aux exigences fonctionnelles énoncées. Notre objet d'étude, l'unité fonctionnelle au sens de l'analyse de cycle de vie, est donc un bâtiment répondant à ces exigences, et considéré sur une certaine durée.

Pour effectuer l'analyse, il faut cependant modéliser un système plus large, variable en fonction des objectifs de l'étude. Si l'objectif est de comparer entre eux différents sites pour une construction, il convient d'inclure les transports induits (par exemple, les trajets domicile-travail), la gestion des déchets ménagers, ainsi que les réseaux d'énergie (électricité, gaz, éventuellement chaleur...) et d'eau. Si l'étude se restreint à l'enveloppe et aux équipements du bâtiment, le transport des personnes peut être négligé, si toutes les variantes comparées sont équivalentes de ce point de vue.

Les inventaires des procédés prennent en compte les phases amont éventuelles : par exemple, dans l'inventaire du kWh utile fourni par une chaudière à gaz, l'extraction et la distribution du gaz sont prises en compte. Les impacts liés aux infrastructures sont comptabilisés s'ils sont importants. Par exemple, les inventaires de transport tiennent compte de la construction et de l'entretien des réseaux, alors que les impacts de la construction des usines de fabrication des matériaux et composants sont considérés comme négligeables. Les déchets ménagers peuvent être recyclés ou incinérés, avec ou sans récupération de chaleur. L'inventaire correspondant est calculé en fonction de données fournies par l'utilisateur (rendement de la valorisation énergétique, énergie substituée...).

(5) *Disability adjusted life loss*, années de vie perdues ajustées par le handicap, cf. M.J. Goedkoop et R. Spriemsma, *The Eco-Indicator 99, A damage oriented method for life cycle impact assessment, methodology report, methodology annex, manual for designers*, avril 2000.

(6) PDF : *Potentially Disappeared Fraction* (fraction potentiellement disparue), cf. référence ci-dessus.

(7) Bruno Peuportier, *Eco-conception des bâtiments*, Presses de l'École des Mines, avril 2003.

(8) Cf. www.izuba.fr

<i>Indicateur environnemental</i>	<i>Unité</i>	<i>Référence</i>
Demande cumulative d'énergie	GJ	(Frischknecht <i>et al.</i> , 2004) (9)
Eau utilisée	m ³	(Frischknecht <i>et al.</i> , 2004)
Épuisement des ressources abiotiques	kg antimoine eq.	(Guinee <i>et al.</i> , 2001) (10)
Déchets produits	t	(Frischknecht <i>et al.</i> , 2004)
Déchets radioactifs	dm ³	(Frischknecht <i>et al.</i> , 2004)
Effet de serre (100 ans)	t CO ₂ eq.	(GIECC, 2007) (11)
Acidification	kg SO ₂ eq.	(Guinee <i>et al.</i> , 2001)
Eutrophisation	kgPO ₄ ³⁻ eq.	(Guinee <i>et al.</i> , 2001)
Dommage à la qualité des écosystèmes dus à l'écotoxicité	PDF*m ² .an	(Goedkoop et Spriensma, 2000), *cf. note 6
Dommage à la santé	DALY**	(Goedkoop et Spriensma, 2000), **cf. note 5
Production d'ozone photochimique	kg C ₂ H ₄ eq.	(Guinee <i>et al.</i> , 2001)
Odeur	m ³ air	(Guinee <i>et al.</i> , 2001)

Tableau 2 : Liste des indicateurs environnementaux pris en compte dans l'outil EQUER.

Les inventaires utilisés par le logiciel EQUER sont issus de la base de données *Ecoinvent*. Cette base comporte davantage de substances que la base française *Inies* (par exemple, les dioxines y sont comptabilisées). Ces inventaires comportent ainsi plusieurs centaines de flux. Pour permettre l'interprétation des résultats, il est alors pertinent de condenser les informations en utilisant des indicateurs environnementaux. Nous en considérons 12 pour l'instant (cf. *tableau 2*).

