

Université de La Rochelle  
Pôle Sciences et Technologie

THÈSE

Pour l'obtention du grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE LA ROCHELLE  
Discipline : Génie Civil

Frédéric CHERQUI

**METHODOLOGIE D'EVALUATION D'UN PROJET  
D'AMENAGEMENT DURABLE D'UN QUARTIER  
Méthode ADEQUA**

Directeurs de thèse : E.WURTZ et F. ALLARD

Présentée le 14 Décembre 2005

**Composition du Jury :**

*Rapporteurs*

G. ACHARD	Professeur,	Université de Savoie
B. PEUPORTIER	Resp. Scientifique HDR,	Ecole des Mines de Paris

*Examineurs*

F. BUYLE-BODIN	Professeur,	Université de Lille
D. GROLEAU	Ingénieur de Recherche,	Ecole d'Architecture de Nantes
E. WURTZ	Directeur de Recherche,	CNRS - INES
F. ALLARD	Professeur,	Université de La Rochelle



Je remercie Francis Allard qui m'accueilli au sein du laboratoire LEPTAB, il a de plus accepté d'encadrer mon travail de thèse, m'apportant le recul critique indispensable dû à sa longue expérience dans le domaine. Je remercie également vivement Etienne Wurtz qui m'a permis de m'épanouir dans ce milieu si étrange qu'est la recherche. Il est difficile de dire comment être un bon directeur de thèse, je dirais simplement qu'Etienne a su être un directeur de thèse idéal.

Je suis très reconnaissant à M. Buyle-Bodin qui a partagé une partie de son précieux temps pour étudier ma thèse et qui m'a fait l'honneur de présider ce jury de thèse, vos conclusions sur mon travail sont très importantes pour moi. Merci à Gilbert Achard et Bruno Peuportier d'avoir accepté de rapporter ma thèse, vos remarques sont toujours pertinentes et m'apportent énormément. Un grand merci également à Dominique Groleau pour son implication dans le jury de thèse et pour ses très nombreuses remarques et pistes de réflexion : j'ai maintenant quelques années de travail pour répondre. De nouveau merci à Gilbert, Bruno et Dominique pour les différents échanges que nous avons eu à travers le projet ADEQUA, j'ai énormément appris.

Je suis également très reconnaissant envers l'ensemble des partenaires du projet ADEQUA pour leur soutien, leur confiance et les nombreux échanges : Emmanuel Dufrasnes, Emil Popovici, Marjorie Musy, Daniel Siret, Nathalie Molines, Christophe Gobin, Alain Bornarel, Anne Le Mouel, Rofia Lehtihet, Sophie Debergue. Et également mes principaux partenaires pour le projet Espaces Gare : Dominique Devez, Sophie Traineau, Véra Broez, Jean-Louis Thomas.

Sans oublier ceux qui m'ont donné les moyens financiers pour ce travail : le Ministère de la Recherche et de l'Éducation, l'ADEME, le PUCA, le RGCU et le FSE.

Pour finir, je tiens à saluer et remercier vivement Adeline, Adriana, Agota, Alain, Alain, Alain, Alain, Albert, Alexis, Aline, Amina, Anaële, André, Anne, Anne-Marie, Anne-Marie, Antoine, Antoine, Antony, Armand, Armelle, Arnaud, Aurélien, Aurore, Bachir, Barbara, Benoît, Benoît, Bernard, Bernard, Bertrand, Bertrand, Brian, Brian, Brigitte, Caroline, Caroline, Cédric, Céline, Céline, Chacha, Chadi, Christian, Christian, Christine, Christine, Christophe, Claire, Claire, Clara, Claude, Claudine, Colette, Cristian, Cyrille, Daniel, Daniel, Danielle, Danielle, Danielle, David, David, David, Delphine, Denis, Dina, Dominique, Elodie, Emmanuel, Emmanuel, Emmanuel, Emmanuelle, Estelle, Fabien, Florence, Florent, Florian, Franck, Franck, Frank, Fred, Frédérique, Gaëlle, Gérard, Ghislaine, Hae Young, Habib, Hassan, Henry, Ily, Isabelle, Isabelle, Jacques, Jany, Jean, Jean, Jean-Bernard, Jean-Claude, Jean-François, Jean-Luc, Jean-Luc, Jean-Michel, Jean-Michel, Jean-Paul, Jean-Paul, Jean-Pierre, Jean-Pierre, Jérôme, Jerry, John, José, Julie, Julien, Karim, Kelly, Khalil, Kit, Laurent, Laurent, Lisa, Lisette, Lola, Louise, Luce, Lucien, Ludivine, Ludovic, Ludovic, Mamino, Manuella, Marc, Marc, Marc, Marc, Marianne, Marie-France, Marie-Paule, Marion, Marion, Martin, Michel, Michel, Michèle, Micheline, Mireille, Mirella, Mohammed, Monique, Mounir, Natacha, Victor, Nathalie, Nathan, Nicolas, Nicolas, Noa, Noelle, Noémie, Noémie, Odile, Olivier, Olivier, Olivier, Pascal, Pascal, Pascale, Patrice, Patrice, Patrick, Paul, Peter, Philippe, Pierre-Olivier, Poupouille, Rachel, Rafik, Raoul, Renan, Robert, Romain, Ronald, Sabine, Sandrine, Sébastien, Serge, Sophie, Sophie, Stéphane, Stéphane, Stéphane, Stéphanie, Stéphanie, Sylvain, Tanguy, Thomas, Thomas, Timea, Vanessa, Véronique, Véronique, Véronique, Victor, Vincent, Virginie, Virginie, Vivien, Yannick, Yannick, Yoko, Youssef, Yves, Yvonne, Yvonne, Zaki...

Et la meilleure pour la fin : amoureuxment merci Morgane sans qui je ne sais pas ce que je serais, ce que je ferais et où je serais...

J'espère n'avoir oublié personne. Certains se reconnaîtront, d'autres non, pourtant ils y sont...



## Méthodologie d'évaluation d'un projet d'aménagement durable d'un quartier - méthode ADEQUA

La démarche HQE, puis l'émergence rapide et incontrôlée d'une volonté de "développement durable" dans le domaine de la construction, sont à l'origine de nouvelles exigences d'aménagement urbain. Or la prise en compte du concept de développement durable requiert une analyse holistique d'un projet urbain. Cela nécessite une échelle d'étude plus large que celle du bâtiment. Ce travail concerne la mise en place d'une méthode d'analyse multi indicateurs basée sur huit objectifs à l'échelle du quartier. La méthode développée est une contribution au projet national initié par le Ministère de l'Équipement et l'ADEME : le projet ADEQUA. La quantification des indicateurs associés aux objectifs permet au professionnel de la construction, l'aménageur ou la collectivité, d'évaluer quantitativement et de comparer différentes alternatives d'aménagement d'un quartier, à l'aide de diagrammes radars. Cette quantification est basée sur l'utilisation d'outils de simulation et sur une agrégation multicritères.

Mots-clés : simulation, quartier, développement durable, environnement, évaluation, indicateurs, analyse multicritères.

## Methodology for assessing sustainable urban district project - ADEQUA method

The fast and uncontrolled emergence of a will to promote sustainable development in the field of building construction generates new requirements for urban development. Besides technical solutions, the project manager or urban planner must take into consideration the overall impact of his project on the local and global environment as well as social trends, economic development, health and safety for users. Integration of a large number of evaluation criteria makes the assessment of such strategy very hard to carry out without a real methodological work. In the last few years, a strong effort has been made in order to organize this debate and various methods evaluating environmental quality of a building project have been proposed. However, this concept of sustainable development requires solutions at a higher level than the single building. This paper proposes a first methodological approach in order to evaluate the sustainability of a district project, in the framework of the French ADEQUA project. This methodology allows actors in the building sector to consider different sustainable alternatives for a project. No unique alternative fits perfectly to sustainable development principles, but there are several best solutions according to specific characteristics of a project and to its own objectives.

Keywords: simulation, district, sustainable development, environment, assessment, indicators, multi-criteria analysis.



# Table des matières

<b>INTRODUCTION</b> .....	<b>1</b>
<b>CHAPITRE 1 : La notion de développement durable et le domaine de la construction</b> .....	<b>3</b>
<b>I. La notion de Développement Durable (DD)</b> .....	<b>4</b>
I.1. <i>Historique</i> .....	4
I.2. <i>Définitions</i> .....	6
I.3. <i>Le secteur de la construction</i> .....	8
I.4. <i>Evolution de la législation française</i> .....	11
I.5. <i>Démarches internationales liées au bâtiment</i> .....	12
<b>II. La démarche HQE, une première étape française</b> .....	<b>14</b>
II.1. <i>L'association HQE</i> .....	14
II.2. <i>Les cibles de la HQE et l'application de la démarche</i> .....	14
II.3. <i>Certification et perspectives</i> .....	15
<b>III. Le projet ADEQUA</b> .....	<b>18</b>
III.1. <i>Présentation générale</i> .....	18
III.2. <i>Réalisation d'une boîte à outil d'aide à la décision</i> .....	18
III.3. <i>Articulation du projet avec le travail de thèse</i> .....	19
<b>IV. Synthèse</b> .....	<b>20</b>
<b>CHAPITRE 2 : Définition générale de la méthode d'évaluation</b> .....	<b>21</b>
<b>I. Portée de la méthode</b> .....	<b>22</b>
I.1. <i>Importance de l'échelle d'étude</i> .....	22
I.2. <i>Aspects concernés et futurs utilisateurs</i> .....	26
I.3. <i>Importance des études quantitatives</i> .....	28
<b>II. Différentes méthodes d'évaluation d'un projet</b> .....	<b>30</b>
II.1. <i>Listes de contrôle ("Check-lists")</i> .....	30
II.2. <i>Matrices d'impact</i> .....	31
II.3. <i>Les méthodes d'aide à la décision</i> .....	32
II.4. <i>Discussion</i> .....	35
<b>III. Etat de l'art des projets et des outils</b> .....	<b>36</b>
III.1. <i>Présentation des méthodes</i> .....	37
III.2. <i>Présentation des logiciels et outils</i> .....	42
III.3. <i>Projets et programmes de recherche</i> .....	47
III.4. <i>Projets en cours</i> .....	51
III.5. <i>Etat des lieux des projets</i> .....	53
<b>IV. Principes généraux de la méthode</b> .....	<b>54</b>
IV.1. <i>Aide à la décision et approche choisie</i> .....	54
IV.2. <i>Mode d'évaluation d'une alternative</i> .....	55
IV.3. <i>Comparaison d'alternatives</i> .....	56
IV.4. <i>Utilisation d'une référence</i> .....	57
<b>V. Synthèse</b> .....	<b>58</b>
<b>CHAPITRE 3 : Objectifs d'aménagement durable d'un quartier</b> .....	<b>59</b>
<b>I. Des objectifs vers les indicateurs</b> .....	<b>60</b>
I.1. <i>Rôles des objectifs</i> .....	60
I.2. <i>Les Indicateurs du Développement Durable (IDD)</i> .....	61
I.3. <i>Les différents modèles d'indicateurs</i> .....	63
I.4. <i>Classification des objectifs</i> .....	67

<b>II. Systèmes d'objectifs et d'indicateurs existants .....</b>	<b>68</b>
II.1. <i>Le projet PASTILLE</i> .....	68
II.2. <i>Le projet CRISP</i> .....	69
II.3. <i>Démarches européennes</i> .....	70
II.4. <i>Démarches françaises</i> .....	74
II.5. <i>Bilan des systèmes</i> .....	78
<b>III. Présentation du système d'objectifs .....</b>	<b>80</b>
III.1. <i>Préserver les ressources (RES)</i> .....	80
III.2. <i>Préserver l'écosystème (ECO)</i> .....	81
III.3. <i>Améliorer la qualité des ambiances (AMB)</i> .....	81
III.4. <i>Préserver la santé et gérer les risques (RIS)</i> .....	81
III.5. <i>Prendre en compte le patrimoine (PAT)</i> .....	81
III.6. <i>Favoriser le développement local (LOC)</i> .....	82
III.7. <i>Renforcer la vie sociale (SOC)</i> .....	83
III.8. <i>Mettre en valeur la place du quartier dans la ville (VAL)</i> .....	83
<b>IV. Synthèse .....</b>	<b>84</b>
<b>CHAPITRE 4 : Gestion des indicateurs associés aux objectifs .....</b>	<b>85</b>
<b>I. Introduction .....</b>	<b>86</b>
I.1. <i>Quantification des indicateurs</i> .....	86
I.2. <i>Normalisation des indicateurs</i> .....	86
I.3. <i>Indicateurs associés à chaque objectif</i> .....	87
<b>II. Agrégation des données .....</b>	<b>88</b>
II.1. <i>Agrégation complète</i> .....	88
II.2. <i>Méthode d'agrégation choisie</i> .....	91
<b>III. Objectif "Préserver les ressources" (RES) .....</b>	<b>92</b>
III.1. <i>Energie</i> .....	93
III.2. <i>Eau</i> .....	94
III.3. <i>Sol</i> .....	95
III.4. <i>Ressources abiotiques épuisables</i> .....	96
<b>IV. Objectif "Préserver l'écosystème" (ECO) .....</b>	<b>97</b>
IV.1. <i>Acidification</i> .....	97
IV.2. <i>Ecotoxicité</i> .....	97
IV.3. <i>Eutrophisation excessive ou dystrophisation</i> .....	98
IV.4. <i>Déchets inertes ultimes</i> .....	99
<b>V. Objectif "Améliorer la qualité des ambiances" (AMB) .....</b>	<b>100</b>
V.1. <i>Ambiance intérieure</i> .....	100
V.2. <i>Ambiance extérieure</i> .....	103
<b>VI. Préserver la santé et gérer les risques (RIS) .....</b>	<b>108</b>
VI.1. <i>Effet de serre</i> .....	108
VI.2. <i>Toxicité humaine</i> .....	109
VI.3. <i>Smog d'été</i> .....	110
VI.4. <i>Déchets radioactifs</i> .....	111
<b>VII. Normalisation des indicateurs et visualisation .....</b>	<b>112</b>
VII.1. <i>Valeurs de référence pour la normalisation des indicateurs</i> .....	112
VII.2. <i>Mode de représentation</i> .....	113
<b>VIII. Outils de gestion statistique et spatiale des indicateurs .....</b>	<b>117</b>
VIII.1. <i>Outil de gestion statistique des indicateurs et objectifs</i> .....	117
VIII.2. <i>Systèmes d'informations géographiques : gestion spatiale</i> .....	119
<b>IX. Synthèse .....</b>	<b>122</b>

<b>CHAPITRE 5 : Etude de cas – Utilisation de la méthode ADEQUA .....</b>	<b>123</b>
<b>I. Présentation du projet Espaces Gare .....</b>	<b>124</b>
I.1. <i>Le quartier de la gare et ses environs .....</i>	<i>124</i>
I.2. <i>Grandes lignes du projet .....</i>	<i>125</i>
I.3. <i>Les trois quartiers .....</i>	<i>127</i>
I.4. <i>Acteurs et ambitions .....</i>	<i>131</i>
<b>II. Application de la méthode sur le quartier EST .....</b>	<b>132</b>
II.1. <i>Objectifs et indicateurs .....</i>	<i>132</i>
II.2. <i>Calcul d'ensoleillement .....</i>	<i>132</i>
II.3. <i>Simulations acoustiques .....</i>	<i>133</i>
II.4. <i>Analyses de cycle de vie .....</i>	<i>137</i>
<b>III. Présentation des alternatives et hypothèses .....</b>	<b>138</b>
III.1. <i>Alternative proposée en juillet .....</i>	<i>138</i>
III.2. <i>Alternative proposée en septembre .....</i>	<i>140</i>
III.3. <i>Hypothèses de calcul .....</i>	<i>141</i>
<b>IV. Evaluation des indicateurs pour les différentes alternatives .....</b>	<b>145</b>
IV.1. <i>Objectif "Préserver les ressources" .....</i>	<i>145</i>
IV.2. <i>Objectif "Préserver l'écosystème" .....</i>	<i>146</i>
IV.3. <i>Objectif "Améliorer la qualité des ambiances" .....</i>	<i>147</i>
IV.4. <i>Objectif "Préserver la santé et gérer les risques" .....</i>	<i>151</i>
<b>V. Comparaison des alternatives .....</b>	<b>152</b>
V.1. <i>Valeur des indicateurs pour les alternatives .....</i>	<i>152</i>
V.2. <i>Objectif "Préserver les ressources" .....</i>	<i>153</i>
V.3. <i>Objectif "Préserver l'écosystème" .....</i>	<i>154</i>
V.4. <i>Objectif "Améliorer la qualité des ambiances" .....</i>	<i>155</i>
V.5. <i>Objectif "Préserver la santé et gérer les risques" .....</i>	<i>156</i>
<b>VI. Synthèse .....</b>	<b>157</b>
<b>CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES .....</b>	<b>159</b>
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE .....</b>	<b>163</b>
<b>ANNEXES .....</b>	<b>175</b>
<b>I. Sigles utilisés .....</b>	<b>175</b>
<b>II. Autres projets .....</b>	<b>177</b>
<b>III. Tableaux de données pour l'évaluation des alternatives .....</b>	<b>180</b>



## Liste des figures

Figure 1 : Grandes dates du développement durable (Brodhag 2004) .....	5
Figure 2 : Modèle de Jacobs et Sadler datant de 1990 (ARPE 2001) .....	6
Figure 3 : Modèle de la région Laboratoire du Saguenay - Lac Saint-Jean (ARPE 2001).....	7
Figure 4 : Différentes images du développement durable (Khalfan 2002) .....	8
Figure 5 : Temps passé à l'intérieur (Observatoire de la qualité de l'air intérieur/CSTB).....	9
Figure 6 : Aménagement durable et aspects concernés (Cherqui et al. 2004a).....	9
Figure 7 : Présentation de l'outil CASBEE .....	13
Figure 8 : Présentation de la démarche HQE et des 14 cibles.....	14
Figure 9 : Description du déroulement d'une opération type (Carfantan et al. 2005).....	24
Figure 10 : Evolutions théoriques des informations disponibles et des possibilités de modification.....	25
Figure 11 : L'aménageur au centre du processus décisionnel (Carfantan et al. 2005).....	27
Figure 12 : "Policy Performance Index" (PPI) (Jesinghaus 1999).....	28
Figure 13 : Recherche de la solution optimum (Brunner et Starkl 2004).....	32
Figure 14 : SMO proposé par le SETUR (Carfantan et al. 2005) .....	39
Figure 15 : Profil établi par le modèle INDI (Charlot-Valdieu et Outrequin 2004).....	40
Figure 16 : Profil d'un projet donné par l'outil Sustainability Checklist .....	44
Figure 17 : Capture d'écran du logiciel INDEX.....	45
Figure 18 : Mesure des conséquences énergétiques d'une alternative (Hanson et al. 1997) .....	46
Figure 19 : Bénéfices et fonctions des espaces verts (Costa et al. 2004) .....	47
Figure 20 : Approches ascendantes et descendantes lors de l'étude d'un projet de construction.....	54
Figure 21 : Exemple de diagramme radar avec les objectifs du projet ADEQUA.....	55
Figure 22 : Comparaison de deux solutions à l'aide d'un diagramme radar : la meilleure alternative est la plus éloignée du centre, l'alternative bleue (Cherqui et al. 2004c).....	56
Figure 23 : Autre comparaison de solutions : l'alternative offrant la meilleure synthèse est la plus circulaire, soit l'alternative bleue.....	56
Figure 24 : Diagrammes radars pour lesquels un objectif a été changé de position (C inversé avec F), on constate que l'aire du diagramme (en bleue) augmente alors que l'évaluation est restée identique.....	57
Figure 25 : Relation entre les données primaires, les indicateurs et les objectifs (Astleithner et al. 2002a; Shields et al. 2002).....	61
Figure 26 : Modèle PSR (Charlot-Valdieu et Outrequin 2002; Dufresnes et Achard 2004).....	63
Figure 27 : Modèle DPSIR (Charlot-Valdieu et Outrequin 2002) .....	64
Figure 28 : Les trois sous-systèmes principaux de l'approche système (Bossel 1999).....	65
Figure 29 : Phases du "Project Cycle" (Youker 1989).....	66
Figure 30 : Exemple de résultats du test PASTILLE .....	69
Figure 31 : Indicateurs et objectifs de la démarche HQE <sup>2</sup> R (Dufresnes et Achard 2004).....	73
Figure 32 : Consommation totale d'eau potable du Grand Lyon (Le Grand Lyon 2004a).....	92
Figure 33 : Distinction entre visibilité intérieure (en bleu) et extérieure (en vert clair).....	101
Figure 34 : Journée où l'air est pur à Québec le 24 septembre 2002 - 15:45 .....	110
Figure 35 : Journée de smog estival à Québec le 10 septembre 2002 - 15:32.....	110

Figure 36 : Journée de smog hivernal à Québec le 2 février 2005 - 9:00.....	110
Figure 37 : Exemple de représentation globale des alternatives .....	114
Figure 38 : Exemple de représentation de l'ensemble des indicateurs .....	114
Figure 39 : Exemple de représentation des indicateurs pour chaque objectif .....	115
Figure 40 : Capture d'écran de l'onglet "Indicateurs" de l'outil .....	117
Figure 41 : Capture d'écran d'un SIG, possibilité de visualisation en 3 dimensions .....	119
Figure 42 : Possibilités du SIG pour la gestion des calques et l'analyse d'information.....	120
Figure 43 : Plan du secteur de la gare et de sa périphérie .....	124
Figure 44 : Présentation du projet "Espaces gare" .....	127
Figure 45 : Photomontage du quartier EST avec une première proposition d'aménagement .....	128
Figure 46: Vue depuis l'hôtel Mercure de la zone OUEST.....	129
Figure 47 : Photomontage du quartier SUD (photo prise depuis la tour de la gare) .....	130
Figure 48 : Méthode de calcul d'une source.....	136
Figure 49 : Présentation de la variante datant de juillet avec la hauteur et le numéro des bâtiments.....	138
Figure 50 : Capture d'écran du quartier et des bâtiments environnants (SOLENE).....	139
Figure 51 : Niveau sonore équivalent de jour à 1,5 mètre du sol (SoundPLAN).....	139
Figure 52 : Présentation de la variante datant de septembre avec la hauteur et le numéro des bâtiments.....	140
Figure 53 : Capture d'écran du quartier et des bâtiments environnants (SOLENE).....	140
Figure 54 : Capture d'écran du logiciel ALCYONE, représentation en 3D à gauche et vue en plan à droite .....	143
Figure 55 : Evolution de la température intérieure et extérieure au cours de l'année pour le deuxième étage du bâtiment 16 de l'alternative de juillet, résultats de COMFIE.....	147
Figure 56 : Résultat du calcul des facteurs de forme entre les faces du quartier et le ciel (SOLENE) .....	148
Figure 57 : Cotation des bâtiments pour l'alternative de juillet.....	149
Figure 58 : Cotation des bâtiments pour l'alternative de septembre.....	149
Figure 59 : Alternative de juillet : prévision du niveau sonore extérieur à 1,5 m du sol, de jour à gauche avec une échelle allant de 60 à 80 dB(A) et de nuit à droite avec une échelle allant de 50 à 80 dB(A).....	150
Figure 60 : Comparaison des alternatives selon l'objectif RES.....	153
Figure 61 : Comparaison des alternatives selon l'objectif ECO.....	154
Figure 62 : Comparaison des alternatives selon l'objectif AMB.....	155
Figure 63 : Comparaison des alternatives selon l'objectif RIS.....	156

## Liste des tableaux

Tableau 1 : Influence de la planification urbaine sur la demande énergétique (Owens 1986).....	22
Tableau 2 : Différents types de listes (André et al. 2003).....	30
Tableau 3 : Problématiques différentes de l'aide multicritères (Roy et Bouyssou 1993).....	33
Tableau 4 : Méthodes de pondération utilisables lors de l'analyse multicritères.....	34
Tableau 5 : Présentation synthétique de l'état de l'art.....	36
Tableau 6 : Exemple de tableau d'analyse (Charlot-Valdiou et Outrequin 2001) .....	37
Tableau 7 : Mesures contre l'expansion urbaine excessive (Hammerl et Everts 2004).....	49
Tableau 8 : Extrait d'indicateurs sur l'expansion urbaine (Hammerl et Everts 2004) .....	49

Tableau 9 : Liste exhaustive des conditions de sélection des indicateurs .....	62
Tableau 10 : Les 14 indicateurs de la SEDD (Dufrasnes et Achard 2004) .....	70
Tableau 11 : Indicateurs européens communs de la SEEU (Dufrasnes et Achard 2004).....	71
Tableau 12 : Arbre des objectifs du projet ECo-housing (Peuportier 2004) .....	72
Tableau 13 : Axes et modules proposés par l'IFEN (IFEN 2003).....	74
Tableau 14 : Critères de la grille RST.01 (Dufrasnes et Achard 2004).....	75
Tableau 15 : Indicateurs proposés par le SETUR et le SNAL (Carfantan et al. 2005) .....	76
Tableau 16 : Classement des indicateurs de l'ARPE (ARPE 2004) .....	77
Tableau 17 : Echelle d'importance entre indicateurs (Saaty 1977) .....	88
Tableau 18 : Valeur du coefficient RI (Al-Harbi 2001).....	90
Tableau 19 : Consommation énergétique des communes (Meziere et Theveniaud 2002).....	92
Tableau 20 : Equivalences entre énergie utilisée et énergie primaire (Frischknet et al 1995) .....	93
Tableau 21 : Valeurs du coefficient d'usage $C_u$ des différentes surfaces urbaines (Brentrup et al. 2002).....	95
Tableau 22 : Ressources épuisables et réserves disponibles (Heijungs 1992) .....	96
Tableau 23 : Potentiel d'acidification des différentes substances (Peuportier 2003).....	97
Tableau 24 : Facteurs d'équivalences entre les types de déchets (Peuportier 2003).....	99
Tableau 25 : Présentation des valeurs de référence proposées .....	112
Tableau 26 : Valeurs des indicateurs associés aux huit objectifs (exemple).....	113
Tableau 27 : Objectifs et indicateurs servant à l'évaluation du quartier EST .....	132
Tableau 28 : Valeur de $D_{FZ}$ selon le type de train (SoundPLAN 1990).....	134
Tableau 29 : Valeur de $D_{Tr}$ selon le type de train (SoundPLAN 1990).....	135
Tableau 30 : Trafic routier dans les rues près de la Gare .....	142
Tableau 31 : Trafic ferroviaire pour une journée type en semaine.....	142
Tableau 32 : Composition des bâtiments .....	143
Tableau 33 : Résultat de calculs effectués par EQUER sur le bâtiment 17 de l'alternative de juillet .....	145
Tableau 34 : Répartition des surfaces au sol [m <sup>2</sup> ] .....	146
Tableau 35 : Comparaison par paire pour l'indicateur d'ensoleillement solaire extérieur (CR=0,059).....	151
Tableau 36 : Résultats des calculs pour l'objectif RIS .....	151



# Nomenclature

$AC_i$	Indice d'écotoxicité aquatique du polluant $i$ [ $m^3/kg$ de polluant]
$A_{div}$	Divergence acoustique géométrique [dB]
$A_{atm}$	Absorption acoustique par l'air [dB]
$A_{dif}$	Diffraction acoustique [dB]
$A_{ref}$	Absorption acoustique par les surfaces verticales [dB]
$A_{sol}$	Effet acoustique du sol [dB]
$C_{eau}$	Consommation d'eau au niveau du quartier [ $m^3$ ]
$C_{météo}$	Paramètre acoustique d'ajustement fonction des conditions météorologiques [dB]
$D_{BM,k}$	Ajustement acoustique pour prendre en compte l'absorption de l'air [dB]
$D_{Br}$	Ajustement acoustique pour prendre en compte la présence d'un pont [dB]
$D_D$	Ajustement acoustique pour prendre en compte le pourcentage de freinage du train [dB]
$D_{Fz}$	Ajustement acoustique pour prendre en compte le type de train [dB]
$D_{Korr,k}$	Ajustement acoustique pour prendre en compte les écrans et les surfaces réfléchives [dB]
$D_L$	Ajustement acoustique pour prendre en compte la longueur du train [dB]
$D_{l,k}$	Ajustement acoustique pour prendre en compte la directivité de la source [dB]
$D_{LC}$	Ajustement acoustique pour prendre en compte la présence d'un croisement à niveau [dB]
$dp$	Distance source – récepteur [m]
$D_{Ra}$	Ajustement acoustique pour prendre en compte le rayon de courbure des voies ferrées [dB]
$D_{s,k}$	Ajustement acoustique pour prendre en compte la distance source - récepteur [dB]
$D_{Tr}$	Ajustement acoustique pour prendre en compte le type de voie ferrée [dB]
$D_V$	Ajustement acoustique pour prendre en compte la vitesse du train [dB]
$E_H$	Espace intérieur habitable par habitant [ $m^2/hab$ ]
$E_i$	Emission de la substance $i$ [kg]
$GWP_i$	Potentiel de réchauffement global du gaz $i$ [ $kg.eq_{CO_2}/kg$ de substance]
HCA	Facteur de toxicologie humaine dans l'air [(kg de chair contaminée)/(kg de substance)]
HCS	Facteur de toxicologie humaine dans le sol [(kg de chair contaminée)/(kg de substance)]
HCW	Facteur de toxicologie humaine dans l'eau [(kg de chair contaminée)/(kg de substance)]
$H_i$	Rayonnement solaire reçu par la surface $i$ [ $W/m^2$ ]
$hs$	Hauteur de la source [m]
$hr$	Hauteur du récepteur [m]
$l_k$	Longueur de section de voie ferrée [m]
$L_p$	Niveau sonore [dB]
$L_{pF}$	Niveau sonore lors de conditions météorologiques favorables à la propagation [dB]
$L_{pH}$	Niveau sonore lors de conditions météorologiques homogènes [dB]
$L_{m,E}$	Niveau sonore émis par un train [dB]
$L_{r,k}$	Niveau sonore reçu depuis un tronçon de voie ferrée [dB]
$L_T$	Niveau sonore à long terme [dB]
$L_w$	Niveau sonore émis par la source de la source [dB]
$N_{hab}$	Nombre d'habitants [hab]
$NP_i$	Potentiel d'eutrophisation de la substance $i$ [ $kg.eq_{PO_4}/kg$ de substance]
$P_i$	Poids du déchet $i$ [kg]
$S_{face(i)}$	Surface de la façade $i$ [ $m^2$ ]
$SH_i$	Surface habitable du bâtiment $i$ [ $m^2$ ]
$S_i$	Surface de sol $i$ [ $m^2$ ]
$SP_i$	Potentiel de smog d'été de la substance $i$ [ $kg.eq_{C_2H_4}/(kg$ de substance)]

$S_{\text{toit\_recup}}$	Surface de toiture disponible pour récupérer l'eau de pluie [m <sup>2</sup> ]
$SV_i$	Surface totale de vitrage du bâtiment i [m <sup>2</sup> ]
$T_{\text{etude}}$	Période choisie pour l'étude [années]
$V_i$	Volume de déchets radioactifs produits [dm <sup>3</sup> ]
$W$	Puissance acoustique d'une source [W]
$\overline{X}$	Moyenne
$\Gamma$	Ecart type
(precipitations)	Pluviométrie locale [m <sup>3</sup> /(m <sup>2</sup> .an)]

### Nombres sans dimension

$A$	Matrice des intensités $a_{ij}$
$a_{ij}$	Intensité de l'importance du critère $C_i$ sur le critère $C_j$
$AP_i$	Potentiel d'acidification de la substance i
$CI$	Indice de consistance
$C_i^{\text{indicateur}}$	Critère i associé à un indicateur
$CR$	Ratio de consistance
$C_u(i)$	Coefficient d'usage du sol i
$F_{\text{face}(i)\text{-ciel}}$	Facteur de forme entre la façade i et le ciel
$H_{Li}$	Niveau d'ensoleillement reçu par la surface i
$N_{\text{comp}}$	Nombre de comparaison nécessaire (comparaison par paires)
$I_j$	Valeur associée à l'indicateur j
$p$	Nombre de coefficients de pondération à déterminer (comparaison par paires)
$P_f$	Pourcentage de freinage d'un train
$p_t$	Pourcentage de temps pendant lequel les conditions météorologiques sont favorables à la propagation du son
$R_{SV/RH}$	Rapport de la surface de vitrage sur la surface habitable
$W$	Matrice des coefficients de pondération $w_i$
$w_i$	Coefficient de pondération associé au critère $C_i$
$\Gamma^*$	Ecart type relatif

## Indices et exposants

air	Substances émises dans l'air
eau	Substances émises dans l'eau
face	Surfaces correspondant à une façade
GWP	Relatif au potentiel à effet de serre
jour	Pendant la période de jour (6h – 22h)
nuit	Pendant la période de nuit (22h – 6h)
parc	Surfaces correspondant à un parc ou espace public
rayon	Relatif au rayonnement solaire
<i>ref</i>	Valeur de référence pour l'indicateur
sol	Substances émises dans le sol
toit	Surface correspondant à un toit
( ) <sub>initial</sub>	Description actuelle
( ) <sub>projet</sub>	Description future

## Indicateurs

$I_{acoustique}$	Confort acoustique extérieur
$I_{acidification}$	Emission de substances entraînant des pluies acides
$I_{confort}$	Confort à l'intérieur des bâtiments
$I_{dechets\_I}$	Production de déchets inertes ultimes
$I_{eau}$	Consommation d'eau
$I_{ecotoxicite}$	Impact des émissions de polluants toxiques pour la faune et la flore
$I_{energie}$	Consommation d'énergie primaire
$I_{eclairage}$	Eclairage intérieur au bâtiment
$I_{espace}$	Espace intérieur au bâtiment
$I_{eutrophisation}$	Emission de substance conduisant à une eutrophisation excessive
$I_{GWP}$	Emission de gaz à effet de serre
$I_{radioactif}$	Production de déchets radioactifs
$I_{ressources}$	Consommation des ressources abiotiques épuisables
$I_{smog}$	Emission de substances de smog d'été
$I_{soleil}$	Ensoleillement reçu par le quartier
$I_{sol}$	Consommation du sol
$I_{tox\_humaine}$	Emission de substances toxiques
$I_{visu\_int}$	Visibilité depuis l'intérieur des bâtiments
$I_{visu\_ext}$	Visibilité depuis l'extérieur



# INTRODUCTION

"L'humanité gémit, à demi écrasée sous le poids des progrès qu'elle a fait. Elle ne sait pas assez que son avenir dépend d'elle. A elle de voir d'abord si elle veut continuer à vivre. "

Henri Bergson, Les deux sources de la morale et de la religion, 1932

Cette citation d'Henri Bergson offre une perspective différente de notre évolution et des progrès qu'elle engendre. Elle est encore d'actualité, peut-être même plus aujourd'hui qu'hier, à l'heure où les deux mots *développement* et *durable* se sont rejoints pour exprimer une prise de conscience qui se généralise.

Cette année, en décembre, est programmé un rendez-vous historique et de portée mondiale. En effet, avant la fin de l'année, le 6,5 milliardième humain devrait naître. La Terre aura-t-elle toujours les ressources suffisantes pour assurer à tous les êtres humains des conditions de vie confortables ? Ce problème émergent ne concerne pas seulement un ou plusieurs pays ; la problématique est maintenant mondiale.

Les villes regroupent plus de 80 % de la population : elles ont donc un rôle majeur à jouer. On célèbre cette année le centenaire de la disparition de Jules Verne : ses écritures visionnaires ont évoqué il y a 125 ans la nécessité de penser et construire la ville de demain. "Pourquoi ne réunirions-nous pas toutes les forces de notre imagination pour tracer le plan d'une cité modèle sur des données rigoureusement scientifiques ?" (Verne 1879). Les ambitions associées à cette ville ont évolué pour prendre en compte un plus grand nombre d'aspects tels que les préoccupations économiques, sociales et environnementales. La tâche est cependant ardue et il semble difficile de croire que la ville idéale existe, au mieux nous pouvons nous en approcher.

La recherche dans le domaine du génie civil se construit étape par étape, en commençant par l'étude d'un bâtiment seul. Dans le premier chapitre, nous montrerons que la prise en compte de la notion de développement durable au niveau français a conduit à des modifications des lois en rapport avec le bâtiment, l'urbanisme et les territoires. La recherche et les démarches se sont focalisées principalement sur le bâtiment et sa parcelle : nous présentons ces initiatives, avec une attention plus particulière pour la démarche HQE. Ensuite à partir des préoccupations centrées sur la notion de développement durable, nous démontrerons qu'il faut maintenant évoluer vers une échelle plus vaste permettant de prendre en compte un plus grand nombre d'aspects (gestion des espaces publics, gestion des transports, mise en place de réseaux de chaleur). Le projet ADEQUA, support de ce travail de recherche, est présenté comme une première proposition à une échelle plus vaste. Il a pour but d'élaborer une méthode intervenant comme une aide à la décision permettant d'évaluer ou de comparer différentes alternatives d'un projet afin de déterminer l'alternative la mieux appropriée à la notion complexe de développement durable.

Le second chapitre sera consacré à la définition de l'ensemble de la méthode ; il s'articule autour des orientations choisies. Dans un premier temps, il s'agit de définir la portée, c'est-à-dire les frontières de notre système : les limites spatiales ont une importance considérable car elles détermineront les aspects sur lesquels il est possible d'agir, les paramètres à prendre en compte pour évaluer un projet et les modes d'évaluation possible. La méthode à mettre en

place sera différente selon que le projet concerne un quartier, une ville ou un territoire. Nous présenterons, pour l'échelle d'étude choisie, le quartier, l'ensemble des acteurs qui seront les futurs utilisateurs de la méthode.

En se basant sur un recensement des méthodes utilisables et sur un état de l'art des démarches, projets et outils relatifs au quartier, il est possible de définir précisément le *modus operandi* retenu. La prise en compte des premières expériences est d'autant plus nécessaire que ce thème de recherche est à la fois novateur et étendu.

Le chapitre 3 propose un ensemble d'objectifs ou thèmes majeurs pour l'évaluation d'un projet d'urbanisme. Cette démarche d'utilisation des objectifs et indicateurs, bien qu'assez récente, est de plus en plus répandue et est utilisée dans des domaines très variés.

Nous établissons tout d'abord les bases de la discussion sur les objectifs, leurs rôles, les caractéristiques des indicateurs associés et les modèles permettant leur mise en place. La dimension exhaustive de l'évaluation d'un projet requiert cependant une analyse fine du système à mettre en place. Nous avons donc décidé de définir nos objectifs en accord avec les systèmes existants ; le développement durable est une notion qui doit se retrouver d'une échelle à l'autre et d'un domaine à l'autre. En effet, il est nécessaire de penser globalement et d'établir une bonne communication entre les métiers. Ainsi nous veillons particulièrement à insérer notre démarche dans le contexte politique national et européen, afin de répondre aux différentes stratégies mises en place.

Nous présentons ensuite les huit objectifs retenus servant de base d'évaluation pour le projet ADEQUA et sa méthode. Nous proposons des pistes de réflexion concernant les objectifs qui n'appartiennent pas à nos domaines de compétence.

Dans la continuité de ce travail, le chapitre 4 se rapporte au cœur de la méthode : les indicateurs. L'accent est mis sur les indicateurs associés aux objectifs correspondant à nos domaines de compétence. Pour chaque objectif, nous proposons un ensemble d'indicateurs ; ces indicateurs sont justifiés, décrits, une méthode de calcul est proposée ainsi qu'une valeur de référence.

Ensuite, la méthode proposée est mise en situation grâce à un cas d'étude. A la demande de l'aménageur *Espaces Ferroviaires*, le LEPTAB participe à l'aménagement de quartiers situés en centre ville de La Rochelle, à travers l'évaluation de variantes envisagées et proposées par le cabinet d'urbanisme *AREP*. L'étude réalisée porte sur trois quartiers respectivement à l'est, à l'ouest et au sud de la gare et le chapitre 5 présente l'application de la méthode sur le quartier est. Ce partenariat a conduit à l'application de la méthode et à un premier retour d'expérience.

# CHAPITRE 1 : La notion de développement durable et le domaine de la construction

Ce chapitre introduit la problématique de l'aménagement en liaison avec la notion de développement durable. Cette notion existe depuis de nombreuses années et son importance s'accroît au fur et à mesure de la prise de conscience des dangers à venir pour la planète et ses occupants, néanmoins le développement durable ne se limite pas à un aspect environnemental.

La prise en compte de cette notion au niveau français a abouti à de nouvelles lois en rapport avec les bâtiments, l'urbanisme et les territoires. La recherche et les démarches se sont focalisées principalement sur le bâtiment et sa parcelle : nous présenterons ces initiatives, avec une attention plus particulière pour la démarche HQE.

Puis, à partir des limites des approches existantes, nous constaterons la nécessité d'élargir l'échelle d'étude pour appréhender de manière plus complète la notion de développement durable. Le projet ADEQUA, support de ce travail de recherche, est présenté ici comme une première proposition de travail à une échelle plus vaste, celle du quartier.

Les conclusions de ce premier chapitre permettent ensuite de centrer notre problématique et de dégager les axes majeurs du travail mené.

## I. La notion de Développement Durable (DD)

Le concept de développement durable est au cœur de ce travail de thèse car l'ambition affichée est de le traduire par un ensemble de paramètres quantifiables ou qualifiables afin d'évaluer des projets d'aménagement urbain. Cependant, cette notion, bien que largement utilisée, reste difficile à appréhender précisément : chacun ayant une définition différente, découlant d'une perception qui lui est propre.

Nous proposons en premier lieu une approche générale sur cette notion, multidisciplinaire et conceptuelle. Ensuite, en recentrant nos ambitions sur le domaine du génie civil et de l'urbanisme, nous pourrions préciser les problématiques soulevées.

### I.1. Historique

Cette notion représentant une problématique multiple, il est difficile de transcrire le contexte historique et son origine. Doit-on partir de la déclaration des droits de l'homme et du citoyen de 1789 comme premier pas social de l'homme (ARPE 2001) ? Ou bien encore de la date de parution du terme "écologie urbaine" en 1925 comme le propose Oliveira de Souza et al. (2004) ? Nous proposons ici de suivre comme piste l'évolution du terme lui-même de "Développement Durable" (DD). Il est cité pour la première fois par l'Union Internationale de la Conservation de la Nature (UICN) dans son ouvrage "Stratégie mondiale de la conservation" en 1980. Ce terme, "Sustainable Development", est ensuite apparu de nouveau et mis à l'honneur en 1987 par les travaux de la Commission Mondiale sur l'Environnement et le Développement (CMED), communément appelé rapport "Brundtland" du nom de sa présidente, Gro Harlem Brundtland, premier Ministre de Norvège (Brundtland 1987). La définition proposée est la suivante : "Le développement durable est un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs. Deux concepts sont inhérents à cette notion : le concept de besoins, et plus particulièrement des besoins essentiels des plus démunis, à qui il convient d'accorder la plus grande priorité, et l'idée des limitations que l'état de nos techniques et de notre organisation sociale imposent sur la capacité de l'environnement à répondre aux besoins actuels et à venir" (Brundtland 1988).

Les préoccupations ayant conduit à ce terme et sa définition remontent au club de Rome datant de la fin des années 1960, au rapport de l'Institut de Technologie du Massachusetts (MIT) intitulé "The Limits to Growth"<sup>1</sup>, ainsi qu'à la conférence des Nations Unies de Stockholm sur l'environnement en juin 1972. Les documents issus de cette conférence spécifient "qu'il est nécessaire mais aussi possible de concevoir et de mettre en œuvre des stratégies de développement socio-économique équitables, respectueuses de l'environnement, appelées *stratégies d'écodéveloppement*" (Comélieu et al. 2002). L'évolution du concept et l'implication des acteurs est résumée par la Figure 1 proposée par Brodhag (2004), actuel Délégué Interministériel au Développement Durable.

---

<sup>1</sup> The Limits to Growth, Meadows D. H., Meadows D. L., Randers J. et Behrens W. W. New York, Universe Book, 1972

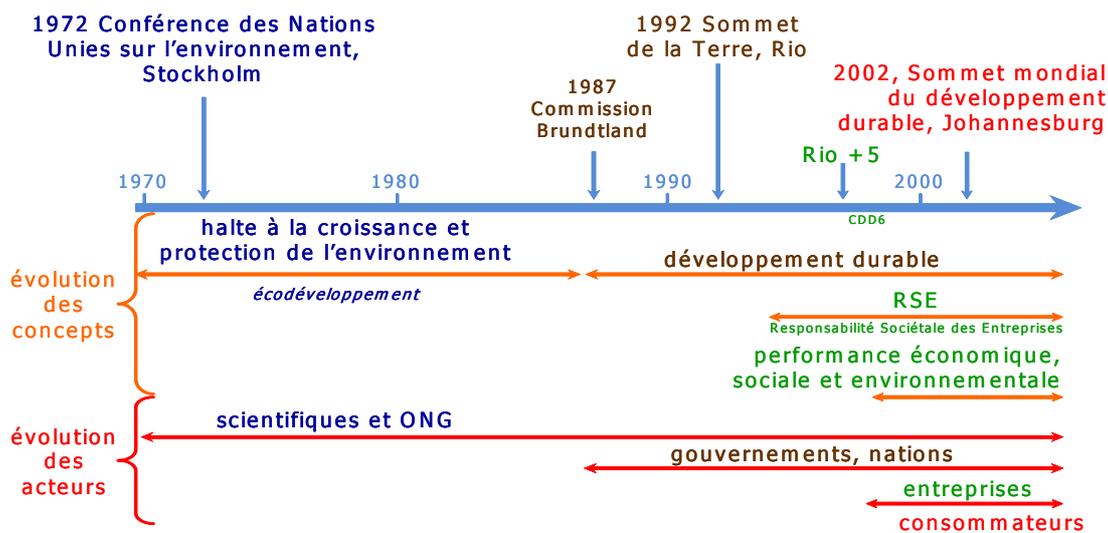


Figure 1 : Grandes dates du développement durable (Brodhag 2004)

Ce graphique présente l'évolution du concept au cours du temps ; il montre aussi clairement la prise de conscience des différents acteurs, depuis les Organisations Non Gouvernementales (ONG) jusqu'aux consommateurs, 30 ans après. On constate aussi que le concept de DD a donné naissance à de nouveaux termes tels que la Responsabilité Sociétale des Entreprises (RSE) ou la performance économique, sociale et environnementale.

La conférence de Rio qui réunit 178 pays a abouti à l'adoption de la "déclaration de Rio sur l'environnement et le développement" et à la création de "l'Agenda pour le XXI<sup>ème</sup> siècle", appelé également Action 21 ou Agenda 21. Les nations qui se sont engagées pour la mise en place de l'Agenda 21 doivent l'appliquer au niveau national, régional et local. L'Agenda 21 est structuré en quatre sections et 40 chapitres. A titre d'exemple, en France, depuis 1999, la Loi d'Orientation sur l'Aménagement et le Développement Durable du Territoire (LOADDT) incite les pays<sup>2</sup> et les agglomérations à élaborer des projets de développement faisant référence au chapitre 28 (Initiatives des Collectivités Locales à l'appui de l'Agenda 21) ; l'élaboration d'agendas est également encouragée par des contrats entre l'état, les régions et les collectivités gestionnaires des agglomérations, des pays et des parcs naturels régionaux. Ces projets de développement doivent faire largement appel à la participation et au partenariat avec les acteurs privés et publics.

Depuis Rio, de nombreux débats mondiaux ont eu lieu, concernant notamment l'effet de serre ou la biodiversité, et la conférence de Johannesburg a continué les actions entreprises. L'objectif étant, à partir de réflexions intergouvernementales, de progressivement impliquer des acteurs de plus en plus localement : le gouvernement, puis les régions, les départements, les collectivités, les entreprises et puis l'ensemble des habitants. En invitant chacun à une réflexion individuelle et à de meilleures pratiques, on pourra localement faire évoluer des problématiques globales ; par exemple la diminution de l'émission des gaz à effet de serre nécessite parmi de nombreuses actions possibles une réduction de l'utilisation de la voiture par chacun d'entre nous, une diminution des consommations de chauffage.

La notion de DD a conduit de par son importance à l'apparition d'un nouveau métier : l'éco-conseiller (Villeneuve et Huybens 2002), issu soit de l'Institut Européen pour le Conseil en

<sup>2</sup> D'après la LOADDT, le pays est "un espace présentant une cohésion géographique, historique, culturelle, économique et sociale"

Environnement de Strasbourg, soit de l'Institut Eco-conseil de Namur<sup>3</sup>, est un professionnel formé aux sciences de l'environnement, à la communication et à la gestion de projets et d'équipes multidisciplinaires. Son rôle majeur est d'accompagner les démarches participatives telles que les Agendas 21. A la différence du conseiller en environnement, il peut provenir de tout horizon disciplinaire (sociologue, journaliste, biologiste, administrateur) et il acquiert des compétences axées sur la mise en valeur des savoirs des autres.

## I.2. Définitions

"Développement Durable" est la traduction française officielle du terme anglo-saxon "Sustainable Development", ce dernier n'ayant pas de correspondance exacte en français. Il est souvent présenté comme la recherche d'un équilibre entre trois pôles : le social, l'environnemental et l'économique. Cette représentation correspond au modèle de Jacobs et Sadler cité par l'Agence Régionale Pour l'Environnement (ARPE 2001), inspirée de la théorie des ensembles et présenté ci-dessous.

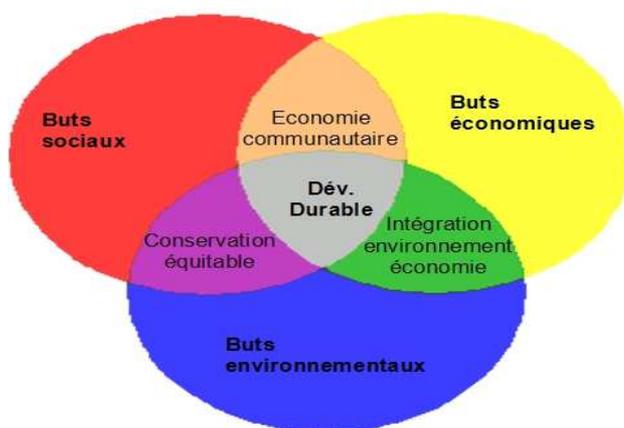


Figure 2 : Modèle de Jacobs et Sadler datant de 1990 (ARPE 2001)

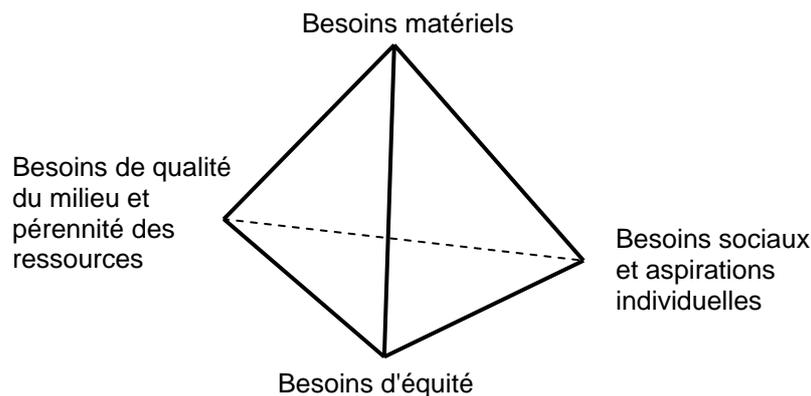
Chacun des cercles définit un ensemble de buts qui justifient les actions humaines. La durabilité du développement exige des synthèses au regard des priorités : cela suggère un traitement équilibré des valeurs et des intérêts. Aucun des buts (écologique, économique ou social) ne doit être sciemment favorisé ou dévalué au détriment des autres.

Selon Sachs cité par Lourdel (2005), le DD présente cinq dimensions : la viabilité sociale, la viabilité économique, la viabilité écologique, la viabilité spatiale (répartition de la population, étalement urbain, etc.) et la viabilité culturelle (respect de la diversité des cultures et des collectivités humaines).

Ces deux modèles sont à l'origine de nombreuses variantes, telle que celle proposée par la région Laboratoire du Saguenay – Lac Saint-jean et présentée à la Figure 3.

---

<sup>3</sup> Actuellement, seules ces deux instituts forment des éco-conseillers en Europe



**Figure 3 : Modèle de la région Laboratoire du Saguenay - Lac Saint-Jean (ARPE 2001)**

A l'origine, ce modèle s'est construit sur la notion du triangle du DD découlant du modèle de Jacobs et Sadler (Sadler et Jacobs 1990) et il s'est transformé en tétraèdre pour inclure un nouveau pôle : l'équité, c'est-à-dire le partage entre les humains et avec la nature des avantages et du bien-être.

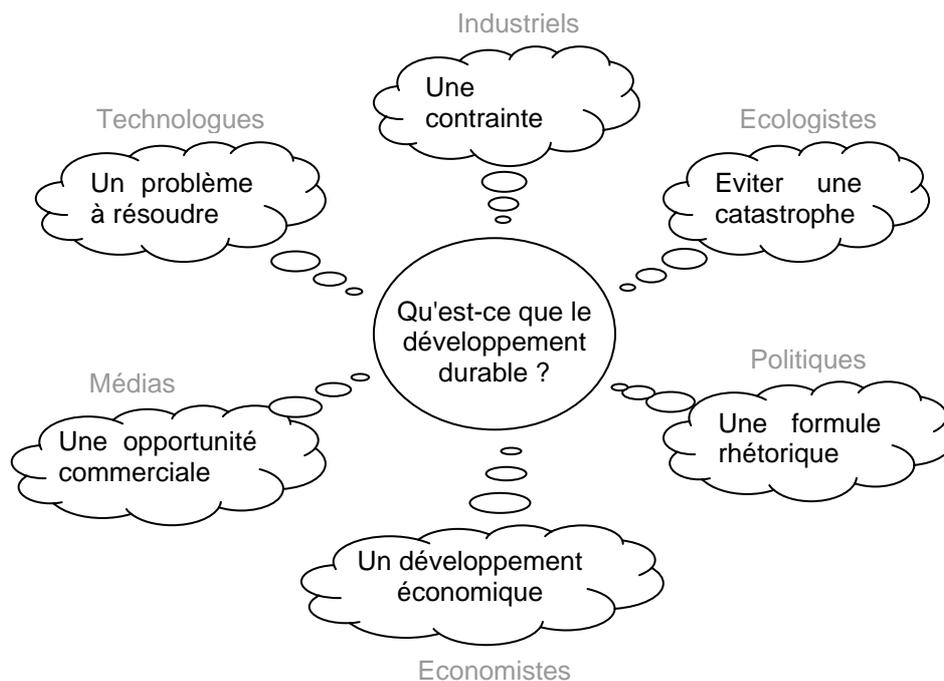
L'application concrète de ces modèles dans les différentes disciplines a conduit à une multitude de définitions dont de nombreuses ont été recensées par le Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD 2004), par le réseau i.d.e.a.<sup>4</sup> et par la thèse de Boutaud (2005). Cette application concrète implique aussi le respect de différents principes qui sont :

- Le principe de solidarité envers les générations futures (transmission du patrimoine énergétique, biotique, abiotique et culturel suffisant) et envers les générations présentes (réduction des inégalités nord-sud).
- Une approche globale et transversale : considérer le système étudié (une ville ou un territoire par exemple) dans son ensemble et prendre en compte toutes les interactions existantes, sans se restreindre à un aspect spécifique.
- Le principe de participation et de coopération : l'implication de tous les acteurs est nécessaire, elle requiert l'information de tous, la consultation du plus grand nombre et la concertation.
- Le principe de précaution : l'absence de certitude scientifique absolue ne doit pas servir de prétexte pour remettre à plus tard l'adoption de mesures effectives. Il s'agit aussi de s'assurer au maximum de la réversibilité des choix.
- Le principe de responsabilité : de nombreuses conséquences globales sont la cause de comportements individuels et il s'agit de transmettre cette responsabilité globale à l'échelle locale.

L'interprétation de cette notion dépend aussi fortement de la discipline à laquelle appartient une personne, comme le montre la Figure 4 :

---

<sup>4</sup> <http://www.idea-reseau.org/>



**Figure 4 : Différentes images du développement durable (Khalfan 2002)**

En fonction des individus, la perspective n'est pas la même ; elle est fortement liée à la capacité d'agir individuelle. La vision de chacun est donc déformée par son métier et il sera par exemple plus difficile pour un économiste de concevoir que le DD doit être envisagé sous la forme d'action à mener pour sauvegarder l'écosystème plutôt que sous la forme d'un nouveau mode de développement économique à mettre en place afin de réduire les inégalités. Chacun a raison, mais seulement en partie, et la difficulté est d'apporter cette vision transversale à tous.

Nous vivons dans un monde où 20 % des êtres humains se partagent plus de 80 % de la consommation mondiale totale (Equiterre 2002), les pays développés génèrent également 96 % des déchets mondiaux. Il est important, aujourd'hui plus qu'hier de dépasser ce concept et d'agir concrètement pour proposer des solutions ou au moins des démarches conduisant à des solutions.

### I.3. Le secteur de la construction

Ce secteur revêt une importance considérable principalement par la quantité de déchets générés et de ressources consommées par le bâtiment. La construction, mais surtout l'exploitation du bâtiment (eau, éclairage, chauffage, entretien), entraîne la consommation de près de la moitié de l'énergie produite dans le monde. Les constructions ont également un rôle important à jouer dans le domaine social au niveau par exemple de la qualité de vie ou des fonctions culturelles. Un adulte passe sept huitième de son temps à l'intérieur d'ouvrages construits, comme le montre la Figure 5, ce constat explique en partie l'emphase mise sur l'amélioration de la qualité de vie des usagers depuis plus de cinquante ans

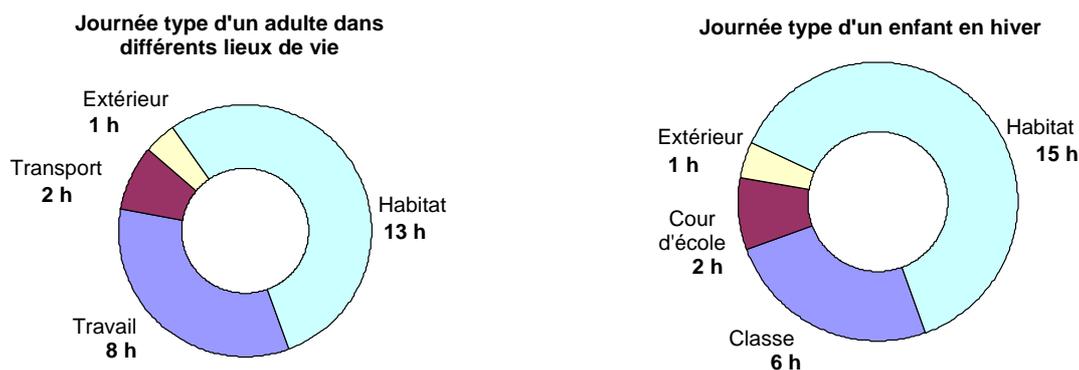


Figure 5 : Temps passé à l'intérieur (Observatoire de la qualité de l'air intérieur/CSTB)

Cela semble paradoxal, mais construire de manière durable serait un problème d'actualité et non un problème ancien ; principalement car la construction n'est plus à l'échelle de l'individu. Certains situent la cause à la fin du XVIII<sup>ème</sup> siècle, lors de la constitution du système métrique décimal en France à la place d'un système d'unités basés sur l'homme (le pied, la coudée, etc.). A cause de cette perte de la dimension humaine des mesures, l'homme n'est plus au centre des préoccupations de construction et d'autres dimensions sont privilégiées comme par exemple la rentabilité économique ou le parti architectural. La solution n'est bien évidemment pas de revenir à des mesures anciennes ; mais elle passe par une redécouverte holistique de l'échelle de la vie humaine : réseaux de transport, architecture, aspects sociaux, etc.

Appliquer le développement durable à la construction signifie la prise en compte globale de ses trois facettes (économie, écologie et société). Cependant, cela ne veut pas obligatoirement dire construire en bois ou installer des capteurs solaires ! La difficulté réside dans la mise en place d'une synthèse entre de nombreux aspects : gestion de l'énergie, diversité sociale, qualité de l'air, réseaux de transports, qualité de l'eau, gestion des déchets, aspect économique, etc. Le nombre de notions impliquées par le développement durable (Figure 6) illustre bien la complexité du concept et de son application.

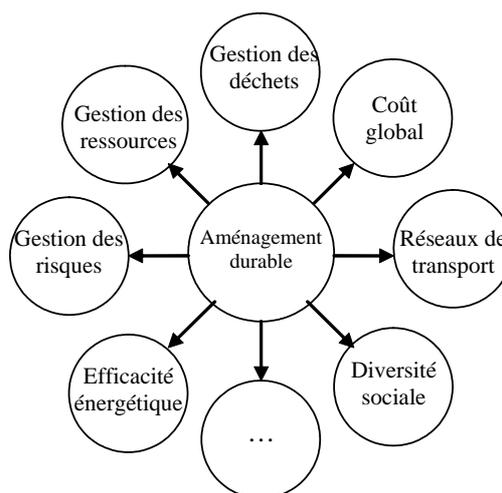


Figure 6 : Aménagement durable et aspects concernés (Cherqui et al. 2004a)

Il n'existe pas à ce jour de solution parfaite d'aménagement durable ; mais il existe de nombreuses solutions plus ou moins restreintes pour optimiser l'aspect social, minimiser les impacts environnementaux, réduire les coûts, etc. Cette synthèse à définir doit cependant être *viable* et *vivable*. La solution globale choisie doit offrir les conditions nécessaires pour être pérenne sans que le quartier ne nécessite de modifications ultérieures majeures (viable). De

plus, il faut que les habitants puissent y vivre de manière décente (vivable), pour ne pas dire confortable. Le terme "vivable" est plus adapté que "confortable" car l'un des objectifs est un confort suffisant et non pas optimal. En hiver, par exemple, la température intérieure se définit comme un équilibre entre un confort relatif<sup>5</sup> suffisant (ne nécessitant pas de vêtement d'extérieur) et une gestion efficace de l'énergie.

Imaginons un quartier où le souhait d'aménagement durable conduit à la réalisation de bâtiments avec de grandes surfaces vitrées au sud pour profiter de la vue sur la mer, sans avoir considéré l'ensoleillement lors de la conception de la façade : cette solution peut être jugée non viable car l'ensoleillement nécessitera l'installation d'un système de climatisation, ou bien si rien n'est fait, elle sera jugée non vivable pour les habitants du bâtiment. L'ajout du système de climatisation (inutile si l'ensoleillement avait été pris en compte) ne répondra vraisemblablement plus aux objectifs du développement durable définis lors de la conception du quartier : la climatisation va entraîner une augmentation du coût global, des consommations et de l'émission de CO<sub>2</sub>. Cet exemple illustre bien les problèmes rencontrés par les acteurs d'un projet, qui omettent certaines conséquences des choix effectués malgré une réflexion approfondie.

Cette situation justifie la nécessité d'une analyse multicritères globale et détaillée dans ces divers domaines.

---

<sup>5</sup> La notion de confort est relative à une époque et un contexte socio-économique

#### I.4. Evolution de la législation française

Au niveau législatif français, les principales lois en rapport avec l'urbanisme et issues de préoccupations durables sont :

- La Loi d'Orientation pour l'Aménagement et le Développement Durable du Territoire (LOADDT)<sup>6</sup>, dite aussi loi Voynet, définit de nouveaux modèles de développement et d'aménagement du territoire, et elle officialise le rôle central des collectivités locales dans le processus de concrétisation et d'application du concept de DD.
- La loi d'orientation agricole n°99-574 du 9 juillet 1999 propose des "contrats territoriaux d'exploitation".
- La loi n°99-586 du 12 juillet 1999 relative au renforcement et à la simplification de la coopération intercommunale, dite loi Chevènement crée un nouvel outil de coopération intercommunale : la communauté d'agglomération ; permettant de regrouper différentes compétences comme l'aménagement de l'espace, le développement économique, les transports ou le développement social urbain.
- La loi n°2000-1208 du 13 décembre 2000 relative à la solidarité et au renouvellement urbain, dite loi SRU ou loi Gayssot, prévoit un ensemble important de mesures s'appuyant sur le principe de solidarité, de participation, de démocratie locale et insiste sur la notion d'économie d'espace.
- La loi d'orientation forestière n°2001-602 du 9 juillet 2001

En vertu de la loi SRU, les Schémas de Cohérence Territoriale (SCoT) remplacent les schémas directeurs, et les Plans Locaux d'Urbanisme (PLU) succèdent aux Plans d'Occupation des Sols (POS). La mission des SCoT, comparativement aux anciens schémas directeurs, est étendue. Dans un premier temps, le document de présentation des SCoT précise les orientations générales de l'organisation de l'espace et de la restructuration des espaces urbanisés, les sites naturels ou urbains à protéger, les grands équilibres entre les espaces urbains et à urbaniser et les espaces naturels, agricoles ou forestiers. Ensuite, il spécifie les objectifs relatifs à l'équilibre social de l'habitat, à l'équilibre entre urbanisation et transports collectifs, à l'équipement commercial et artisanal, à la protection des paysages et à la mise en valeur des entrées de ville, à la prévention des risques. Dans un second temps, le rapport de présentation expose le « diagnostic », analyse l'état initial de l'environnement, et présente le Projet d'Aménagement et de Développement Durable (PADD). Le PLU, compatible avec le SCoT, présente l'ensemble du projet de la commune : aménagement, paysage, environnement, espaces publics, etc. Il porte sur la totalité de la superficie de la commune et intègre les règles d'urbanisme des ZAC. Il est élaboré à l'initiative de la commune, en association avec les autres personnes publiques et l'Etat et il comporte également un Plan d'Aménagement et de Développement Durable (PADD).

Ensuite, la loi Voynet invite à l'élaboration de projets d'agglomération et de contrats d'agglomération, exprimant la stratégie de développement durable du territoire en matière de développement économique, de cohésion sociale, d'aménagement et d'urbanisme, de transport, de politique de la ville, etc. Ce sont de véritables projets politiques, conformes aux recommandations des agendas 21 locaux. Dans ses articles 25 et 26, la LOADDT mentionne d'ailleurs les « agendas 21 locaux » comme principaux outils de mise en œuvre du développement durable sur le territoire communal et supra communal.

---

<sup>6</sup> Loi n°99-533 du 25 juin 1999

En outre, la démarche de projet est aussi préconisée par la loi d'orientation agricole. Les contrats territoriaux d'exploitation (CTE) précisent des engagements concernant les "orientations de la production de l'exploitation" (art L. 311-3). Assis sur une logique de territoire, ils répondent à des enjeux définis localement. Enfin, la loi d'orientation forestière, en s'inscrivant dans le long terme, permet d'anticiper la gestion de la forêt en créant un contexte favorable à la mobilisation des acteurs et en redonnant à celle-ci la place qui lui revient au sein des activités culturelles et socio-économiques du territoire.

Concernant l'échelle du bâtiment, la réglementation est plus abondante : elle concerne par exemple la sécurité, les économies d'énergies, l'accessibilité aux personnes handicapées, l'isolation phonique, la santé. Le DD est aussi et surtout mis en place par des initiatives d'encouragement telles que les labels (NF Habitat, Habitat et environnement, etc.) ou la démarche HQE.

## I.5. Démarches internationales liées au bâtiment

L'iisBE<sup>7</sup> (initiative internationale pour un cadre bâti durable ou "International Initiative for a Sustainable Built Environment") est un organisme international majeur dont l'objectif principal est de faciliter et promouvoir des directives, des méthodes et des outils qui permettront de progresser vers un cadre bâti durable. Les membres de son conseil d'administration proviennent de différents continents. Ses objectifs comprennent, notamment la création d'un forum d'échange international, d'une base de données<sup>8</sup> ouverte aux chercheurs, stratèges ou responsables et professionnels à travers le monde et le déploiement d'un programme d'une durée de quatre ans, visant à caractériser les initiatives prises dans tous les pays importants. L'iisBE dirige également le processus Défi des bâtiments écologiques (ou Green Building Challenge), un programme collaboratif international de grande portée, voué à l'élaboration théorique et pratique de systèmes d'évaluation du rendement environnemental des bâtiments ; plus de 15 pays y participent couramment et les derniers cas d'étude ont eu lieu à Tokyo en septembre 2005 lors de la conférence SB05.

Dans de nombreux pays, différentes démarches nationales sont également issues des ambitions du développement durable. Nos voisins anglais par exemple ont mis en place la méthode BREAM (BRE's Environmental Assessment Method). Cette méthode développée par le Building Research Establishment (BRE), organisme public anglais équivalent du CSTB en France, consiste à évaluer la qualité environnementale des bâtiments à travers les aspects suivants : management, énergie, santé et bien-être, pollution, transport, utilisation du terrain, ressources et eau. Pour chaque aspect, des points sont attribués en fonction des performances puis ces points sont pondérés et agrégés afin d'obtenir une note finale. Cette note est convertie par une échelle en un qualificatif qui va de passable à excellent et un certificat est délivré. La méthode existe depuis 1990 et elle concerne les bâtiments de bureau, les unités industrielles, les commerces de détail, les écoles. Les autres types de bâtiments (centres de loisirs, laboratoires) peuvent être évalués par une méthode BREEAM spécifique. Par exemple, la version de BREEAM qui traite les habitations s'appelle EcoHomes.

Les Etats-Unis ont développé le système de notation LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) qui concerne les aspects suivants : nettoyage et maintenance du bâtiment, qualité de l'air intérieur, efficacité énergétique, gestion de l'eau, recyclage et équipements pour le recyclage et amélioration des systèmes en vue de l'obtention de standards

---

<sup>7</sup> <http://www.iisbe.org/iisbe/start/iisbe.htm>

<sup>8</sup> <http://www.sbis.info/>

de performance élevés. De même le Japon a développé l'outil CASBEE (Comprehensive Assessment System for Building Environmental Efficiency). Il permet de calculer la valeur de l'efficacité environnementale comme le ratio  $Q/L$ ,  $Q$  étant la qualité ou performance écologique du bâtiment et  $L$  étant la charge écologique.  $Q$  va par exemple augmenter avec la réduction des consommations de chauffage et  $L$  va augmenter si le bâtiment consomme une part importante de ressources épuisables. Le résultat de l'évaluation est présenté graphiquement, comme sur l'exemple de la Figure 7.

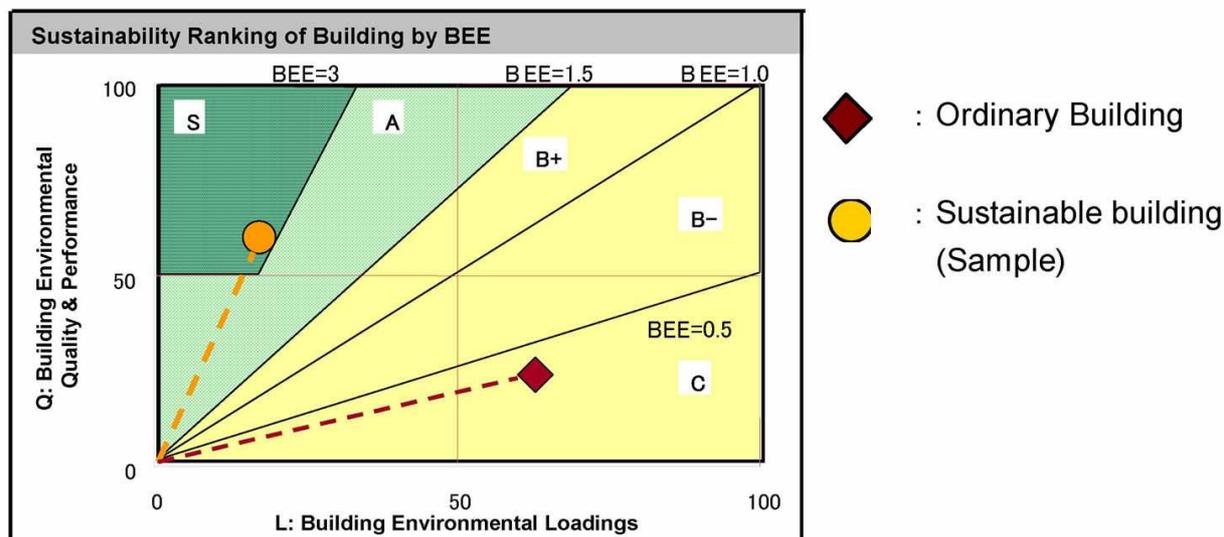


Figure 7 : Présentation de l'outil CASBEE<sup>9</sup>

Suivant le rapport  $Q/L$ , le bâtiment est classé S, A, B+, B- ou C. S correspond à un bâtiment en accord avec la notion de développement durable (Sustainable building) et C à un bâtiment ordinaire.

Il existe d'autres méthodes telles que ENVEST (Royaume Uni), GreenCalc (Pays Bas) ou EcoProP (Finlande). Une liste détaillée de nombreux outils est disponible à l'adresse <http://annex31.wiwi.uni-karlsruhe.de/TOOLS.HTM> ou dans la littérature (Bussemey-Buhe 1997 pp. 24-33; Antonini et al. 2002 pp. 7-43).

Nous nous intéressons maintenant plus spécifiquement au contexte français et à la démarche HQE qui représente actuellement une première illustration des ambitions françaises à l'échelle du bâtiment.

<sup>9</sup> <http://www.ibec.or.jp/CASBEE/english/methodE.htm>

## II. La démarche HQE, une première étape française

La Démarche HQE, promue par l'Association HQE, vise à améliorer la Qualité Environnementale des Bâtiments (QEB) neufs et existants, c'est-à-dire à offrir des ouvrages sains et confortables dont les impacts sur l'environnement sont les plus faibles possibles.

### II.1. L'association HQE

Créée en 1996 à l'initiative du Plan Urbanisme Construction Architecture (PUCA) et à la suite de travaux de recherche menés depuis 1992, l'Association HQE regroupe les acteurs du bâtiment dans le but de développer la qualité environnementale des bâtiments de manière concertée. L'Association se définit comme un lieu d'échanges, de concertation, d'information, de formation et d'action. Elle met en réseau les compétences et les expériences des membres au service des projets individuels et collectifs. Elle est composée d'organismes publics ou collectifs (associations, syndicats) représentant l'ensemble des acteurs du bâtiment : maîtrise d'ouvrage, maîtrise d'œuvre, entreprises, fabricants de produits de construction, experts, réseaux d'acteurs régionaux, etc., regroupés en cinq collèges assurant la pluralité des points de vue au sein du conseil d'administration. Par décret du 5 janvier 2004, l'Association HQE est maintenant reconnue d'utilité publique.

### II.2. Les cibles de la HQE et l'application de la démarche

La qualité environnementale d'un bâtiment se décompose en 14 exigences particulières, appelées "cibles" (Figure 8) et organisées en deux domaines : maîtriser les impacts sur l'environnement extérieur et produire un environnement intérieur satisfaisant.

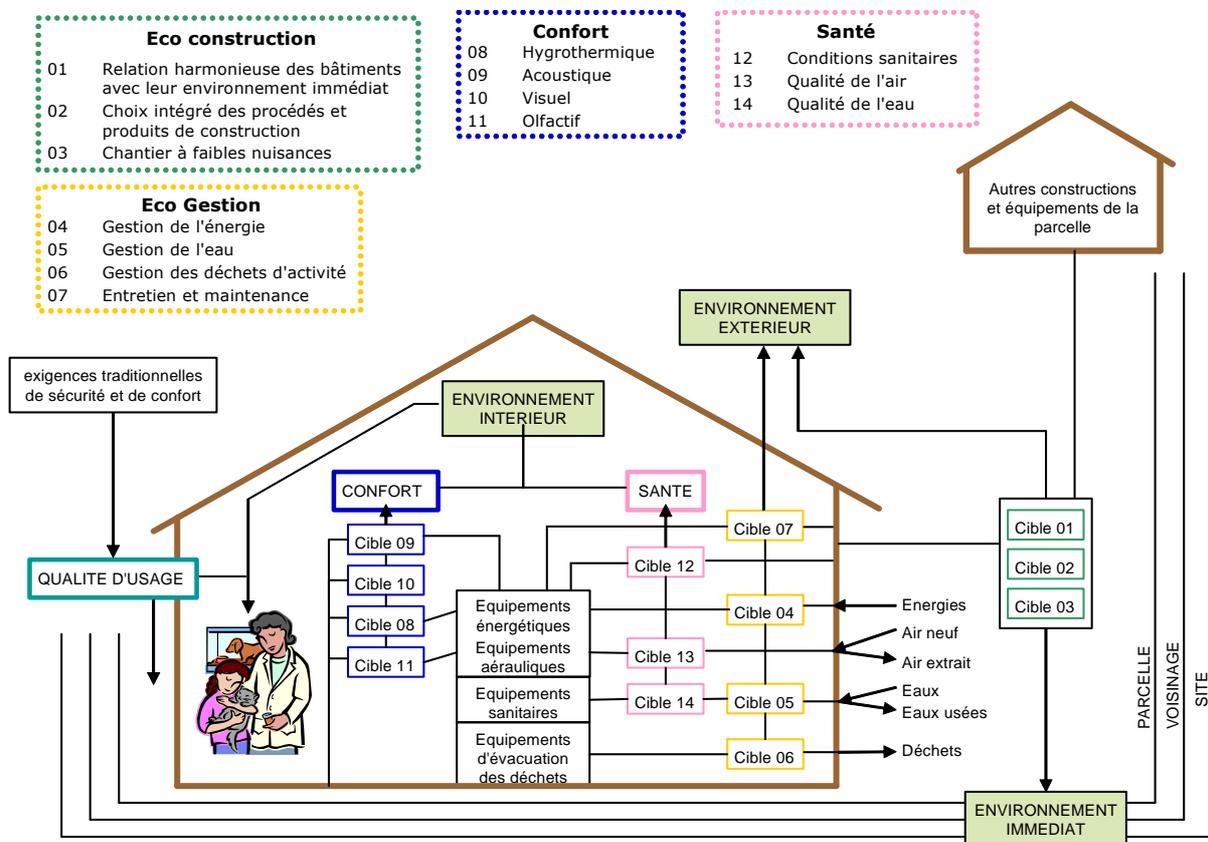


Figure 8 : Présentation de la démarche HQE et des 14 cibles

Ces 14 cibles appartiennent à quatre principales familles : l'éco construction, l'éco gestion, la santé et le confort. La démarche HQE est une démarche volontaire qui s'appuie sur un objectif de "Qualité Environnementale (QE) des bâtiments" et un "Système de Management Environnemental (SME) des opérations". Le SME (de Valicourt 2001) "est la composante du système de management global qui inclut la structure organisationnelle, les activités de planification, les responsabilités, les pratiques, les procédures, les procédés et les ressources pour élaborer, mettre en œuvre, réaliser, passer en revue et maintenir la politique environnementale"<sup>10</sup>. La norme ISO 14001 définit les spécifications et les grandes lignes directrices pour l'utilisation du SME : elle fournit les exigences et les règles minimales à respecter. La Qualité Environnementale est évaluée à partir du référentiel HQE de "Définition Explicite de la Qualité Environnementale" (DEQE). Ce référentiel (Nibel et al. 2001b) présente pour chaque cible les exigences et indicateurs nécessaires à leur prise en compte. Les indicateurs peuvent être quantitatifs ou qualitatifs, orientés résultats ou moyens, selon les cas et selon les phases du projet auxquels ils s'appliquent.

L'application de la démarche est fondée sur une logique de hiérarchisation des exigences : le maître d'ouvrage choisit trois ou quatre cibles pour lesquelles la performance maximale sera recherchée. Quatre ou cinq autres cibles sont retenues pour un traitement particulier (bonne performance) et pour les autres cibles, le maître d'ouvrage se contente du respect de la réglementation. Le SME doit être appliqué et c'est au sein de ce système de management que les différents choix et actions sont justifiés. La question des surcoûts engendrés par ce type de démarche doit être abordée du point de vue du coût global, c'est-à-dire en intégrant les économies de fonctionnement possibles (eau, énergie, maintenance) et dans le cas des collectivités en intégrant les coûts évités (pollutions, santé, consommation de ressources). Si l'on considère le coût d'investissement seul, l'association HQE annonce un surcoût allant de 0 à 25 %, cependant on constate une valeur proche de 10 % dans la majorité des cas.

Cette démarche connaît un intérêt grandissant et de plus en plus d'opérations se revendiquent en accord avec la démarche HQE. D'après l'actuel président de l'association, Dominique Bidou : "si l'Association HQE se félicite de voir la progression importante de l'idée HQE au sein du monde de la construction, elle ne peut que regretter que trop de ces auto proclamations HQE ne respectent pas les principes et les contenus que l'Association développe dans ses référentiels". Ainsi, l'association travaille à la reconnaissance des opérations HQE en particulier par la certification « NF (ouvrage) – Démarche HQE ».

### II.3. Certification et perspectives

Le projet est mené par le CSTB depuis 2002 et il concerne pour l'instant les bâtiments tertiaires de bureaux ou d'enseignement, neufs ou de réhabilitation lourde. Ce champ d'application sera par la suite étendu à d'autres types d'opérations.

Après avoir été expérimenté sur 20 opérations lauréates de l'appel à projets ADEME "démarche HQE et bâtiments tertiaires", la première version du référentiel est disponible depuis février 2005 sur le site du CSTB<sup>11</sup>. Ce référentiel provient d'une collaboration entre le CSTB, l'AFNOR et l'Association HQE.

D'après le référentiel de certification, un bâtiment est certifié "NF Bâtiments Tertiaires - Démarche HQE" si il respecte les conditions suivantes :

---

<sup>10</sup> D'après la norme ISO 14001

<sup>11</sup> <http://www.cstb.fr/hqe/>

- "Mise en œuvre d'un système de management d'opération permettant de fixer les cibles environnementales, d'organiser l'opération pour les atteindre tout en maîtrisant les processus de réalisation opérationnelle."
- "Atteinte au moins d'un niveau très performant pour 3 cibles environnementales, d'un niveau performant pour quatre cibles environnementales et d'un niveau base pour sept cibles environnementales choisies parmi les 14. Pour les bâtiments devant répondre à la réglementation thermique, la cible 4 doit être traitée en niveau performant ou très performant."

Le référentiel technique disponible gratuitement en téléchargement sur les sites [www.marque-nf.com](http://www.marque-nf.com), [www.cstb.fr/hqe](http://www.cstb.fr/hqe) ou [www.assohqe.org](http://www.assohqe.org), spécifie les exigences que le maître d'ouvrage doit respecter pour bénéficier du droit d'usage de la marque NF Bâtiments Tertiaires - Démarche HQE pour son opération. L'audit en vue d'obtenir la certification est effectué par un auditeur (ou une équipe d'audit) qualifié et missionné par le CSTB ; les évaluations ont lieu à des moments clés de l'opération, au minimum à la fin des phases de programme, de conception et de réalisation.

L'association HQE a permis, depuis sa création, d'initier un marché et de susciter un intérêt grandissant pour la construction de bâtiments respectueux de l'homme et de l'environnement. Le processus de mise en place d'une certification lui permettra de rester un gage de qualité pour un ouvrage et d'éviter les utilisations abusives. L'association a choisie d'orienter la certification principalement sur le système de management, et cette certification concerne la démarche plus que le bâtiment. De plus, de nombreuses cibles sont actuellement évaluées en fonction des dispositions prises ou justifiées vis-à-vis de problèmes spécifiques et non pas par des indicateurs évaluant une pression exercée sur un système (l'environnement par exemple) ou l'état d'une partie d'un système (température intérieure, niveau d'ensoleillement reçu).

L'enjeu de la certification est aussi majeur à l'heure de l'Europe car chaque pays possède ses démarches et labels ; alors que l'Union Européenne tend à unifier les procédures. La France doit pouvoir apporter des solutions concrètes sous peine de se voir imposer les démarches étrangères.

De plus, l'association HQE, consciente de l'échelle d'étude limitée que représente le bâtiment et sa parcelle pour la prise en compte du développement durable, souhaite augmenter son champ d'action à l'aménagement urbain. La prise en compte plus globale des problématiques liées au développement durable n'implique pas seulement un changement d'échelle, cela implique aussi un élargissement des problématiques concernées (espaces publics, réseaux de transport, etc.), des acteurs et donc un changement de la démarche envisagée. A l'origine le concept de la HQE a été créé pour s'appliquer à la construction de bâtiments, afin d'intégrer des préoccupations environnementales dans l'acte de bâtir. Elle a permis à la France d'apporter une première réponse à la conférence de Rio et aux conférences suivantes.

L'extension au quartier montre la lucidité de l'association vis-à-vis de l'évolution des problématiques et des modes de réponses. La recherche de méthodes applicables à des échelles plus vastes que celles du bâtiment devient en effet un enjeu majeur dans le domaine de la construction. Il semble difficile de considérer le bâtiment seul et sa parcelle, alors qu'une réflexion à l'échelle d'un îlot ou d'un quartier permettra d'élargir les préoccupations (ambiance sonore extérieure, gestion des déplacements, etc.) et les modes d'actions (effet de masque entre bâtiments, réseaux de chaleur, etc.). L'association HQE ne s'est pas engagée seule sur cette voie puisque des projets ont émergé et continuent d'émerger en France et à l'étranger.

L'aménagement du quartier constitue le thème de ce travail de recherche. L'orientation choisie est cependant différente puisque l'association HQE souhaite proposer une démarche

soutenue par un système de management, alors que nous souhaitons mettre en place une méthode d'évaluation de projets d'aménagement de quartier. L'objectif final est le même, cependant les chemins diffèrent.

Dans la suite de ce chapitre, nous présentons le projet ADEQUA, support de notre travail de recherche, puis les chapitres suivants présenteront la méthode mise en place.

### III. Le projet ADEQUA

Dans ce paragraphe, nous présenterons le projet ADEQUA tel qu'il a été défini et accepté (Wurtz et al. 2003). Ce projet démarré en mai 2004 (pour 24 mois) et piloté par le LEPTAB, regroupait initialement quatre laboratoires français (CEP, CERMA, LEPTAB et LOCIE) et deux entreprises (GTM et TRIBU). EDF R&D a également souhaité rejoindre ce projet afin de partager l'expérience acquise dans le domaine de l'élaboration d'outils de simulation destinés à appréhender la problématique du développement durable à l'échelle urbaine.

Le projet ADEQUA a pour but l'élaboration d'une méthodologie d'aide à la décision lors de la réalisation ou de la réhabilitation d'un quartier résidentiel. Celle-ci se veut en accord avec la notion de développement durable, et cependant, dans un premier temps, elle sera restreinte à des domaines précis correspondant aux compétences des différents partenaires du projet. Notre but est de mettre en place le cœur de cette méthodologie, auquel il sera par la suite possible de greffer d'autres domaines de compétence pour évaluer exhaustivement les projets d'aménagement.

#### III.1. Présentation générale

Ce projet fait suite à une demande de différentes catégories d'acteurs impliqués dans la réalisation d'opérations d'urbanisme que sont les architectes urbanistes, les collectivités locales, les entreprises générales de construction et les bureaux d'étude ayant la tâche d'assistant au maître d'ouvrage pour la réalisation d'un quartier. Pour cette raison ces différents types de partenaires sont tous impliqués dans ce projet et seront amenés à traiter des tâches correspondant tant à leurs besoins qu'à leurs compétences. Les collectivités locales apporteront leur contribution grâce à leur expérience propre dans le domaine et en proposant des cas d'études réels.

Notre objectif concerne la prise en compte et l'optimisation des différents aspects de la réalisation d'un environnement urbain durable. A cet effet on pourra s'appuyer sur les résultats d'expériences précédentes, des dires d'experts, des bases de données et également sur de nombreux logiciels de simulation. En effet, bien souvent la difficulté n'est pas liée à l'absence de connaissance dans les différents domaines mais à l'accession à celle-ci. Le projet final décrira avec précision les différents outils existants, leur domaine d'application, les informations nécessaires pour les alimenter et le type de résultats que l'on peut en attendre.

Nous définirons un certain nombre de critères devant être pris en compte dans l'élaboration d'un projet puis nous étudierons le moyen de les évaluer de façon à proposer une approche multicritères d'aide à la décision par le biais de la comparaison entre différentes solutions. Nous pourrions ainsi fournir une boîte à outils contenant les informations nécessaires pour évaluer les différentes solutions envisageables et guider les acteurs de ce type de réalisation. Il peut également être nécessaire de proposer des alternatives en précisant les enjeux des solutions envisagées, qui peuvent concerner l'orientation et la disposition des bâtiments, leur taille ou encore la mise en place de systèmes communs de chauffage ou de climatisation.

#### III.2. Réalisation d'une boîte à outil d'aide à la décision

On veillera à apporter un soutien à tous les stades du projet depuis l'élaboration de l'esquisse jusqu'à la définition de la qualité des ambiances en passant par le choix des matériaux utilisés, les méthodes de construction ou encore le coût énergétique de la construction et du fonctionnement futur du quartier. L'approche ainsi réalisée apportera une aide à la décision aux maîtres d'ouvrages et maîtres d'œuvre d'un projet à partir de critères fondés sur la qualité

des constructions et de la vie dans ces constructions tout en s'attachant au respect de l'environnement. On pourra ainsi convaincre les collectivités locales que la réalisation d'un projet de qualité n'est pas simplement une affaire de spécialistes mais demande une contribution de tous les intervenants depuis le concepteur jusqu'à l'habitant.