Le thème « ozone photochimique » concerne l'ozone troposphérique et ses effets sur la santé (maladies respiratoires) – la concentration en ozone étant l'un des paramètres de la qualité de l'air, dans les villes. L'indicateur « épuisement des ressources » prend en compte les réserves mondiales des matières concernées et la rapidité de leur raréfaction. La génération d'odeurs est exprimée en divisant les émissions (en mg) par les seuils respectifs (en mg/m³) à partir desquels les substances peuvent être détectées par 50 % d'un échantillon représentatif de la population. L'indicateur est alors exprimé en m³ d'air vicié.

LIMITES DE LA MÉTHODOLOGIE

L'analyse du cycle de vie (ACV) ne porte que sur les aspects quantifiables de la qualité environnementale. Les appréciations plus subjectives, concernant l'esthétique ou la qualité de la vie, ne sont donc pas abordées. En ce qui concerne la santé, l'indicateur de toxicité humaine est évalué en considérant des effets moyennés sur le territoire européen : il ne dépend pas du lieu

d'émission (densité de population, vents dominants...). Mais celui-ci n'est en général pas connu, car le concepteur ne sait pas dans quelle usine les matériaux de construction qu'il a prescrits seront fabriqués. Si l'objectif de l'étude est d'évaluer l'impact sanitaire sur les occupants du bâtiment ou sur les riverains, il est nécessaire d'utiliser d'autres types de modèles, intégrant les transferts de masse dans les revêtements de sol et de murs, les mouvements d'air, etc.

Une limite, commune à l'ensemble des indicateurs, est l'imprécision des évaluations. Il est souvent difficile de connaître la marge d'incertitude sur les données et les résultats, mais elle peut être élevée. Dans des domaines comme la thermique, il est possible de comparer les résultats d'un calcul à une facture énergétique ou à une mesure de température. Mais s'agissant d'émissions de CO₂, par exemple, la mesure ne peut s'effectuer que sur un procédé isolément, et non sur l'ensemble du cycle

(9) Frischknecht R., Jungbluth N., Althaus H.-J., Doka G., Heck T., Hellweg S., Hischer R., Nemecek T., Rebitzer G., Spielmann M. (2004) « *Overview and Methodology* », *ecoinvent report No. 1*, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, Suisse.

(10) Guinée J. B., (final editor), Gorée M., Heijungs R., Huppes G., Kleijn R., de Koning A., van Oers L., Wegener Sleeswijk A., Suh S., Udo de Haes H. A., de Bruijn H., van Duin R., Huijbregts M. A. J., Lindeijer E., Roorda A. A. H., Weidema B. P. : *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, 704 p.

(11) Forster, P.M. (2007) *Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing*. In: Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (ed), *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press.



Rénovation du Reichstag, à Berlin.

© Chien-Chi Chang/MAGNUM PHOTOS

de vie d'un bâtiment. Un premier niveau d'imprécision concerne l'évaluation des flux de matière et d'énergie (données d'inventaire). Un deuxième niveau correspond à l'agrégation en effets (impacts potentiels) : ainsi, par exemple, l'incertitude sur le potentiel de réchauffement global des gaz à effet de serre a été estimée à 35 %. Enfin, un troisième niveau concerne le passage des effets aux dommages (années de vie perdues, par exemple). Une autre cause d'erreur 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 multicritères 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 Presco. 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 deux nouveaux projets : Enslic Building et Lore-LCA. L'un des axes de travail est la simplification des analyses. Contrairement aux produits industriels, un bâtiment est généralement construit en un exemplaire unique. Il est alors impossible de consacrer plusieurs mois d'études à une ACV, comme on le fait dans le cas d'un produit fabriqué à des milliers d'exemplaires.