Le projet consiste tout d'abord en une classification des critères liés au développement durable puis dans un second temps en un recensement des moyens permettant de les évaluer. La méthode sera alors validée sur les cas d'études choisis en partenariat avec les collectivités ce qui conduira au développement d'une méthodologie d'aide à la décision.

### III.3. Articulation du projet avec le travail de thèse

La thèse présentée ici est étroitement liée au projet ADEQUA. Elle a pour objet d'apporter à ce projet une méthode permettant d'évaluer des objectifs et indicateurs afin de comparer différentes propositions d'aménagement d'un quartier. Cela implique notamment la définition d'indicateurs, la détermination de leur mode de calcul, ainsi que de leur mode de gestion. Certaines actions, telles que la détermination des objectifs, ont nécessité la collaboration de tous ; elles sont précisées dans le texte. Je remercie une nouvelle fois l'ensemble des partenaires pour l'aide et la collaboration qu'ils ont bien voulu m'accorder pour ce travail.

## IV. Synthèse

La problématique est posée : il s'agit de mettre en place une méthode pour évaluer les projets d'aménagement de quartier. Cette problématique répond, dans la continuité des réflexions entreprises à l'échelle internationale depuis plusieurs dizaines d'années, à la volonté d'inclure la notion de développement durable dans le domaine de la construction. La majorité des travaux de recherche dans ce domaine concernent le bâtiment et fort de la connaissance acquise, nous pouvons envisager d'élargir notre échelle d'étude.

La problématique doit cependant être définie de manière plus précise ; ce sera l'objet du deuxième chapitre. En effet, de nombreuses inconnues subsistent, concernant par exemple le type d'évaluation à mettre en place, la portée spatiale et temporelle, et le mode de représentation de l'évaluation.

Après la généralisation de la prise de conscience des ressources limitées de la Terre et des grandes disparités entre les êtres humains, nous évoluons ensemble vers la recherche de solutions adaptées à un futur inconnu. Dans ce domaine, le travail de Frey (2004) apporte une vision intéressante, à partir des quatre niveaux de "durabilité" proposés par McDonach et Yaneske (2002) pour qualifier le développement urbain d'une ville. Le niveau 0 correspond à l'absence totale de vie, état stable car rien n'est consommé ni produit ; on peut citer comme exemple les ruines d'une ville détruite par une catastrophe naturelle comme Pompéi. Dans le niveau 1, les humains vivent simplement des limites du renouvellement naturel de l'écosystème ; c'est l'état occupé par nos ancêtres pendant plusieurs millions d'années. Le niveau 2 correspond à un état plus élevé d'activités socio-économiques et à une demande plus importante en ressources. Pour être durable, le système doit être suffisamment productif pour pouvoir maintenir un équilibre et remédier à une dégradation de l'écosystème. Le dernier niveau correspond à une biosphère totalement nouvelle et artificielle ; de nombreuses recherches sont menées dans cette direction, principalement dans l'optique d'une colonisation future de l'espace.

Nous pouvons considérer qu'actuellement l'humanité est dans une période transitoire entre le premier et le deuxième niveau, cette période n'est pas durable car l'écosystème se dégrade et il faudra donc évoluer vers un niveau stable, mais lequel ? Depuis que nous avons dépassé le niveau 1, les conséquences du développement d'une ville dépassent ses frontières et même sa périphérie pour se répercuter au niveau planétaire. Et les solutions à apporter, si l'on souhaite arriver au niveau 2 doivent se faire à une échelle bien plus large que la ville. Frey conclut de la sorte que l'ancien slogan "penser globalement et agir localement" n'est plus approprié et qu'il est plus important aujourd'hui d'agir et de penser à la fois au niveau local et au niveau global.

Ce travail apporte sa modeste contribution à cet enjeu, en essayant de lier les problématiques locales en rapport avec l'individu avec des problématiques globales.

## CHAPITRE 2 : Définition générale de la méthode d'évaluation

L'ensemble de la méthode comme support d'aide à la décision sera présenté dans ce chapitre. Il s'articule autour des orientations choisies en fonction de nombreux éléments.

- Dans un premier temps, il s'agit de définir la portée, c'est-à-dire les frontières de notre système (les limites spatiales et l'échelle temporelle).
- Nous devons également déterminer quels sont les futurs utilisateurs de notre méthode et quelles sont leurs attentes.
- A partir de l'état de l'art des méthodes d'évaluations existantes et en considérant les différentes expériences déjà menées dans ce domaine, nous pouvons définir les principes généraux que nous mettons en place.

## I. Portée de la méthode

### I.1. Importance de l'échelle d'étude

#### I.1.a. L'échelle spatiale

Il existe des projets d'aménagement ou de planification à toutes les échelles : le bâtiment, l'îlot, le quartier, l'ensemble de quartiers, la ville, l'agglomération, le territoire ou la région. Chaque échelle de projet présente des spécificités intrinsèques très variées, qu'il s'agisse des possibilités d'aménagement, des acteurs impliqués ou de l'échelle de temps. Le choix de l'échelle de travail est la première étape clef qui oriente fortement le projet tant au niveau du type de données disponibles qu'au niveau des objectifs à définir. Dans cette partie, nous justifions un choix de l'échelle d'étude pertinent vis-à-vis d'une démarche d'évaluation d'un projet en accord avec la notion de développement durable.

Penser le développement durable de manière globale implique une étude plus vaste que celle du bâtiment et sa parcelle. Etant donné la nécessité de prendre en considération les espaces publics ou les réseaux urbains, et en raison de l'interaction entre les bâtiments, il est nécessaire d'avoir une approche globale des phénomènes. D'après Owens (1986), l'occupation du sol et la planification urbaine peuvent significativement influencer la consommation énergétique d'une communauté, comme le montre le Tableau 1 ci-dessous.

**Tableau 1 : Influence de la planification urbaine sur la demande énergétique (Owens 1986)**

Variables de planification	Lien avec la consommation d'énergie	Effet sur la consommation d'énergie de la communauté
Forme urbaine	Besoins en terme de transports locaux	Jusqu'à 20 % de variation de l'utilisation d'énergie
Mixité des activités	Besoins en terme de transport (principalement la longueur des trajets)	Variation jusqu'à 130 %
Combinaison de variables structurelles (forme, taille, mixité d'utilisation du terrain, etc.)	Besoins en terme de transports (longueur des trajets et fréquence)	Variation jusqu'à 150 %
Densité, forme bâtie	Ratio volume sur surface qui influence les besoins en chauffage	200 % de variation selon les formes urbaines
Densité et regroupement des extrémités de trajets	Faisabilité du transit et facilité d'utilisation des transports publics	Jusqu'à 20 % d'économie d'énergie
Densité, mixité d'utilisation du terrain	Introduction de réseaux de chaleur ou de systèmes de cogénération	Jusqu'à 100 % d'amélioration pour l'énergie primaire
Densité, disposition du site, orientation et conception	Maximisation du potentiel d'utilisation d'énergies renouvelables ou gratuites	Jusqu'à 20 % d'économie d'énergie

La consommation d'énergie d'une communauté est liée par de nombreux aspects à la planification urbaine qui peut conduire à des économies importantes. Owens présente ici les aspects les plus couramment rencontrés lors de la recherche de l'efficacité énergétique. Ces économies peuvent provenir pour une majeure part du secteur des transports, à partir du contrôle de l'étalement urbain ou de la compacité de la communauté. Le secteur du chauffage est également une source importante d'économie grâce par exemple aux réseaux de chaleur et à la prise en compte des masques entre les bâtiments au niveau du rayonnement solaire.

Pour cette prise en compte globale, il est nécessaire d'élargir l'échelle spatiale d'étude. D'un point de vue uniquement environnemental, les impacts des constructions peuvent être considérés à tous les niveaux, depuis celui du bâtiment jusqu'à la planète (Peuportier 2003).

La complexité de l'évaluation d'un projet croit naturellement en fonction de l'élargissement de la zone d'étude, lorsque l'on souhaite garder un niveau de précision et un nombre de points d'évaluation constants. L'échelle adéquate se veut donc être un compromis entre une prise en compte trop parcellaire ou trop restreinte et une complexité inhibante. Nous avons choisi le quartier comme échelle intermédiaire entre le bâtiment et la ville. La Figure 9 montre l'articulation des différentes échelles spatiales d'intervention : l'aménagement du quartier concerne une échelle intermédiaire entre le territoire et le bâtiment.

Cette figure sera plus amplement commentée aux paragraphes suivants, mais nous pouvons déjà constater que l'opération d'aménagement découle de la planification territoriale et d'une politique globale. Elle conduit normalement à un ensemble de prescriptions concernant le bâtiment. Le quartier permet de transmettre la volonté d'un développement réfléchi depuis l'échelle globale du territoire jusqu'à l'échelle locale du bâtiment. Sa dimension plus ciblée qu'une ville ou un territoire, limite le nombre de données nécessaires, et ainsi, rend possible l'utilisation d'outils évaluant les parti pris sur les bâtiments (orientation, forme, etc.). D'après Charlot-Valdieu (2001), *"l'échelle du quartier s'avère pertinente dans une approche de développement durable : à l'heure où l'on ne maîtrise pas encore toutes les dimensions du développement durable à l'échelle d'une ville, le quartier, plus homogène, permet d'expérimenter des mesures appropriées au territoire et à ses spécificités"*. En plus de réduire la quantité de données nécessaires à la détermination des indicateurs de développement durable, le quartier, constitue un ensemble de vie cohérent regroupant dans une zone géographique délimitée des habitations, des réseaux de transports, des espaces verts, des lieux publics, des commerces, du tertiaire, etc. Il correspond ainsi mieux au niveau de résolution de nombreux problèmes tels que la collecte des déchets ou la limitation des nuisances (olfactives, acoustiques). De plus, grâce à sa dimension, il offre une plus grande facilité de concertation entre les autorités, les associations, les habitants et les entreprises. Dans une ville, l'approche quartier par quartier est également plus compréhensible quand on considère leur diversité : la même réponse en terme de développement durable ne peut être uniformément appliquée (Becue et Tahon 2004).

Le quartier apparaît donc comme une échelle pertinente et judicieuse de mise en place d'une démarche de développement durable. Il se définit comme une "division administrative de la ville ou partie ayant sa physionomie propre et une certaine unité" (Le Petit Robert 1996). A partir de l'interprétation de l'*unité*, on peut considérer le quartier comme une échelle de vie cohérente où l'on travaille, vit et dispose de commerces et de services. La limite physique n'est pas précisément définie (aire, nombre d'habitations) car elle va dépendre du projet de construction ou de réhabilitation et du type de quartier (densité d'habitations, espaces publics, diversités des fonctions des bâtiments).

Concernant les projets d'aménagement de quartier, deux procédures distinctes existent (Carfantan et al. 2005; Dufrasnes 2005) :

- Le lotissement qui est une procédure d'initiative privée qui nécessite en préalable une maîtrise foncière totale.
- La ZAC qui est une procédure d'initiative publique mise en place par la collectivité ; la maîtrise foncière n'est pas un préalable obligatoire et l'aménagement peut être confié à un aménageur privé ou public.

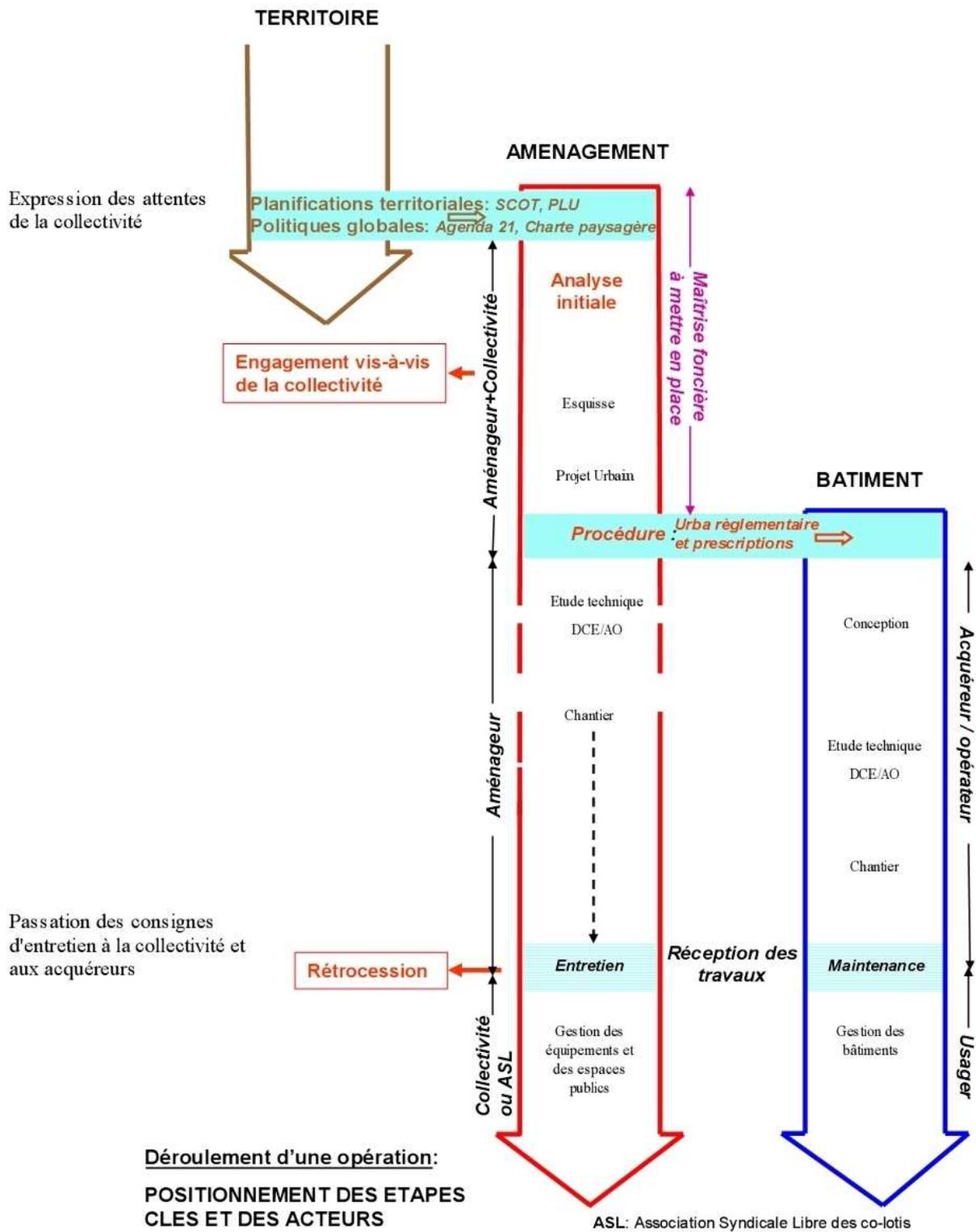


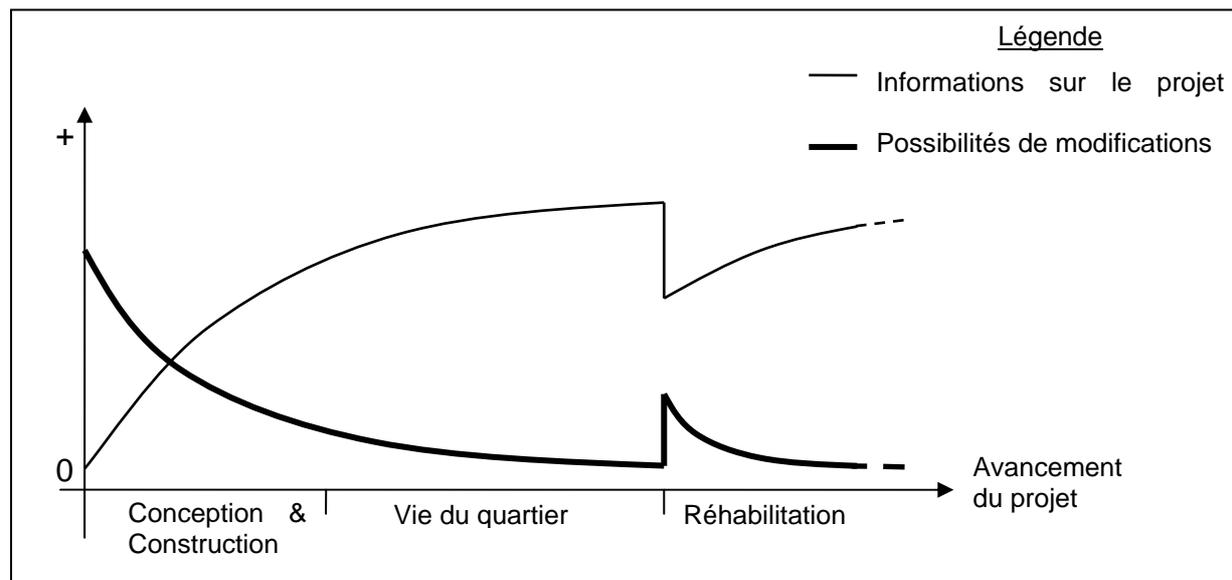
Figure 9 : Description du déroulement d'une opération type (Carfantan et al. 2005)

### I.1.b. L'échelle temporelle

Nous venons de borner spatialement les projets d'aménagement auxquels pourront s'appliquer la méthode mise en place. Concernant l'échelle temporelle, plusieurs questions s'imposent :

- A quelle(s) phase(s) du projet doit intervenir la méthode ?
- L'évaluation concerne-t-elle un instantané ou bien permet-t-elle un suivi du projet tout au long de sa vie ?

La Figure 10 illustre la relation théorique entre l'avancement d'un projet, les informations disponibles et les possibilités de modification du projet.



**Figure 10 : Evolutions théoriques des informations disponibles et des possibilités de modification**

En pratique, ces courbes ne sont pas lisses car les différentes parties d'un quartier évoluent à des degrés et des vitesses différentes. La deuxième partie du graphique correspond à la réhabilitation d'un quartier : les possibilités de modifications deviennent à nouveau importantes, à l'inverse des informations disponibles. La partie "conception et construction d'un quartier" dure de 5 à 10 ans, la durée de vie du quartier avant réhabilitation dépend de nombreux paramètres (type de quartier, localisation, acteurs impliqués, aspect financier) et sa durée varie davantage. Un quartier, tout au long de sa vie, peut être réhabilité plusieurs fois et de manière plus ou moins importante : de la réhabilitation de quelques bâtiments à la démolition et la restructuration de la totalité du quartier. Plusieurs ruptures peuvent apparaître sur les courbes, avec des amplitudes variables.

Ainsi, le choix de la phase d'intervention est d'une grande importance : plus l'évaluation intervient tard et plus il sera complexe d'intervenir sur le projet. A l'inverse, lors de phases très initiales du projet, peu de données sont disponibles. Le parti pris de ce travail est de considérer que la méthode doit pouvoir être applicable durant l'ensemble des phases de conception et de construction du projet : chaque phase a son importance pour l'optimisation du quartier et ne peut être négligée. La difficulté inhérente est de pallier le manque d'information lors des phases préliminaires du projet, tout en restant très vigilant sur la pertinence de certains indicateurs lorsqu'une très faible quantité de données est disponible.

La distinction entre les étapes majeures de conception et de construction du quartier et sa vie n'est pas franche ; nous proposons de la faire correspondre au moment où la gestion urbaine

du bâti se termine, c'est-à-dire quand les réflexions s'intéressent uniquement à l'échelle d'un bâtiment et de sa parcelle.

Peut-on ensuite appliquer cette démarche tout au long de la vie du quartier ? Le but affiché de la méthode proposée est la comparaison de projets de quartier et l'analyse des impacts d'une solution d'aménagement ; le suivi du quartier réalisé ne rentre pas dans ce cadre. La démarche de suivi du quartier n'est pas simplement une application de la méthode d'évaluation de projets de quartier : elle nécessite la définition d'indicateurs spécifiques, de protocoles de mesures in situ, etc.

## I.2. Aspects concernés et futurs utilisateurs

### I.2.a. Développement Durable et aménagement

Dans le premier chapitre nous avons constaté que la notion de développement durable est complexe à appréhender, la notion de besoin étant difficilement quantifiable. A travers les nombreuses définitions et interprétations de celle-ci, apparaissent principalement l'utilisation du "bon sens" et d'une démarche holistique avec au coeur de la réflexion la dimension humaine.

Appliquer le développement durable dans le domaine de l'aménagement des quartiers consiste à réfléchir aux nombreux aspects, donc à mettre en place une analyse multicritères dans les domaines de l'environnement, de l'économie et du social. Le quartier idéal du point de vue du développement durable, Saint Graal des aménageurs, architectes ou urbanistes, n'existe pas et ne pourra pas être atteint : la multiplicité des aspects, les nombreuses interactions, parfois même leurs contradictions, empêchent une optimisation de l'ensemble des paramètres. Au mieux, la solution d'aménagement conduira à la meilleure synthèse ; ce qui implique l'utilisation de références afin de pouvoir comparer les différents projets de quartiers. Ces références seront soit propres à un projet si l'on considère les différentes alternatives de quartiers, soit externes aux choix si elles sont basées sur des typologies de quartier. Nous aborderons cet aspect plus en détails dans le dernier paragraphe de ce chapitre.

Cette étude, premier élément de l'évaluation des quartiers, a pour but de présenter une méthode opérationnelle. Elle ne prétend pas traiter de manière exhaustive l'ensemble des aspects concernés par le développement durable mais se restreint à un domaine de compétence. Cependant sur la base de la méthode proposée, il est aisé d'ajouter de nouveaux aspects à intégrer.

Une autre notion a été souvent évoquée en parallèle de la notion de développement durable : la nécessité de l'implication de tous. Un projet, quel qu'il soit, ne pourra se réaliser correctement que si l'ensemble des acteurs impliqués assimilent et souhaitent "bien construire". La méthode doit donc être compréhensible et à la portée de tous les acteurs.

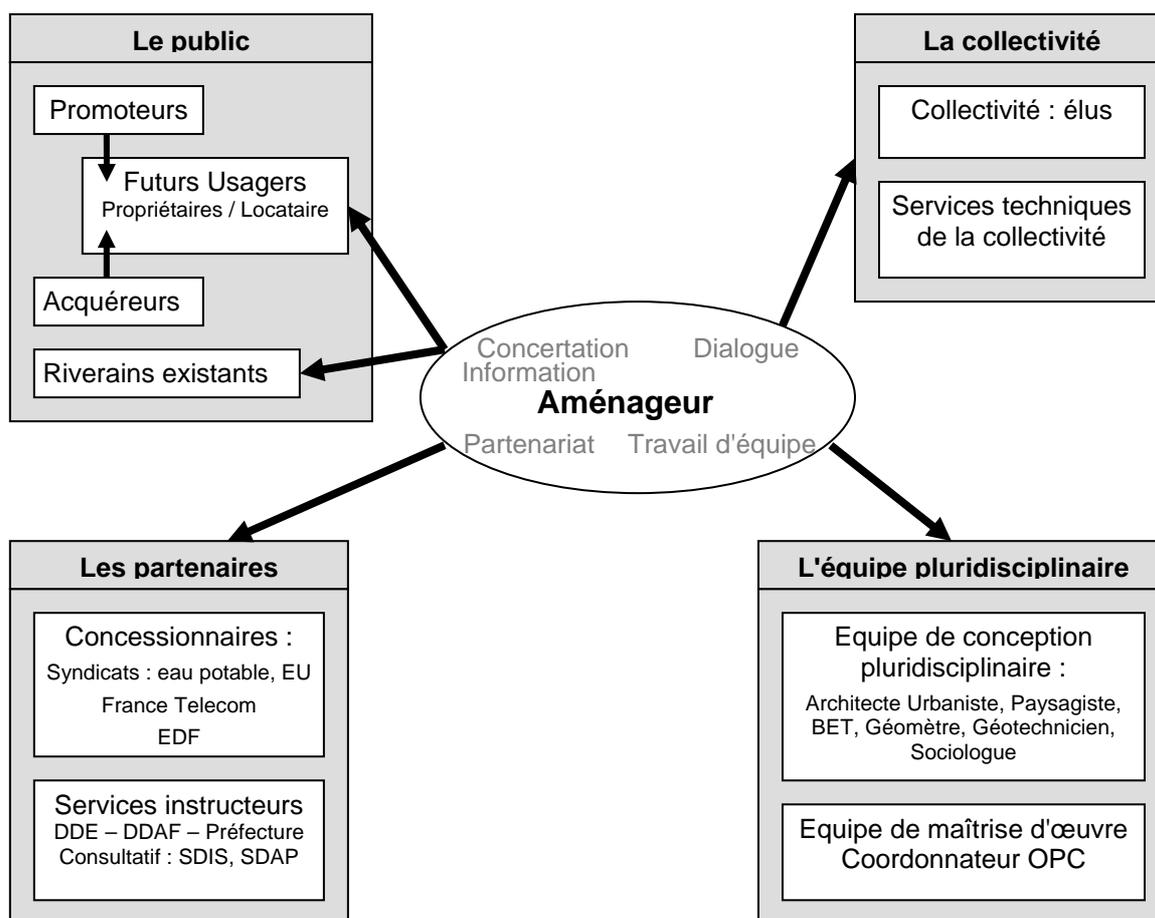
### I.2.b. Le rôle des principaux acteurs

Nous avons observé (Figure 9) le déroulement d'une opération d'urbanisme à l'échelle du quartier. Les principaux acteurs intervenant dans ce type d'opération et leur domaine de compétence sont (Dufrasnes 2005) :

- Les élus locaux ayant la responsabilité de l'urbanisation.
- L'aménageur organisant l'espace en vue de créer de nouveaux quartiers, de prévoir leur insertion naturelle et urbaine et de mettre en place les équipements nécessaires à la satisfaction des besoins des populations.

- Le géomètre expert exerçant en vertu de la loi, une mission d'intérêt général : dresser les plans et les documents topographiques à incidence foncière.
- L'urbaniste qui est un professionnel engagé dans l'organisation et la gestion de l'espace et de ses usages, spécialiste de l'interprétation des concepts théoriques pour mettre en forme l'espace en programmes et en plans.
- Le paysagiste qui est un professionnel engagé dans la préservation, la mise en valeur ou la restauration des paysages.

Selon le processus, lotissement ou ZAC, le maître d'ouvrage relèvera du domaine public ou privé. Dans tous les cas, l'aménageur, ayant la maîtrise foncière (ou étant mandaté), sera au centre du processus décisionnel comme le montre la Figure 11.



**Figure 11 : L'aménageur au centre du processus décisionnel (Carfantan et al. 2005)**

Celui-ci reste cependant en relation étroite avec une partie ou l'ensemble des intervenants : les habitants, la collectivité locale comprenant des élus et des services techniques, les professionnels tels que des bureaux d'études et les associations locales. L'équipe mise en place par l'aménageur, en concertation ou non avec les autres acteurs, constitue le comité de pilotage de l'opération urbaine.

Notre méthode doit pouvoir accompagner ce comité de pilotage et servir d'outil de concertation entre l'ensemble des acteurs d'un projet. "Le processus de construction ne doit donc pas être considéré comme une succession d'étapes distinctes, mais comme un travail collectif permettant d'aboutir à une solution satisfaisante techniquement, économiquement et répondant aux besoins des utilisateurs" (Lair et al. 2003).

En raison de la diversité des acteurs et de leurs attentes, l'utilisation d'indicateurs (de développement durable) devient nécessaire, comme l'a montré Boulanger (2004). De plus, une condition nécessaire de réussite est l'implication de l'ensemble des acteurs concernés et afin de ne pas freiner cette implication, la méthode mise en place doit être simple et compréhensible par tous (Ronchi et al. 2002; Cherqui et al. 2004b; Payraudeau et van der Werf 2005).

### I.3. Importance des études quantitatives

Pour répondre aux attentes des différents acteurs, il est nécessaire d'évaluer les différentes alternatives selon un ensemble de critères. Ces évaluations seront quantitatives, comme par exemple une consommation d'eau en m<sup>3</sup>/an ou une consommation énergétique en kWh/(m<sup>2</sup>.an). Mais certaines seront qualitatives dans le meilleur des cas ; citons par exemple les jugements de valeur comme "bonne pratique", "meilleure pratique" ou "en dessous de la norme".

Concernant le domaine de la construction, de nombreuses démarches aboutissent à une évaluation qualitative, bien qu'elles soient basées sur des critères quantitatifs. Citons par exemple la certification NF Logement (CERQUAL 2005c) avec trois niveaux de profils allant de A à C, ou bien la certification Habitat et Environnement (CERQUAL 2005a) et ses cinq profils, la certification Qualitel (CERQUAL 2005b) et ses cinq niveaux de performances allant de 1 à 5. Dans ces trois exemples, le but est de mettre en place une certification d'un bâtiment et non pas de comparer plusieurs projets pour déterminer quel sera le meilleur. Une évaluation qualitative est donc bien adaptée. Cependant, lorsqu'il s'agit d'optimiser ou de comparer, l'approche qualitative ne semble plus suffisante. Un contre exemple est "l'European Environmental Pressure Indices project" conduit par Eurostat et financé par la Commission Européenne (Jesinghaus 1999) : 60 indicateurs appartenant à dix thèmes sont évalués de manière qualitative avec sept choix allant de "très bien" à "crise".

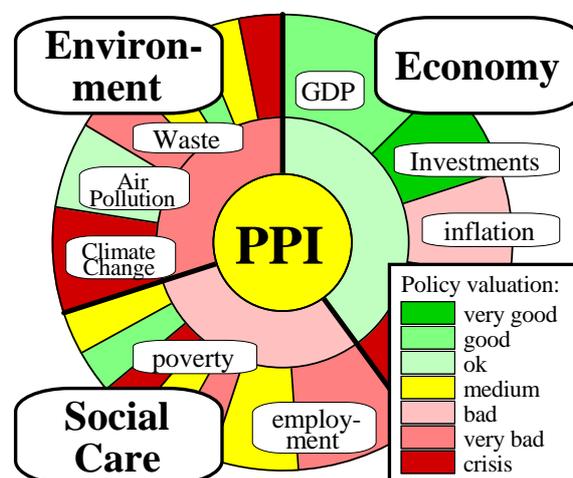


Figure 12 : "Policy Performance Index" (PPI) (Jesinghaus 1999)

A chaque qualificatif est associé une couleur, et à chaque indicateur est associé une surface fonction de l'importance de celui-ci. L'ensemble de l'évaluation est visualisé sous forme d'un graphique camembert divisé en trois aspects élémentaires : l'environnement, les préoccupations sociales et l'économie. Cette démarche offre la possibilité d'évaluer globalement un projet ou de comparer plusieurs projets.

Une représentation similaire est développée par Ronchi et ses collaborateurs (Ronchi et al. 2002) dans le projet italien ISSI. La difficulté principale de cette méthode est, de notre point de vue, la difficulté de lisibilité due au grand nombre de surfaces et de couleurs employées.

L'évaluation précise d'un projet, la comparaison d'alternatives et l'agrégation d'indicateurs sont des techniques pouvant nécessiter une approche purement quantitative. Cette solution n'est néanmoins pas souhaitable (Dhakal 2002) ni réalisable.

Dans notre approche, nous envisageons de faire cohabiter des évaluations qualitatives et quantitatives d'indicateurs. Nous proposons ici plusieurs méthodes permettant le passage d'une impression qualitative à une valeur quantitative :

- Le recours à des expertises peut permettre d'établir une notation précise d'un indicateur.
- L'utilisation de base de données peut dans certains cas permettre de préciser un critère et ensuite de lui donner une note.
- L'AHP (Saaty 1977) et MACBETH (Bana e Costa et al. 2003) sont des méthodes qui, à partir de la comparaison deux à deux des indicateurs, mènent jusqu'à leur quantification.

De plus, au sein de notre approche actuelle, nous privilégions l'utilisation d'outils permettant la quantification d'indicateurs ; les outils de simulations solaires ou acoustiques en sont un bon exemple.

Pour clarifier cette discussion, nous présentons dans le chapitre suivant un état de l'art des méthodes d'évaluation pouvant être utilisées lors de notre démarche.

## II. Différentes méthodes d'évaluation d'un projet

En fonction des domaines et des besoins, de nombreuses méthodes ont été développées dans le but d'évaluer un projet. Ces méthodes concernent un domaine plus large que la construction ou la réhabilitation d'un quartier, et chacune possède ses propres spécificités.

Dans ce chapitre, nous établissons un état de l'art exhaustif de ces démarches. Cet état de l'art est basé principalement sur les livres de Pierre André (André et al. 2003) et Jacques Pictet (Pictet 1996), sur la thèse de Catherine Bussemey-Buhe (Bussemey-Buhe 1997) et sur le cours de Keith Storey (Storey 2005). Quelque soit la méthode choisie pour évaluer un projet, il est très fréquemment nécessaire de faire appel au jugement d'experts, à des bases de données ou à des outils de calcul ou de simulation.

### II.1. Listes de contrôle ("Check-lists")

La liste de contrôle est la méthode la plus simple pour évaluer un projet : l'utilisateur dispose d'une énumération de points de contrôle. Ainsi il pourra trier des projets (en excluant ceux qui ne répondent pas à la liste), prendre conscience de l'importance de certains aspects (incidences ou impacts potentiels) ou bien, vérifier la correcte prise en compte de l'ensemble des aspects.

#### II.1.a. Différents types de listes

André et al. (2003) différencient cinq types de listes. Elles sont répertoriées dans le Tableau 2 ci-dessous :

**Tableau 2 : Différents types de listes (André et al. 2003)**

Type de liste	Descriptif
Liste simple	Énumération de points de contrôle servant à attirer l'attention du professionnel sur les points essentiels
Liste descriptive	Énumération des points de vigilance compléter d'informations sur les moyens de contrôle et d'optimisation
Liste avec seuils	Énumération de points avec des valeurs seuils minimales ou maximales permettant de les juger précisément
Liste avec échelle et pondération	Liste d'indices globaux calculés à partir de sous indices pondérés et bornés de 0 à 1. Les sous indices sont en général calculés subjectivement
Questionnaires	Ensembles de questions et leurs réponses, regroupés par catégories. Les réponses permettent d'établir les limites de la connaissance et d'apprécier les conséquences éventuelles du projet

De nombreuses variantes de ces listes peuvent exister ; Bussemey-Buhe (Bussemey-Buhe 1997) présente les "check-lists" permettant d'évaluer les impacts. Ces "check-lists" sont du type *questionnaire* mais avec comme seules réponses possibles "oui", "non" ou "ne sait pas".

#### II.1.b. Avantages et inconvénients

L'avantage de l'utilisation des listes est la simplicité de la méthode et la rapidité d'évaluation. Elles constituent également un aide mémoire des points essentiels et sont aisément adaptables.

Cependant, chaque point est étudié individuellement sans corrélation avec les autres, sans rendre compte de la complexité des phénomènes. Les listes agissent aussi comme des œillères et peuvent conduire à l'omission de certains points spécifiques du projet. Pour rester exploitables, elles ne doivent pas comporter une multitude de points différents et en conséquence se limiter aux impacts de première importance. De plus l'évaluation aboutit

généralement à une estimation subjective et qualitative ; les conclusions risquent donc de dépendre de l'évaluateur. Cet inconvénient est minimisé avec l'utilisation de listes comportant des seuils ou des échelles et des pondérations. Enfin, les listes nécessitent d'être définies par un ensemble d'experts et deviennent obsolètes faute de mise à jour des seuils ou des points de contrôle en fonction de l'avancée des connaissances.

## II.2. Matrices d'impact

Les matrices d'impact permettent de faire ressortir l'interaction entre les activités d'un projet et leurs conséquences potentielles. Chaque cellule de la matrice représente une relation de cause à effet entre une action et un impact. Les matrices peuvent être génériques, sectorielles ou adaptées à un projet donné. Cette méthode a été pour la première fois utilisée par Leopold et al. (1971) pour recenser les impacts d'un projet et les estimer. Il existe de multiples utilisations différentes des matrices : Bussemey-Buhe (1997) en recense plusieurs dans sa thèse.

### II.2.a. Différents types de matrices

Les matrices sont classées en fonction des types de renseignement contenus dans les cellules :

- les matrices simples contiennent une indication d'interaction ou non,
- les matrices descriptives contiennent un texte indiquant la nature, la grandeur, l'importance ou la signification de l'impact,
- les matrices numériques contiennent des nombres entiers ou des réels caractérisant l'impact (évaluation et importance),
- les matrices à symboles décrivent visuellement la valeur de l'impact (mineur, significatif, majeur).

### II.2.b. Avantages et inconvénients

Elles possèdent les mêmes avantages et inconvénients que les listes de contrôle dont elles sont une adaptation mais elles permettent une estimation plus fine du projet. La pondération des impacts entraîne des conséquences à mesurer : nous les exposerons plus en détail dans le chapitre concernant la gestion des indicateurs et plus spécifiquement sur leur agrégation. Les matrices peuvent être larges et la masse d'information difficile à manipuler : l'informatique peut dans ce cas s'avérer une aide indispensable.

D'après André et al. (2003), "Malgré leurs limites, on a fréquemment recours aux matrices, car elles ont l'avantage de proposer une synthèse visuelle de l'impact des activités d'un projet".

## II.3. Les méthodes d'aide à la décision

### II.3.a. Présentation

Au cours du processus d'évaluation d'un projet, elles permettent de prendre les décisions concernant par exemple la localisation, des options de construction ou encore l'échéancier du projet (Roy et Bouyssou 1993). Ces méthodes permettent également de prendre la décision finale lors de choix de différentes alternatives. Plusieurs méthodes d'aide à la décision existent : la présentation de l'information en tableau, la comparaison par critères, la méthode ordinale et l'aide multicritères à la décision.

L'intérêt des méthodes d'aide à la décision est justifié dans le cas où la recherche de la solution n'est pas immédiate. Pour illustrer cela, Brunner et Starkl (2004) ont pris comme exemple une problématique idéale dans laquelle on recherche une solution optimisant les impacts  $x$  et les coûts  $y$ , cet exemple est présenté Figure 13.

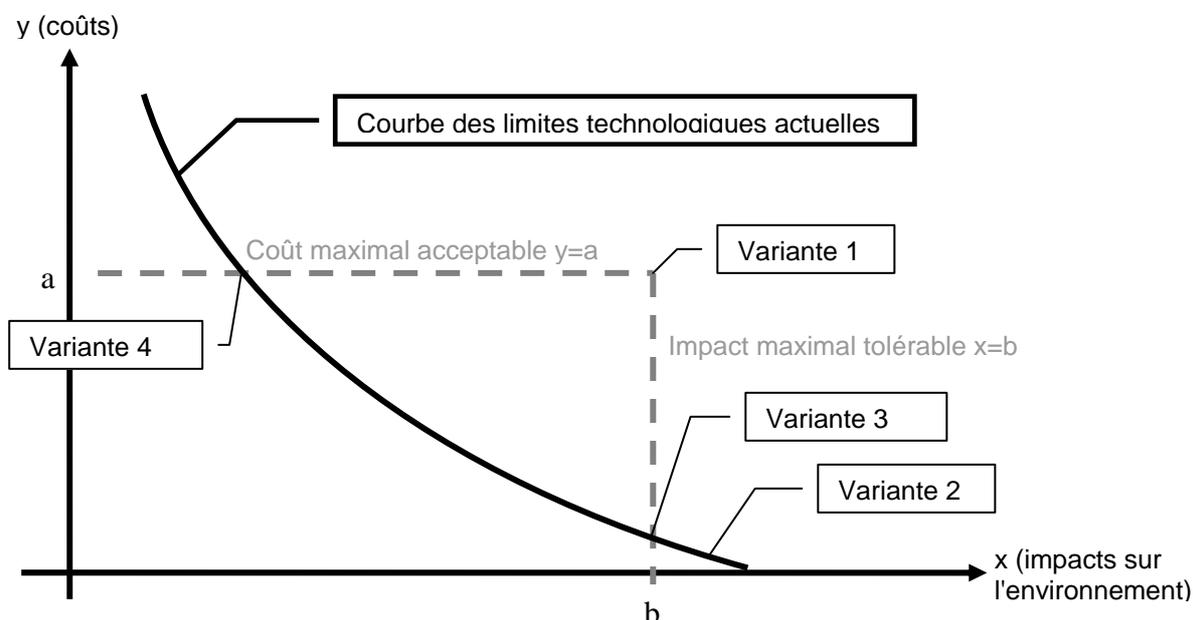


Figure 13 : Recherche de la solution optimum (Brunner et Starkl 2004)

Dans cette problématique, la recherche de la solution doit conduire à un impact moindre acceptable (ne dépassant pas le seuil  $x=b$ ) pour un coût réduit et inférieur au coût maximal acceptable  $y=a$ . L'ensemble des variantes non optimisées (par exemple la variante 1) est éliminé par la raison. Elles sont considérées comme non optimisées car le coût peut être réduit à impact équivalent ou inversement. De même, les variantes dépassant les seuils  $x=b$  et  $y=a$  sont rejetées (par exemple la variante 2). Il reste l'ensemble des variantes comprises entre la variante 3 et la variante 4 et situées sur la courbe des limites technologiques qui représente l'ensemble des variantes offrant le minimum d'impact pour un coût minimum. Ces variantes 3 et 4 représentent respectivement la solution acceptable d'un point de vue environnemental la moins onéreuse et la meilleure solution technologique disponible à un prix acceptable. L'apport de l'aide à la décision est de trouver la meilleure solution sur la courbe entre les variantes 3 et 4 et de justifier en quoi ce choix est le meilleur.

### II.3.b. Aide multicritères à la décision

Nous nous sommes plus spécifiquement intéressés à l'aide multicritères à la décision, qui consiste à ordonner les alternatives sur la base soit d'un critère unique, soit de différents critères appréhendés dans leur pluralité (approche multicritères) ; le tout en vue de faire ressortir l'alternative qui s'approche le plus des objectifs recherchés. Cette démarche nécessite tout d'abord de reconnaître les acteurs, puis de définir les alternatives d'un projet, d'établir les critères et leur pondération éventuelle. Ensuite, il faut évaluer chaque critère pour chaque alternative et l'ensemble des résultats est inscrit dans une matrice alternatives/critères. Cette matrice sera interprétée en vue d'obtenir un classement des différentes alternatives et d'identifier celle qui satisfait au mieux les exigences requises. Parmi les méthodes d'aide à la décision, on peut citer les tableurs SMART et SWING, basés sur la théorie MAUT (Brunner et Starkl 2004) et le logiciel Expert Choice (Al-Harbi 2001) appliquant le processus de hiérarchisation analytique (AHP). "La diversité de ces méthodes réside dans la façon d'effectuer la synthèse de l'information" (Ben Mena 2000). En effet, l'aide multicritères à la décision répond à quatre problématiques différentes présentées dans le Tableau 3 ci-dessous.

**Tableau 3 : Problématiques différentes de l'aide multicritères (Roy et Bouyssou 1993)**

	Objectif	Résultat
P.α	Eclairer la décision par le choix d'un sous-ensemble aussi restreint que possible en vue d'un choix final, ce sous-ensemble contenant les "meilleures" actions ou à défaut les actions "satisfaisantes".	Un choix ou une procédure de sélection
P.β	Eclairer la décision par un tri résultant d'une affectation de chaque action à une catégorie, les catégories étant définies a priori en fonction de normes ayant un rapport avec la suite à donner aux actions qu'elles sont destinées à recevoir.	Un tri ou une procédure d'affectation
P.γ	Eclairer la décision par un rangement obtenu en regroupant tout ou partie ("les plus satisfaisantes") des actions en classes d'équivalence, ces classes étant ordonnées, de façon complète ou partielle, conformément aux préférences.	Un rangement ou une procédure de classement
P.δ	Eclairer la décision par une description, par un langage approprié, des actions et de leurs conséquences.	Une description ou une procédure cognitive

### II.3.c. Méthodes de pondération des critères

L'utilisation de méthodes agrégatives a pour but de synthétiser le problème pour permettre une vision globale de celui-ci ; cette simplification implique nécessairement un remaniement et une perte d'information plus ou moins importante en fonction de la méthode utilisée. Malgré cet inconvénient, ces méthodes sont néanmoins indispensables dans de nombreux cas. Dans le cas d'une approche monocritère, la matrice entière sera synthétisée en un vecteur comprenant une seule valeur par alternative. Dans le cadre d'une approche multicritères, on considère sinon la matrice toute entière, du moins un nombre de critères supérieur à 1. Etant donné que le choix du type d'agrégation est fortement corrélé à la démarche globale que nous souhaitons mettre en place, nous évoquerons les approches d'agrégation plus en détail dans le chapitre 4 qui concerne la gestion des indicateurs.

L'agrégation d'indicateurs implique nécessairement de pondérer ceux-ci ; la détermination de l'importance d'un critère par rapport à un autre est un enjeu majeur à la fois scientifique et politique. Plusieurs méthodes de pondération peuvent être envisagées (Hajkowicz et Prato 1998; Tamiz et al. 1998; Bana e Costa et al. 2003; Boulanger 2004; Brunner et Starkl 2004; Krajnc et Glavic 2005; Payraudeau et van der Werf 2005) et de nombreux exemples d'utilisation sont disponibles dans la littérature (Al-Harbi 2001; Al Khalil 2002; Mendoza et Prabhu 2003; Molines 2003; Svoray et al. 2005). Les principales méthodes sont résumées dans le Tableau 4.

**Tableau 4 : Méthodes de pondération utilisables lors de l'analyse multicritères**

Méthode	
Avantages	Inconvénients
<b>Méthode d'attribution de scores (fixed point scoring)</b>	
Répartition d'une somme de points sur l'ensemble des critères (répartition de 100 % par exemple)	
L'attribution d'un poids plus important à un critère réduit l'importance relative d'un autre élément	Difficulté d'appréhender la complexité globale de la réalité (Svoray et al. 2005)
<b>Comparaison par paire (paired comparison)</b>	
Comparaison deux à deux des critères, les plus connus étant la méthode AHP inventée par Saaty (1977) et la méthode MACBETH (Bana e Costa et al. 2003)	
<ul style="list-style-type: none"> <li>- La méthode est simple d'utilisation</li> <li>- La consistance (cohérence) de l'ensemble des comparaisons est vérifiée</li> <li>- Des logiciels utilisant cette méthode existent : Expert Choice ou MultiCSync (Moffett et al. 2005) par exemple.</li> <li>- Elle permet d'appréhender la complexité du monde réel (Svoray et al. 2005)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Le choix de l'échelle allant de 1 (même importance) jusqu'à 9 (absolument plus important) n'est pas justifié mathématiquement</li> <li>- Le temps de comparaison augmente plus rapidement que le nombre de critères : l'équation (II.1.1) ci-après indique le nombre de comparaisons nécessaire <math>N_{comp}</math> en fonction du nombre de poids <math>p</math> à déterminer (Hajkowicz et Prato 1998)</li> </ul>
$N_{comp} = \frac{p!}{2 * (p-2)!} = \frac{1}{2} * p * (p-1) \quad (II.1.1)$	
<b>Analyse de jugement (judgement analysis)</b>	
Evaluation de l'importance d'alternatives distinctes réelles ou fictives sur des échelles de 1 à 10, 1 à 20 ou 1 à 100. Une procédure inverse permet de calculer les poids des critères en fonction des évaluations des alternatives.	
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Les pondérations sont fonction des comportements révélés des acteurs et non pas de leurs préférences officielles</li> <li>- La méthode permet la prise en compte indirecte de paramètres</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Cette méthode est également plus consommatrice en temps ; pour obtenir une signification statistique, un nombre suffisant d'alternatives doit être étudié<sup>12</sup>.</li> <li>- La méthode conduit à surestimer parfois la capacité cognitive des décideurs lorsque le nombre d'alternatives est important.</li> </ul>
<b>Méthode des valeurs attendues (expected value method)</b>	
L'attribution des poids est uniquement fonction du classement des critères et de leur nombre. Janssen (1992) propose des valeurs de pondération.	
- La méthode est simple et requiert uniquement de classer les critères	- La pondération obtenue ne reflétera pas systématiquement les différences d'importance entre critères
<b>Technique du jeu de cartes</b>	
Distribution d'un "jeu de cartes" sur lesquelles sont inscrits les noms de critères ainsi que des cartes blanches. Le décideur classe les cartes ; il a la possibilité de mettre des cartes ex aequo et de glisser des cartes blanches entre les critères	
- Simple et facilement utilisable	Même inconvénients que la méthode des valeurs attendues et la méthode d'attribution des scores
<b>Arbre des pondérations</b>	
Lorsqu'il est possible de décomposer les critères sous forme d'une arborescence, alors à partir de la pondération de chaque embranchement, la valeur de pondération de chaque critère correspond au produit des coefficients des sous branches et des branches dont il est issu.	
Le nombre d'éléments à comparer est limité	La difficulté réside dans la réalisation de l'arbre

<sup>12</sup> (Hajkowicz and Prato 1998) se sont servis de 15 alternatives pour pondérer 5 critères et ils citent (Cooksey 1996) qui a utilisé 30 alternatives pour six critères.

Il faut préciser en ce qui concerne les méthodes AHP et MACBETH de comparaison par paire que ces méthodes permettent d'effectuer une comparaison d'alternatives ; la détermination des coefficients de pondération n'est qu'une étape. Ces méthodes sont parmi les méthodes d'analyse multicritères les plus utilisées : les logiciels Expert Choice et M-MACBETH permettent de faciliter leur utilisation.

La grande différence entre ces méthodes réside dans le mode de comparaison : MACBETH est basé sur une comparaison par différence, par exemple "X est mieux de quatre points que Y" alors que pour l'AHP, l'utilisateur établit des ratios entre les options, par exemple "X est trois fois plus important que Y".

D'autres méthodes de détermination des poids des critères existent, comme l'utilisation de la logique floue (Gagliardi et Roscia 2002). Ces dernières ne sont pas présentées ici car étant novatrices, il existe peu ou pas de retour d'expérience.

## II.4. Discussion

Nous avons vu qu'il existe une importante variété de méthodes pour évaluer un projet. Les paramètres principaux définissant l'utilisation d'une méthode plutôt qu'une autre sont la simplicité, la clarté d'utilisation, la finesse de l'évaluation (qui ne garantit pas forcément la justesse), la flexibilité (ou adaptabilité). L'expérience montre qu'une évaluation ne peut pas être basée sur une méthode unique mais qu'il est préférable de combiner différentes méthodes (Pictet 1996). Le choix de la méthode est principalement fonction :

- Des circonstances : l'objectif est-il d'évaluer les impacts majeurs ou l'ensemble des impacts ?
- Du temps disponible : pour la collecte des données, le développement de modèles.
- Des ressources disponibles : budget, experts, équipements.
- De la qualité et de la disponibilité des données : quelles variables, quelles échelles, comment les acquérir ?
- Des retours d'expérience : quelles méthodes ont été utilisées dans des cas comparables et quel est le bilan ?
- De l'échelle d'étude : dimension spatiale, temporelle et humaine (combien de personnes sont impliquées dans le projet) ?

Les listes de contrôle sont plus efficaces en phase de tri préliminaire, les matrices sont performantes pour intégrer les interactions entre les activités d'un projet, les modèles permettent d'élaborer des scénarios, les méthodes de superposition privilégient la visualisation, les méthodes d'aide à la décision permettent de comparer au mieux différentes options.

Pour notre problème, les nombreux aspects envisagés seront traités selon différentes méthodes d'évaluation, afin de s'adapter au type d'évaluation, aux données disponibles, etc. Par exemple, l'évaluation de l'ensoleillement reçu dans le quartier requiert l'utilisation de modèles, l'évaluation de la consommation de ressources sera réalisée à l'aide des listes de contrôle, l'évaluation plus globale du projet nécessite des méthodes d'analyse multicritères.

Mais le choix des méthodes d'évaluation doit dépendre également des retours d'expérience. Dans ce cadre, il est pertinent de prendre connaissance des projets comparables tant en France qu'à l'étranger avant de définir nos exigences méthodologiques.

### III. Etat de l'art des projets et des outils

Nous avons établi un état de l'art se voulant le plus exhaustif possible des démarches, guides, logiciels, outils d'évaluation et projets en cours concernant l'aménagement des quartiers. Cet état de l'art se restreint au domaine de la construction et de la réhabilitation, sans prendre en compte les nombreuses démarches ayant trait aux décisions politiques tel que les agendas 21 locaux. Il ne recense pas non plus les très nombreux outils qui sont spécifiques à un aspect particulier du quartier (par ex. simulation solaire ou aérodynamique, mais également gestion des forêts, du système de transports en commun) ou bien qui concernent les systèmes d'indicateurs uniquement, comme CRISP ou PASTILLE. Notre état de l'art n'est pas limité aux frontières françaises mais il essaye d'appréhender l'ensemble des démarches européennes ainsi que d'autres plus éloignées. L'état de l'art est scindé en deux parties : une étude des méthodes, outils et projets existants et ensuite une présentation des projets en cours.

L'état de l'art des projets existants est présenté de manière synthétique dans le Tableau 5.

**Tableau 5 : Présentation synthétique de l'état de l'art**

	Nom	Champ d'étude
METHODES	Méthode CSTB "réhabiliter ou démolir et construire ?"	Identification du besoin de démolition lors de la réhabilitation d'un quartier
	Méthode anglaise "regeneration balance sheet"	Choix du schéma de rénovation d'un quartier
	L'évaluation des impacts sur l'environnement (EIE)	Etude d'impact d'un projet ou d'une activité demandée par la loi
	Méthode proposée par le SETUR	Méthodologie visant à élargir la démarche HQE au quartier
	Méthode HQE <sup>2</sup> R	Méthode d'évaluation d'un projet de renouvellement urbain à destination des collectivités locales et de leur partenaire
	L'Approche Environnementale sur l'Urbanisme (AEU)	Démarche d'accompagnement des projets urbains et de réflexion sur les impacts environnementaux
OUTILS / LOGICIELS	Projet de l'Annexe 31	Etat de l'art exhaustif et détaillé sur les moyens de minimiser les impacts environnementaux liés à la consommation d'énergie
	Projet INVENTUR	Recensement des outils logiciels existants dans le champ urbain
	Outil "Sustainability Checklist"	Evaluation d'un projet de quartier selon les trois piliers du développement durable
	Logiciel INDEX	Logiciel de planification urbaine regroupant une multitude d'aspects
	Outil PLACE <sup>3</sup> S	Outil d'évaluation d'alternatives de quartier basé sur la consommation énergétique
PROJET / PROGRAMME	Programme européen ENERGIE	Programme d'élaboration de recommandations en rapport avec le développement urbain.
	Projet URGE (Urban Green Environment)	Projet basé sur l'étude et l'évaluation des relations entre les espaces verts urbains et le quartier
	Projet mené à Compiègne	Méthode locale d'évaluation des conséquences au niveau d'un quartier de l'implantation d'un pont.
	Projet ECOLUP (Ecological Land Use Planning)	Projet recherchant à faciliter l'utilisation et l'application d'un système de management lors de la planification urbaine
	Projet ZED (Zero Emission Développement)	Définition de typologies de motifs urbains pour l'étude du microclimat et de l'énergie à l'échelle du quartier
	Programme RUE 2000	Contribution à l'élaboration de méthodes de management environnemental pour le renouvellement urbain

### III.1. Présentation des méthodes

#### III.1.a. Méthode du CSTB : "Réhabiliter ou démolir et construire ?"

Cette méthode (Charlot-Valdieu et Outrequin 2001) concerne les quartiers de logements sociaux. Elle permet, à partir d'une grille analytique basée sur les objectifs du développement durable, d'évaluer les impacts des projets de réhabilitation et / ou de démolition - construction. Cette méthode permet de guider la décision de rénovation ou de démolition ; et pour les opérations incluant à la fois rénovation et démolition, elle aide à savoir jusqu'à quel point démolir et ce qu'il faut au minimum rénover. La méthode a été mise en place à la suite d'une étude menée par le bureau d'études La Calade et le CSTB à la demande de la Direction Régionale de l'Équipement des Pays de la Loire. Elle a ensuite été mise en pratique par la municipalité d'Angers, puis par le propriétaire de logements sociaux Angers Habitat et la Direction Départementale de l'Équipement du Maine et Loire, avant d'être plus largement utilisée.

La méthode propose 22 enjeux prioritaires évalués par 48 indicateurs. Pour chaque indicateur, l'utilisateur détermine la valeur actuelle et propose une valeur cible en fonction de la valeur actuelle et des priorités de l'ensemble des acteurs impliqués dans le projet, un exemple est donné dans le Tableau 6.

**Tableau 6 : Exemple de tableau d'analyse (Charlot-Valdieu et Outrequin 2001)**

N°Indicateur	valeur	Objectif	Qualité	Contraintes physiques et d'aménagement			
				ED	LD	EA	LA
Population d'âge supérieure à 46 ans	21 %	↑	-				
Besoin de changer la fonctionnalité du quartier	OUI	↑↑	--	NON	NON		
Existence d'un pôle attractif	NON	↑↑	-	NON	NON		
Accès aisé au transport en commun	NON	↑	0		OUI		Difficile
Présence de services publics	Insuffisant	↑	-	NON	OUI		Difficile
Nombre d'emplois / 1000 habitants	Insuffisant	↑	-	NON	OUI		Difficile
Nombre de cellules commerciales	0,7 m²/hab	↑	-	NON	OUI		Difficile
Existence de lieux de convivialité	Peu	↑	-	NON			
<b>Synthèse</b>			<b>-- (8 -)</b>	<b>NON (+6)</b>	<b>OUI (+2)</b>		<b>NON (4)</b>

ED : Espaces Disponibles, LD : Locaux Disponibles, EA : Espaces Aménageables, LA : Locaux Aménageables

L'étude de la solution envisagée se fait à l'aide de listes de contrôles, par la mise en évidence de l'évolution de chaque indicateur : l'utilisateur détermine ainsi les points positifs et négatifs et permet une comparaison avec les autres solutions.

#### III.1.b. Méthode anglaise : The Regeneration Balance sheet

Ce tableau d'évaluation des rénovations d'un quartier provient de supports de formation développés par l'UWE (University of the West of England) et commandés par le département des transports ainsi que par des municipalités et régions de Grande Bretagne. Il offre un cadre de compréhension des schémas de rénovation, par le biais d'une liste de contrôles (voir le paragraphe II.1 ci-dessus) couvrant l'ensemble des thèmes et dimensions du développement durable. Cette liste de contrôles permet d'évaluer pour chaque point, les améliorations ou détériorations induites. Le nombre de thèmes à traiter est choisi en fonction de l'opération étudiée. Le tableau bilan peut être présenté sous forme d'un simple tableau (Antonini et al.

2002) permettant d'avoir une vision globale et synthétique. Celui-ci peut ensuite servir de base à l'établissement d'un rapport plus détaillé.

### III.1.c. Evaluation des Impacts sur l'Environnement (EIE)

Cette démarche qui englobe différentes procédures selon le pays, vise "la prise en compte de l'environnement dans la décision d'approuver diverses formes d'activités" (André et al. 2003). Elle émerge d'un ensemble de préoccupations sociales à l'échelle tant nationale qu'internationale. Elle vise à éviter que ne survienne une dégradation de l'environnement aux dépens d'un développement économique ; grâce à une meilleure intégration des projets au milieu. Le processus d'EIE est apparu aux Etats-Unis en 1969 et il s'est ensuite répandu dans le monde. L'application des EIE en Europe provient de la directive 85/337/CEE. En France, les exigences d'études d'impact datent de l'article 2 de la Loi n°76-629 du 10 juillet 1976 relative à la protection de la nature jusqu'au décret d'application n°85-453 du 23 avril 1985 qui en présente le fonctionnement : tout projet doit être soumis à une étude d'impact dès que le coût total est supérieur 1 800 000 Euros (indexé sur le coût de la vie) avant application de quelque fractionnement du projet que ce soit.

*Cette démarche dépasse le cadre du projet urbain par bien des aspects, cependant elle possède de nombreux points communs avec notre travail tant au niveau des acteurs impliqués (maîtres d'ouvrage, public, décideurs) que des méthodes et outils applicables.*

### III.1.d. Méthodologie proposée par le SETUR

Cette méthodologie est appelée "méthodologie pour une démarche de qualité environnementale sur les opérations d'aménagement dans une perspective de développement durable" (Carfantan et al. 2005) et est financée par la DGUHC (Direction Générale de l'Urbanisme, de l'habitat et de la Construction), l'ADEME et le SNAL (Syndicat National des Aménageurs Lotisseurs). Cette étude a été lancée pour définir une méthode en vue d'une démarche de qualité pour : intégrer le site vis-à-vis du territoire environnant, influencer sur la qualité de l'aménagement proprement dit, faciliter la qualité attendue des bâtiments à construire et anticiper les besoins des générations futures.

Son objectif est de définir un outil à l'usage des aménageurs, publics ou privés, et des collectivités locales. La méthode mise en place a pour principal but de relier l'opération à l'échelle du quartier avec les démarches mises en place à l'échelle plus large du territoire et l'échelle plus restreinte du bâtiment comme la démarche HQE. L'étude a été menée sous la maîtrise d'ouvrage du SNAL, et suivie par un comité de pilotage composé de représentants des trois financeurs et de l'association HQE.

Le travail a conduit à la réalisation d'un Système de Management d'Opération, Figure 14, ainsi qu'à la constitution de 11 thèmes et 2 approches transversales pour l'analyse d'une opération. Actuellement, ce travail a été testé sur deux cas lors de phases spécifiques : un lotissement à Laval et un lotissement à Puilboreau. Il devrait prochainement être utilisé complètement sur de nouvelles opérations.

Ce travail nous apporte de nombreuses informations sur les étapes clés du déroulement d'une opération d'urbanisme, et sur les possibilités de mise en place d'un SMO à cette échelle, ainsi que sur les thèmes associés au quartier et leur déclinaison en objectifs.

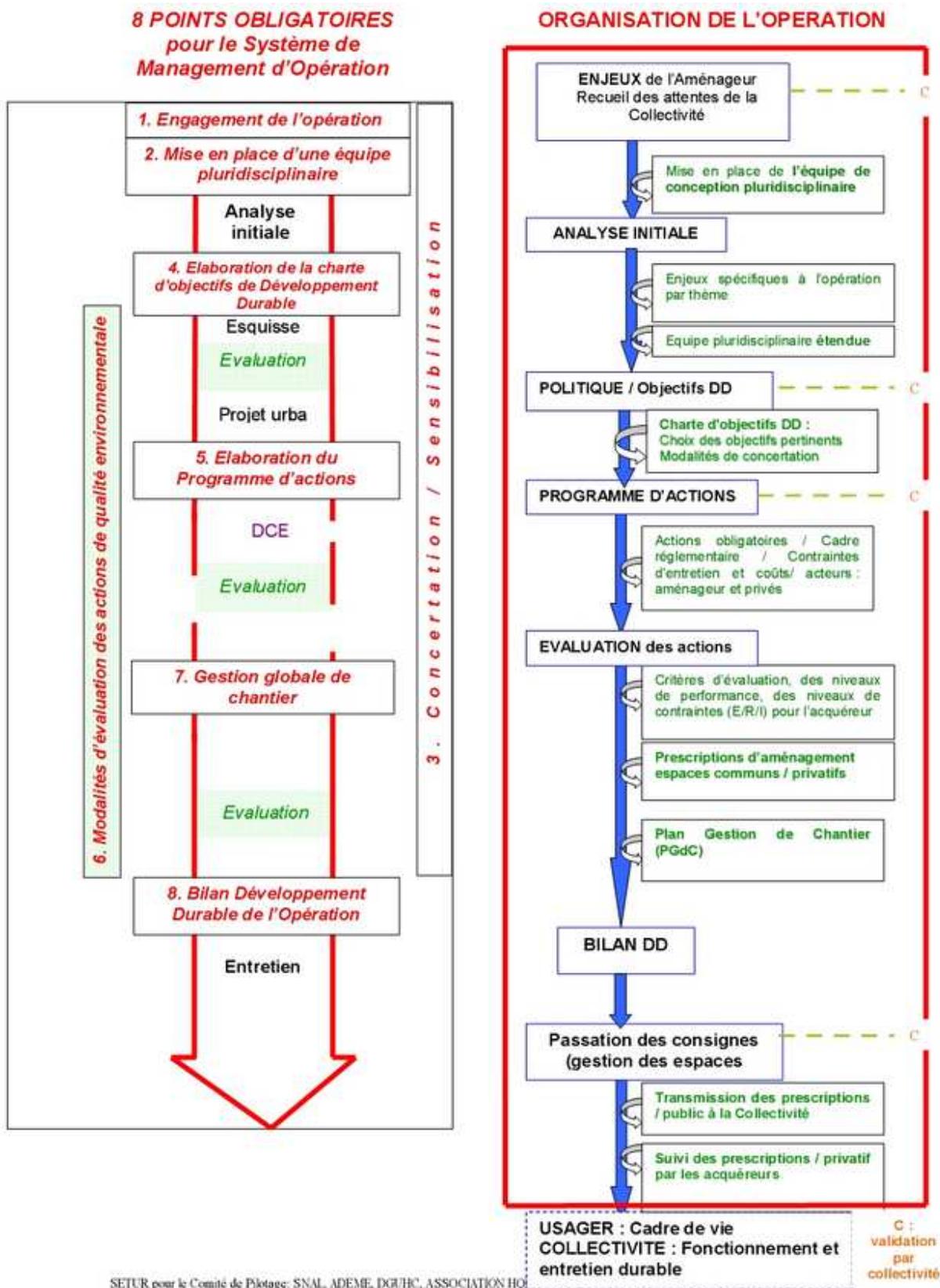


Figure 14 : SMO proposé par le SETUR (Carfantan et al. 2005)

Cette figure met en parallèle le SMO proposé avec l'organisation de l'opération. Les huit points obligatoires du SMO s'articulent autour des phases majeures de l'opération à l'échelle du quartier. Deux points obligatoires accompagnent l'opération pendant toute sa durée : l'évaluation des actions et la concertation / sensibilisation.

### III.1.e. Le projet HQE<sup>2</sup>R

Ce projet européen de recherche et de démonstration a été coordonné par le CSTB avec pour but "d'élaborer une démarche ainsi que des méthodes et des outils à destination des collectivités locales et de leurs partenaires afin de les aider dans leurs projets de renouvellement urbain" (Charlot-Valdieu et Outrequin 2003). Il a commencé en septembre 2001 et s'est terminé en janvier 2004. Les méthodes et outils ont été mis en place et testés sur 15 quartiers dans 14 villes de sept pays membres de l'Union Européenne (Allemagne, Danemark, Espagne, France, Italie, Pays Bas et Royaume Uni). L'évaluation repose sur cinq objectifs composés de 21 cibles et 61 indicateurs sont ainsi définis. Cette décomposition correspond au système d'indicateurs ISDIS (Charlot-Valdieu et Outrequin 2004). Trois modèles permettent l'évaluation du quartier : le modèle INDI évaluant les indicateurs du système ISDIS, le modèle ENVI qui concerne l'impact environnemental et le modèle ASCOT permettant de comparer le coût global d'un bâtiment avec un bâtiment de référence. Ces trois modèles sont complétés par des grilles d'analyse, pour prendre en compte l'impact croisé des projets et pour choisir entre démolition et réhabilitation.

Le modèle INDI (INDICators Impact) est une méthode visant à poser les questions essentielles concernant l'aménagement d'un quartier. La situation initiale du quartier est d'abord analysée et ensuite différents scénarios sont évalués sur la base des indicateurs ISDIS. Sur les 61 indicateurs, 14 sont qualitatifs et les autres indicateurs sont quantitatifs ou qualitatifs selon le choix de l'utilisateur. A l'issue de l'évaluation, le modèle conduit à l'établissement d'un "profil de développement durable" du quartier (Figure 15 ci-dessous).

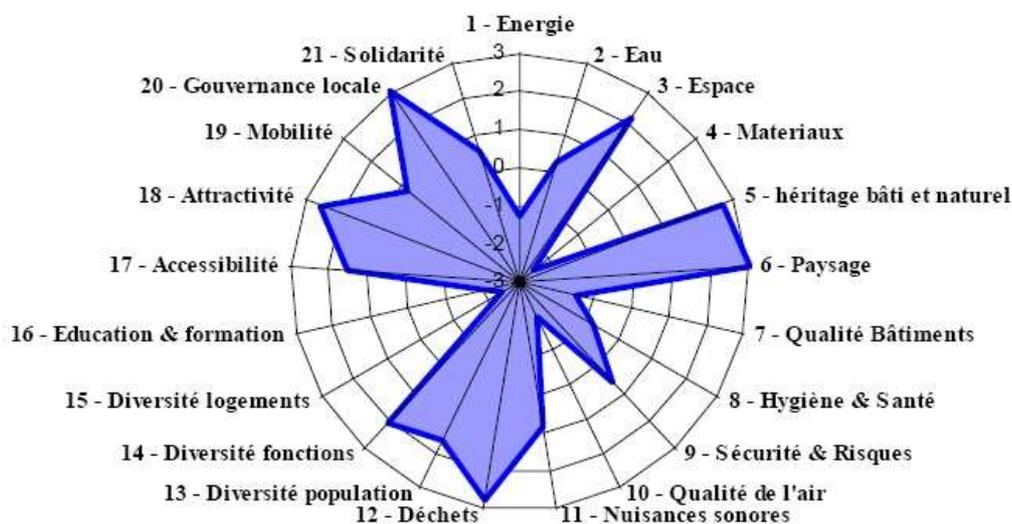


Figure 15 : Profil établi par le modèle INDI (Charlot-Valdieu et Outrequin 2004)

Cette figure présente un exemple de profil établi par le modèle INDI, le diagramme radar offre une vision globale des 21 thèmes d'évaluation. L'objectif est d'obtenir des valeurs les plus éloignées du centre.

Le modèle ENVI (ENVironment Impact) est un modèle d'impact environnemental développé dans le cadre du projet HQE<sup>2</sup>R : c'est un outil d'aide et d'évaluation pour les collectivités

locales qui leur permet de répondre à la directive 2001/42/CE sur l'impact des projets urbains. Il permet d'évaluer le quartier mais également les actions possibles sur ce quartier (démolition, construction, changement d'usage des bâtiments, mise en place de transports en commun...). L'évaluation est basée sur cinq variables qui sont l'énergie (consommation et production locale), l'eau (consommation et valorisation des eaux pluviales), CO<sub>2</sub> (émissions et absorption), déchets (générés et valorisés) et enfin espace (urbanisé et naturel). Le résultat final est un tableau de bord affichant la valeur de chaque variable.

Le modèle ASCOT (Assessment of Sustainable CONstruction and Technology cost) permet à l'utilisateur d'évaluer et d'optimiser les coûts ; cette étude est menée bâtiment par bâtiment. Il prend en compte l'ensemble des coûts d'investissement et d'exploitation du bâtiment sur sa durée de vie totale, les économies réalisées, la réduction des impacts environnementaux grâce aux économies d'énergie et les coûts environnementaux induits (actuellement, ce calcul est assez sommaire). Ainsi l'utilisateur peut comparer les alternatives possibles par bâtiment et choisir la plus pertinente. De nombreux documents relatifs au projet sont disponibles à l'adresse <http://hqe2r.cstb.fr/>. L'association européenne pour un développement urbain durable SUDEN (<http://www.suden.org/>) a été fondée suite à la fin du projet et elle dispose également de documents mis à jour.

*Ce projet est très proche du projet ADEQUA que nous menons, de par son échelle d'étude et de par son but qui est de mettre en place une évaluation précise et quantifiable pour aider à la décision. Il diverge néanmoins tant au niveau des indicateurs définis et de la méthode d'évaluation. La divergence provient principalement du domaine d'étude qui concerne uniquement la réhabilitation : il a conduit les acteurs du projet HQE<sup>2</sup>R à la définition d'indicateurs plus centrés sur les habitants que sur les masses bâties (diversité de la population, niveau d'éducation et qualification professionnelle, cohésion sociale...). Le projet ADEQUA s'intéresse à la fois à la réhabilitation et à la construction ; ainsi il se base sur des données disponibles dès les premières phases de construction d'un projet (disposition des bâtiments, enveloppes, aménagement urbain, types de logements, type d'énergie...).*

### III.1.f. L'AEU (Approche Environnementale sur l'Urbanisme)

L'AEU permet d'intégrer les préoccupations énergétiques et environnementales en amont des projets d'urbanisme et d'aménagement et concourt à l'amélioration de leur qualité environnementale. Cette démarche mise en place en 1996 par le département Bâtiment et Urbanisme de l'ADEME, vise à initier une réflexion à partir des phases très amont sur l'ensemble des aspects environnementaux. "Elle est proposée aux collectivités locales qui s'engagent dans des démarches de planification stratégique ou de projets urbains, comme aux praticiens sensibles aux questions environnementales ou chargés de missions d'assistance à maîtrise d'ouvrage" (ADEME 2004b). L'assistance à la conduite de projet passe par l'animation de groupes de travail réunissant des représentants associatifs ou des collectifs d'habitants, et de réunions publiques de concertation. Le rôle de l'animateur est primordial : il doit être un acteur indépendant de l'équipe de maîtrise d'ouvrage et a pour principale tâche d'encourager les échanges entre l'ensemble des parties prenantes et les expertises disponibles.

Actuellement, l'AEU traite les thèmes suivants : choix énergétiques, environnement climatique, gestion des déplacements, gestion de l'eau, gestion des déchets, environnement sonore, sites et sols pollués, diversité biologique. L'AEU conduit à la rédaction d'un Projet d'Aménagement et de Développement Durable (PADD) comprenant les orientations générales, les différentes parties du PLU ; ce document peut également contenir des orientations d'aménagement plus précises. Le PLU (Plan Local d'Urbanisme), anciennement POS, est l'outil principal de mise en œuvre, à l'échelle communale, des politiques urbaines qui donne

aux communes un cadre de cohérence opérationnelle pour les différentes actions et opérations, publiques ou privées.

L'ADEME a mené des premières actions de sensibilisation et de formation des élus et des praticiens en Aquitaine, Centre, Pays de la Loire, et Poitou Charentes ; elles devraient être étendues au niveau national, notamment en vue de constituer des réseaux de compétences. En 2005, l'ADEME complétera le dispositif avec le guide de l'AEU et ses cahiers thématiques.

### III.2. Présentation des logiciels et outils

#### III.2.a. Annexe 31 de l'Agence Internationale de l'Energie

L'annexe 31 est un projet de l'Agence Internationale de l'Energie qui s'est déroulé de 1996 à 1999. Le but de cette annexe fût de fournir des informations sur les moyens de minimiser les impacts environnementaux liés à la consommation d'énergie des bâtiments. Ces impacts concernent l'intérieur du bâtiment et l'environnement extérieur local et global. L'objectif final étant de promouvoir l'efficacité énergétique grâce à une utilisation plus importante d'outils adaptés par les professionnels : les outils permettent de stimuler la communication, de quantifier précisément l'efficacité énergétique et environnementale et dernièrement de fixer des objectifs à atteindre.

14 pays ont participé à cette annexe : Australie, Canada, Danemark, Finlande, France, Allemagne, Japon, Pays-Bas, Nouvelle Zélande, Norvège, Suède, Suisse, Grande Bretagne et Etats-Unis. Les différents experts participants étant principalement des architectes, des ingénieurs ou des chercheurs.

Cette annexe a permis d'établir un état de l'art à l'échelle internationale des différentes aides conduisant à l'évaluation des impacts environnementaux d'un bâtiment (Lützkendorf et Tanz 2001). L'ensemble de l'état de l'art est disponible à l'adresse <http://annex31.wiwi.uni-karlsruhe.de>. Cet état de l'art recense les outils par pays ou par catégorie avec pour un grand nombre d'entre eux une fiche décrivant l'outil, les utilisateurs, les résultats, les avantages et inconvénients... Un deuxième site <http://www.uni-weimar.de/scc/PRO/survey.html> vient compléter cet l'état de l'art.

*L'annexe 31 est un source d'information précieuse concernant les outils applicables sur les bâtiments. De nombreux outils décrits dans cette enquête sont utilisables bâtiment par bâtiment lors d'une réflexion à une échelle plus vaste.*

#### III.2.b. Le projet INVENTUR

Inventur est la contraction de « inventaire » et « urbain ». Ce programme, initié dans le cadre de l'action de recherche du CNRS Gestion de modèles et de connaissances - application à la ville a été mené conjointement, entre septembre 1998 et juillet 1999, par la Fédération de Recherche *Physique et images de la ville* et le Laboratoire PARIS. Il visait à réaliser un recensement et une typologie des modèles existant dans le champ urbain, tous domaines confondus. "Dans le cadre de l'inventaire, est considéré comme un modèle tout outil d'intelligibilité, développé à partir d'une formalisation mathématique, suivant des hypothèses strictement énoncées, et pour lequel un travail de validation a été entrepris, permettant in fine de produire des connaissances sur un ou plusieurs phénomènes observables dans un champ donné. De ce fait, l'inventaire s'attache à décrire des modèles présentant une certaine opérationnalité. Ce sont des outils logiciels, développés à partir d'un ou plusieurs modèles théoriques, et ayant vocation à être utilisés, comme tels ou de façon agrégée, par d'autres que leurs concepteurs. Sont écartés a priori les modèles qui ne relèveraient que de simples

descriptions ou d'expérimentations mathématiques n'ayant pas fait l'objet d'un travail de validation. Le champ urbain est considéré comme l'ensemble des phénomènes naturels et anthropiques observables au niveau de fragments urbains significatifs, d'entités urbaines globales ou de systèmes de villes dans un territoire. Sont écartées a priori les échelles extrêmes, trop proches des entités architecturales d'une part, ou des grandes échelles géographiques d'autre part. Ces limites sont cependant laissées à l'appréciation des experts décrivant les modèles."

Les modèles inventoriés s'appliquent indifféremment à tout phénomène du champ urbain, concernant les domaines suivants : géographie et dynamique spatiale, économie et gestion urbaine, sociologie, transports, réseaux techniques, physique urbaine, risques et enfin morphologies urbaines. Ce questionnaire a été rempli directement par un développeur ou un utilisateur du modèle, qu'il détaille de manière scientifique et technique.

Le programme Inventur a permis de recenser 64 modèles dont certains, comme Townscope par exemple, sont encore en cours de développement et d'utilisation. L'inventaire est disponible à l'adresse <http://www.cerma.archi.fr/inventur/inventur.html>.

*Cet inventaire bien qu'ancien maintenant nous propose de nombreux logiciels applicables sur un quartier comme par exemple Solene, Townscope ou Mithra.*

### III.2.c. Le guide et l'outil "Sustainability Checklist for Developments"

Ce guide propose un cadre d'analyse des développements urbains ; il cible les aménageurs, les autorités locales et les services techniques associés. Il a été développé par l'institut de recherche anglaise sur le bâtiment (Building Research Establishment, BRE) à la demande des ministères anglais du commerce et de l'industrie et des transports, d'autorités locales, de régions et d'industries. Le guide est composé d'une liste de contrôle permettant d'évaluer qualitativement un projet de développement et de nombreuses recommandations. La méthode est en partie basée sur les outils BREEAM et EcoHome qui délivrent un label aux bâtiments et habitations respectueux de l'environnement à travers 22 critères.

La liste de contrôle proposée décrit les étapes pratiques qu'il faut prendre en compte pour intégrer une démarche durable (dans le sens "soutenable") dans un projet. Cette méthode simple s'applique sur des quartiers existants ou à construire et elle reflète les informations et conseils des professionnels de la construction et de l'urbanisme. Les thèmes abordés sont l'occupation du terrain, les transports, l'énergie, les bâtiments, les infrastructures, l'impact sur la communauté élargie, les ressources naturelles, l'écologie, les problèmes locaux et l'économie locale. La liste de contrôle peut être utilisée de trois manières différentes : elle servira soit de liste des points de vigilance, soit de liste de valeurs de références (énergétique, économiques...) ou bien encore comme système de notation d'un projet.

La liste de contrôle se présente sous la forme d'un livre (Brownhill et Rao 2002) ; mais un outil logiciel a ensuite été développé à partir de ce guide à la demande de l'Agence de Développement du Sud Est de l'Angleterre (SEEDA). L'outil est disponible gratuitement à l'adresse <http://www.sustainability-checklist.co.uk/>. Il comprend une interface de saisie de réponses à de nombreuses questions, ainsi qu'une visualisation du profil du projet, Figure 16.

La proportion d'environnemental, de social et d'économique varie d'une question à l'autre. Par exemple dans le thème "intensité de l'utilisation du terrain", la question sur le nombre d'habitations ayant un accès facile vers les espaces verts publics concerne des bénéfices environnementaux et sociaux uniquement, aucun bénéfice économique n'est associé à cette question. L'importance de chaque aspect est indiquée avec chaque question.



Figure 16 : Profil d'un projet donné par l'outil Sustainability Checklist

Des recommandations sont disponibles sur chaque thème. Pour répondre à la majorité des questions posées, il faut choisir entre "meilleure pratique", "bonne pratique" et "moins que les bonnes pratiques". Les scores de chaque question sont additionnés en performances environnementales, sociales et économiques pour obtenir un profil pour le projet. Ensuite, par l'agrégation de l'ensemble des résultats de ces questions, on obtient le tableau de bord présenté ci-dessus. Pour chaque thème, il est possible de visualiser la notation environnementale, sociale et économique du projet obtenue par l'agrégation des résultats de la liste de contrôle.

*Cet outil récent apporte beaucoup d'information sur les points à évaluer car les aspects abordés sont en parfaites concordances avec nos attentes. Cependant, l'évaluation selon les trois catégories classiques du développement durable semble inadaptée aux attentes des aménageurs. En effet, il devient difficile à partir du profil de comprendre les faiblesses d'un projet, de plus, l'évaluation du projet est limitée de par son côté qualitatif.*

### III.2.d. Le logiciel INDEX

Ce logiciel (CRITERION 2005), basé sur un système d'information géographique (ArcInfo), permet à travers l'évaluation d'indicateurs de mesurer les performances d'une ville ou d'une communauté de villes, Figure 17. La première version date de 1994 ; depuis il est mis à jour régulièrement et utilisé largement aux Etats-Unis. Son principal but est d'optimiser la planification urbaine en fonction de problèmes identifiés, d'analyse d'alternatives et d'objectifs définis. Il permet également une évaluation dans le temps des indicateurs, fournissant ainsi des indications sur les progrès effectués vis-à-vis d'objectifs annoncés. Ce logiciel est un outil assez complet puisqu'il va depuis la création de plans et leur implantation, l'évaluation et le suivi de l'urbanisation, jusqu'à un rendu précis et réaliste de la solution choisie grâce à l'incorporation d'images satellites, de photos aériennes et de tout support visuel.

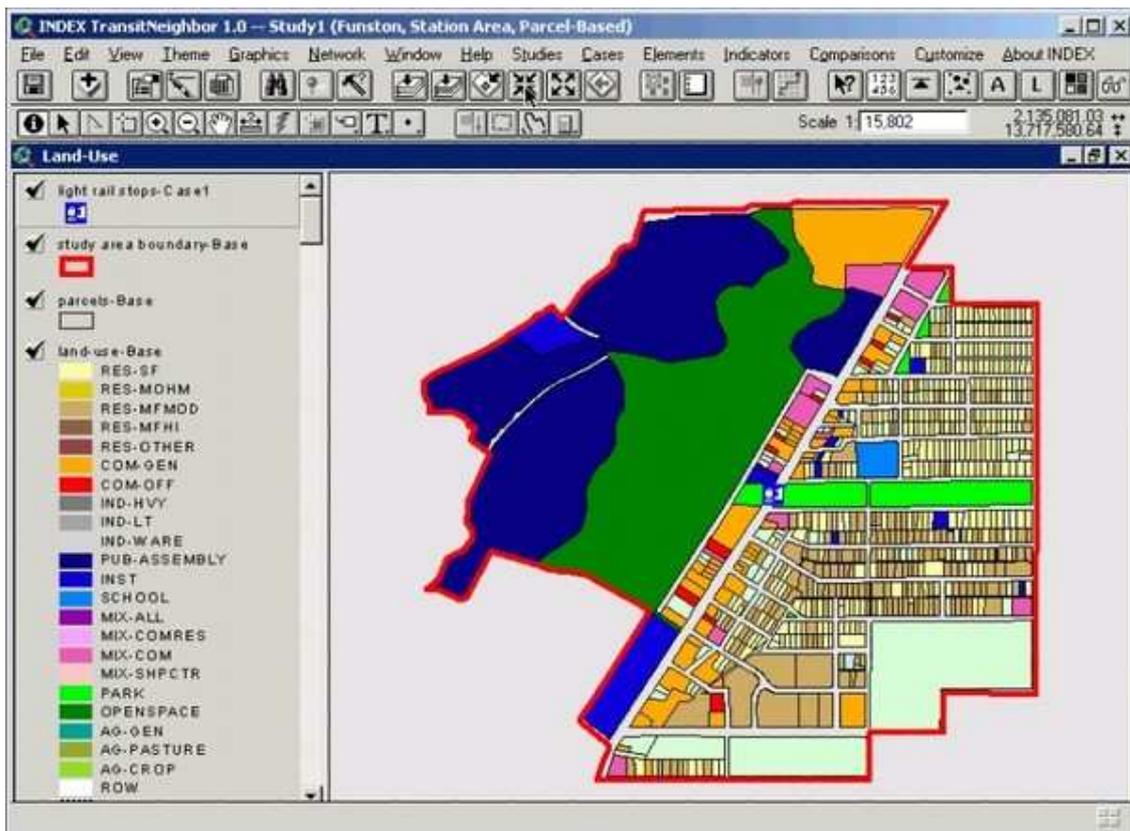


Figure 17 : Capture d'écran du logiciel INDEX

*A cause de l'exhaustivité des fonctions et des aspects, cet outil est devenu une "usine à gaz" assez lourde à utiliser et fortement consommatrice en temps et en ressources humaines. Ce logiciel est distribué par <http://www.crit.com> et il coûte environ 4 000 \$.*

### III.2.e. PLACE<sup>3</sup>S

Le sigle PLACE<sup>3</sup>S signifie : "**PL**anning for **C**ommunity **E**nergy, **E**conomic and **E**nvironmental **S**ustainability", soit "**PL**anification pour une **C**ommunauté **E**nergétiquement, **E**conomiquement et **E**nvironnementalement **D**urable". C'est un outil de planification urbaine créée spécialement pour que les autorités locales puissent comprendre l'influence de la croissance urbaine et des décisions de développement local sur leur communauté (du quartier à la région). Ce projet a été initié et soutenu par les agences de l'énergie de la Californie (The California Energy Commission 2001), de l'Oregon et de Washington.

La méthode développée utilise l'énergie comme unité de référence, exprimée en *British Thermal Unit* (1 kWh = 3412 Btu), pour évaluer l'efficacité de l'utilisation du terrain, de la conception des quartiers, de la gestion du système de transport, de l'utilisation des bâtiments et infrastructures publiques, de la gestion énergétique locale et de la consommation des autres ressources (Hanson et al. 1997). PLACE<sup>3</sup>S s'appuie sur le système d'information géographique ARCVIEW développé par ESRI, dans lequel un outil de quantification est incorporé ; il fournit ainsi des cartes et des données ciblées à destination du public et des décideurs, montrant les effets de leur choix. Cette méthode est donc adaptée aux réunions entre les différents acteurs et elle encourage la participation du public. Le principe de la méthode est de comparer un jeu de plan (solutions) que les décideurs mettent en place pour trouver le plan préféré par l'ensemble des acteurs, c'est en général un plan efficace au niveau de la réduction de la demande énergétique et de l'utilisation d'énergies renouvelables, mais ce n'est pas forcément le plus efficace car d'autres critères liés à la qualité d'usage entrent

également en ligne de compte. Le travail peut être mené aussi bien à l'échelle du quartier que de la région : cela requiert en entrée des données sur le climat, les habitations, l'emploi, les transports, les infrastructures, les ressources énergétiques renouvelables et non renouvelables disponibles comme le montre la Figure 18.

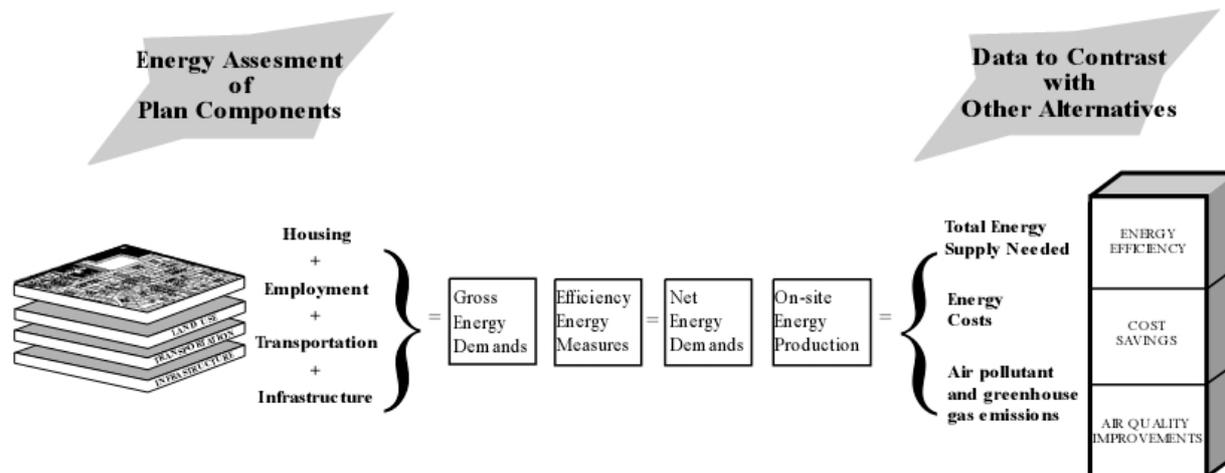


Figure 18 : Mesure des conséquences énergétiques d'une alternative (Hanson et al. 1997)

Ensuite, ces informations sont converties en consommation (et production) énergétiques, en coûts et en émissions de CO<sub>2</sub> à partir d'une base de données de valeurs moyennes. Les équivalences entre les énergies sont calculées en fonction du pouvoir calorifique, du coût local de l'énergie et des émissions de CO et CO<sub>2</sub> induites. Le calcul énergétique prend en compte le système de transport, l'utilisation de chaque bâtiment (résidentiel, commercial ou industriel) et la consommation des infrastructures (éclairage des rues, réseau hydraulique) ; les consommations sont ensuite affinées en fonction des stratégies d'optimisation énergétiques.