DE LA THÉORIE À LA PRATIQUE

Développé en 1995 dans le cadre de partenariats européen (projet REGENER) et national (avec notamment DUMEZ, maintenant dans le groupe VINCI), l'outil EQUER a été utilisé dans des projets, en construction neuve et en réhabilitation, dans les secteurs résidentiel, mais aussi tertiaire (bureaux, bâtiments scolaires...). Ces applications ont permis de montrer l'importance de la phase d'utilisation : dans une maison standard actuelle, par exemple, la phase de construction ne représente qu'environ 20 % de l'énergie consommée, contre 80 % pour l'utilisation (chauffage, eau chaude

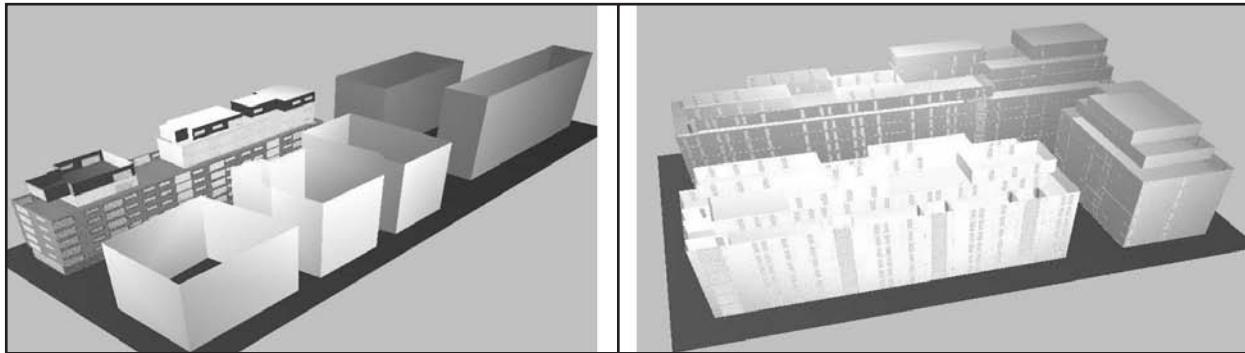


Figure 1 : Saisie informatique du projet, logiciel ALCYONE.

sanitaire, éclairage et autres usages de l'électricité). Pour une maison correspondant aux meilleures pratiques actuelles en termes d'efficacité énergétique (label allemand « maison passive »), la part de la construction atteint 50 %. Par rapport à une maison standard chauffée au gaz, la maison passive chauffée par pompe à chaleur émet 3,5 fois moins de CO₂, mais génère 30 % de déchets radioactifs en plus. La production d'électricité à partir de sources d'énergie renouvelables (toiture photovoltaïque, par exemple) permettrait de réduire l'ensemble des impacts.

Ces études ont également fait apparaître l'influence du comportement des occupants sur la performance environnementale des bâtiments. L'éco-conception ne suffit pas : la fourniture de modes d'emploi serait nécessaire à une meilleure gestion du patrimoine bâti.

L'approche a été étendue à l'échelle d'un petit quartier, dans le cadre du projet européen Eco-housing, et du projet Adequa, comportant une application au quartier Lyon Confluence. Trois îlots ont été modélisés, repré-

sentant 60 000 m² logements, 15 000 m² de bureaux et 70 000 m² d'espaces verts.

La figure suivante montre un exemple de résultat où le projet est comparé à une référence correspondant au standard actuel de construction et aux meilleures pratiques. Chaque axe correspond à un indicateur, les variantes sont représentées en valeur relative par rapport à la référence : par exemple, les meilleures pratiques permettent de réduire d'un facteur 4 les émissions de gaz à effet de serre, mais le projet n'atteint pas tout-à-fait cet objectif.

La chaudière bois étudiée pour le projet émet des composés organiques volatils, avec des effets sur la santé et la biodiversité : un travail sur la dépollution des fumées serait donc utile. Cette étude a également montré l'influence de la conception architecturale : les besoins de chauffage peuvent varier d'un facteur 3, selon la compacité et l'exposition au soleil des bâtiments, d'où l'intérêt d'une approche dite « bioclimatique » et d'une conception intégrée, associant en amont architecte et ingénieur dans une démarche commune. Le bénéfice

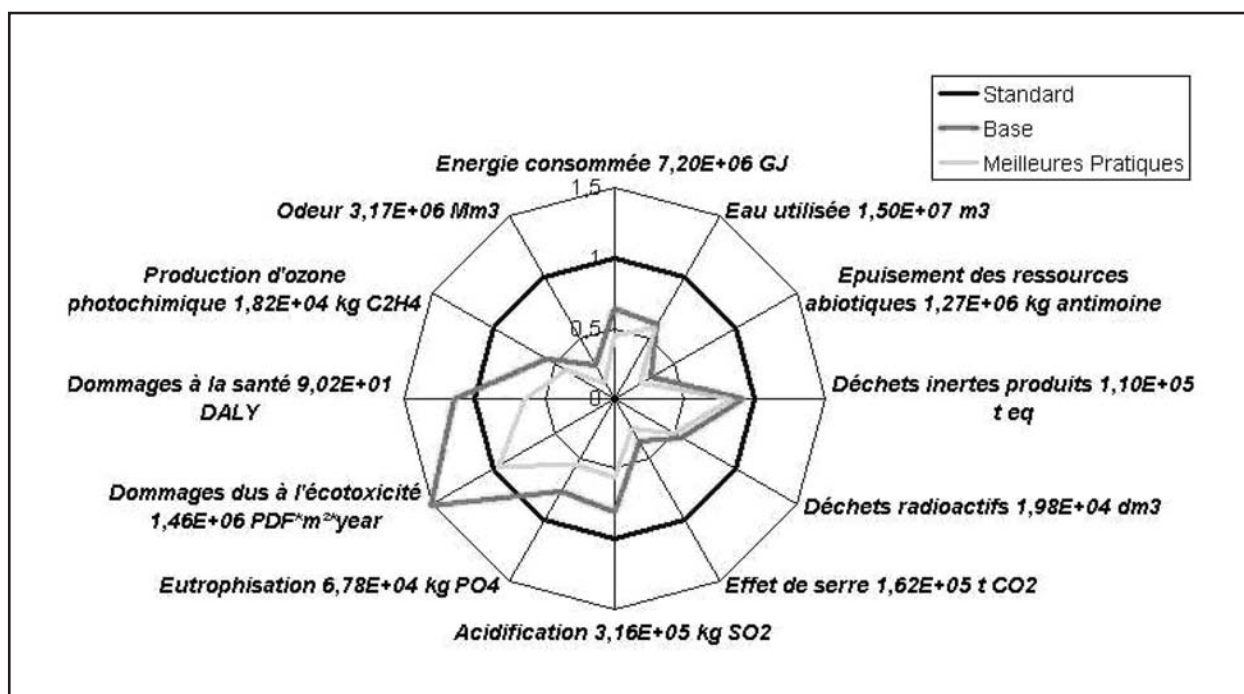


Figure 2 : Résultats de l'analyse de cycle de vie sur 80 ans, comparaison de variantes (logiciel EQUER).

environnemental de choix technologiques comme les énergies renouvelables, les économiseurs d'eau, la combinaison de matériaux selon leur inertie thermique, peut être quantifié, ce qui peut contribuer à promouvoir l'innovation. L'intérêt principal de l'ACV est de faire progresser l'ensemble des filières : il ne s'agit pas d'imposer un modèle unique de bâtiment.

Un travail important reste à faire pour améliorer la précision et la fonctionnalité de ces outils, mais les premières applications en montrent les potentialités. L'enjeu, en termes de préservation de l'environnement et de développements industriels, justifie des efforts, qui peuvent en partie être mutualisés grâce à des partenariats internationaux.