Ce projet et la méthode mise en place ont permis une approche concrète applicable de manière assez simple par les autorités locales. Elle est proche des objectifs du projet ADEQUA tant au niveau de la méthode que des résultats (comparaison d'alternatives). Cependant, elle se consacre principalement à l'aspect énergétique et relègue à un second plan les autres préoccupations environnementales et les aspects de qualité d'usage du quartier. De plus amples informations sur cette méthode sont disponibles à l'adresse <http://www.energy.ca.gov/places>.

*L'outil PLACE<sup>3</sup>S présente un bon modèle de la démarche à appliquer pour évaluer un quartier : l'utilisation de ratios pour estimer les consommations énergétiques, les coûts et les émissions de CO<sub>2</sub> offre un gain de temps appréciable et il évite le problème du nombre de données restreintes. La transposition directe de cette méthode en France n'est cependant pas réalisable directement car les ratios de référence utilisés ne sont pas les mêmes et ils doivent donc être déterminés. De plus, l'objectif que nous nous sommes fixé implique d'évaluer d'avantage que la consommation, le coût et les émissions de CO<sub>2</sub>.*

### III.3. Projets et programmes de recherche

#### III.3.a. Le programme de recherche européen ENERGIE

Ce programme financé par le 5<sup>ème</sup> Programme Cadre de la Recherche et du Développement (PCRD) de 1999 à 2002 avait pour but de mettre en exergue le développement et l'application de technologies innovantes tournées vers les énergies propres, plus efficaces et bénéfiques pour la société. Ce programme a permis d'établir un bilan des impacts urbains (Brophy et al. 2000) : empreinte écologique, effet d'îlot de chaleur, déchets, qualité de l'eau, émissions et qualité de l'air. Il a également proposé des recommandations et des outils en rapport avec les stratégies de développement urbain. Ce travail est un des initiateurs de la recherche menée à l'échelle du quartier. *Son intérêt découle principalement de la diversité des thèmes abordés, et également du nombre important de quartiers exemplaires étudiés.*

#### III.3.b. Le projet URGE

URGE (**UR**ban **GR**een **E**nvironment) est un projet européen de développement des espaces verts urbains pour l'amélioration de la qualité de vie dans les villes et les régions urbaines, commencé en mars 2001 et qui vient de se terminer en février 2004. Il a été coordonné par le Centre Allemand de Recherche Environnemental Leipzig-Halle, et a regroupé à la fois des institutions scientifiques et des autorités ou bureaux d'études en charge de la planification urbaine, en Allemagne, Finlande, Angleterre, Hongrie, Italie et aux Pays-Bas. A travers la promotion des espaces verts et leur étude, l'objectif majeur est d'accroître la connaissance disponible sur les interactions entre la nature et les systèmes socio-économiques des environnements urbains. Le travail mené dans ce projet de recherche concerne les espaces verts de manière exhaustive et approfondie : à titre d'exemple, la méthode d'évaluation mise en place étudie l'offre d'emploi générée par ces espaces, les pollutions initiales et futures, les bénéfices physiques et émotionnels. La Figure 19 résume les principales fonctions des espaces verts urbains.

<p><b>Les espaces verts urbains...</b>            ... jouent un rôle pour la détente, l'amélioration de la qualité de vie et de travail            ... aident à promouvoir un style de vie sain            ... encouragent l'appartenance sociale à la communauté            ... soutiennent l'éducation environnementale            ...</p>	<p><b>Fonctions sociales</b></p>	<p><b>Fonctions écologiques et bénéfiques pour l'environnement</b></p>	<p><b>Les espaces verts urbains...</b>            ... encouragent la protection des ressources naturelles            ... fournissent un habitat pour l'écosystème et influent positivement sur la diversité des espèces            ... adoucissent les contraintes environnementales liées au climat urbain            ...</p>
<p><b>Les espaces verts urbains...</b>            ... sont un facteur positif pour l'emplacement de nouvelles entreprises            ... vivifient l'économie locale en attirant des investisseurs et des touristes            ... offrent des opportunités directes d'emploi            ...</p>	<p><b>Bénéfices économiques</b></p>	<p><b>Conception et planification</b></p>	<p><b>Les espaces verts urbains...</b>            ... définissent la structure du tissu urbain            ... donnent un caractère local et un paysage distinct            ... contribuent à l'identité esthétique, historique et culturelle de la ville            ...</p>

Figure 19 : Bénéfices et fonctions des espaces verts (Costa et al. 2004)

Le projet URGE a abouti à la définition de quatre fonctions ou bénéfices des espaces verts et à leur évaluation : les fonctions sociales, les fonctions écologiques, les bénéfices économiques et les fonctions en rapport avec la conception et la planification urbaine.

Deux méthodes d'évaluation (URGE 2004) adaptées respectivement à l'échelle de la ville et du site, basées sur une liste de contrôle, sont téléchargeables sur le site du projet <http://www.urge-project.ufz.de>. La première méthode nommée Polyfunctional Assessment Method (PFAM) se rapproche d'une somme pondérée d'indicateurs, elle est utilisable à l'aide d'un tableur comme Excel. La deuxième méthode nommée FLAG Method (Vreeker et al. 2001) permet d'évaluer si une solution est acceptable ou non en fonction d'une liste de contraintes, l'évaluation peut se faire à l'aide du logiciel SAMISoft.

*Bien que ce projet soit uniquement focalisé sur les espaces verts, le travail mené et les méthodes d'évaluation proposées nous fournissent de nombreuses informations sur le processus d'évaluation d'un site. De plus, ce travail est le plus pertinent pour permettre une prise en compte adaptée des espaces verts lors de l'évaluation d'un projet de quartier.*

### III.3.c. Le projet de Compiègne

La Communauté de Communes de la Région de Compiègne, dans le cadre de son schéma directeur envisageait de construire un pont dans le centre de Compiègne, avec différents scénarios possibles pour le trafic routier. Maïzia (Maïzia 2004) a mis en place un outil d'aide à la décision permettant de mesurer les différents impacts sur l'environnement urbain de ce projet à travers l'analyse des nuisances sonores, des pollutions atmosphériques, des perturbations des accès aux bâtiments aux alentours du site, de l'impact visuel et de l'impact sur le développement des rives. Les alternatives sont étudiées selon chaque aspect de manière indépendante grâce à des indicateurs quantitatifs et qualitatifs ainsi qu'avec des images de synthèse. L'outil n'utilise pas ensuite de méthode d'agrégation ou de représentation globale de l'ensemble des aspects ; il se borne à présenter les conséquences selon chaque aspect et c'est ensuite à la Communauté de Communes de prendre la décision. Cet outil a été incorporé dans un support numérique de type navigation html.

### III.3.d. ECOLUP

Le projet ECOLUP (**ECO**logical **Land Use Planning**) est né de la collaboration des villes allemandes de Constance, Ueberlingen et Dornbirn avec la "Lake Constance Foundation". Ce projet d'une durée de trois ans a été subventionné par le programme européen LIFE. Il a eu pour but de faciliter l'application du système de management européen EMAS II à la planification urbaine à l'échelle d'une collectivité. Il existe deux systèmes de management environnemental : le système international ISO 14001 et le système européen EMAS ("Eco-Management and Audit Scheme"). Le système récent EMAS II inclut toutes les exigences du système ISO 14001 et il le dépasse dans la mesure où les exigences sont plus fortes et qu'elles ne conduisent pas uniquement à une certification du management mis en place mais à la validation des déclarations environnementales.

ECOLUP a édité un guide (Hammerl et Everts 2004) permettant de mettre en place au mieux un système de management EMAS II. La méthode proposée vise principalement à promouvoir l'échange d'informations entre les communautés et à améliorer le champ des préoccupations environnementales lors de la planification urbaine. Elle est revisitée régulièrement sur la base des retours d'expérience. Cette démarche s'applique au niveau politique de la communauté et elle s'intéresse à de nombreux aspects du développement urbain : expansion urbaine, espaces verts, transports, énergie, eau, faune et flore, qualité de l'air, bruit). Le guide est téléchargeable à l'adresse <http://www.ecolup.info>.

Le guide issu du projet fournit de nombreuses recommandations face aux différents problèmes rencontrés lors de l'aménagement d'un quartier, ainsi que des indicateurs. Le Tableau 7 ci-dessous propose des solutions contre l'expansion urbaine excessive et le Tableau 8 présente des exemples d'indicateurs associés. Ce projet propose en plus de nombreux indicateurs dans les domaines suivants : occupation du sol, gestion des espaces verts, transport et mobilité, écosystème, énergie et climat et participation du public.

**Tableau 7 : Mesures contre l'expansion urbaine excessive (Hammerl et Everts 2004)**

Directes	Indirectes	Liées
Etablir la surface de terrain disponible pour la construction Développement urbain conservant la surface Maintient des limites des habitations Optimisation des relations entre le terrain utilisé par les transports et celui utilisé par les habitations – optimisation des capacités de construction du site Consolidation rétrospective : utilisation des parcelles non occupées, étages additionnels, mixité des usages, gestion des nouveaux besoins de logements en conservant la surface, renforcement des espaces habitables et de travail, augmentation de la densité, minimisation du réseau de transport	Réduire la dispersion des habitations Eviter les espaces en jachère dans la ville Utilisation conservatrice de la surface et choix du type de construction Usage intensifié des emplacements attractifs Compensation quantitative et qualitative des pertes de terrain à construire Mobilisation du potentiel dans les sites construits	Gestion de la politique de développement de la ville Restructuration des quartiers de la ville Gestion intégrée des transports et de l'habitat Concentration de l'approvisionnement, des installations administratives et des services Choix de l'emplacement et du type d'utilisation en fonction de critères environnementaux Coordination de l'usage temporaire de bâtiments (usage intermittent)

**Tableau 8 : Extrait d'indicateurs sur l'expansion urbaine (Hammerl et Everts 2004)**

Indicateurs	Calcul	Unité	Données nécessaires
Proportion d'espace habitable disponible	Rapport de la surface habitable et de transport à la surface de la municipalité	%	Surface habitable, surface de transport, surface de la municipalité
Surface utilisée	Rapport de la surface habitée et de transport à la surface totale de terrain	%	Surface habitable, surface de transport, surface totale de terrain
Utilisation du terrain par parcelle	Rapports de l'emprise des bâtiments à la surface de parcelle et de la surface totale habitable de l'ensemble des étages à la parcelle	%	Emprise au sol des bâtiments, surface de la parcelle, surface habitable totale
Densité de population	Rapport du nombre d'habitants à la surface de la municipalité	hab/m <sup>2</sup>	Nombre d'habitants, surface de la municipalité

Pour chaque domaine, le guide propose des recommandations ainsi que des indicateurs permettant d'évaluer des projets à l'échelle d'une collectivité. Les tableaux ci-dessus donnent un aperçu du mode de présentation des recommandations et des indicateurs.

### III.3.e. Le projet de recherche ZED et le logiciel ZEIS

ZED signifie "Zero Emission Development" ; ce projet financé par la commission européenne s'est déroulé de 1995 à 1997. Son but était de définir différentes typologies de motifs urbains fonction de perspectives de planification, du microclimat et d'études énergétiques. Cette connaissance nécessitant la mise en place de nouvelles techniques d'analyse a permis d'informer sur les manières de concevoir un quartier conduisant à réduire les émissions de CO<sub>2</sub>. Il a été coordonné par le "Martin Centre for Architectural and Urban Studies" de l'Université de Cambridge, en collaboration avec "Future Systems" (bureau d'architecture anglais), le GRECO de l'Ecole d'Architecture de Toulouse, le bureau d'étude environnemental allemand RP+K Sozietät et TÜV Rheinland en Allemagne. Le travail a concerné trois cas

d'études (Londres, Toulouse et Berlin) et s'est principalement intéressé à la définition de paramètres sur le microclimat.

Ce projet de recherche a conduit au développement d'un prototype d'outil informatique d'aide à la planification et la conception urbaine. Le prototype nommé ZEIS (Zero Emission Information System) est basé sur une centaine d'indicateurs répartis dans six catégories principales : énergie, émissions, bâtiments, transports, services et environnement. Il a ensuite été amélioré par le GRECO de l'Ecole d'Architecture de Toulouse pour devenir un logiciel opérationnel englobant un plus grand nombre d'aspects. Il fournit à l'utilisateur un profil environnemental basé sur l'agrégation des indicateurs et sur le logiciel de Mapinfo.

*Ce projet a été novateur de par ses objectifs et ses résultats ; à l'échelle du quartier, il a permis de proposer des méthodes d'analyse, de définir des objectifs et indicateurs adaptés, et d'établir des relations entre le microclimat et les formes urbaines.*

### III.3.f. Le programme RUE 2000

En mars 2000, le Plan Urbanisme Construction Architecture (PUCA) a lancé la consultation de recherches et de recherche-actions "Renouvellement urbain et environnement 2000". L'objectif de ce programme est de contribuer à l'élaboration de méthodes de management environnemental pour le renouvellement urbain, c'est à dire la transformation des tissus existants dans la perspective du développement durable, de la réhabilitation des bâtiments au réaménagement des quartiers. A l'issue de cette consultation, parmi les projets retenus, sept recherche-actions ont fait l'objet d'un suivi – évaluation sous la coordination scientifique du service sciences humaines du CSTB et l'appui des CETE de l'Ouest, de Lyon, du Nord Picardie et du CRESGE.

En mettant l'accent sur les jeux d'acteurs ce suivi a permis de privilégier trois champs d'investigation :

- L'articulation entre le jeu des opérateurs urbains et le jeu des opérateurs de la construction sous l'angle des préoccupations environnementales
- La qualité de la coopération entre acteurs opérationnels (maîtrises d'ouvrages urbaine et de construction, maîtrise d'œuvre et entreprises) d'une part et les chercheurs ou conseils, environnementalistes et sociologues, d'autre part
- Les qualités d'écoute et de prise en compte des aspirations des usagers (expression libre ou dirigée, participation aux choix effectués, etc.)

Ces expérimentations, associant recherche et action opérationnelle, ont été présentées et discutées lors de séminaires thématiques, ces travaux ont ensuite fait l'objet d'une synthèse finale (Souami et al. 2005) et d'un débat lors du colloque final organisé le 23 et 24 juin 2005. Un site web est associé à ce programme : [www.rue2000.net](http://www.rue2000.net).

### III.4. Projets en cours

#### III.4.a. Développement durable dans la construction

Une norme sur le développement durable dans la construction est en cours d'élaboration dans le domaine de la construction et du génie civil. Le comité technique TC 59 "Construction immobilière" de normalisation qui est chargé de son élaboration rassemble 17 participants représentant les associations de normalisations des pays suivants : France (AFNOR), Allemagne (DIN), Belgique (IBN), Canada (SCC), République de Corée (KATS), Danemark (DS), Espagne (AENOR), Finlande (SFS), Italie (UNI), Japon (JISC), Norvège (SN), Pays-Bas (NEN), Pologne (PKN), Royaume-Uni (BSI), Suisse (SNV), Suède (SIS), USA (ANSI).

Actuellement, aucune norme n'a été publiée. Ce comité se décompose en quatre groupes de travail : "Principes généraux et terminologie", "Indicateurs de durabilité", "Affirmation environnementale des produits" et "Performance environnementale des bâtiments". Des informations concernant l'avancement du projet de norme sont disponibles à l'adresse : <http://www.iso.org/iso/fr/stdsdevelopment/tc/tclist/TechnicalCommitteeDetailPage.TechnicalCommitteeDetail?COMMID=5595>

#### III.4.b. SHE

Le projet de démonstration SHE (**S**ustainable **H**ousing in **E**urope) est financé par la Commission Européenne à travers le 5<sup>ème</sup> PCRD, action clef n°4 "Cité de demain et héritage culturel" de mars 2003 à février 2008. Il poursuit les objectifs suivants :

- Evaluer et démontrer la faisabilité du logement durable, à travers la construction de 600 nouveaux logements, co-financés par la Commission européenne, dans quatre états membres (Danemark, France, Italie et Portugal).
- Intégrer le développement durable et la participation des futurs habitants dans toutes les phases décisionnelles du processus de construction.
- Développer des bonnes pratiques, reproductibles dans les pays européens, et formuler de nouvelles procédures qualitatives d'évaluation.
- Fournir aux acteurs du secteur une meilleure compréhension des coûts à long terme, des bénéfices directs et indirects des constructions durables.
- Evaluer la satisfaction des habitants à travers un monitoring social.

L'avancement du projet est visible sur le site [http://www.she.coop/france/index\\_fr.asp](http://www.she.coop/france/index_fr.asp).

#### III.4.c. CONCERTO

Dans le cadre du 6ème programme cadre, la communauté européenne soutient le projet CONCERTO qui concerne les communautés "durables". L'appel à proposition a été lancé de juin à décembre 2003 (European Commission 2003a). Ce projet vise à démontrer l'efficacité d'une approche centrée sur la politique énergétique locale au niveau de la réduction de la consommation énergétique et de l'augmentation de l'utilisation d'énergies renouvelables. La démonstration doit conduire à encourager les différentes communautés d'Europe à adopter ce type d'approche. Les opérations exemplaires de construction ou de réhabilitation démontreront les bénéfices sociaux, économiques et environnementaux de la gestion de la production énergétique (favorisant les énergies renouvelables) et de la demande à l'échelle communautaire. D'une durée de cinq ans, ce projet permettra de financer 25 à 30 projets de

quartier dans différents pays européens et de diffuser largement les résultats à travers l'Europe. "L'initiative CONCERTO est principalement axée sur l'intégration de l'auto approvisionnement et les techniques de gestion de la demande dans les grands ensembles" (Dufrasnes et Achard 2004).

#### III.4.d. SUNtool

Le projet SUNtool (Sustainable Urban Neighbourhood modelling tool) est financé par la commission européenne pour trois ans jusqu'au début de l'année 2006. Son but est de développer un logiciel de modélisation accompagnant l'utilisateur lors de l'optimisation de la planification d'un quartier. A partir d'une esquisse de la forme du quartier et de nombreuses descriptions (utilisation des bâtiments, âge...), le logiciel calculera les flux d'énergie, de déchets et d'eau. Les modèles développés pour ce logiciel concernent principalement les aspects suivants : rayonnement, éclairage, microclimat et comportement humain (Robinson et al. 2002). A partir du calcul des différents flux, l'utilisateur peut obtenir une évaluation de la performance pour différentes échelles spatiales allant du site à une zone d'un bâtiment et pour différentes durées. Il est prévu de mettre en place un outil d'analyse paramétrique permettant d'aider l'utilisateur à optimiser la conception. Les avancées du projet sont visibles à partir du site <http://www.suntool.net/>.

#### III.4.e. PETUS

L'acronyme PETUS signifie **P**actical **E**valuation **T**ools for **U**rban **S**ustainability, c'est un projet européen du 5<sup>ème</sup> PCRD qui a débuté en décembre 2002 et qui devrait se finir en novembre 2005. Les partenaires de ce projet ayant constaté un manque d'outils d'évaluation du succès d'un projet et de ses possibilités de transfert à une autre application, le but de cette étude est de proposer une méthode d'évaluation des projets d'infrastructure urbaine selon un ensemble de critères et ensuite de caractériser la "transferabilité" des projets dans d'autres lieux en Europe ou dans le monde. Le projet PETUS est piloté par l'Ecole d'Architecture de l'Université de Wales (Grande Bretagne) avec comme partenaires l'Université de Liège (Belgique), le JR-NTS (Autriche), l'Université Technique du Danemark, l'INSA de Lyon, l'Etukeno Oy (Finlande), le Wansdronk Architectuur (Pays-Bas) et l'Université d'Architecture de Sofia (Bulgarie).

La méthode d'évaluation du projet PETUS est basée sur différents outils en lien avec tous les aspects de l'infrastructure urbaine : facteurs sociaux, économiques et environnementaux. Ces aspects inclus entre autres l'eau et ses réseaux, les déchets, les transports, l'énergie et la protection de la nature. Les avancés du projets ainsi que les différentes publications sont disponibles à l'adresse <http://www.petus.eu.com>.

#### III.4.f. E\_co-housing

E\_co-housing est un projet européen soutenu par la Direction Générale de l'Energie et des Transports ; il a débuté en janvier 2003 pour une durée de trois ans. Piloté par le CEP de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, en collaboration avec l'Université de Karlsruhe (Allemagne), le SINTEF (Norvège), GTM-Construction et DHV (Pays-Bas), son but est de développer et de tester des aides à la décision pour le développement durable des quartiers en impliquant les futurs habitants depuis la phase initiale d'un projet jusqu'à la fin de sa réalisation. Cette étude s'inspire du concept de co-habitat ou "co-housing". Le co-habitat est une forme de logement qui confère aux résidents un sens exacerbé du voisinage et de la communauté. "Il s'agit d'un habitat (immeuble ou lotissement) incluant des logements privés et des équipements collectifs (par exemple parkings, rue piétonne, maison ou appartement

commun, jardin...). Cet ensemble est conçu et géré selon un processus de décision participatif impliquant les résidents. Des opérations plus classiques sont également concernées : un promoteur peut par exemple donner aux acquéreurs le choix de certaines options." (Peuportier 2004).

Différents outils seront mis en place au cours de ce projet : des outils de conception concernant l'énergétique et l'analyse de cycle de vie, d'aide à la décision basé sur des objectifs et indicateurs associés et des recommandations. Ces outils seront en parallèle testés sur deux applications (Stoa 2004) : le projet Garibaldi de la ville de Montreuil en région parisienne, le quartier de Svartlamon à Trondheim (Norvège). Le quartier choisi à Montreuil comporte 42 logements sociaux pour une surface de 3400 m<sup>2</sup>. Le quartier de Svartlamon compte actuellement 100 logements et de 100 à 120 nouveaux logements sont prévus. Une troisième application plus spécifique est programmée à Dunaujvaros en Hongrie dans le cadre du projet SOLANOVA sur l'installation de systèmes solaires lors de rénovations.

Des informations actualisés sont disponibles sur le site : <http://www.eco-housing.org/>.

Ce projet est très proche de nos objectifs de par l'échelle d'étude et les attentes. Il diffère tout de même par le fait que les réalisations concernées par E\_co-housing incluent nécessairement la participation des futurs résidents pendant l'ensemble de la durée de réalisation ; les objectifs environnementaux et sociaux sont ainsi plus facilement pris en compte lors des décisions.

### III.5. Etat des lieux des projets

A la lecture des projets présentés, nous pouvons énoncer les conclusions suivantes :

- Les projets et démarches précédemment cités nous apportent tout d'abord des outils à appliquer sur le quartier entier ou sur des éléments du quartier ; cependant il n'est pas toujours aisé d'avoir accès à certains outils car ils ne sont plus développés actuellement ou bien à cause d'un protectionnisme excessif.
- Ces projets et démarches proposent également des méthodes variées pour l'analyse des données ou des indicateurs, comme par exemple l'utilisation de ratios énergétiques en fonction de typologie d'éléments de quartier proposé par la méthode PLACE3S ou bien les méthodes d'analyse multicritères mises en place dans les EIE ou dans le projet URGE.
- Ils nous renseignent également sur les rôles, les attentes ou les collaborations entre acteurs, grâce par exemple au projet RUE 2000 et sa table ronde ou au projet mené à Compiègne, ou encore au projet mené par le SETUR et le SNAL.
- De nombreux projets, à partir de recommandations ou de critères d'évaluation mis en place, ont permis de définir les aspects à prendre en compte. D'autres projets basés sur l'étude des systèmes d'indicateurs ont également été pris en compte : ces projets ainsi que les aspects choisis sont présentés dans le chapitre suivant.
- Enfin, l'aspect réglementaire est abordé dans la méthode AEU, le projet HQE<sup>2</sup>R, la méthode ECOLUP, etc.

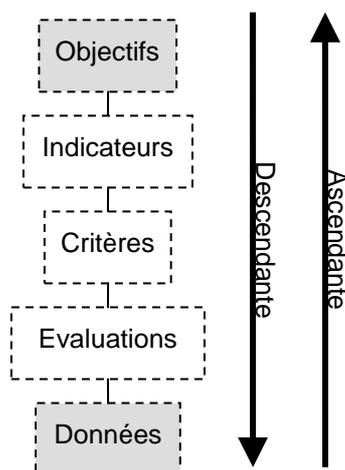
D'autres projets plus éloignés de nos problématiques ont été étudiés : le lecteur intéressé pourra se reporter à l'annexe 2 page 177 pour de plus amples informations.

A partir d'une analyse fine des projets, nous avons pu définir un cadre de travail pour la mise en place de cette méthode qui est présentée maintenant.

## IV. Principes généraux de la méthode

### IV.1. Aide à la décision et approche choisie

L'objectif principal de la méthode est de servir d'aide à la décision et non pas de décider à la place du décideur. Cela signifie que la méthode doit permettre au décideur de visualiser les conséquences positives et négatives de chaque alternative d'un projet de construction ou de réhabilitation d'un quartier. L'information doit donc être concise pour permettre une vue d'ensemble mais elle ne doit pas se résumer à une note globale unique. "L'aide à la décision est utile dans les circonstances qui nécessitent la considération de différentes lignes de conduite, qui ne peuvent être évaluées par la mesure d'une simple et unique action" (Al-Harbi 2001). Pour répondre à ces contraintes, la méthode que nous proposons utilise des objectifs représentant les aspects principaux du projet ; chaque objectif d'un projet d'aménagement de quartier est évalué par l'intermédiaire d'un ensemble d'indicateurs. Ainsi l'utilisateur obtient un "tableau de bord" lui donnant une vision exhaustive des conséquences. Dans ce type d'approche appelée approche descendante et présentée Figure 20, nous privilégions les objectifs.



**Figure 20 : Approches ascendantes et descendantes lors de l'étude d'un projet de construction**

Par opposition, l'approche ascendante présente l'avantage majeur de prendre en compte dès le départ les données disponibles, mais elle ne permet pas forcément d'obtenir un système d'objectif exhaustif et équilibré car elle est basée uniquement sur les données disponibles et non pas sur une vision exhaustive des attentes.

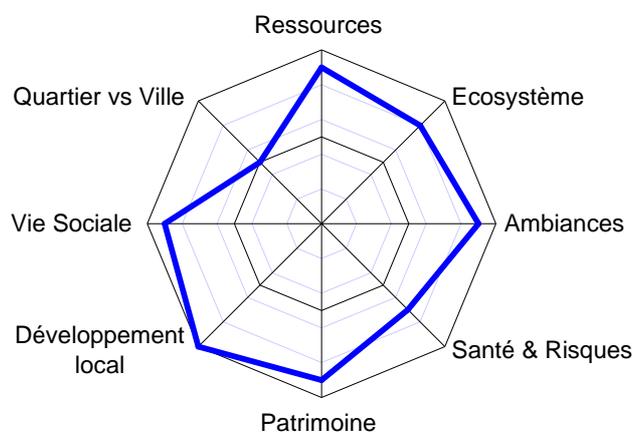
L'utilisation d'indicateurs est devenue une approche classique et très répandue dans le domaine urbain ; citons de manière non exhaustive (Groleau et Marenne 1995; Martin Centre for Architectural and Urban Studies 1997; Fédération nationale des agences d'urbanisme 2001; Adolphe et al. 2002; Boukhezer 2002; Crawford 2002; Dupagne et al. 2004; Oliveira de Souza et al. 2004). On retrouve également des indicateurs dans d'autres domaines comme la gestion du paysage ou la protection de l'environnement (Homedes 1996; den Butter et van der Eyden 1998; Cornforth 1999; Kurtz et al. 2001; European Commission 2002; Diaz-Balteiro et Romero 2004; Link 2005; OCDE 2005). Et dans le cadre de la planification urbaine, "l'utilisation d'indicateurs et la participation publique sont des étapes cruciales pour construire une vision partagée et pour influencer le mode de vie ainsi que les activités économiques" (Diamantini et Zanon 2000). Cependant une mauvaise utilisation des indicateurs peut fausser la prise de décision (Jesinghaus 1999; Dhakal 2002) : la réduction du système à quelques

variables peut détourner le problème des objectifs initiaux et une emphase trop importante sur certains indicateurs peut masquer des aspects importants. Nous veillerons dans la suite à définir les caractéristiques des indicateurs avant de les définir eux-mêmes.

## IV.2. Mode d'évaluation d'une alternative

Ainsi une alternative ou proposition est évaluée à partir d'un ensemble d'objectifs, eux-mêmes définis par différents indicateurs répondant à des critères précis. Dans la suite de notre travail, nous présenterons successivement les objectifs retenus, puis les indicateurs associés à chaque objectif. Nous verrons également comment quantifier ces indicateurs.

Par soucis de clarté, la représentation de l'évaluation permettant la visualisation de l'ensemble des indicateurs d'un objectif est basée sur un diagramme radar ou pieuvre dont un exemple est donné Figure 21 (les objectifs présentés dans l'exemple seront présentés et détaillés dans le chapitre suivant).



**Figure 21 : Exemple de diagramme radar avec les objectifs du projet ADEQUA**

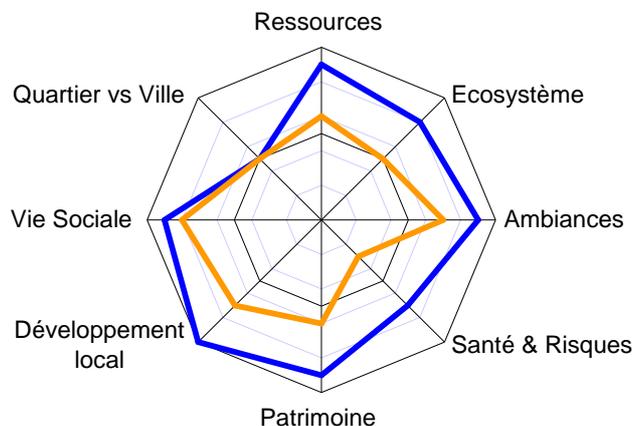
Cette figure montre l'ensemble des objectifs sur un même diagramme, ce n'est qu'un artifice de représentation servant à présenter ces objectifs ; car le diagramme sert à représenter les indicateurs associés à un objectif, comme nous le verrons dans le chapitre 4.

Le diagramme radar est un outil qui a prouvé son utilité dans de nombreux domaines comme la gestion des espèces marines, la gestion rurale, le tourisme ou les écosystèmes (Giampietro et Pastore 1999; Wefering et al. 2000; Lopez-Ridaura et al. 2002; Collie et al. 2003; Becue et Tahon 2004; Ko 2005), il présente une comparaison graphique des avantages et limitations du projet étudié. Le nom originel de ce diagramme est diagramme AMOEBA : le terme signifiant amibe en anglais et c'est également l'acronyme néerlandais de "Méthode Générale d'Evaluation et de Description d'un Ecosystème" (Ten Brink et al. 1991). L'optimum du diagramme est généralement choisi comme la courbe extérieure du diagramme ; il s'agit donc d'uniformiser l'ensemble des objectifs pour qu'ils soient du type "le plus est le mieux". En plus de la transparence de cette représentation, un autre avantage est qu'il est possible d'afficher des données non commensurables étant donné qu'aucune pondération ou agrégation n'est nécessaire. La non homogénéité de la notion de développement durable est ainsi conservée.

De même, la méthode offre la possibilité, pour chaque objectif, de visualiser l'ensemble des indicateurs associés sous la forme d'un diagramme radar pour repérer les points forts et les améliorations concernant un aspect particulier du projet.

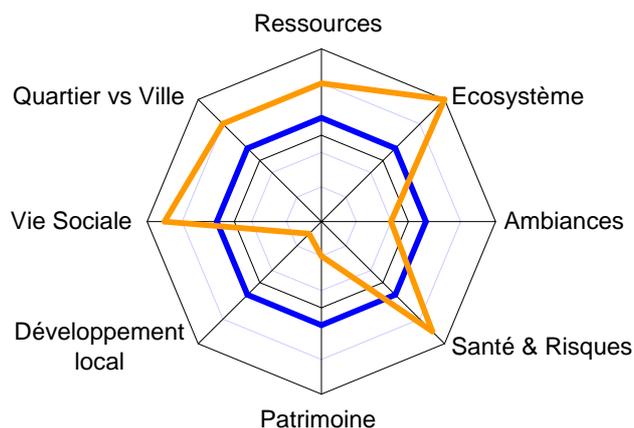
### IV.3. Comparaison d'alternatives

En plus d'une visualisation graphique des avantages et limitations d'un projet, le diagramme radar permet de comparer visuellement deux alternatives d'un projet de quartier afin d'aider le décideur à choisir la meilleure solution, la plus éloignée du centre, Figure 22. Ce mode de représentation permet de comparer les points forts et les faiblesses de chaque alternative,



**Figure 22 : Comparaison de deux solutions à l'aide d'un diagramme radar : la meilleure alternative est la plus éloignée du centre, l'alternative bleue (Cherqui et al. 2004c)**

Dans les cas plus ambigus où les alternatives semblent difficiles à départager, l'utilisateur pourra privilégier certains aspects. Il peut également se servir d'un autre avantage du diagramme radar : la notion de synthèse est clairement illustrée par la circularité du résultat. Sur la Figure 23, les deux solutions sont globalement équivalentes ; cependant une solution est circulaire et l'autre a mis l'emphase sur certains critères (écosystème, santé & risques, vie sociale) au détriment des autres critères. La solution la plus circulaire est préférée car elle représente une synthèse entre l'ensemble des critères, et cette notion de synthèse est très importante dans la démarche de développement durable.



**Figure 23 : Autre comparaison de solutions : l'alternative offrant la meilleure synthèse est la plus circulaire, soit l'alternative bleue**

Il est très important de préciser que cette méthode de visualisation reste une comparaison visuelle, en effet, il serait erroné de se baser sur l'aire occupée par chaque alternative étant donnée que cette aire dépend de la position des objectifs, la Figure 24 en fait la démonstration.



Figure 24 : Diagrammes radars pour lesquels un objectif a été changé de position (C inversé avec F), on constate que l'aire du diagramme (en bleue) augmente alors que l'évaluation est restée identique

Considérons un projet évalué selon huit objectifs, il obtient comme notes la valeur 1 pour les objectifs A, C, D, E, G et H et la valeur 0 pour les autres objectifs (B et F). Sur la figure de gauche, on constate que l'aire du diagramme est égale à la moitié de l'aire totale (4/8 de la surface). Maintenant, à partir de la même évaluation, on inverse la position des objectifs F et C : l'aire du diagramme passe à plus de la moitié (5/8 de la surface totale). Nous démontrons ainsi que la position des objectifs influe sur l'aire du diagramme. L'aire ne doit donc pas être utilisée pour comparer des solutions.

On constate également que la position des objectifs peut avoir une influence sur l'évaluation visuelle d'autant plus grande que le nombre d'objectifs sera important : pour résoudre ce problème, nous avons volontairement limité le nombre d'indicateurs par objectif.

#### IV.4. Utilisation d'une référence

Un autre problème concernant la comparaison d'alternative est la nécessité de définir une référence. Celle-ci permet de définir la périphérie du diagramme radar, c'est-à-dire quand tous les indicateurs sont au maximum. Si la comparaison se fait sans référence, et si toutes les alternatives sont mal notées sur un indicateur, l'évaluation relative des performances ne permettra pas de réaliser que cet indicateur n'est pas atteint.

La définition des références pose différents problèmes au niveau du choix des données permettant d'établir les références : quelles données prendre ? Peut-on utiliser les mêmes références pour l'ensemble de la France ? Les références évoluent-elles dans le temps ? Comme les réponses sont propres à chaque indicateur, nous définirons ces références en même temps que les indicateurs. La flexibilité de la méthode permet à l'utilisateur de changer la valeur de ces références.

## V. Synthèse

Dans ce deuxième chapitre, nous avons établi les exigences de notre méthode. Pour cela, nous avons choisi et défini des limites spatiales et temporelles pour l'étude de notre système : le quartier, échelle intermédiaire entre le bâtiment et la ville ou le territoire, est une échelle pertinente et cohérente avec les réflexions concernant la planification urbaine et les projets d'aménagement. C'est aussi un idéal entre une prise en compte trop parcellaire ou restreinte et une complexité ingérable, elle correspond au niveau de résolution de nombreux problèmes et offre une plus grande facilité de concertation entre les acteurs. Du point de vue temporel, la méthode doit intervenir dès les phases initiales du projet, et elle doit pouvoir être applicable durant l'ensemble des phases de conception et construction du projet jusqu'à la vie du quartier ; la difficulté étant de s'adapter aux données disponibles.

Puis nous avons analysé les besoins et les attentes des acteurs intervenants lors d'opération d'aménagement : l'aménageur est l'acteur clef, il reste cependant en relation étroite avec une partie ou l'ensemble des intervenants, le processus de construction étant un travail collectif et non pas une succession d'étapes. Une méthode claire et une implication indispensable de tous sont les bases nécessaires.

Nous avons vu qu'il existe un grand nombre de méthodes d'évaluation d'un projet ou d'une partie d'un projet, une combinaison de celles-ci sera nécessaire afin de s'adapter aux différents indicateurs et à leur mode d'évaluation. Nous privilégions une approche multicritères d'aide à la décision utilisant des indicateurs quantifiables et des outils de simulations pour les quantifier. Concernant les indicateurs qualitatifs, il existe des méthodes permettant le passage d'une impression qualitative à une valeur quantitative : le recours à des expertises, l'utilisation de bases de données associées à des listes de contrôle et les méthodes de comparaison par paire comme l'AHP ou MACBETH. Il s'agira de pouvoir évaluer quantitativement chaque alternative.

L'établissement d'un état de l'art se voulant le plus exhaustif possible des démarches, guides, logiciels, outils d'évaluation et projets concernant l'aménagement des quartiers a conduit à l'élaboration d'une méthode et à la définition de ses caractéristiques.

La démarche retenue est une méthode d'aide à la décision basée sur des objectifs évalués à partir d'un ensemble d'indicateurs pour la grande majorité quantifiables. La comparaison ou la visualisation d'alternatives est basée sur un diagramme radar, pieuvre ou Amoeba ; il offre de nombreux avantages tant au niveau de la compréhension que de la représentation et ses limites ont été clairement identifiées.

Dans la suite de ce travail et sur la base des caractéristiques définies dans le présent chapitre, nous présenterons les objectifs retenus comme aspects privilégiés d'évaluation du quartier, puis les indicateurs associés à ces objectifs.

## CHAPITRE 3 : Objectifs d'aménagement durable d'un quartier

Dans ce chapitre, nous proposons un ensemble d'objectifs ou thèmes majeurs pour l'évaluation d'un projet d'urbanisme. Cette démarche d'utilisation des objectifs et indicateurs, bien qu'assez récente, est de plus en plus répandue et se retrouve dans des domaines très variés.

Dans une première partie, nous établissons les bases de la discussion sur les objectifs, leurs rôles, les caractéristiques des indicateurs associés et les modèles permettant leur mise en place.

La dimension exhaustive de l'évaluation d'un projet requiert cependant une analyse fine du système à mettre en place. Nous avons donc décidé de définir nos objectifs en accord avec les systèmes existants ; le développement durable est une notion qui doit se retrouver d'une échelle à l'autre et d'un domaine à l'autre. En effet, il est nécessaire de penser globalement et d'établir une bonne communication entre les métiers. Ainsi nous veillons particulièrement à insérer notre démarche dans le contexte politique national et européen, afin de répondre aux différentes stratégies mises en place.

Nous présentons ensuite les huit objectifs retenus servant de base d'évaluation pour le projet ADEQUA et sa méthode.

## I. Des objectifs vers les indicateurs

### I.1. Rôles des objectifs

Le rôle de chaque objectif est d'offrir un angle de vision sur le projet, synthétisant la totalité des aspects à prendre en compte lors de l'évaluation. Un objectif est évalué à partir de la visualisation d'un ensemble d'indicateurs construits en agrégeant des critères dits de base. Comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent, dans cette approche descendante, les objectifs ont également pour fonction de servir de cadre pour la définition des indicateurs.

Le système d'indicateurs et objectifs mis en place pourra servir à l'une ou plusieurs des actions énumérées ci-dessous :

- Comprendre la notion de développement durable : éduquer, identifier les problèmes.
- Impliquer les acteurs : informer le public et les autres acteurs, encourager la participation, initier les discussions.
- Appuyer les décisions : définir les objectifs, identifier les actions, justifier.
- Diriger les choix : contrôler, évaluer, faire des recommandations, mesurer les progrès.
- Résoudre les conflits : coordonner, jouer le rôle de médiateur, encourager la concertation.

L'utilisation d'objectifs permet également de ne pas réduire l'évaluation d'alternatives à une note globale ; il serait en effet ambitieux de réduire à un seul chiffre la complexité du développement durable et de ses multiples dimensions. L'utilisation d'une note unique, comme par exemple dans le cas de l'empreinte écologique (Stoglehner 2003; Frey 2004; Le Grand Lyon 2004b; Monfreda et al. 2004; Lewis et Brabec 2005; van Vuuren et Bouwman 2005), a un but pédagogique de prise de conscience de la nécessité de protéger l'environnement et ne peut servir d'aide à la décision. Notons au passage que l'empreinte écologique a une vocation environnementale et aucun lien avec la dimension sociale : sa principale vocation est de faire prendre conscience que le mode de consommation actuel n'est pas durable.

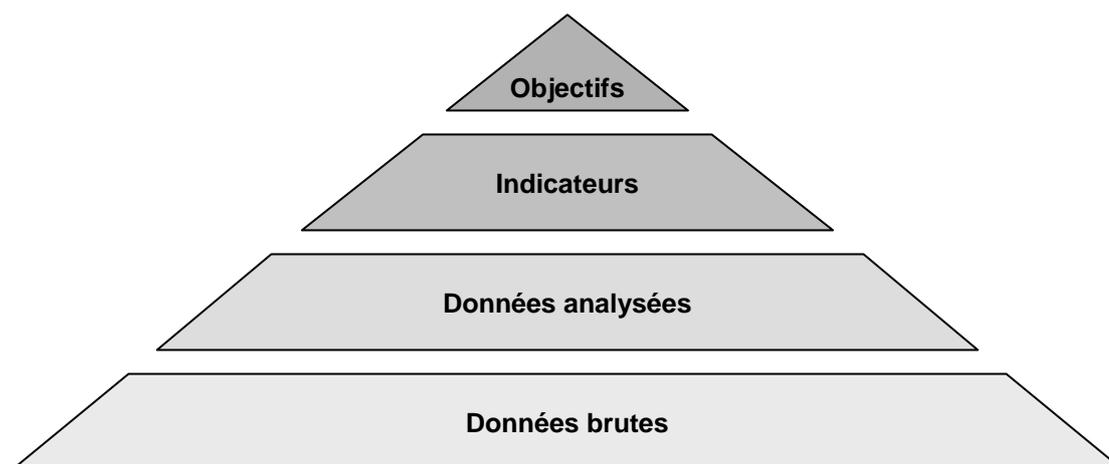
## I.2. Les Indicateurs du Développement Durable (IDD)

D'après Boulanger (2004), l'utilisation du concept d'indicateur a initialement servi en sociologie avec Lazarsfeld (1958), "il y désignait la traduction de concepts théoriques (abstraites) en variables observables". Après un déclin d'utilisation dans les années 60, il a récemment resurgi et devient maintenant un concept indissociable de la notion de développement durable. Son utilisation est de plus en plus courante et il acquiert une importance grandissante dans le processus décisionnel. L'indicateur est à l'intersection de trois domaines : les valeurs et objectifs, la politique et la science (Shields et al. 2002).

De nombreuses définitions du terme indicateur existent ; parmi celles-ci les points importants à retenir sont :

- Signal ou état ou changement (Kurtz et al. 2001; Astleithner et al. 2002a)
- Modèle qui simplifie un sujet complexe (Bossel 1999; Astleithner et al. 2002a; Dhakal 2002)
- Interprétation empirique et indirecte rendant compte d'une réalité non observable (Repetti et Desthieux; Boulanger 2004)

Sa quantification, si elle est possible, s'effectue à partir d'un ensemble de données brutes et de leur analyse, comme le montre la Figure 25.



**Figure 25 : Relation entre les données primaires, les indicateurs et les objectifs (Astleithner et al. 2002a; Shields et al. 2002)**

Cette pyramide présente les étapes d'agrégation de l'information : à partir d'une multitude de données brutes, on tend vers une évaluation synthétique. Dans la pratique, la difficulté réside dans la transition entre chaque étage de la pyramide ; cela concerne les modes de calcul des indicateurs (modes de pondération et d'agrégation).

Nous rappelons avoir présenté les limites des indicateurs dans le chapitre 2 et une mauvaise utilisation peut fausser la prise de décision. La définition des caractéristiques des indicateurs et du système associé permet de prendre en considération ces limites. Les caractéristiques présentées dans le Tableau 9 représentent une synthèse de l'abondante littérature sur ce sujet (Harger et Meyer 1996; Martin Centre for Architectural and Urban Studies 1997; Kelly 1998; Bossel 1999; Cornforth 1999; Jesinghaus 1999; Barrera-Roldan et Saldivar-Valdes 2002; Dhakal 2002; Malkina-Pykh 2002; McMahan 2002; Spangenberg et al. 2002; European Commission 2003c; Finnveden et al. 2003; Ayong Le Kama et al. 2004; Shi et al. 2004).

**Tableau 9 : Liste exhaustive des conditions de sélection des indicateurs**

Aspect	Conditions
Mesure	Scientifiquement valide
	Techniquement mesurable : disponibilité et fiabilité des données, des outils, des personnes, temps suffisant, coûts acceptables
Comportement	Sensible, répond de manière prédictive aux changements
	Robuste, indépendant des hypothèses
	Adaptable à des développements futurs
Utilité	Analytiquement valide (répond à un problème)
	En lien avec la capacité d'agir
	Approprié à l'échelle d'étude
	Accessible à la fois par les spécialistes et les non spécialistes
Clarté	Simple en concept
	Facilement interprétable
	Pas d'ambiguïté entre indicateurs
	Reproductible
Compatibilité	Capable de correspondre à des décisions politiques nationales, locales
	Appartenant à un système existant
	Compatible avec d'autres systèmes
	Accepté internationalement
Représentativité	Approche holistique et transversale du développement durable
	Représentant les visions et objectifs de l'ensemble des parties prenantes

Nous pouvons définir six familles de conditions à partir de la littérature : les aspects de mesure ou de quantification, le comportement de l'indicateur, sa clarté, sa compatibilité et sa représentativité.

Comme l'a souligné Malkina-Pykh (2002), il est plus facile d'établir une liste de conditions que de déterminer des indicateurs respectant l'ensemble des prescriptions. De plus, la pertinence de chaque indicateur n'est pas uniquement liée à ses caractéristiques intrinsèques, mais elle dépend fortement du système d'indicateurs choisi et des relations entre ces indicateurs.

Nous nous servons, dans la mesure du possible, de l'ensemble de ces prescriptions comme des considérations guidant nos choix.

### I.3. Les différents modèles d'indicateurs

La définition des objectifs et des indicateurs associés peut se faire selon plusieurs types de modèles. L'utilisation d'un modèle pour cadrer les IDD offre différents avantages tels que montrer les liens entre les indicateurs, justifier ou guider le choix des indicateurs (Malkina-Pykh 2002).

On retrouve ces modèles dans la littérature, avec cependant de grandes disparités d'utilisation ; les modèles PER, FPEIR et leurs variantes étant les plus fréquemment utilisés.

#### I.3.a. Modèle PER (PSR)

Le modèle "Pression Etat Réponse", traduction de l'anglais "Pressure State Response", a été finalisé par l'OCDE, motivé par le besoin de définir des indicateurs reflétant les liens entre les causes et les effets. Cette approche repose sur la notion de causalité : les activités humaines exercent des *pressions* sur l'environnement, qui modifie l'*état* de l'environnement et la communauté *répond* à ces changements en adaptant sa politique environnementale, Figure 26.

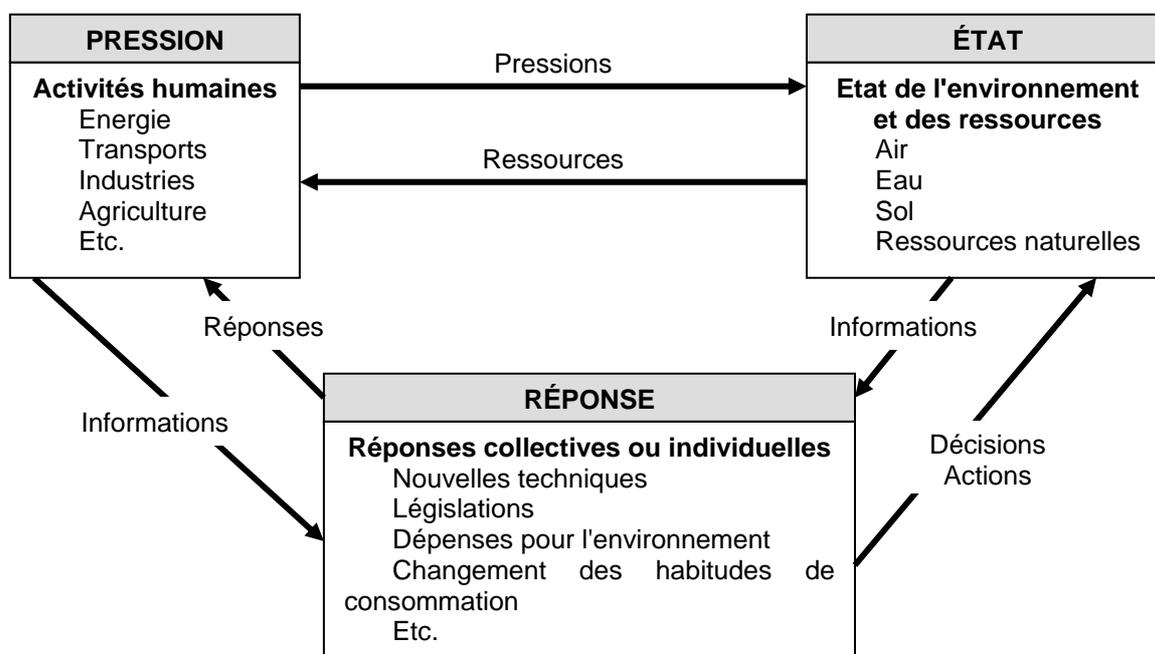


Figure 26 : Modèle PSR (Charlot-Valdieu et Outrequin 2002; Dufrasnes et Achard 2004)

D'après ce modèle, les indicateurs peuvent être classés selon les trois catégories :

- **Les indicateurs de pression** décrivent les pressions directes et indirectes qu'exerce une activité humaine sur le milieu.
- **Les indicateurs d'état** décrivent des phénomènes physiques (par ex. température ou niveau de bruit d'une certaine zone), biologiques (par ex. flore présente), chimiques (par ex. concentration d'une substance dangereuse). Ils permettent d'élaborer un diagnostic.
- **Les indicateurs de réponse** décrivent les efforts de groupes dans la société ou les tentatives des autorités pour prévenir, compenser ou s'adapter aux changements.

Le modèle PSR développé à l'origine pour évaluer des aspects environnementaux, est maintenant utilisé de manière plus exhaustive. Il se base sur les chaînes de relations de cause

à effet d'impacts environnementaux, sociaux et économiques ; chaque chaîne de cause à effet est étudiée de manière distincte et correspond à un problème spécifique.

### I.3.b. Modèle FPEIR (DPSIR)

L'Agence Européenne de l'Environnement (AEE) utilise le modèle DPSIR qui est une adaptation du modèle PSR. FPEIR "Forces motrices Pression Etat Impact Réponse" vient de l'anglais DPSIR "Driving forces Pressure State Impact Response" : les *forces motrices* sociales et économiques exercent une *pression* sur l'environnement et, par conséquent, l'*état* de l'environnement change. Cela a un *impact* sur la santé humaine, l'écosystème et les ressources, et risque d'entraîner une *réponse* de la société.

Les forces motrices ont été ajoutées car le modèle PSR a été jugé incompatible avec le système social et économique ; les forces motrices correspondant aux activités humaines (Ronchi et al. 2002).

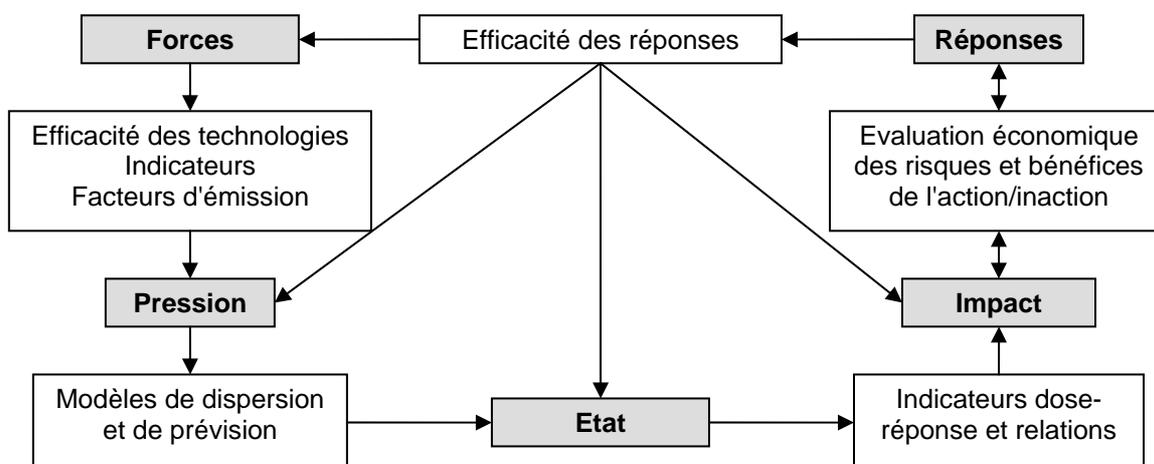


Figure 27 : Modèle DPSIR (Charlot-Valdieu et Outrequin 2002)

D'après un rapport de l'AEE (Smeets et Wetering 1999) cité par (Charlot-Valdieu et Outrequin (2002), les indicateurs peuvent être classés sur quatre groupes :

- **Les indicateurs descriptifs**
  - Les *indicateurs de forces motrices* décrivent le développement social, économique et démographique de nos sociétés et leurs implications dans les changements de style de vie, de schéma de consommation ou de production.
  - Les *indicateurs de pression* ont été présentés précédemment
  - Les *indicateurs d'état* ont été présentés précédemment
  - Les *indicateurs d'impact* décrivent les effets ultimes causés par les changements.
  - Les *indicateurs de réponse* ont été présentés précédemment
- **Les indicateurs de performance** mesurent l'écart entre les conditions actuelles et l'objectif à atteindre
- **Les indicateurs d'efficacité** fournissent un aperçu de l'efficacité des produits et des processus en terme de ressources utilisées, d'émissions dégagées et de déchets générés par unité de produit

- **Les indicateurs de bien-être total** visent à décrire de manière globale le développement durable.

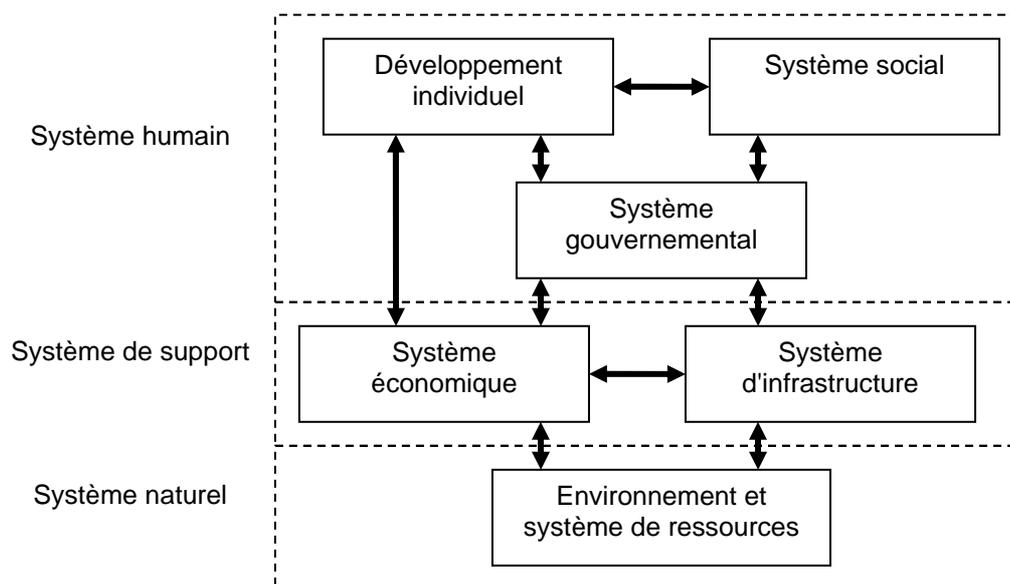
### I.3.c. Dérivés du DPSIR et limites

D'après Dhakal (2002), une étude sur les méthodes aurait montré que le système DPSIR est le plus largement utilisé pour construire un système d'indicateurs. Il est utilisé de différentes manières, en omettant ou ajoutant un ou plusieurs composants, par exemple en supprimant les réponses ou en ajoutant l'exposition, la vulnérabilité, etc.

Bien que ces modèles soient très répandus, ils ont plusieurs limitations. Tout d'abord, ils ne permettent pas d'appréhender la nature systémique et dynamique de nombreux processus de cause à effet, ni les relations qui peuvent exister entre les différentes causes elles-mêmes ou les effets eux-mêmes. En d'autres termes, cette approche ne réussit pas à saisir les informations sur la nature et le comportement du système dans lequel les décisions sont prises (Kelly 1998). De plus, les indicateurs de réponse seraient basés sur des modèles intuitifs ou mentaux inadaptés pour des systèmes avec des structures complexes. Enfin, un impact peut devenir à la fois pression ou état selon la chaîne étudiée.

### I.3.d. Autres modèles

Réalisant les limites des systèmes précédents, des recherches ont conduit à de nouveaux systèmes. L'approche systémique (Kelly 1998; Bossel 1999; Dhakal 2002) est un premier exemple présenté Figure 28.

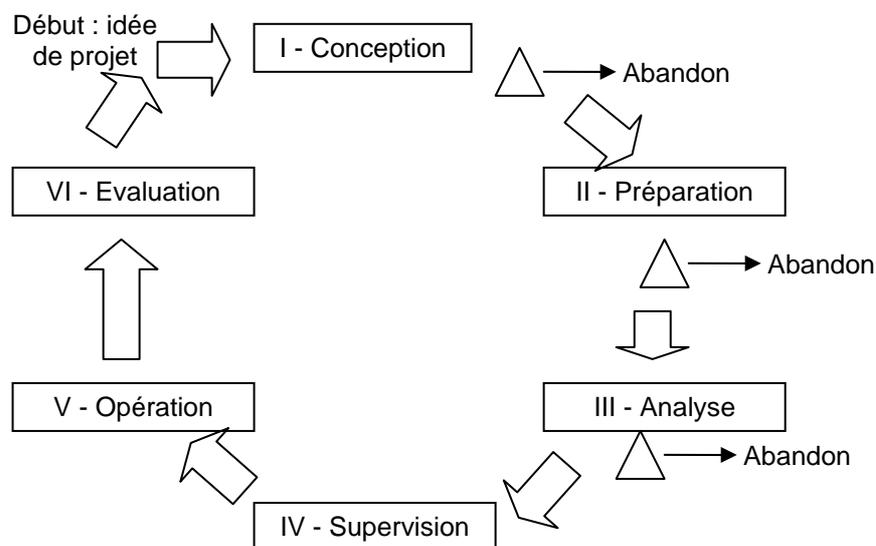


**Figure 28 : Les trois sous-systèmes principaux de l'approche système (Bossel 1999)**

La tâche consiste à décomposer le projet en trois principaux systèmes : le système humain, le système de support et le système naturel. Chaque système est ensuite divisé en autant de sous-systèmes que nécessaire. Les indicateurs sont ensuite associés à ces sous-systèmes. Cette approche nécessite de pouvoir définir l'ensemble des systèmes correspondant au projet étudié.

Des dérivés de l'approche système ont abouti à de nouvelles approches telles que le modèle sensitif (Chan et Huang 2004) ou le modèle Relational Indicatorset Model ou RIM (Repetti et Desthieux).

Pour étudier les performances d'activités d'un projet, la Banque Mondiale (World Bank) utilise la méthode du "Project Cycle" (Youker 1989), Figure 29.



**Figure 29 : Phases du "Project Cycle" (Youker 1989)**

Cette approche initialement destinée à accompagner le processus de développement de projets permet également de construire des indicateurs de performance environnementale (Dhakai 2002). Dans le cas de la définition d'indicateurs, il faut appliquer le cycle activité par activité. Après la conception d'indicateurs en lien avec une activité, les étapes suivantes permettent de vérifier la pertinence (validité, utilité, etc.) et en cas de nécessité plusieurs cycles peuvent être envisagés afin d'obtenir un choix stable d'indicateurs.

Un approche similaire est le "Policy Circle" et ses variantes (Shields et al. 2002), centrée sur la détermination d'objectifs adaptés à une politique.

Dernièrement, la sélection d'indicateurs peut se faire de manière ad hoc ou par essais-erreurs, c'est-à-dire par des itérations successives (Bossel 1999). Néanmoins les indicateurs choisis risquent de refléter le domaine d'expertise spécifique des acteurs, entraînant la création d'un système déséquilibré contenant de nombreux indicateurs sur un aspect précis et pas assez sur un autre aspect.

D'après l'approche descendante choisie (chapitre 2 paragraphe 5.2), les indicateurs de développement durable (IDD) découlent des objectifs retenus. Nous privilégions pour le choix des indicateurs le modèle PSR car il est très répandu et malgré ses limitations reste le plus adapté à une problématique aussi complexe et pluridisciplinaire. Nous verrons dans le chapitre suivant que la majorité des indicateurs définis sont des indicateurs de pression.

Dans la suite de ce chapitre, nous nous consacrons à la définition des objectifs. Dans le chapitre suivant (chapitre 4), les IDD associés sont présentés, puis le mode de calcul de chaque indicateur est détaillé et nous abordons la question de leur gestion statistique et géographique.

#### I.4. Classification des objectifs

Boulanger (2004) et Dhakal (2002) proposent différentes classifications des objectifs associés aux systèmes :

- Cause à effet : modèles PSR, DPSIR et leurs dérivés
- Milieux : eau, terre, air
- Ressources : biotiques, abiotiques, monétaires
- Enjeux : satisfaction des citoyens, mobilité locale, qualité de l'air
- Secteurs : transport, habitat, commerces, énergie, industries
- Piliers : économique, environnemental et social
- Thèmes politiques : changement climatique, pollution de l'air, de l'eau, déchets
- Actions : contrôle de la pollution, développement d'infrastructures vertes
- Acteurs : élus, urbaniste, aménageur, habitant
- Normes : efficacité, équité, prudence

Nous retrouvons ces classifications dans les différents systèmes proposés ci-après.

## II. Systèmes d'objectifs et d'indicateurs existants

Au lieu de mener une réflexion *ex nihilo*, nous proposons dans ce paragraphe un tour d'horizon des indicateurs et objectifs en rapport avec l'évaluation urbaine. Nous présentons en premier lieu deux projets transversaux : les projets PASTILLE et CRISP. Puis nous recensons les systèmes existants que nous avons jugé important de prendre en considération : nous les intégrons dans la mesure du possible à notre démarche.

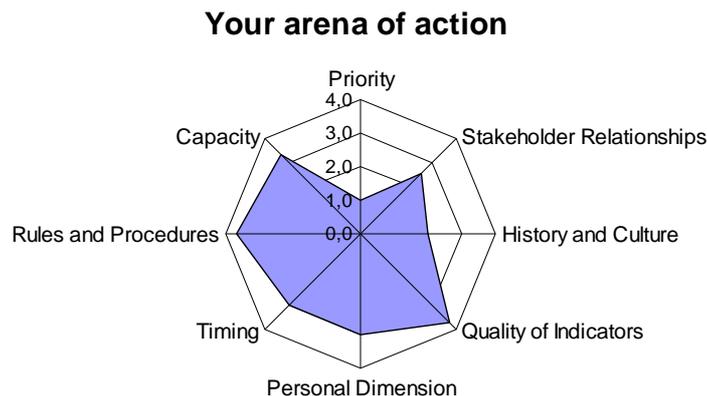
### II.1. Le projet PASTILLE

Cet acronyme signifie "**P**romoting **A**ction for **S**ustainability **T**hrough **I**ndicators at the **L**ocal **L**evel in **E**urope". Son but principal était d'analyser la mise en place d'IDD dans des villes ou municipalités (Astleithner et al. 2002b). Ce projet a démarré en mars 2000, financé par la Commission Européenne et la Suisse, et il s'est terminé en septembre 2002. Le consortium coordonné par le Professeur Rydin de la London School of Economics and Political Science était composé de laboratoires de recherche français, anglais, autrichien et suisse.

Les indicateurs sont de plus en plus largement utilisés comme outil politique clef et le problème émergent est de savoir comment les exploiter au mieux lors de la prise de décisions ; le projet PASTILLE a nommé cela le "nouveau management public". Ce projet s'est donc concentré sur l'utilisation de ces indicateurs à l'échelle urbaine, en liaison avec chaque politique locale. L'étude portait sur quatre cas d'étude, soit un par pays : les villes choisies (Londres, Le Grand Lyon, Vienne et Winterthur) étaient déjà impliquées dans une démarche active sur les IDD avant ce projet. Le projet a tout d'abord permis de définir la portée et le rôle des indicateurs, puis il s'est consacré à l'analyse du processus de développement de ces indicateurs et à leur utilisation, en relation avec chaque contexte local. Troisièmement, il a évalué l'impact des indicateurs et leur efficacité lors des décisions de politique publique.

A l'issue du projet, le consortium a constaté que les IDD n'ont pas une influence évidente et automatique sur la prise de décision. Ils peuvent cependant servir à assimiler la notion de développement durable, s'ajouter au processus de gouvernance ou bien encore aider à façonner les décisions politiques au niveau local. Le succès de la création d'IDD repose principalement sur la manière dont ces indicateurs seront intégrés dans le processus décisionnel, des relations existantes entre les acteurs politiques, et de leurs modes de prise de décisions. L'efficacité de l'utilisation de ces IDD est également très fortement liée aux relations entre les différents experts en charge d'indicateurs spécifiques et le reste de la communauté (dont les acteurs politiques font partie).

Ce projet a abouti à l'élaboration d'un guide à l'usage des acteurs impliqués dans le développement et l'utilisation d'IDD à l'échelle locale (Astleithner et al. 2002a). Il explique le rôle des indicateurs, les méthodes de gestion de la politique locale de développement durable, et surtout il fournit un outil permettant de tester le système d'indicateurs retenu ainsi que son efficacité dans le contexte local. Un exemple de résultat est donné Figure 30 ci-dessous.



**Figure 30 : Exemple de résultats du test PASTILLE**

Le système d'indicateurs est évalué selon huit thèmes :

- L'importance ou priorité accordé au système vis-à-vis des autres facteurs comme les jugements politiques ou professionnels (*Priority*).
- L'efficacité des relations entre les décideurs et le système, et l'efficacité des relations entre les décideurs (*Stakeholder Relationship*).
- Le contexte culturel et historique de la prise de décision (*History and Culture*) : c'est-à-dire l'image positive ou négative que les décideurs gardent des processus décisionnels précédents.
- La qualité des indicateurs (*Quality of indicators*) : pertinence, clarté, etc.
- L'implication des utilisateurs du guide (*Personal Dimension*) lors de la définition des indicateurs.
- La flexibilité dans le temps (*Timing*) du système afin de s'adapter aux opportunités et contraintes.
- L'intégration des procédures formelles de prise de décisions habituellement utilisées au sein du système d'indicateur (*Rules and Procedures*).
- L'accès aux ressources, la formation et les capacités des utilisateurs du système (*Capacity*).

Cette évaluation est représentée sous forme d'un diagramme radar, l'idéal étant de maximiser l'ensemble des thèmes. Le fichier de test est disponible sur le site du projet PASTILLE<sup>13</sup> ou directement à l'adresse <http://www.lse.ac.uk/collections/PASTILLE/test.xls>.

## II.2. Le projet CRISP

L'acronyme du projet signifie "**C**onstruction and **C**ity **R**elated **S**ustainability **I**ndicators". Ce projet a concrétisé un réseau thématique européen sur les IDD utilisés dans le domaine de la construction et de la ville. Le réseau ayant pour but de "coordonner les travaux de recherche qui définissent et valident de tels indicateurs et qui les appliquent pour mesurer la performance des projets de construction (bâtiment et cadre bâti) en terme de développement durable"(Nibel 2001).

<sup>13</sup> <http://www.lse.ac.uk/collections/PASTILLE/>.

CRISP a débuté en juin 2000 pour une durée de trois ans ; il regroupait 24 équipes provenant de 16 pays européens, piloté par le CSTB et le VTT (équivalent finlandais du CSTB).

Quatre thèmes distincts ont été définis : le produit, le bâtiment, le bloc urbain et le processus ou la stratégie. L'activité principale de ce réseau fut d'établir un listing exhaustif des IDD et systèmes d'IDD utilisés lors de projets de construction nationaux ou internationaux à travers l'Europe. Un état de l'art est disponible pour chacun des pays suivants : Allemagne (Wetzel et al. 2001), Autriche (Geissler et Macoun 2001), Belgique (Desmyter et al. 2001), Danemark (Hansen et Dammann 2002), Espagne (Alavedra 2001), Finlande (Hakkinen 2001), France (Nibel et al. 2001a), Grande-Bretagne (Gomez et al. 2001), Grèce (Bikas et Milonas 2001), Hollande (Rommens et Lanting 2000), Hongrie (Kunszt et Tiderenczl 2000), Italie (Sala 2003), Norvège (Fossdal 2001), Roumanie (Suler 2000) et Suède (Eden et Glaumann 2001).

Actuellement, ce projet recense plus de 500 indicateurs regroupés dans 39 systèmes différents, et parmi eux environ 180 indicateurs concernant le quartier. A chaque indicateur sont associés de nombreuses informations telles que sa description, le système auquel il appartient, son unité de mesure, sa méthode d'évaluation ou les aspects concernés. L'ensemble de ces informations est disponible sur le site du projet<sup>14</sup>.

## II.3. Démarches européennes

### II.3.a. La Stratégie Européenne pour un Développement Durable (SEDD)

Cette stratégie concerne six défis majeurs (Dufrasnes et Achard 2004) évalués par 14 indicateurs se rassemblant autour de six enjeux, et présentés dans le Tableau 10.

**Tableau 10 : Les 14 indicateurs de la SEDD (Dufrasnes et Achard 2004)**

Enjeux de durabilité	Indicateurs de durabilité
Contexte économique général	PIB par habitant et taux de croissance du PIB réel
	Productivité du travail
Emploi	Taux d'emploi
	Taux d'emploi des travailleurs âgés
Innovation et recherche	Dépenses publiques d'éducation
	Dépenses de R&D par source de financement
	Dépenses consacrées aux TIC
Réforme économique	Convergence des taux d'intérêts
Cohésion sociale	Taux de risque de pauvreté
	Dispersion des taux d'emploi régionaux
	Chômage de longue durée
Environnement	Emissions des gaz à effet de serre
	Intensité énergétique de l'économie
	Volumes transportés

Les six défis majeurs sont : les changements climatiques, les menaces potentielles pour la santé publique, la pression croissante sur certaines ressources naturelles essentielles, la

<sup>14</sup> <http://crisp.cstb.fr>

pauvreté et l'exclusion sociale, les implications du vieillissement de la population, la pollution.

### II.3.b. La Stratégie Européenne pour l'Environnement Urbain (SEEU)

Cette stratégie devrait permettre d'aider les villes européennes à améliorer leur environnement et leur cadre de vie en les rendant plus saines et plus agréables à vivre. Elle s'axe autour de quatre domaines : gestion urbaine, transports urbains durables, construction durable et enfin urbanisme durable. Elle a conduit à l'élaboration d'indicateurs pour diagnostiquer l'état initial, observer et suivre les progrès accomplis, élaborer des politiques ou comparer les villes. Les indicateurs proposés sont appelés "indicateurs européens communs" et présentés dans le Tableau 11.

**Tableau 11 : Indicateurs européens communs de la SEEU (Dufrasnes et Achard 2004)**

	Indicateurs obligatoires					Indicateurs facultatifs				
	Satisfaction du citoyen	Changement climatique	Mobilité locale	Proximité	Qualité de l'air	Déplacement particulier	Eco entreprises	Bruit	Gestion de l'espace	Eco produits
Egalité et cohésion sociale										
Démocratie et gouvernance										
Du local au global										
Economie locale										
Protection environnementale										
Héritage culturel										

Les cellules grisées correspondent à la présence d'indicateurs en relation avec un thème (par exemple égalité et cohésion sociale, démocratie et gouvernance ou du local au global) et un objectif (par exemple satisfaction du citoyen, changement climatique ou mobilité locale).

### II.3.c. Le projet Eco-Housing

Le projet européen Environmental co-housing présenté au chapitre précédent, au stade d'avancement actuel, propose 40 objectifs répartis selon neuf buts et quatre dimensions, Tableau 12.

**Tableau 12 : Arbre des objectifs du projet ECo-housing (Peuportier 2004)**

Dimensions	Buts	Objectifs
<b>1 Écologique</b>	1 Préserver les ressources	1 Préserver les matières premières 2 Economiser l'énergie 3 Economiser l'eau 4 Réduire l'usage du sol
	2 Protéger l'écosystème	1 Limiter les émissions toxiques 2 Protéger le climat 3 Protéger les forêts 4 Protéger les rivières et les lacs 5 Améliorer la qualité de l'air extérieur 6 Protéger la faune et la flore 7 Réduire les déchets 8 Réduire les déchets radioactifs 9 Préserver la couche d'ozone 10 Limiter les inondations
<b>2 Économique</b>	1 Réduire le coût global	1 Réduire le coût de construction 2 Réduire le coût de fonctionnement 3 Réduire le coût de maintenance 4 Réduire le coût de rénovation 5 Réduire le coût de démolition
	2 Augmenter la valeur	1 Faciliter l'adaptation des espaces 2 Faciliter l'adaptation des usages
<b>3 Sociale</b>	1 Préserver la santé des résidents	1 Améliorer la qualité de l'air intérieur 2 Améliorer la qualité de l'eau 3 Réduire les champs électromagnétiques 4 Réduire les risques (incendie, explosion...)
	2 Améliorer le confort	1 Améliorer le confort visuel 2 Améliorer le confort thermique 3 Réduire le bruit 4 Réduire les odeurs 5 Améliorer le bien-être
	3 Augmenter la valeur sociale	1 Améliorer la qualité d'usage 2 Augmenter l'équité sociale 3 Augmenter l'équité de genre 4 Faciliter les relations sociales 5 Améliorer la participation
<b>4 Culturelle</b>	1 Augmenter la valeur esthétique	1 Améliorer l'architecture et l'image 2 Améliorer l'intégration au site
	2 Conserver la connaissance et l'histoire	1 Respecter les sites historiques 2 Intégrer la mémoire 3 Augmenter la valeur culturelle

Le groupe d'acteurs concerné sélectionne un sous-ensemble de critères, auxquels des priorités peuvent être affectées. La structuration des objectifs selon quatre dimensions ou neuf buts est proposée pour clarifier la liste d'objectifs, cependant ce sont les objectifs qui sont importants.

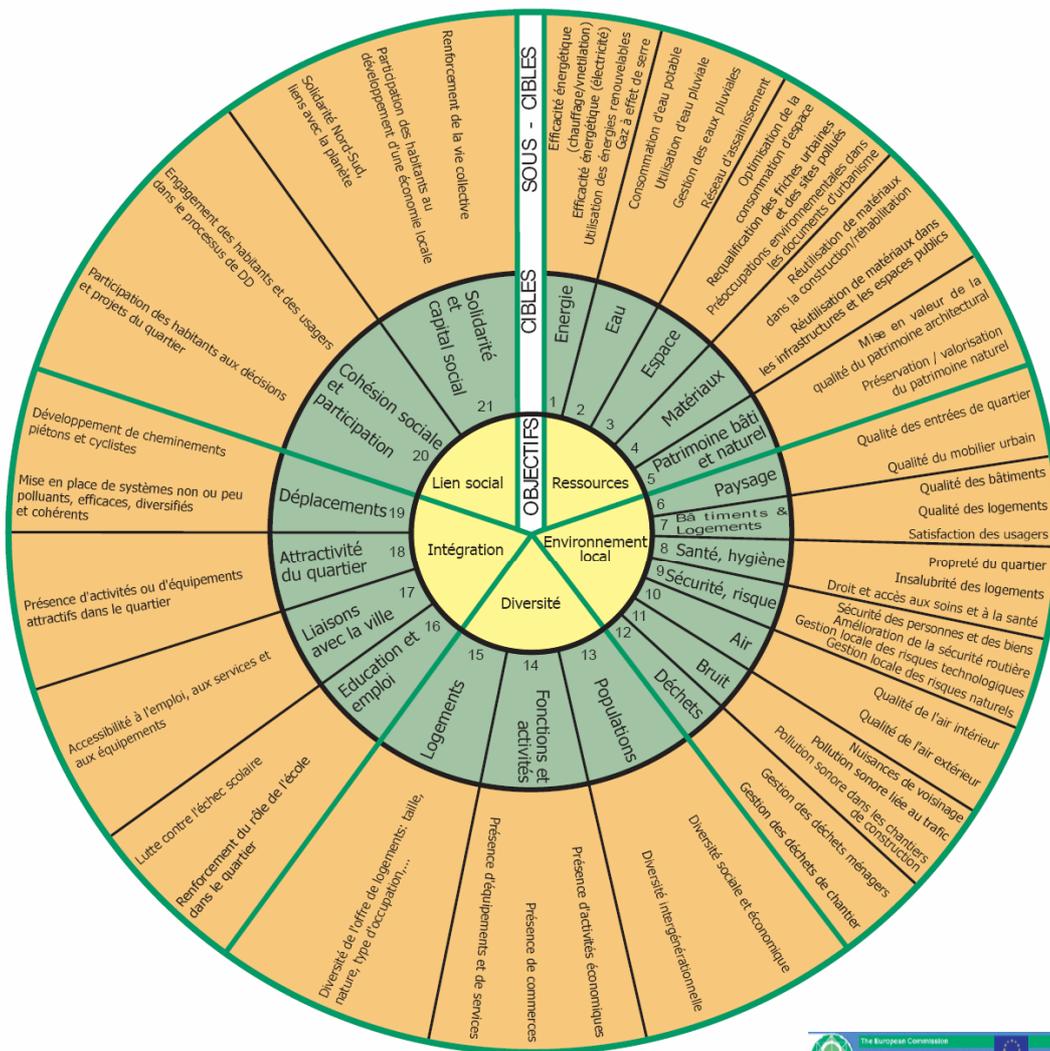
### II.3.d. Le projet RESPECT

Le Réseau d'Evaluation et de Suivi des Politiques Environnementales des Collectivités Territoriales, initiative à l'origine française, regroupe aujourd'hui 26 collectivités de l'Union Européenne. Ce projet est consacré à l'expérimentation et à la validation d'un tableau de bord et il a conduit à la création d'un outil de suivi et de pilotage des politiques environnementales, la méthode RESPECT, un site web lui est dédié : <http://www.respect.asso.fr/>.

Le tableau de bord élaboré prend en compte le modèle Pression Etat Réponse, il est composé de 73 indicateurs classés en 12 thèmes : air, bruit, paysage urbain, habitat, patrimoine naturel, déchets, déplacements, eau, énergie, risques, sol et sous-sol et engagement mutuel pour l'environnement.

II.3.e. HQE<sup>2</sup>R

Le projet HQE<sup>2</sup>R présenté au chapitre précédent regroupe 61 indicateurs classés selon 21 cibles et cinq objectifs, Figure 31 ci-dessous.



\*sur un concept original de David Mowat, résident de "Community at Heart" (Bristol, Royaume-Uni)



Figure 31 : Indicateurs et objectifs de la démarche HQE<sup>2</sup>R (Dufrasnes et Achard 2004)

La répartition circulaire de l'ensemble des objectifs se rapproche de la représentation sous forme de diagramme radar.

II.3.f. Les autres initiatives européennes

D'autres initiatives européennes sont recensées par le projet CRISP et dans la bibliographie suivante : (Astleithner et al. 2002a; Charlot-Valdieu et Outrequin 2002; Dhakal 2002; European Commision 2002; McMahan 2002).

## II.4. Démarches françaises

### II.4.a. La Stratégie Nationale de Développement Durable (SNDD)

Adoptée par le gouvernement français en juin 2003, cette stratégie a été élaborée par un groupe de travail interministériel, en prenant en compte le contexte international. Elle est considérée par ses auteurs comme "une version préliminaire, perfectible et a vocation à être améliorée" (Ayong Le Kama et al. 2004). 45 indicateurs ont été retenus et classés selon trois piliers : économique, environnemental et socio-sanitaire. Ils sont répartis selon 12 thèmes :

- I. Indicateurs synthétiques
- II. Amélioration de la croissance potentielle
- III. Equité intergénérationnelle et qualité de la gestion patrimoniale
- IV. Innovation et recherche
- V. Mode d'insertion dans la mondialisation
- VI. Changement climatique
- VII. Ressources environnementales
- VIII. Modes de production et de consommation
- IX. Santé - environnement
- X. Cohésion sociale
- XI. Modes de vie et santé
- XII. Valorisation des ressources humaines

### II.4.b. Les indicateurs de l'IFEN

L'IFEN (Institut Français de l'Environnement) a retenu une sélection de 45 indicateurs s'organisant autour de dix modules divisés en cinq axes et présentés dans le Tableau 13.

**Tableau 13 : Axes et modules proposés par l'IFEN (IFEN 2003)**

Axes	Modules
Axe 1 : une croissance soutenable	Module 1 : Une croissance "éco-efficace" Module 2 : Intégration de l'environnement dans la structure productive
Axe 2 : patrimoines et ressources critiques	Module 3 : Utilisation durable des ressources Module 4 : Entretien et transmission de nos patrimoines
Axe 3 : dimension spatiale et perspectives globales	Module 5 : Répartition et inégalités spatiales Module 6 : Relations de la France avec le reste du monde
Axe 4 : satisfaction des besoins des générations présentes	Module 7 : Inégalités et exclusions Module 8 : Comportements d'insatisfaction
Axe 5 : long terme et générations futures	Module 9 : Principes de responsabilité et de précaution Module 10 : Vulnérabilité et adaptation à l'imprévisible

Chaque indicateur est détaillé sur une fiche individuelle et toutes ces fiches sont regroupées dans un ouvrage (IFEN 2003). Les indicateurs de l'IFEN sont assez proches de la SNDD étant

donné qu'ils ont servis comme une des bases d'établissement de la stratégie. Cependant, la SNDD n'a pas jugée utile de retenir certains indicateurs comme par exemple le stock de déchets radioactifs français.

#### II.4.c. La grille RST.01

Elle a été établie par le réseau scientifique et technique du ministère de l'Équipement (Dufrasnes et Achard 2004). Il s'agit d'un outil pédagogique destiné aux agents de l'État et des collectivités territoriales servant à évaluer qualitativement les opérations d'aménagement ou d'équipement en construction ou existantes. La grille est présentée dans le Tableau 14.

**Tableau 14 : Critères de la grille RST.01 (Dufrasnes et Achard 2004)**

Dimensions et Interfaces	Critères de durabilité
Social	Solidarité
	Exclusion, discrimination, désocialisation
	Impact sur la santé et la sécurité
	Identité culturelle
Social - Economie	Efficacité redistributive
	Équité intra et intergénérationnelle
	Accessibilité
	Compensation des préjudices
Economie	Intégration économique
	Création de biens, de services et d'emplois
	Efficacité économique
	Impact financier
Economie - Environnement	Efficacité allocative à long terme
	Précaution – Prévention
	Robustesse des choix
	Responsabilisation
Environnement	Impact sur l'environnement
	Cadre de vie
	Management environnemental
	Ressources naturelles
Environnement - Social	Aménités
	Ethique
	Perception et acceptation de la population
	Réversibilité
Gouvernance	Concertation, participation et association
	Processus décisionnel
	Évaluation, suivi, bilan
	Contexte juridique et réglementaire

La grille se décompose en 16 critères reprenant les quatre piliers du développement durable auquel 12 critères transversaux sont ajoutés. Les 12 critères transversaux correspondent aux problématiques appartenant à deux piliers du développement durable. Chaque critère est noté selon une échelle de 0 (sujet non traité) à 4 (approche intégrée).

II.4.d. Les indicateurs proposés par le SETUR et le SNAL

Dans le cadre du projet de "Méthodologie pour une démarche de qualité environnementale sur les opérations d'aménagement dans une perspective de développement durable" présenté dans le chapitre précédent, est proposé un ensemble d'indicateurs pour évaluer la qualité environnementale d'une opération. Ces indicateurs se répartissent selon 11 thèmes et sont présentés dans le Tableau 15 appelé également "grille thématique".

**Tableau 15 : Indicateurs proposés par le SETUR et le SNAL (Carfantan et al. 2005)**

Thème	Indicateur	Thème	Indicateur
Formes urbaines Utilisation rationnelle de l'espace	Typologie du bâti et des formes urbaines selon le contexte Eléments de patrimoine Reprise des objectifs de Loi SRU (densité) Requalification des espaces urbains Flexibilité des espaces et des bâtiments Localisation des espaces publics	Contexte social Usages / mixité	Prise en compte des usages et des attentes Mixité sociale : offres de logements diversifiées Mixité fonctionnel : services / activités Mixité intergénérationnelle Approche socio-démographique Optimisation des équipements
Déplacement Accessibilité	Liaison avec la ville, avec le territoire Développement des liaisons douces et des TC Gestion du stationnement Accessibilité aux équipements et aux commerces, accessibilité aux sites, accessibilité aux PMR et aux TC Qualité de l'air : émissions de GES, chantier Sécurité des flux, traitement de la vitesse	Bruit et nuisances	Bruit lié aux infrastructures de transport et au trafic Bruit lié au voisinage Bruit lié au chantier Nuisance : pollution de l'air Nuisances visuelles
Energie	Desserte du secteur Potentialité du site et des filières locales Récupération de chaleur Eclairage public Qualité du bâti (chauffage, ventilation, électricité) Choix du matériel économique	Climat et géographie	Orientation solaire Orientation des pentes Protection contre la pluie Sens du vent
Eau	Régulation Récupération (arrosage, eaux grises) Infiltration Irrigation Choix d'essences rustique et de matériel économique Valorisation en tant qu'éléments de paysage	Paysage et Biodiversité	Préserver le paysage existant Maîtrise des vues Intégration paysagère, trame verte Gestion différenciée, choix des essences Secteurs d'intérêt écologique, continuité biologique Aménagement des interfaces
Déchets et rejets	Compostage Tri sélectif Récupération Gestion des déchets de chantier Traitement des déchets de chantier Jardins filtrants et dépollution par les plantes Intégration des contraintes de collecte	Relief et analyse des pentes	Qualité du sol (stabilité, capacité d'infiltration) Pollution des sols Imperméabilisation Gestion des déblais et des remblais
Matériaux (espaces publics, bâtiments) Choix en fonction du cycle de vie des matériaux Utilisation de matériaux recyclés Santé			

Au sein de ce projet, cinq thèmes sont définis comme prioritaires : l'énergie, les déplacements, les formes urbaines, le contexte social et l'eau. Les six autres thèmes relevant d'une approche plus locale. Chaque thème renvoie à des grands enjeux pour le développement durable. Ces enjeux débouchent sur des objectifs qui déterminent, à leur tour, des orientations d'aménagement générales.

#### II.4.e. Les indicateurs de l'ARPE Midi-Pyrénées

L'Agence Régionale pour l'Environnement (ARPE) Midi-Pyrénées propose un tableau de bord composé de 27 indicateurs donnant une photo de la situation de la ville en terme de développement durable. Ces indicateurs sont présentés dans le Tableau 16 ci-dessous :

**Tableau 16 : Classement des indicateurs de l'ARPE (ARPE 2004)**

Champ	Thème	Indicateur
Respect des équilibres écologiques	Espaces verts, boisements et zones naturelles	Offre en espace verts entretenus par habitant
	Protection des ressources en eau douce et de leur qualité	Prix moyen de l'eau Qualité de l'eau produite
	Déchets	Taux de détournement pour valorisation
Respect des équilibres écologiques <=> développement social	Qualité de l'air et bruit	Emission de gaz responsable de la pollution atmosphérique
		Proportion des déplacements domicile travail réalisés en transport en commun
	Agriculture périurbaine	Proportion des exploitations signataires d'une démarche labellisée
	Risques majeurs	Niveau d'exposition aux risques naturels et industriels
Développement économique <=> environnement	Certification	Indice de consommation d'espace
		Part des salariés d'établissements privés certifiés ISO 14001
Développement économique	Diversification de l'activité	Nombre d'établissements privés pour 1000 habitants
	Emploi	Evolution du nombre d'emplois
Développement social <=> action économique	Précarité et exclusion	Ecart au salaire net annuel national moyen
		Part de la population vivant en deçà du seuil de pauvreté
Développement social	Démographie	Taux d'accroissement de la population
	Logement social	Proportion des logements locatifs sociaux
	Santé	Temps d'accès aux services d'urgence
	Education, formation	Proportion des 15 ans et plus non titulaires d'un diplôme qualifiant
	Patrimoine, culture, sport et loisirs	Nombre de monuments inscrits et classés
		Nombre de livres empruntés dans les bibliothèques
	Sécurité des biens et des personnes	Taux de criminalité
Intégration des femmes	Taux de chômage féminin	
Gouvernance	Finance et marge de manœuvre	Taux d'imposition
	Stratégies de développement durable	Réalisation de tableaux de bord
		Signature de la chartre d'Aalborg
	Citoyenneté et démocratie	Taux d'abstention aux élections municipales et régionales
Niveau d'implication des citoyens dans la décision		

L'objet de ces indicateurs est de proposer un tableau de bord minimal. Il s'agit donc davantage d'un outil pédagogique sur le développement durable que d'un outil de pilotage des politiques locales. Pour chaque indicateur est proposée une définition générale ; les limites d'utilisation de cet indicateur ainsi qu'une aide à l'interprétation permettent d'étayer la définition générale de façon critique et analytique.

## II.5. Bilan des systèmes

On peut constater que les initiatives nationales et internationales sont nombreuses et une première conclusion apparaît : il semble difficile d'utiliser exactement un système existant pour notre problématique car aucun ne répond parfaitement à nos attentes. Le système que nous présentons dans la suite du manuscrit a été établi sur la base de ces approches et en cohérence avec elles.

### II.5.a. Contexte et utilisation du système

Nous avons vu dans le premier chapitre que le développement durable peut se présenter dans sa manière la plus simple selon le triptyque social, environnemental et économique. Il serait imaginable de définir ainsi trois objectifs et leurs indicateurs associés. Pourtant, notre problématique nécessite de définir un système d'objectifs plus en adéquation avec les problématiques de l'aménagement urbain. Les objectifs à définir doivent répondre aux caractéristiques suivantes :

- **Adaptation à l'échelle du quartier et à ses défis** : nos objectifs doivent être en concordance avec les attentes des différents acteurs et en phase avec les actions possibles à cette échelle.
- **Prise en compte d'objectifs issus d'autres échelles plus vastes** : des initiatives similaires sont menées à l'échelle de la ville, du territoire ou encore à des échelles plus larges ; nos objectifs doivent pouvoir y répondre également, dans la mesure du possible.
- **Respect d'une démarche transversale, exhaustive et holistique** : le développement durable est un tout, ainsi les objectifs choisis doivent représenter l'ensemble des aspects.
- **Rôle d'évaluateur** : sans oublier le rôle fondamental qui est d'évaluer les impacts ou incidences des choix réalisés.
- **Utilisable par tous**, c'est-à-dire par les aménageurs, mais également par les acteurs politiques locaux et compréhensible par les habitants ou futurs habitants.
- **Autres rôles potentiels** présentés au paragraphe I.1 page 60 : faire comprendre la notion de développement durable, impliquer les acteurs et résoudre les conflits.

### II.5.b. Quid du coût et de la dimension économique ?

La dimension économique revêt un caractère particulier dans le domaine de la construction. Un aspect à prendre en compte concerne le développement économique du quartier : l'évaluation doit, dans la mesure du possible, inclure la manière dont l'aménagement du quartier influera sur l'économie locale. D'un autre côté, il paraît difficilement envisageable de prendre en compte les problèmes de pauvreté ou le taux de chômage lors de la conception urbaine du bâti d'un quartier.

Le débat concerne alors la rentabilité ou la viabilité économique d'un projet. Nous avons décidé de ne pas inclure cet aspect dans l'approche écocentrique du développement durable que nous avons choisi. L'approche écocentrique signifie donner la priorité à la protection de la vie de tous les êtres humains, à la différence de l'approche anthropocentrique qui vise la maximisation des indicateurs économiques (Sébastien et Brodhag 2004). Le coût est cependant un élément indispensable de prise de décision et l'omettre signifierait rendre incomplète l'évaluation. L'inclusion d'indicateurs de coût de construction, d'aménagement ou d'entretien dans le processus d'évaluation des projets n'entraîne pas de risque de stratégie non coopérative, c'est-à-dire de les utiliser comme critères dominants (Brunner et Starkl 2004), car nous basons notre démarche sur l'implication et la bonne volonté de tous. Cependant, s'agissant du coût global du projet, "l'optimum économique d'un projet urbain résulte plus de la cohérence des choix vis à vis de nombreuses contraintes que de la nature technique intrinsèque de la solution retenue" (Gobin 2005). Nous n'avons donc pas d'objectif purement économique recensant l'ensemble des coûts induits lors de l'aménagement du quartier, mais nous avons décidé d'inclure des indicateurs économiques au sein des différents objectifs.

### III. Présentation du système d'objectifs

Le système d'objectifs a été décidé par l'ensemble des partenaires du projet ADEQUA (Cherqui et al. 2005b), ces derniers représentant plusieurs disciplines et plusieurs métiers. Il est basé sur le modèle PSR, car malgré ses points faibles, celui-ci représente un cadre très largement utilisé par les systèmes auxquels nous nous référons.

Nous limitons volontairement le nombre d'objectifs et d'indicateurs, afin d'offrir une vision compacte et compréhensive ; cette approche est soutenue par de nombreux auteurs (Jesinghaus 1999; Dhakal 2002; Lopez-Ridaura et al. 2002; Ronchi et al. 2002).

Les huit objectifs du système sont présentés ci-dessous.

Conformément à nos domaines de compétence et à l'objet de cette thèse, ces objectifs ne seront pas tous traités dans ce manuscrit. Dans la suite, nous mobilisons nos ressources pour mettre en place l'évaluation des objectifs suivants :

- Préserver les ressources
- Préserver l'écosystème
- Améliorer la qualité des ambiances
- Préserver la santé et gérer les risques

Le travail d'évaluation des autres objectifs suit la même démarche, seul les compétences permettant d'établir les indicateurs et leur mode d'évaluation diffèrent. Nous proposons, pour les autres objectifs, des premières pistes de réflexion ainsi que des références vers la littérature.

#### III.1. Préserver les ressources (RES)

La préservation des ressources est indispensable si l'on souhaite offrir aux générations futures la possibilité de répondre à leurs besoins. Le principe de précaution nous impose de considérer pour le futur des modes de production et de consommation proches des modes actuels. Les ressources concernées sont l'eau, l'énergie, le sol et les autres ressources abiotiques épuisables.

Concernant l'énergie, ce n'est elle qui s'épuise, mais les matières premières servant à sa production, cependant sa préservation est nécessaire car les réseaux actuels permettent de distribuer spatialement en dehors du quartier, toute énergie non consommée.

Pour ce qui est des ressources épuisables, nous portons notre attention uniquement sur les ressources abiotiques, par opposition aux ressources biotiques qui "concerne la vie". Nous ne prenons en effet pas en compte la faune et la flore car leur préservation concerne deux autres objectifs : la préservation de leur milieu est incluse dans l'objectif suivant nommé "Préserver les écosystèmes" et la préservation des espèces végétales et animales elles-mêmes est incluse dans l'objectif "prendre en compte le patrimoine" (et plus spécifiquement le patrimoine naturel).

Les ressources abiotiques (matières premières épuisables) sont, pour la problématique de l'aménagement urbain, les matériaux de construction et les combustibles.

Cet objectif recense des indicateurs qui dépassent le cadre des impacts locaux, comme par exemple le caractère épuisable d'un matériau. En effet, bien que la portée de certains impacts

soit nationale ou même planétaire, l'action doit se faire à une échelle locale. Si chaque individu économise une goutte d'eau, c'est un océan d'eau douce qui est préservé.

### III.2. Préserver l'écosystème (ECO)

L'écosystème signifie "l'ensemble des êtres vivants et des éléments non vivants" (Larousse 1996). Sa préservation signifie respecter et protéger la faune et la flore, et minimiser les risques pour cet environnement.

Cet objectif regroupe les indicateurs mesurant les émissions de gaz nocifs pour l'écosystème, directement ou indirectement, par exemple le CO<sub>2</sub> ou le SO<sub>2</sub>. Il concerne également les déchets ultimes, i.e. restant après tri, recyclage et incinération.

De même que pour les indicateurs de l'objectif précédant (RES), l'échelle de certains impacts est bien plus vaste que celle du quartier, c'est le cas par exemple de l'effet de serre.

Nous précisons que nous écartons les indicateurs en rapport avec la destruction de la couche d'ozone car la réglementation en vigueur mène déjà à l'interdiction de tout matériau ou fluide conduisant à l'émission de gaz nocifs, suite à la ratification du protocole de Montréal (Sarma et al. 2000) par la France en 1998, aussi nous considérons que ce problème ne relève plus de décisions à l'échelle du quartier.

### III.3. Améliorer la qualité des ambiances (AMB)

Le rôle du bâtiment, a évolué au cours des siècles. Initialement, le bâtiment avait pour uniques fonctions d'abriter et de protéger des agents extérieurs. Grâce, aux progrès, ses fonctions se sont multipliées et le bâtiment, le quartier ou la ville doivent maintenant garantir aux usagers une qualité d'ambiance convenable aussi bien à l'intérieur des bâtiments que dans les espaces extérieurs.

L'ambiance est caractérisée par des paramètres liés à l'air comme sa qualité ou sa température et à l'environnement de l'usager : visibilité, espace disponible, etc.

### III.4. Préserver la santé et gérer les risques (RIS)

En 1987, lors d'un colloque tenu à la Sorbonne, est apparu le terme "cindynique" qui signifie "la science qui étudie les risques"<sup>15</sup>. La cindynique s'intéresse plus particulièrement aux risques industriels et plus spécifiquement aux risques majeurs. Ce fait est révélateur d'une préoccupation nouvelle, qui se retrouve de plus en plus dans les nombreux systèmes d'indicateurs. Nous proposons donc d'intégrer à notre démarche la mesure et la maîtrise des risques technologiques et naturels pour les personnes, les biens et l'environnement.

Dans cet objectif, nous incluons également la santé des personnes et leur sécurité, deux thèmes en rapport avec l'aspect social et proches par certains points de vue de la gestion des risques.

### III.5. Prendre en compte le patrimoine (PAT)

L'aménagement d'un quartier doit également se faire dans le respect, la préservation, le développement et la mise en valeur du patrimoine existant ou en construction. Le terme

---

<sup>15</sup> Voir <http://fr.wikipedia.org/wiki/Cindynique>

patrimoine est ici utilisé dans son sens large : patrimoine culturel, religieux, architectural, vernaculaire, historique et naturel.

Le lecteur trouvera ci-dessous un ensemble d'indicateurs en rapport avec les différentes typologies de patrimoine à respecter, préserver et développer :

- Patrimoine culturel, religieux, architectural, vernaculaire ou historique : nombre de monuments inscrits et classés, respect du patrimoine existant, intégration de la mémoire, amélioration de l'intégration au site,
- prise en compte du patrimoine existant dans le projet du point de vue urbanistique et architectural,
- Patrimoine naturel : protection des espèces menacées et non menacées présentes sur le site, respect des zones protégées et des zones d'habitat des espèces, protection des cheminements des espèces (par ex. zones de haltes lors des migrations, corridors écologiques), conservation et valorisation du paysage naturel (montagne, plage et mer, forêts, parcs), proportion d'espace vert naturel et plantés, liaisons vertes, biodiversité des plantes et des espèces, adaptation des essences de plantes avec le climat local.

La littérature proposée concerne majoritairement le patrimoine naturel (Condon et al. 2002; European Commission 2002; Gomez-Sal et al. 2003; Mendoza et Prabhu 2003; Bornarel et al. 2004; Costa et al. 2004; Hammerl et Everts 2004; Carfantan et al. 2005).

Les aspects de desserte et de visibilité du patrimoine sont respectivement pris en compte dans les objectifs de mise en valeur de la place du quartier et d'amélioration de la qualité des ambiances.

### III.6. Favoriser le développement local (LOC)

Il est également souhaitable d'encourager le développement local du quartier, aussi bien du point de vue économique que culturel, éducatif ou social ; grâce à un urbanisme pensé.

Cet objectif regroupe un ensemble d'aspects variés, son évaluation nécessite l'utilisation d'indicateurs dont la majorité sont recensés dans la littérature (Owens 1986; ARENE 2001; Condon et al. 2002; Equiterre 2002; European Commission 2002; Martin-Houssart et Tabard 2002; McMahon 2002; Ayong Le Kama et al. 2004; Bornarel et al. 2004; Hammerl et Everts 2004; Peuportier 2004; Carfantan et al. 2005; CERQUAL 2005b).

Les indicateurs proposés traitent du tourisme, de l'utilisation d'énergies renouvelables, du partage de l'espace, de la propreté du quartier, de la cohérence économique et environnementale, de l'accessibilité des personnes à mobilité réduite, de la maîtrise du développement, de réductions des coûts, d'éducation, de la flexibilité d'utilisation des bâtiments et de l'attribution de fonctions attractives à certains bâtiments (rôle public ou commercial).

Nous restons bien sûr dans le domaine de la construction ou réhabilitation d'un quartier et ne prenons donc pas en compte les indicateurs concernant l'emploi ou les revenus par exemple.

Un aspect important du développement local d'un quartier concerne la gestion des transports et des déplacements urbains : cet aspect nécessite plusieurs indicateurs en rapport avec les différents modes de transport, la mise en valeur des modes alternatifs dits "doux", l'accessibilité depuis les habitations aux lieux de travail, de détente, de commerces et de service, la gestion des stationnements en fonction des différents modes.

Les liaisons vertes sont prévues dans l'objectif prendre en compte le patrimoine.

### III.7. Renforcer la vie sociale (SOC)

L'objectif de renfort de la vie sociale dans le quartier peut être atteint par la conjonction de moyens hétéroclites tels que la mixité sociale, fonctionnelle, générationnelle, le logement social, l'accession à la propriété, la recherche de l'acceptation du quartier par les (futurs) habitants ou la création de lieux de vie et de rencontre. Contrairement à d'autres systèmes d'indicateurs, nous considérons que la mixité sociale n'est pas un objectif à atteindre mais un moyen d'atteindre les objectifs sociaux.

La grande majorité de la littérature relative à ces nombreux aspects a déjà été citée lors des objectifs précédents.

### III.8. Mettre en valeur la place du quartier dans la ville (VAL)

Le quartier doit être appréhendé comme un élément d'une ville, ainsi son intégration doit être en relation avec des échelles plus larges. Les Eco Maires expriment clairement cet objectif lorsqu'ils parlent "d'assurer l'intégration et la cohérence du quartier avec le tissu urbain et les autres échelles de territoire" (Eco Maires 2005).

Cet objectif est complémentaire de l'objectif "favoriser le développement local du quartier" ; tous les deux ont une haute importance politique sur l'avenir du quartier et son évolution. La mise en valeur de la place du quartier dans la ville peut se diviser selon plusieurs aspects majeurs :

- L'impact du développement du quartier sur les quartiers voisins : acceptation du quartier par les riverains, droit au soleil et à la visibilité, cohérence urbanistique et architecturale,
- Les interactions avec les quartiers voisins : existence de pôles communs (école, bibliothèque, magasin), déplacements inter quartiers, mobilité professionnelle, utilisation commune d'énergie (réseaux de chaleur),
- Valorisation de l'identité propre du quartier : développement de spécificités au niveau de la ville, autonomie relative au niveau des services et commerces de proximité, protection contre la voirie urbaine de transit.

## IV. Synthèse

Ce chapitre nous a permis de définir les caractéristiques attendues des indicateurs, et de prendre connaissance des systèmes existants. Il n'existe actuellement pas à notre connaissance de système permettant de répondre directement et de manière adaptée à notre problématique d'aménagement d'un quartier, aussi nous avons choisi de définir notre propre système d'objectifs puis d'indicateurs. Les huit objectifs du projet ADEQUA se veulent en accord avec les autres projets, les stratégies nationales et la politique européenne.

Concernant les objectifs, les deux premiers (RES et ECO) correspondent au pilier environnemental du développement durable. Puis les objectifs AMB et RIS concernent les personnes, leur bien-être, leur santé et leur sécurité. Ces préoccupations apparaissent dans de nombreux systèmes et ont une importance considérable quelque soit l'échelle envisagée. Les trois objectifs suivant (PAT, LOC et SOC) abordent principalement les aspects socio-économiques du quartier. Le dernier objectif (VAL) nous est apparu indispensable pour servir de liaison entre le quartier et la ville à laquelle il appartient.

Ces huit objectifs permettent la représentation des alternatives d'un projet, à partir d'indicateurs que nous présentons dans le chapitre suivant.

## CHAPITRE 4 : Gestion des indicateurs associés aux objectifs

Dans la continuité de ce travail, nous étudions dans ce chapitre le coeur de la méthode : les indicateurs. Nous nous focalisons sur les indicateurs associés aux objectifs correspondant à nos domaines de compétence : la préservation des ressources, la préservation de l'écosystème, l'amélioration de la qualité des ambiances, la préservation de la santé et la gestion des risques. Pour chaque objectif, nous proposons un ensemble d'indicateurs ; ces indicateurs sont justifiés, décrits, une méthode de calcul est proposée ainsi qu'une valeur de référence.

Pour la définition des indicateurs, nous avons tenté de respecter les critères proposés par la littérature et énoncés au paragraphe I.2 du chapitre 3.

Certains aspects nous apparaissent indispensables : mesure, utilité, clarté et représentativité. D'autres aspects comme le comportement (sensibilité, robustesse, etc.) ne sont pas encore définissables pour tous les indicateurs et seule la pratique et les retours d'expérience pourront offrir une vision plus précise.

## I. Introduction

### I.1. Quantification des indicateurs

Il est fondamental que chaque indicateur soit scientifiquement valide et techniquement mesurable. Aussi les indicateurs ont été choisis à partir d'une réflexion générale sur les outils disponibles actuellement. Le chapitre suivant, consacré à l'application de cette méthodologie, présente des exemples d'outils répondant à ces attentes. La liste d'outils utilisables est assez conséquente (US department of energy 2004) et ils sont nombreux à offrir les mêmes fonctionnalités. Notre réflexion n'est donc pas uniquement portée sur l'existence ou la disponibilité immédiate de l'outil, mais également sur les capacités et la fiabilité des modèles utilisés, l'adaptation à la France (par exemple pour l'analyse du cycle de vie), les combinaisons de logiciels possibles (évitant la double entrée de données) et enfin le support technique ou plutôt les possibilités d'échange avec le développeur.

Ce choix ne sera pas forcément identique pour tous, ainsi la méthode est distincte des outils étudiés.

### I.2. Normalisation des indicateurs

La représentation que nous avons choisie, le diagramme radar, nécessite la définition d'une référence. Cette référence permet de normaliser l'indicateur et ainsi de le représenter sur une échelle allant de 0 à 1. La valeur maximale de 1 étant située en périphérie du diagramme. Cette normalisation offre également l'avantage, en adaptant la formule de calcul de chaque indicateur, d'obtenir le même sens de variation. En effet, certains indicateurs sont du type "plus c'est mieux" (par exemple la quantité d'ensoleillement reçu dans les parcs) et d'autres sont du type "moins c'est mieux" (par exemple les émissions de CO<sub>2</sub>). Les termes "plus c'est mieux" et "moins c'est mieux" sont une traduction des termes "more is better" et "less is better" proposés par Diaz-Balteairo et Romero (2004).

Boulanger (2004) recense plusieurs méthodes de normalisation :

- La normalisation statistique : expression de toutes les valeurs en écart-types après avoir transformé les variables de sorte que la moyenne de l'ensemble des valeurs soit égale à zéro. Les inconvénients sont la nécessité de recalculer à chaque nouvelle observation la moyenne et l'absence de comparaison possible entre quartiers
- La moyenne empirique : le choix de la valeur permettant la normalisation est effectué empiriquement ; cela peut être par exemple la valeur d'une année de référence ou la valeur maximale que peut prendre l'indicateur (si elle est connue). Le risque est qu'une nouvelle valeur "déborde" cette limite et que la valeur de l'indicateur normalisé soit supérieure à 1.
- La normalisation axiologique : la démarche est également empirique à la différence près que les valeurs sont choisies en fonction du contexte d'action ou d'évaluation, on attribue 0 à la situation la pire et 1 à la situation considérée idéale. La difficulté est également de connaître ces valeurs extrêmes.
- La normalisation mathématique : on applique une fonction mathématique pour borner l'indicateur entre 0 et 1 ou -1 et +1 par exemple. Lors de cette normalisation, il convient d'être conscient des conséquences qui sont la déformation de la distribution originale et le manque de transparence.

La méthode de normalisation qui semble la plus adéquate à notre problématique est la normalisation axiologique afin de faire correspondre la périphérie du diagramme radar aux valeurs optimums. Nous proposons des valeurs de référence correspondant à la meilleure situation, cependant ces valeurs n'existent pas en réalité ou plutôt elles ne sont jamais les mêmes pour chaque situation. Prenons par exemple les émissions de gaz à effet de serre ; l'indicateur non normalisé sera le poids émis en kilogramme équivalent de CO<sub>2</sub> et l'optimum est... de ne pas émettre de CO<sub>2</sub>. Mais cet optimum n'est pas réaliste et avec cette normalisation nos valeurs seront toujours proches de 0. De même, quelle est la valeur la plus pessimiste ? Nous proposons dans ces cas une valeur de référence empirique basé sur une estimation de la valeur "moyenne" et optimisée de manière réaliste. Si nous reprenons le cas des émissions de CO<sub>2</sub>, la formule de normalisation de l'indicateur sera :

$$I_{\text{GWP}} = \frac{\text{idéal actuel à atteindre en kg.eq}_{\text{CO}_2} \text{ par habitant et par an}}{\text{émissions de gaz à effet de serre en kg.eq}_{\text{CO}_2} \text{ par habitant et par an}} \quad (\text{IV.1.1})$$

La référence choisie (ou idéal actuel) peut correspondre par exemple à une amélioration de 30 % par rapport à la valeur moyenne. Ce mode de calcul permet de garder une valeur toujours positive.

Dans le cas où la valeur de référence est atteinte par un projet, il convient de fixer un nouveau seuil, un nouvel objectif comme valeur de référence. Les nombreuses utilisations de cette méthode permettront de définir de meilleures références, voire même d'adapter la référence aux particularités du quartier.

Après la présentation des différents indicateurs associés aux objectifs, nous proposerons des références pour la normalisation de chaque indicateur.

### I.3. Indicateurs associés à chaque objectif

Les indicateurs choisis sont basés sur le modèle PSR, en accord avec la réflexion menée dans le chapitre 3 (paragraphe I.3). La majorité des indicateurs actuellement définis sont des indicateurs de pression comme par exemple la quantité d'eau consommée. Les autres indicateurs sont des indicateurs d'état (par ex. l'espace intérieur disponible par habitant).

Conformément à nos ambitions, nous avons réduit au maximum le nombre d'indicateurs, afin de limiter le temps nécessaire d'utilisation de la méthode et d'éviter les contradictions, et enfin de gagner en simplicité et en clarté. L'utilisateur expert peut cependant ajouter des indicateurs s'il le souhaite ; cette méthode se veut modulaire et évolutive.

Le calcul de certains indicateurs nécessite d'agréger différents critères pour arriver à une note unique par indicateur : avant de présenter les différents indicateurs et leur mode de calcul, nous présentons la méthode retenue pour agréger ces critères.

## II. Agrégation des données

### II.1. Agrégation complète

Pour obtenir une note par indicateur, il s'agit maintenant d'agréger l'ensemble des critères associés à l'indicateur. D'après la littérature (Roy et Bouyssou 1993; Maystre et al. 1994; Pictet 1996; Ben Mena 2000; André et al. 2003; Molines 2003), notre problématique correspond à l'*agrégation complète* ou *approche du critère unique de synthèse*; c'est-à-dire l'inclusion de l'ensemble des données dans une formule mathématique en vue de l'obtention d'une valeur unique. Cela suppose de choisir quels poids attribuer à chaque donnée, comment combiner ces critères en un indicateur (par une somme, un produit ou une opération plus complexe) et cela suppose également que tous les jugements soient commensurables.

#### II.1.a. Choix des coefficients de pondération

Le chapitre 2 paragraphe II.3.c récapitule l'ensemble des méthodes de pondération utilisables lors de l'analyse multicritères. Parmi ces méthodes, nous avons choisi la comparaison par paire pour sa facilité d'usage, la possibilité de l'implémenter dans un fichier de tableur et surtout pour sa capacité à fournir un protocole de vérification de la cohérence des comparaisons entre critères. L'inconvénient majeur est l'absence de transparence car le mode de calcul des poids de chaque critère reste assez complexe, bien que les choix demandés à l'utilisateur soient simples.

La méthode de comparaison par paire choisie est l'Analytical Hierarchy Process développée par Saaty (1977) et depuis très largement utilisée. Nous présentons ici cette méthode qui se décompose en quatre étapes : hiérarchisation des critères par importance du plus important au moins important, construction d'une matrice à partir de la comparaison deux à deux des critères, détermination des poids associés à chaque critère grâce à une méthode approchée de calcul des vecteurs propres et enfin vérification de la consistance du résultat.

- Hiérarchisation des critères par importance

Soit  $C_1 \dots C_i \dots C_n$  l'ensemble des critères dont on recherche le coefficient de pondération. La hiérarchisation doit aboutir à un classement dans lequel  $C_1$  est plus important que  $C_{i-1}$  qui est plus important que  $C_i$  et ainsi de suite jusqu'à  $C_n$  qui sera le critère de moindre importance. La relation d'importance définie ici n'est pas stricte, cela signifie que  $C_{i-1}$  est aussi important ou plus important que  $C_i$ .

- Comparaison deux à deux des critères

Soit  $w_i$  le poids du critère  $C_i$ . La comparaison par paire des critères conduit à définir le degré d'importance d'un critère par rapport à l'autre en fonction du Tableau 17.

**Tableau 17 : Echelle d'importance entre indicateurs (Saaty 1977)**

Intensité de l'importance	Définition	Explication
1	Importance égale	Les deux indicateurs contribuent identiquement à l'objectif
3	Faible importance de l'un sur l'autre	L'expérience et le jugement favorisent légèrement un indicateur sur l'autre
5	Importance essentielle ou forte	L'expérience et le jugement favorisent fortement un indicateur sur l'autre
7	Importance démontrée	Un indicateur est fortement favorisé et sa prépondérance est démontrée
9	Importance absolue	Il est évident qu'un indicateur doit être favorisé au maximum
2, 4, 6, 8	Valeurs intermédiaires entre deux jugements adjacents quand un compromis est nécessaire	

Par exemple si le critère  $C_i$  à une importance essentielle par rapport au critère  $C_j$ , alors le rapport  $w_i/w_j$  sera égal à 5.

En comparant entre eux chacun des critères, on obtient la matrice suivante :

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & \dots & a_{1i} & a_{1j} & \dots & a_{1n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{i1} & \dots & a_{ii} & a_{ij} & \dots & a_{in} \\ a_{j1} & \dots & a_{ij} & a_{jj} & \dots & a_{jn} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & \dots & a_{ni} & a_{nj} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} \text{ avec } a_{ij} = \frac{w_i}{w_j} \text{ et } a_{ii} = 1$$

$a_{ij}$  est l'intensité de l'importance de  $C_i$  sur  $C_j$  et  $w_i$  le coefficient de pondération associé à  $C_i$ .

- Détermination des poids associés à chaque critère

Ensuite, on recherche le vecteur des coefficients de pondération  $W = \{w_1 \dots w_i \dots w_n\}$ . Pour ce faire, on divise chaque  $a_{ij}$  par la somme des valeurs de la colonne correspondante et ensuite on effectue une moyenne par ligne, soit l'opération mathématique suivante, équation (IV.2.1) :

$$W = \begin{bmatrix} \frac{\frac{a_{11}}{\sum_{k=1}^n a_{k1}} + \dots + \frac{a_{1i}}{\sum_{k=1}^n a_{ki}} + \dots + \frac{a_{1n}}{\sum_{k=1}^n a_{kn}}}{n} \\ \dots \\ \frac{\frac{a_{i1}}{\sum_{k=1}^n a_{k1}} + \dots + \frac{a_{ii}}{\sum_{k=1}^n a_{ki}} + \dots + \frac{a_{in}}{\sum_{k=1}^n a_{kn}}}{n} \\ \dots \\ \frac{\frac{a_{n1}}{\sum_{k=1}^n a_{k1}} + \dots + \frac{a_{ni}}{\sum_{k=1}^n a_{ki}} + \dots + \frac{a_{nn}}{\sum_{k=1}^n a_{kn}}}{n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\sum_{l=1}^n \left[ \frac{a_{1l}}{\sum_{k=1}^n a_{kl}} \right]}{n} \\ \dots \\ \frac{\sum_{l=1}^n \left[ \frac{a_{il}}{\sum_{k=1}^n a_{kl}} \right]}{n} \\ \dots \\ \frac{\sum_{l=1}^n \left[ \frac{a_{nl}}{\sum_{k=1}^n a_{kl}} \right]}{n} \end{bmatrix} \tag{IV.2.1}$$

Donc chaque coefficient  $w_i$  est obtenu par la formule (IV.2.2) :

$$w_i = \frac{\sum_{l=1}^n \left[ \frac{a_{il}}{\sum_{k=1}^n a_{kl}} \right]}{n} \tag{IV.2.2}$$

Et la somme des  $w_i$  doit être égale à 1.

- Vérification

On définit les vecteur  $[\lambda'_1 \dots \lambda'_i \dots \lambda'_n]$  et  $[\lambda_1 \dots \lambda_i \dots \lambda_n]$  tel que :

$$\begin{bmatrix} \lambda'_1 \\ \dots \\ \lambda'_i \\ \dots \\ \lambda'_n \end{bmatrix} = \sum_{k=1}^n w_k * \begin{bmatrix} a_{1k} \\ \dots \\ a_{ik} \\ \dots \\ a_{nk} \end{bmatrix} = w_1 * \begin{bmatrix} a_{11} \\ \dots \\ a_{i1} \\ \dots \\ a_{n1} \end{bmatrix} + \dots + w_i * \begin{bmatrix} a_{1i} \\ \dots \\ a_{ii} \\ \dots \\ a_{ni} \end{bmatrix} + \dots + w_n * \begin{bmatrix} a_{1n} \\ \dots \\ a_{in} \\ \dots \\ a_{nn} \end{bmatrix} \quad (IV.2.3)$$

Et 
$$\lambda'_i = \frac{\lambda'_i}{w_i} \quad (IV.2.4)$$

Puis 
$$\lambda_{\max} = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda'_i}{n} \quad (IV.2.5)$$

L'index de consistance CI est alors :

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (IV.2.6)$$

Ensuite, pour calculer le ratio de consistance CR, on divise l'index de consistance par une valeur RI dépendant du nombre de critères n et donnée dans le Tableau 18.

**Tableau 18 : Valeur du coefficient RI (Al-Harbi 2001)**

Taille de la matrice (n)	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (IV.2.7)$$

L'attribution des poids est jugée acceptable si CR est inférieur à 0,1. Dans le cas contraire, la procédure doit être de nouveau appliquée. Le vecteur  $\lambda'_i$  maximum indique la ligne dans laquelle il y a un problème avec un coefficient  $a_{ij}$ . Si plusieurs coefficients sont en cause, l'erreur devient plus difficile à localiser.

### II.1.b. Choix du mode d'agrégation

Pour l'agrégation complète, les méthodes disponibles sont : la comparaison par paire avec principalement l'AWP (Saaty 1977) ou MACBETH (Bana e Costa et al. 2003), la Théorie d'Utilité Multi-Attribut ou MAUT (Keeney et Raiffa 1976) cité par (Dodgson et al. 2005), l'addition linéaire (Dodgson et al. 2005) ou toute fonction mathématique comme par exemple celle développée par Nassar et al. (2003).

La MAUT est inapplicable ici car le problème est trop complexe pour établir des fonctions d'utilité aux indicateurs. L'agrégation des critères nécessite une grande clarté et simplicité de réalisation, c'est pourquoi nous avons opté pour l'addition linéaire qui est également une des

méthodes les plus utilisées. La normalisation des critères permet de réduire les inconvénients de compensation entre critères ou d'effet d'échelle.

Notre démarche est proche de la démarche proposée par Krajnc et Glavic (2005) qui ont proposé un "index de développement durable composite" jugeant des performances des entreprises. Cet index est divisé entre trois sous index (économie, environnement et social) et chaque sous index est évalué par la somme pondérée d'indicateurs normalisés. Nous n'avons cependant pas choisi d'agrèger les indicateurs entre eux ; il semble en effet difficile d'additionner des critères de nature différente.

Ainsi la valeur associée à l'indicateur  $I_j$  composé des critères  $\{C_1, \dots, C_i, \dots, C_n\}$  sera donnée par l'équation (IV.2.8) :

$$I_j = \sum_{i=1}^n [w_i * C_i] \quad (\text{IV.2.8})$$

Avec  $w_i$  le coefficient de pondération du critère  $C_i$  calculé par l'AHP. Cette valeur sera bornée entre 0 et 1 étant donné que l'ensemble des critères et des poids sont positifs et inférieurs ou égaux à 1.

## II.2. Méthode d'agrégation choisie

Nous proposons donc de calculer les poids des critères par la méthode de l'AHP puis d'agrèger les critères grâce à une somme pondérée, comme le montre l'équation (IV.2.8).

L'AHP, bien que couramment utilisée (Cloquell-Ballester et al.; Al-Harbi 2001; Al Khalil 2002; Nassar et al. 2003; Hill et al. 2005; Moffett et al. 2005), présente certaines limitations d'après la littérature (Belton et Gear 1983; Belton et Gear 1985; Dyer et Wendel 1985; Dyer 1990; Hajkowicz et Prato 1998; Dodgson et al. 2005) citée par (Al-Harbi 2001; Molines 2003; Moffett et al. 2005). On peut les résumer ainsi :

- Les pondérations sont attribuées indépendamment de l'échelle de variation des indicateurs. Deux indicateurs peuvent avoir la même pondération alors que l'un a une plus grande amplitude de variation.
- L'introduction de nouveaux indicateurs change l'importance relative de chaque indicateur et une inversion de rang peut se produire.

Harker et Vargas (Harker et Vargas 1987) et Perez (Perez 1995) ont cependant discuté ces critiques et prouvé à partir d'un travail théorique et des exemples qu'elles ne sont pas valides.

L'utilisation de l'AHP nous paraît indispensable car c'est la seule méthode offrant la possibilité de vérifier la cohérence des coefficients de pondération attribués à chaque critère.

### III. Objectif "Préserver les ressources" (RES)

Les ressources concernées sont l'eau, l'énergie, le sol et les autres ressources abiotiques épuisables (matériaux de construction et combustibles). Un indicateur est défini pour chaque type de ressource.

Le calcul de chaque indicateur prend en compte actuellement uniquement les bâtiments et le comportement des habitants. Le calcul de la part des consommations dues aux collectivités (par exemple la consommation d'eau pour le nettoyage des voiries ou l'arrosage public) est en cours de développement par le CEP de l'Ecole des Mines de Paris. Cette limitation ne supprime cependant pas la possibilité de faire des économies au niveau du patrimoine bâti, qui est la principale source de consommation d'eau (Figure 32) et d'énergie (Tableau 19).

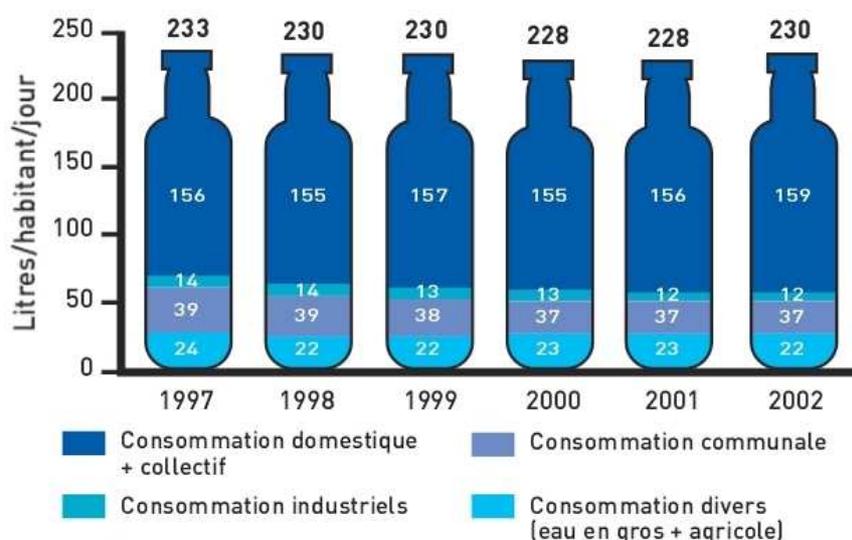


Figure 32 : Consommation totale d'eau potable du Grand Lyon (Le Grand Lyon 2004a)

L'exemple du Grand Lyon nous montre que la consommation d'eau à usage domestique et collectif représente environ 69 % de la consommation totale<sup>16</sup>. Cette valeur semble en cohérence avec d'autres collectivités, cependant à notre connaissance, il existe peu de statistiques sur la consommation d'eau des communes et nous n'avons pas trouvé de statistiques nationales.

Tableau 19 : Consommation énergétique des communes (Meziere et Theveniaud 2002)

	< 2.000 hab.	2.000 à 9.999 hab.	10.000 à 49.999 hab.	≥ 50.000 hab.	TOTAL
<b>Bâtiments</b>	72%	74%	75%	75%	74%
<b>Éclairage public</b>	20%	19%	16%	16%	18%
<b>Carburants</b>	8%	7%	9%	9%	8%
<b>Tous postes</b>	100%	100%	100%	100%	100%

Le tableau ci-dessus, provient de statistiques établies par la SOFRES en partenariat avec l'ADEME, l'AITF, l'ATTF, EDF et GDF. Il présente les grands postes concernant la consommation énergétique propres aux communes uniquement, c'est-à-dire que ces chiffres ne prennent pas en considération les consommations énergétiques des habitations ou

<sup>16</sup> La consommation d'eau potable est considérée uniquement en ville : dans l'absolu, le secteur agricole représente de l'ordre de 80% de la consommation potable de la France.

commerces. Le poste carburant représente la consommation énergétique en carburant utilisé par les véhicules communaux. On peut constater que quelque soit la taille de la commune, la proportion de la consommation énergétique des bâtiments communaux (écoles, piscines, équipements sportifs, bâtiments administratifs, locaux techniques, équipements socioculturels) est supérieure à 70 % de la consommation totale de la commune.

Comme nous calculons la consommation énergétique totale l'ensemble du bâti (habitation + tertiaire + bâtiments communaux), nous considérons prendre en compte la grande majorité de la consommation énergétique du quartier. La part de la consommation non prise en compte est difficilement quantifiable étant donné le faible nombre de statistiques sur la consommation énergétique des quartiers.

### III.1. Energie

Cet indicateur représente la consommation énergétique du quartier. Il est calculé en fonction de la consommation de chaque type d'énergie convertie en énergie primaire afin de "pouvoir prendre en compte différents types d'énergie distribués sur une base homogène". Pour chaque joule d'énergie utilisée, l'énergie primaire nécessaire pour sa production est détaillée dans le Tableau 20, cette énergie primaire prend en compte la production d'énergie depuis les phases amont d'extraction des combustibles (comme le pétrole ou l'uranium) ou d'autre ressources (hydroélectricité par exemple).

**Tableau 20 : Equivalences entre énergie utilisée et énergie primaire (Frischknet et al 1995)<sup>17</sup>**

Ressource	Unité	Energie primaire [MJ/Unité]
Lignite	kg	9,5
Charbon dur	kg	19
Energie géothermique	MJ	1
Biomasse	MJ	1
Energie cinétique (mare motrice, vent)	MJ	1
Energie potentielle de l'eau (barrage hydraulique)	MJ	1
Energie solaire	MJ	1
Gaz de mine	kg	39,8
Gaz de pétrole	Nm <sup>3</sup>	45
Gaz naturel	Nm <sup>3</sup>	39
Uranium	kg	900 000
Pétrole brut	kg	45 600
Bois de forêt sec	t	20 300

Et pour la production d'électricité, le mix retenu est de 78% d'énergie nucléaire, 14% d'hydroélectrique, 4% de gaz et 4% de charbon.

Et l'indicateur  $I_{\text{energie}}$  normalisé sera donc :

$$I_{\text{energie}} = \left( I_{\text{energie}}^{\text{ref}} \right) / \left( \frac{\text{consommation d'énergie primaire [kWh]}}{N_{\text{hab}} * T_{\text{etude}}} \right) \quad (\text{IV.3.1})$$

Avec  $N_{\text{hab}}$  le nombre d'habitants du quartier et  $T_{\text{etude}}$  la période d'étude choisie (par défaut nous prenons 100 ans). La valeur de référence  $I_{\text{energie}}^{\text{ref}}$  permettant de normaliser l'indicateur est donnée dans le Tableau 25 page 112.

La consommation d'énergie renouvelable n'est pas soustraite de la consommation d'énergie totale pour différentes raisons :

<sup>17</sup> Cité par (Peuportier 2003)

- Les effets bénéfiques de l'utilisation d'énergies renouvelables sont pris en compte par une réduction des émissions (objectif ECO), une indépendance énergétique accrue (objectif LOC) et la réduction de la consommation des ressources abiotiques (ci-dessous).
- L'objectif est de construire un quartier avec des bâtiments qui consomment peu d'énergie ; l'énergie la moins chère est celle que l'on ne consomme pas.
- Cet objectif encourage la réflexion au niveau de l'enveloppe des bâtiments et des masques entre bâtiments. La réflexion sur les systèmes doit venir ensuite et non pas initialement.

### III.2. Eau

L'indicateur  $I_{eau}$  mesure la quantité d'eau consommée au niveau du quartier pour le cycle de vie complet des bâtiments du quartier. Cela inclut également la consommation domestique des habitants.

Si l'utilisateur le souhaite, il peut soustraire la quantité d'eau récupérable par la mise en place de systèmes de récupération sur les toits. La quantité d'eau récupérable [ $m^3/an$ ] peut se calculer en fonction du produit de la surface de toiture disponible [ $m^2$ ] par la pluviométrie locale [ $m^3/(m^2.an)$ ].

L'indicateur  $I_{eau}$  normalisé sera ainsi :

$$I_{eau} = (I_{eau}^{ref}) / \left( \frac{\frac{C_{eau}}{T_{etude}} - S_{toit\_recup} * (precipitations)}{N_{hab}} \right) \quad (IV.3.2)$$

Avec  $C_{eau}$  la consommation d'eau du quartier [ $m^3$ ],  $S_{toit\_recup}$  la surface de toiture [ $m^2$ ] disponible pour récupérer l'eau de pluie, (precipitations) la valeur de la pluviométrie locale exprimée en [ $m^3/(m^2.an)$ ].

### III.3. Sol

La consommation de surface équivalente de terrain est estimée grâce à la somme de chaque m<sup>2</sup> de terrain multiplié par un coefficient d'usage  $C_u$  dépendant du type de terrain. La comparaison entre la surface équivalente de terrain du projet étudié et l'état initial nous permet de connaître le changement de la valeur écologique du terrain. Le coefficient d'usage du sol varie entre 0 à 1, la valeur minimum correspond à une zone naturelle et la valeur maximum à une zone artificielle construite et sans végétation. Les valeurs des coefficients d'usage sont présentées dans Tableau 21 ci-dessous.

**Tableau 21 : Valeurs du coefficient d'usage  $C_u$  des différentes surfaces urbaines (Brentrup et al. 2002)**

Catégorie de surface	Caractéristiques principales	Coefficient d'usage $C_u$
Tissu urbain continu	Recouvert principalement par des bâtiments ou routes, 80 à 100 % de la surface étanche	0,95
Site industriel ou commercial	Principalement des surfaces artificielles sans végétation (par ex. hôpitaux, centres commerciaux, universités)	0,95
Zones portuaires	Quais, chantiers navals et infrastructures portuaires à l'exclusion des bassins d'eau	0,95
Aéroports	Pistes, bâtiments et zone végétale associée	0,90
Décharges	Décharges publiques ou industrielles partiellement végétales	0,90
Routes et réseaux ferrés	Autoroutes et routes d'une largeur minimale de 100 mètres	0,90
Tissu urbain discontinu	Bâtiments et routes, 50 à 80 % de la surface étanche accompagnée de zones végétales et de friches	0,85
Zones agricoles cultivées	Terres cultivées	0,75
Zones urbaines vertes	Zones végétales dans le tissu urbain (par ex. parcs, cimetières)	0,70
Équipements de sport et de loisirs	Par exemple campings, terrains de sport, parcours de golf	0,70
Zones agricoles d'élevage	Pâturages	0,55
Zones forestières	Forêts et landes	0,35
Plages et dunes	A l'exclusion des surfaces artificielles	0,25
Zones humides	Marécages, marais partiellement exploités	0,15

Afin d'obtenir un indicateur de consommation du sol compris entre 0 et 1, nous proposons de calculer  $I_{sol}$  à partir du rapport entre la surface équivalente initiale et la surface équivalente prévue. Etant donné que l'indicateur doit être majoré par 1 et que dans certains cas la réhabilitation d'un quartier peut conduire à augmenter la valeur écologique du terrain (par exemple transformation d'un site industriel en logements + espaces verts), nous divisons ce rapport par une référence  $I_{sol}^{ref}$ . L'indicateur de consommation du sol sera :

$$I_{sol} = \frac{1}{I_{sol}^{ref}} * \frac{\left( \sum_{i=1}^n [S_i * C_u(i)] \right)_{initial}}{\left( \sum_{i=1}^n [S_i * C_u(i)] \right)_{projet}} \text{ pour } n \text{ surfaces} \quad (IV.3.3)$$

( )<sub>initial</sub> correspond à la description des surfaces actuelles et ( )<sub>projet</sub> correspond à la description des surfaces futures si le projet se réalise tel quel.  $S_i$  est la surface  $i$  ayant un coefficient d'usage  $C_u(i)$ .

Optimiser cet indicateur signifie consommer le moins possible de sol pour construire des bâtiments ou des routes par exemple. Cet indicateur est en accord avec la recherche d'une compacité maximale pour le quartier, avec néanmoins une plus grande précision puisque le type d'utilisation du sol est considéré. L'optimum n'est pas de maximiser cette compacité : les effets négatifs d'une compacité excessive apparaîtront au niveau de l'objectif d'amélioration de la qualité des ambiances (i.e. diminution de la visibilité ou de l'ensoleillement), également au

niveau énergétique puisque les masques entre bâtiments réduiront les apports solaires en hiver et enfin ils influenceront sur la vie sociale du quartier.

### III.4. Ressources abiotiques épuisables

L'ensemble des ressources épuisables consommées est calculé à partir d'une analyse du cycle de vie des bâtiments. Le calcul peut être effectué par le logiciel EQUER (Peuportier 2001) développé par le Centre Energétique et Procédés (CEP) de l'Ecole des Mines de Paris. "L'indicateur d'épuisement des ressources d'EQUER est obtenu en additionnant les quantités de matières premières utilisées pour la fabrication du produit étudié divisées par les réserves. Il est donc sans dimension" (Peuportier et Polster 2004). Seules les ressources pouvant devenir insuffisantes dans les 100 ans à venir sont prises en considération sont présentées dans le Tableau 22.

**Tableau 22 : Ressources épuisables et réserves disponibles (Heijungs 1992)<sup>18</sup>**

Symbole	Substance	Réserves	Unité
<b>Ressources énergétiques</b>			
-	pétrole brut	123 559	Mégatonne
-	gaz naturel	109 326	10 <sup>9</sup> m <sup>3</sup>
U	uranium	1 676 820	Tonne
<b>Métaux</b>			
Cd	cadmium	0,535	Mégatonne
Cu	cuivre	350	Mégatonne
Hg	mercure	0,0057	Mégatonne
Ni	nickel	54	Mégatonne
Pb	plomb	75	Mégatonne
Sn	étain	4,26	Mégatonne
Zn	zinc	147	Mégatonne

L'indicateur normalisé de consommation des ressources abiotiques épuisables  $I_{ressources}$  est donné par la formule suivante :

$$I_{ressources} = \frac{I_{ressources}^{ref}}{\sum_{i=1}^n \left[ \frac{\text{consommation de la ressource } i}{\text{réserve de la ressource } i} \right]} \text{ pour } n \text{ ressources abiotiques épuisables (IV.3.4)}$$

<sup>18</sup> Cité par (Peuportier 2003)

## IV. Objectif "Préserver l'écosystème" (ECO)

La préservation de l'écosystème requiert de minimiser les risques pour la faune et la flore. Cela nécessite la prise en compte des impacts sur l'ensemble du cycle de vie du quartier. De même que pour l'objectif de préservation des ressources, l'analyse du cycle de vie du quartier est basée uniquement sur les bâtiments et le comportement des habitants.

### IV.1. Acidification

Les émissions des substances présentées dans le Tableau 23 entraînent des pluies acides ayant un impact sur la végétation de manière directe (altération superficielle) ou indirecte (appauvrissement du sol).

**Tableau 23 : Potentiel d'acidification des différentes substances (Peuportier 2003)**

formule	substance	AP
SO <sub>2</sub>	Dioxyde de soufre	1,0
NO	Monoxyde d'azote	1,07
NO <sub>2</sub>	Dioxyde d'azote	0,7
NO <sub>x</sub>	Oxyde d'azote	0,7
NH <sub>3</sub>	Ammoniac	1,88
HCL	Acide chlorhydrique	1,88
HF	Acide fluorhydrique	1,6

La formation de pluies acides contenant respectivement de l'acide sulfurique ou de l'acide nitrique est la conséquence de réactions chimiques entre le soufre ou des oxydes d'azote avec l'ozone de stratosphère, l'eau, l'oxygène. Ces réactions chimiques et donc l'impact des émissions dépendent également de la "concentration de fond", c'est-à-dire la concentration des autres émissions dans la même région. On parle d'impact potentiel étant donné que seuls les émissions à l'origine des pluies acides sont considérées.

Le potentiel d'acidification ou Acidification Potential (AP) est exprimé en kg équivalent de SO<sub>2</sub>.

L'indicateur d'acidification  $I_{\text{acidification}}$  sera ainsi :

$$I_{\text{acidification}} = \left( I_{\text{acidification}}^{\text{ref}} \right) / \left( \frac{\sum_{i=1}^n [E_i * AP_i]}{N_{\text{hab}} * T_{\text{etude}}} \right) \text{ pour un ensemble de } n \text{ substances émises (IV.4.1)}$$

Avec  $E_i$  l'émission de la substance  $i$  exprimée en kg et  $AP_i$  le potentiel d'acidification de la substance exprimé kg.eq<sub>SO2</sub>/kg de substance.

### IV.2. Ecotoxicité

Cet indicateur permet de prendre en compte les impacts des émissions du quartier sur la faune et la flore. Ces substances nocives proviennent des matériaux (principalement le bitume ou l'acier) et de la consommation d'énergie (principalement l'utilisation de charbon, mais pas uniquement).

Le calcul de l'écotoxicité des substances est basé sur la méthode des volumes critiques (Peuportier 2003) afin de pouvoir évaluer les effets qui dépendent de la concentration en polluants et de leur nocivité propre. Pour chaque polluant est ainsi définie une concentration

maximale tolérable  $C_m$  ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) par exemple telle que 95 % des individus du milieu considéré sont préservés. Le volume critique s'obtient alors en divisant les émissions par  $C_m$ . L'indicateur sera ensuite obtenu en sommant les volumes critiques  $V_C$  de chaque polluant.

Dans le cas de l'écotoxicité, les indices correspondants à l'inverse de  $C_m$  sont donnés pour deux milieux : ECA (Ecotoxicological Classification factor for Aquatic ecosystems) pour le milieu aquatique et ECT (Ecotoxicological Classification factor for Terrestrial ecosystems) pour le milieu terrestre. L'écotoxicité terrestre étant prise en compte par l'indicateur de toxicité humaine (objectif RIS), le calcul se base sur l'écotoxicité aquatique, l'indicateur  $I_{\text{écotoxicité}}$  sera donc :

$$I_{\text{écotoxicité}} = \left( I_{\text{écotoxicité}}^{\text{ref}} \right) / \left( \frac{\sum_{i=1}^n [E_i * ECA_i]}{N_{\text{hab}} * T_{\text{étude}}} \right) \text{ pour un ensemble de } n \text{ polluants emis (IV.4.2)}$$

Avec  $E_i$  l'émission du polluant  $i$  exprimée en  $\text{kg}$  et  $ECA_i$  l'indice d'écotoxicité aquatique du polluant exprimé  $\text{m}^3/\text{kg}$  de polluant. Les valeurs d'ECA sont disponibles dans le manuel d'utilisation du logiciel EQUER (Peuportier et Polster 2004).

### IV.3. Eutrophisation excessive ou dystrophisation

L'eutrophisation correspond à l'enrichissement d'une eau en sels minéraux (Larousse 1996), à partir des années 70, ce terme a évolué et actuellement il est employé pour définir l'étouffement des milieux aquatiques du à un enrichissement trop important. L'eutrophisation favorise en effet la croissance des algues qui prolifèrent et qui, à terme, asphyxient le milieu par la diminution de la transparence de l'eau (blocage de la photosynthèse) et par l'appauvrissement en oxygène due à décomposition des algues mortes par les micro-organismes. Les causes sont les rejets industriels et urbains, ainsi que l'utilisation excessive d'engrais.

Le principe de calcul est similaire en tout point au calcul précédent :

$$I_{\text{eutrophisation}} = \left( I_{\text{eutrophisation}}^{\text{ref}} \right) / \left( \frac{\sum_{i=1}^n [E_i * NP_i]}{N_{\text{hab}} * T_{\text{étude}}} \right) \text{ pour un ensemble de substances } n \text{ emises (IV.4.3)}$$

Avec  $E_i$  l'émission de la substance  $i$  exprimée en  $\text{kg}$  et  $NP_i$  le potentiel d'eutrophisation de la substance exprimé  $\text{kg.eq}_{\text{PO}_{4,3}}/\text{kg}$  de substance émise. Ces valeurs sont également disponibles dans le manuel d'utilisation du logiciel EQUER (Peuportier et Polster 2004).

#### IV.4. Déchets inertes ultimes

Les déchets inertes ultimes correspondent à la quantité de déchets ultimes restant après tri, recyclage ou incinération. L'indicateur est défini comme la somme des quantités des divers types de déchets multipliés par les facteurs d'équivalences définis dans le Tableau 24.

**Tableau 24 : Facteurs d'équivalences entre les types de déchets (Peuportier 2003)**

Type de centre de stockage	Type de déchet	Coûts, marge (moyen) [Euros/tonne]	Tonne équivalente (Classe III)
Classe III	Déchet inerte	3-12 (7,5)	1
Classe II	Déchet industriel banal	30-60 (45)	6
Classe I	Déchet industriel spécial	120-200 (160)	21

Les facteurs d'équivalence entre type de déchets sont établis proportionnellement à leur prix moyen.

Les déchets radioactifs ne sont pas pris en compte et ils font l'objet d'un indicateur spécifique.

Le calcul de l'indicateur de déchets inertes ultimes  $I_{\text{dechets\_I}}$  sera calculé en fonction d'une valeur de référence :

$$I_{\text{dechets\_I}} = (I_{\text{dechets\_I}}^{\text{ref}}) / \left( \frac{\sum_{i=1}^n [P_i * (\text{facteur d'équivalence})_i]}{N_{\text{hab}} * T_{\text{etude}}} \right) \text{ pour } n \text{ déchets inertes ultimes (IV.4.4)}$$

Avec  $P_i$  le poids du déchet  $i$  exprimé en kg et le facteur d'équivalence exprimé en kg.eq/kg de déchet.

## V. Objectif "Améliorer la qualité des ambiances" (AMB)

Dans cet objectif est recensé l'ensemble des indicateurs permettant de juger de la qualité des ambiances intérieures et extérieures proposées aux futurs habitants du quartier ; cette décomposition intérieur – extérieur est utilisée ici pour présenter les indicateurs.

### V.1. Ambiance intérieure

L'ambiance intérieure proposée aux futurs habitants doit être prise en considération lors de l'évaluation des projets d'aménagement d'un quartier. L'échelle d'étude implique une faible connaissance de l'intérieur du bâtiment (disposition des espaces, systèmes, matériaux), cependant l'aménageur, par ses choix, peut avoir une influence directe sur cette ambiance (citons par exemple les questions d'éclairage naturel), et il peut faire des propositions à l'intention des futurs bâtisseurs des logements, concernant le confort hygrothermique ou acoustique.

#### V.1.a. Confort hygrothermique et aéraulique

L'évaluation du confort hygrothermique et aéraulique se fait par le calcul du PMV, cependant ce calcul semble irréalisable à notre échelle d'étude étant donné le nombre de données nécessaires inconnues.

Nous proposons donc qu'une note  $N_{\text{confort}}$  soit donnée en fonction des intentions vis-à-vis des conditions de confort intérieur des bâtiments. Cette note va de 0 à 10, en considérant l'échelle suivante : 0/10 en cas de respect minimum de la réglementation, 5/10 lorsque le confort global fait l'objet d'une attention particulière et 10/10 correspond au confort optimal souhaité, c'est-à-dire que les citoyens ne subiront aucune période d'inconfort durant l'année. La note globale correspond à la moyenne des notes attribuées par bâtiment.

La notation dépend des choix technologiques envisagés, ce qui pourra avoir des conséquences sur la consommation énergétique par bâtiment. Dans ce cas, le critère de confort intérieur normalisé sera :

$$C_1^{\text{conf}} = \frac{N_{\text{confort}}}{10} \quad (\text{IV.5.1})$$

Si un logiciel peut également permettre d'obtenir une première approche sur le confort intérieur, ce résultat pourra bien sûr être utilisé en complément de la note sur le confort ou en remplacement (si l'approche tient compte de la température de l'air mais aussi de l'humidité et de la vitesse d'air). La difficulté étant qu'à notre échelle d'intervention il subsiste de nombreuses inconnues sur les futurs systèmes de chauffage, le type de paroi, etc.

Par exemple, le logiciel COMFIE développé par le CEP et par IZUBA Energie, permet en parallèle du calcul de la consommation énergétique d'un bâtiment de fournir le taux d'inconfort qui représente le pourcentage de temps d'occupation durant lequel la température de la zone est supérieure à 27°C ou inférieure à 16°C. Nous proposons de pondérer ce taux en fonction de la surface habitable de chaque bâtiment afin d'évaluer le quartier entier. La limite supérieure de température est difficile à établir car la sensation de confort dépend également d'autres paramètres thermiques tels que la température des parois, la vitesse d'air, l'habillement des occupants ou la température extérieure. Elle dépend aussi de paramètres non thermiques liés à chaque individu comme l'âge, le statut économique, le contexte (type de bâtiment, fonctions, saison, climat), les interactions avec l'environnement (éclairage, acoustique, qualité de l'air) et les attentes. Nous avons préféré une limite haute de 25°C au

lieu de 27°C, ce choix est basé sur la littérature (van der Linden et al. 2002). Ce deuxième critère, présenté de manière normalisé et de la forme "le plus est le mieux" sera :

$$C_2^{conf} = \frac{\sum_{i=1}^n [(1 - (\text{taux infort})_i) * SH_i]}{\sum_{i=1}^n SH_i}, \text{ pour } n \text{ bâtiments} \quad (\text{IV.5.2})$$

Avec  $(\text{taux infort})_i$  le taux d'inconfort du bâtiment  $i$  et  $SH_i$  sa surface habitable.

Par pondération des deux critères, l'indicateur normalisé de confort intérieur  $I_{confort}$  est :

$$I_{confort} = w_1 * C_1^{conf} + w_2 * C_2^{conf} \quad (\text{IV.5.3})$$

La valeur des pondérations est choisie par l'utilisateur en fonction par exemple de la fiabilité de la note ou des résultats de simulation.

### V.1.b. Confort acoustique

L'arrêté du 30 juin 1999 relatif à la "caractérisation acoustique des bâtiments d'habitation" stipule à l'article 7 que "l'isolement acoustique standardisé pondéré  $D_{nTAtr}$  des pièces principales et cuisines contre les bruits de l'espace extérieur doit être au minimum de 30 décibels". Au niveau de l'ambiance extérieure, nous avons choisi de quantifier et prendre en compte le niveau sonore au niveau des façades, ainsi imposer un niveau sonore maximal admissible dans les habitations serait donc redondant avec l'évaluation extérieure. De plus, il existe également des valeurs minimales d'isolement entre les logements imposées par la réglementation acoustique. Nous ne retenons donc pas d'indicateur de confort acoustique pour ce qui concerne les ambiances intérieures.

### V.1.c. Visibilité intérieure

D'après Nivet (1999), "la vue est le premier sens sollicité dans la découverte de notre environnement. On peut donc augurer que la prise en compte des facteurs visuels a une relative importance lorsque le concepteur imagine et construit un nouvel espace".

Au niveau de la visibilité, nous distinguons la visibilité intérieure et la visibilité extérieure, comme l'illustre la Figure 33.

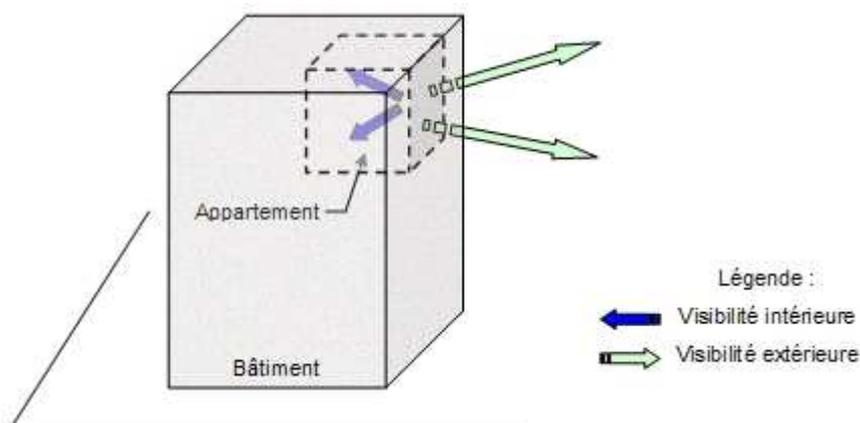


Figure 33 : Distinction entre visibilité intérieure (en bleu) et extérieure (en vert clair)

La visibilité intérieure concerne une personne située à l'intérieur d'une habitation, c'est-à-dire le vis-à-vis avec d'autres habitations.

La visibilité extérieure concerne une personne située à l'extérieur : pourcentage de ciel visible depuis la rue, depuis les espaces publics ou les espaces verts. La visibilité des sites remarquables comme les monuments ou ouvrages d'art concerne ces deux types de visibilité car le site peut être vu depuis l'extérieur comme l'intérieur de l'habitation ; nous avons décidé de la ranger dans la visibilité extérieure.

Le vis-à-vis avec les autres habitations dépend de la distance entre les façades des bâtiments, la visibilité du ciel depuis les façades dépend également de ce paramètre et elle sera d'autant plus faible que la distance entre les bâtiments est réduite. Nous proposons donc de quantifier la visibilité intérieure à partir du facteur de forme entre les façades des bâtiments et le ciel.

Ainsi l'indicateur normalisé de visibilité intérieure sera :

$$I_{visu\_int} = \frac{\sum_{i=1}^n [F_{face(i)-ciel} * S_{face(i)}]}{\sum_{i=1}^n S_{face(i)}} * 2, \text{ pour } n \text{ façades} \quad (IV.5.4)$$

Avec  $F_{face(i)-ciel}$  le facteur de forme entre la façade  $i$  et le ciel,  $S_{face(i)}$  la surface de la façade  $i$ . La multiplication par deux permet d'avoir des valeurs bornées entre 0 et 1. En effet le facteur de forme entre une façade et le ciel sera compris entre 0 et 0,5 (une surface de façade verticale ne peut voir au maximum que la moitié du ciel).

Cet indicateur est directement normalisé et la valeur maximale correspond bien à une visibilité maximale du ciel.

Les indicateurs relatifs à la visibilité extérieure sont présentés dans le contexte de l'ambiance extérieure.

#### V.1.d. Eclairage naturel

L'éclairage intérieur dépend à la fois de l'éclairage naturel provenant de l'extérieur et de l'éclairage artificiel mis en place. Il apparaît inutile de prendre en compte l'éclairage artificiel car la réglementation impose un niveau d'éclairement minimal en fonction de l'utilisation. A notre niveau d'intervention, on peut au mieux rechercher à maximiser l'éclairage naturel, ce qui signifie réduire les masques et augmenter la surface vitrée. Les masques sont pris en compte par la limitation du vis-à-vis avec les autres bâtiments (cf. visibilité intérieure). Le paramètre utile est donc le rapport de vitrage total à la surface habitable totale, noté  $R_{SV/SH}$  :

$$R_{SV/SH} = \frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n \left[ \frac{SV_i}{SH_i} \right], \text{ pour un nombre de bâtiments } n \quad (IV.5.5)$$

Avec  $SV_i$  la surface totale de vitrage du bâtiment  $i$  et  $SH_i$  sa surface habitable.

L'indicateur final d'éclairage intérieur  $I_{eclairage}$  est obtenu en divisant le ratio  $R_{SV/SH}$  par le ratio de référence  $R_{SV/SH}^{ref}$ .

$$I_{eclairage} = \frac{R_{SV/SH}}{R_{SV/SH}^{ref}} \quad (IV.5.6)$$

### V.1.e. Espace intérieur

Le dernier paramètre lié au confort intérieur est l'espace habitable moyen par personne que les bâtiments du quartier peuvent offrir. Cet espace correspond au rapport de la surface habitable totale du quartier par le nombre d'habitants ; l'espace habitable moyen  $E_H$  est donc :

$$E_H = \frac{\sum_{i=1}^n SH_i}{N_{\text{hab}}} , \text{ pour un nombre de bâtiments } n \text{ et une population } N_{\text{hab}} \quad (\text{IV.5.7})$$

L'indicateur final d'espace intérieur  $I_{\text{espace}}$  est obtenu en divisant l'espace habitable moyen par la valeur de référence.

$$I_{\text{espace}} = \frac{E_H}{E_H^{\text{ref}}} \quad (\text{IV.5.8})$$

La limite de cette approche est la non prise en compte des disparités des tailles de logement, toutefois les données disponibles ne nous permettent pas d'étudier le plan masse de chaque bâtiment pour procéder à une analyse plus fine.

## V.2. Ambiance extérieure

### V.2.a. Confort hygrothermique et aéraulique

Pour mesurer le confort extérieur, on utilise en général la PET ou "Physiologically Equivalent Temperature" (Ali-Toudert et Mayer 2004; Katschner 2004) ; qui est calculée en fonction du flux radiatif, de la température de l'air, de son humidité et de la vitesse du vent. Cependant à notre niveau d'intervention, c'est-à-dire pour un espace extérieur hétérogène et complexe, nous n'avons aucun moyen de contrôler les paramètres hygrothermiques de l'air. La vitesse du vent est difficilement prévisible car elle ne dépend pas uniquement du climat et de la géométrie du quartier, mais également de la végétation et du mobilier urbain. De plus, le confort extérieur dépend fortement de l'adaptation psychologique de chacun (Nikolopoulou et Steemers 2003).

Ces différents auteurs (Katschner 2003; Nikolopoulou et Steemers 2003; Katschner 2004) ont également montré l'intérêt urbanistique de développer différents microclimats afin que les usagers puissent choisir le plus adapté au contexte ; par ex. ambiance chaude en période normale, ambiance ombrée et/ou ventilée en période chaude. Cependant, la diversité des microclimats nous paraît actuellement difficilement appréhendable.

Concernant la question de la qualité de l'air extérieur, il semble également actuellement difficile de la prédire efficacement. De plus, nous considérons que cette question est pour une grande part, prise en compte au niveau de l'objectif "Préserver la santé et gérer les risques" qui recense de nombreuses causes de dégradation de la qualité de l'air.

Ainsi, cette méthodologie ne retient aucun indicateur de confort hygrothermique extérieur ni de qualité de l'air extérieur.

### V.2.b. Confort acoustique

Nous considérons quatre critères : le niveau sonore en façade de jour, de nuit et le niveau sonore au sol de jour et de nuit.

L'article 15 de la loi cadre n° 92-1444 du 31 décembre 1992 introduit le terme de points noirs à résorber, s'appliquant aux zones habitées soumises à des niveaux sonores jugés trop excessifs. La limite est de 70 dB(A) entre 6h et 22h et de 65 dB(A) la nuit (ADEME 2005) ; elle est mesurée à l'extérieur, à 2 m devant les façades, fenêtres fermées (ADEME 2004a).

Le système d'indicateur *Spanish Urban sustainable indicators*<sup>19</sup> définit l'indicateur *People exposed to significant sound levels*<sup>20</sup> caractérisant le pourcentage de la population exposée à un seuil de contamination sonore supérieur à 70 dB(A) de jour et 60 dB(A) de nuit. Les valeurs des niveaux sonores sont données à 1,5 m au dessus du sol.

A partir de ces quatre valeurs de référence, nous construisons quatre critères :

- $C_1^{acoustique}$  le pourcentage des façades respectant le seuil de 70 dB(A) le jour,
- $C_2^{acoustique}$  le pourcentage des façades respectant le seuil de 65 dB(A) la nuit,
- $C_3^{acoustique}$  le pourcentage du sol respectant le seuil de 70 dB(A) le jour,
- $C_4^{acoustique}$  le pourcentage du sol respectant le seuil de 60 dB(A) la nuit,

La nuit est définie de 22 heures à 6 heures et le jour de 6 heures à 22 heures. La proportion de surface est calculée à partir de la discrétisation de chaque surface en un maillage de points espacés de 2 m. Cette distance est un bon compromis entre la précision souhaitée et les capacités des ordinateurs disponibles aujourd'hui.

Les prévisions de bruit sont effectuées par des outils informatiques basés sur la norme NMPB96 préconisée par la directive européenne (ADEME 2004a). Nous détaillerons le mode de prévision dans le cas d'application.

L'indicateur de confort acoustique normalisé  $I_{acoustique}$  sera :

$$I_{acoustique} = w_1 * C_1^{acoustique} + w_2 * C_2^{acoustique} + w_3 * C_3^{acoustique} + w_4 * C_4^{acoustique} \quad (IV.5.9)$$

Les quatre coefficients de pondérations sont calculés à partir de la méthode proposée au paragraphe II.1.a de ce chapitre. (AHP)

A l'avenir, il est envisageable de prendre en compte le projet d'indicateur européen  $L_{den}$  de la directive européenne 2002/49/CE<sup>21</sup> (European Commission 2003b) qui décompose l'étude des nuisances sonores selon trois périodes : le jour (day) de 6h à 18h, le soir (evening) de 18h à 22h et la nuit (night) de 22h à 6 h. D'après l'ADEME (2004a) "chaque pays membre est libre de fixer les horaires respectifs de ces périodes afin de se conformer aux usages locaux (les pays du Sud peuvent par exemple intégrer la période de sieste dans la période de repos)".

<sup>19</sup> [http://crisp.cstb.fr/view\\_systems.asp?id\\_ds\\_systems=48](http://crisp.cstb.fr/view_systems.asp?id_ds_systems=48)

<sup>20</sup> [http://crisp.cstb.fr/view\\_indicators.asp?id\\_ds\\_indicators=497](http://crisp.cstb.fr/view_indicators.asp?id_ds_indicators=497)

<sup>21</sup> <http://forum.europa.eu.int/Public/irc/env/noisedir/library>

### V.2.c. Visibilité extérieure

Les indicateurs présentés ici concernent les intervisibilités dans les espaces urbains ouverts ainsi que la visibilité des sites remarquables depuis l'intérieur des habitations. La littérature (Teller et Azar 2001; Boukhezer 2002; Sarradin et al. 2002) recense de nombreux indicateurs de visibilité tels que l'ouverture du ciel, les profondeurs de vue, la régularité de la ligne du ciel, l'écart type du spectre des hauteurs angulaires, l'anisotropie de l'espace ouvert, la surface visible, le coefficient de regroupement, la longueur moyenne des plus courts chemins et la distance visible.

Nous avons retenu l'ouverture du ciel qui représente "le sentiment de confinement ressenti par un observateur située dans l'espace ouvert" (Teller et Azar 2001). Une distinction est cependant faite entre l'ouverture du ciel observé depuis la rue et depuis les espaces publics (ce sont deux sentiments de confinement différents). Il existe plusieurs méthodes de calcul de l'ouverture du ciel, et nous avons décidé de quantifier l'ouverture du ciel à partir de la moyenne des facteurs de forme entre chaque élément de surface et le ciel. Les deux critères ainsi définis sont  $C_1^{visu\_ext}$  et  $C_2^{visu\_ext}$  :

$$C_1^{visu\_ext} = \frac{\sum_{i=1}^n [F_{rue(i)-ciel}] S_{rue(i)}}{\sum_{i=1}^n S_{rue(i)}}, \text{ pour un nombre de rues } n \quad (IV.5.10)$$

$$C_2^{visu\_ext} = \frac{\sum_{i=1}^n [F_{public(i)-ciel}] S_{public(i)}}{\sum_{i=1}^n S_{public(i)}}, \text{ pour un nombre d'espaces publics } n \quad (IV.5.11)$$

Avec  $F_{rue(i)-ciel}$  le facteur de forme entre la rue  $i$  et le ciel,  $S_{rue(i)}$  la surface de la rue  $i$ .

Afin de prendre en compte la visibilité des sites remarquables, nous définissons comme indicateur, une note allant de 0 à 1. Les sites remarquables regroupent l'ensemble des sites dont la visibilité permet d'améliorer la sensation de confort visuel, ce sont par exemple :

- les monuments ou les ouvrages d'art,
- les paysages remarquables comme la mer ou la montagne,
- tout autre point d'intérêt défini comme tel par les habitants ou les décideurs.

La note 0 correspond à l'invisibilité complète des sites remarquables depuis l'ensemble du quartier et la note 1 signifie que tous les sites remarquables sont visibles depuis l'ensemble du quartier. La notation de la visibilité, notée  $C_3^{visu\_ext}$  peut se faire à partir des plans en 2 ou 3 dimensions, à partir d'une maquette si elle est disponible ou bien encore à l'aide d'outils informatiques de rendu en trois dimensions.

L'indicateur de visibilité extérieure correspond à l'agrégation de ces trois critères :

$$I_{visu\_ext} = w_1 * C_1^{visu\_ext} + w_2 * C_2^{visu\_ext} + w_3 * C_3^{visu\_ext} \quad (IV.5.12)$$

#### V.2.d. Ensoleillement

Après avoir recensé les différents indicateurs présents dans la littérature (Cherqui et al. 2005a), nous avons retenu en première approche le niveau de rayonnement solaire relatif reçu par les surfaces. Pour différentes typologies de surfaces, nous quantifions la proportion (ou niveau) d'ensoleillement reçu  $H_{Li}$  [%] en fonction de la valeur maximale du rayonnement solaire global reçu (direct + diffus + réfléchi) dans le quartier, à partir de l'équation (IV.5.13) ci-dessous :

$$H_{Li}[\%] = \frac{H_i}{\max(H_j | j)} \quad (\text{IV.5.13})$$

$H_i$  et  $H_j$  [ $\text{W/m}^2$ ] représente respectivement le rayonnement solaire global reçu par la surface  $i$  et la surface  $j$ .

Ensuite, les critères sont calculés en fonction de la typologie de la surface :

- Pour les espaces verts où l'ensoleillement recherché est maximal, le critère  $C_1^{\text{soleil}}$  correspond à la moyenne des proportions d'ensoleillement reçu par l'ensemble des parcs :

$$C_1^{\text{soleil}} = \frac{\sum_{i=1}^n H_{L\text{parc}(i)}}{n} \quad [\%], \text{ pour un nombre de parcs } n \quad (\text{IV.5.14})$$

- Tout le monde doit avoir accès au soleil. Pour les façades, on considère pour le climat français que l'idéal est de maximiser l'ensoleillement reçu (du point de vue de l'éclairage mais aussi de la qualité de vie, de la consommation d'énergie), le critère  $C_2^{\text{soleil}}$  sera :

$$C_2^{\text{soleil}} = \frac{\sum_{i=1}^n H_{L\text{façade}(i)}}{n} \quad [\%], \text{ pour un nombre de façades } n \quad (\text{IV.5.15})$$

La maximisation de l'ensoleillement solaire peut avoir des conséquences négatives en été au niveau du confort ou de consommation d'énergie, cependant c'est au niveau du bâtiment que l'on doit rechercher à minimiser les apports solaires en été (amélioration des propriétés des vitrages, casquettes). En effet, il est difficile de prévoir des masques à l'échelle du quartier permettant de réduire les apports solaires d'été tout en garantissant des apports solaires en hiver.

- Dans le cas où il est envisagé d'utiliser l'énergie solaire grâce à des capteurs solaires thermiques ou photovoltaïques localisés en toiture, il faudra prendre en compte l'ensoleillement reçu par les toits des bâtiments avec l'indicateur  $C_3^{\text{soleil}}$  :

$$C_3^{\text{soleil}} = \frac{\sum_{i=1}^n H_{L\text{toit}(i)}}{n} \quad [\%], \text{ pour un nombre de toits } n \quad (\text{IV.5.16})$$

- Nous définissons un indicateur permettant de caractériser l'homogénéité de répartition de l'ensoleillement sur l'ensemble des façades du quartier. Il correspond à l'écart type relatif moyen du rayonnement solaire reçu par les façades. L'écart type relatif  $\Gamma^*$  est égal au ratio de l'écart type  $\Gamma$  par la moyenne  $\bar{X}$ . Par exemple l'écart type relatif de rayonnement solaire reçu par les façades orientées au sud est :

$$\Gamma_{\text{rayon\_sud}}^* = \frac{\Gamma_{\text{rayon\_sud}}}{\text{rayon\_sud}} \quad (\text{IV.5.17})$$

Avec  $\Gamma_{\text{rayon\_sud}}$  l'écart type du rayonnement solaire de l'ensemble des façades dont l'orientation principale est sud et  $\text{rayon\_sud}$  la moyenne du rayonnement reçu par les façades orientées au sud. On cherche à minimiser cet écart type relatif moyen.

Le critère normalisé du type "le plus est le mieux" est obtenu par la formule suivante :

$$C_4^{\text{soleil}} = 1 - \left[ \frac{1}{4} * (\Gamma_{\text{rayon\_sud}}^* + \Gamma_{\text{rayon\_nord}}^* + \Gamma_{\text{rayon\_ouest}}^* + \Gamma_{\text{rayon\_est}}^*) \right] \quad (\text{IV.5.18})$$

L'indicateur normalisé d'ensoleillement  $I_{\text{soleil}}$  correspond à l'agrégation de ces quatre indicateurs, soit :

$$I_{\text{soleil}} = w_1 * C_1^{\text{soleil}} + w_2 * C_2^{\text{soleil}} + w_3 * C_3^{\text{soleil}} + w_4 * C_4^{\text{soleil}} \quad (\text{IV.5.19})$$

Si aucune volonté n'est définie en ce qui concerne l'utilisation du solaire photovoltaïque ou thermique sur les toits, le coefficient de pondération  $w_3$  sera égal à zéro.

## VI. Préserver la santé et gérer les risques (RIS)

Cet objectif regroupe trois catégories : la santé, la sécurité et les risques.

Comme Jackson (2003), il nous apparaît clairement que la santé publique dépend fortement de l'intégration de végétation, de lumière naturelle et d'un accès visuel et physique vers des espaces extérieurs. Ces aspects sont repris spécifiquement dans les objectifs de qualité des ambiances, de préservation du patrimoine et de développement local. Pour une évaluation plus directe de moyens de garantir la santé des usagers du quartier, nous proposons comme indicateurs le temps d'accès au service d'urgence (ARPE 2004) et la qualité de l'eau. La qualité de l'air peut être envisagée à travers l'évaluation des causes de dégradation. Cette vision globale permet de considérer les conséquences non pas seulement sur les futurs habitants mais sur l'ensemble de la population actuelle et future.

La sécurité peut être envisagée à travers différents indicateurs tels la surface allouée à la police et à la gendarmerie en fonction de la surface du quartier.

Quant à l'évaluation des risques potentiels et de leur gestion, l'ARPE (2004 page 19) propose la définition d'un niveau d'exposition aux risques naturels et industriels. L'IFEN (2003) utilise comme indicateur de risques industriels le nombre d'installations classés SEVESO II en fonction de la densité de population. D'autres indicateurs généralistes concernent la surface ou la population exposée à un risque ou l'élaboration ou non par la collectivité de Plans de Prévention des Risques naturels prévisibles (prévus par la loi du 2 février 1995 relative au renforcement de la protection de l'environnement) qui permet entre autres de définir les zones inondables et donc non constructibles. Des indicateurs plus spécifiques dont certains proposés par l'ARENE Ile-de-France (Bornarel et al. 2004; Carfantan et al. 2005) sont la présence de risques électromagnétiques, la présence de Radon ou la mise en place de zones de stockage des eaux d'orage.

En regard de notre domaine de compétence, nous proposons pour le moment les indicateurs relatifs à la qualité de l'air, au risque de réchauffement global de la planète, à la toxicité humaine et aux risques liés à la prolifération de déchets nucléaires. D'autres indicateurs pourront être ajoutés par la suite.

### VI.1. Effet de serre

L'effet de serre est responsable du réchauffement planétaire en piégeant une partie du rayonnement infrarouge émis en direction du ciel par la Terre qui se comporte comme un corps noir. C'est un phénomène nécessaire, car sans lui la température de la Terre chuterait à  $-18^{\circ}\text{C}$ , mais actuellement une concentration trop importante de gaz à effet de serre dans l'atmosphère risque d'entraîner une augmentation de température trop importante. Les conséquences annoncées sont l'augmentation du volume d'eau de mer (par la fonte des glaciers) et la diminution de la surface terrestre, la disparition de nombreuses espèces, l'augmentation de la pluviométrie ou encore la modification des courants marins.

Nous pouvons distinguer deux principales causes : l'augmentation de l'albédo de la surface terrestre (donc l'augmentation du rayonnement réémis par la surface terrestre) et l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre.

Nous avons choisi de ne prendre en compte que les émissions de gaz à effet de serre ; l'augmentation de ces émissions étant un facteur avéré et corrélé avec le réchauffement de la terre. L'augmentation de l'albédo du sol n'est pas prise en compte car actuellement, aucune

étude n'a pour l'instant réussi à corréliser une augmentation de l'albédo de la surface totale de la Terre avec l'augmentation de la température moyenne de la terre.

Le potentiel d'effet de serre du quartier est donc calculé à partir des potentiels des différents gaz à effet de serre appelé GWP (Global Warming Potential) et exprimé en kg équivalent de CO<sub>2</sub>. Un gaz n'aura pas les mêmes conséquences sur 20 ans, 50 ans, 100 ans ou plus ; cela est principalement dû au fait que les gaz se décomposent à des vitesses différentes les uns des autres.

Le logiciel EQUER base son calcul des équivalences sur une durée de 100 ans et les valeurs du GWP proposées proviennent de l'International Panel on Climate Change, IPCC (1994).

L'indicateur de potentiel de réchauffement global  $I_{GWP}$  sera ainsi :

$$I_{GWP} = \left( I_{GWP}^{ref} \right) / \left( \frac{\sum_{i=1}^n [E_i * GWP_i]}{N_{hab} * T_{etude}} \right) \text{ pour un ensemble de n substances émises (IV.6.1)}$$

Avec  $E_i$  l'émission de la substance  $i$  exprimée en kg et  $GWP_i$  le potentiel de réchauffement global de la substance exprimé en kg.eqCO<sub>2</sub>/kg de substance émise.

## VI.2. Toxicité humaine

Dans le cas de la toxicité humaine, l'effet induit d'une substance ne dépend pas de la concentration dans le milieu, mais de la dose d'exposition. Elle correspond au rapport entre la masse de polluant inhalée ou ingérée sur une certaine durée et la masse de l'individu. Cet indicateur permet de prendre en compte les impacts toxiques du quartier sur la population. Il est considéré à l'échelle moyenne de la planète car son effet n'est pas obligatoirement local. La démarche de calcul de cet indicateur est détaillée dans le mode d'emploi du logiciel (Peuportier et Polster 2004). Pour résumer, la toxicité de chaque substance est exprimée en kg de chair humaine contaminée à une exposition maximale tolérable et s'obtient en sommant les émissions émises dans l'air (respectivement l'eau et le sol) multipliées par HCA (respectivement HCW et HCS). Ces trois derniers acronymes représentent les indices des substances :

- HCA (Human toxicological Classification factor for the Air) pour le milieu atmosphérique,
- HCW (Human toxicological Classification factor for Water) pour le milieu aquatique,
- HCS (Human toxicological Classification factor for the Soil) pour le milieu terrestre.

L'indicateur de toxicité humaine  $I_{tox\_humaine}$  sera ainsi :

$$I_{tox\_humaine} = \left( I_{tox\_humaine}^{ref} \right) / \left( \frac{\sum_{i=1}^n [E_i^{air} * HCA_i + E_i^{eau} * HCW_i + E_i^{sol} * HCS_i]}{N_{hab} * T_{etude}} \right) \text{ (IV.6.2)}$$

Avec  $n$  le nombre de substances émises.  $E_i^{air}$ ,  $E_i^{eau}$  et  $E_i^{sol}$  sont respectivement la quantité [kg] de substance  $i$  émise dans l'air, l'eau et le sol.  $HCA_i$ ,  $HCW_i$  et  $HCS_i$  sont exprimées en kg de chair contaminée à la dose maximale tolérable par kg de substance émise. Ces valeurs sont disponibles dans le manuel d'utilisation du logiciel EQUER (Peuportier et Polster 2004).

Ce sont les matériaux de construction ou la consommation d'énergie qui sont à l'origine des ces émissions, comme par exemple l'acier de construction (0,05 kg de chair humaine contaminée par kg d'acier), le zinc (0,38 kg de chair humaine contaminée par kg), l'électricité nucléaire (32,22 kg de chair humaine contaminée par TJ consommé) ou le chauffage fuel (329,10 kg de chair humaine contaminée par TJ consommé).

### VI.3. Smog d'été

Le mot smog est un néologisme formé à partir des mots d'anglais smoke (fumée) et fog (brouillard) ; les particules fines et l'ozone en sont deux constituants importants. On distingue le smog d'été et le smog d'hiver. L'ozone accroît les phénomènes de pluies acides et il a également des répercussions directes sur la santé humaine, sur certaines cultures et sur le vieillissement de certains plastiques (Peuportier 2003). La Figure 35 montre une journée de smog d'été à Québec en comparaison avec une journée sans smog, Figure 34. Et la Figure 36 montre une journée de smog d'hiver. Ces trois photos proviennent du site <http://www.mddep.gouv.qc.ca/air/info-smog/smog.htm>.



**Figure 34 : Journée où l'air est pur à Québec le 24 septembre 2002 - 15:45**



**Figure 35 : Journée de smog estival à Québec le 10 septembre 2002 - 15:32**

Le smog d'été correspond à la production d'ozone photochimique, c'est-à-dire par décomposition de substances sous l'effet du rayonnement solaire. L'ozone provient de réactions photochimiques complexes entre les oxydes d'azote (NOx) et les composés organiques volatiles (COV), qu'on nomme les précurseurs. Il se forme essentiellement pendant l'été, durant les après-midi très chauds et ensoleillés, où le vent est faible.



**Figure 36 : Journée de smog hivernal à Québec le 2 février 2005 - 9:00**

En hiver, les polluants, principalement les particules fines provenant du chauffage au bois, du transport et d'activités industrielles, sont retenus près du sol lorsque les vents sont faibles et les températures froides (inversion de température empêchant la dispersion verticale des

polluants). En plus de réduire la visibilité, les particules peuvent pénétrer profondément dans le système respiratoire et causer des risques pour la santé en particulier chez les personnes vulnérables dont les enfants et les personnes âgées.

Afin de limiter le nombre d'indicateur, seul le smog d'été est retenu. Ce choix correspond à une réalité : on parle plus généralement de smog d'été et de pics d'ozones que du smog d'hiver. De plus l'usage du charbon tend à se réduire, les particules émises par les transports sont simultanées aux émissions de COV et de SO<sub>2</sub> qui est pris en compte dans l'indicateur d'acidification.

Basé sur le même principe que l'effet de serre, l'indicateur de smog d'été  $I_{\text{smog}}$  sera ainsi :

$$I_{\text{smog}} = (I_{\text{smog}}^{\text{ref}}) / \left( \frac{\sum_{i=1}^n [E_i * SP_i]}{N_{\text{hab}} * T_{\text{etude}}} \right) \text{ pour un ensemble de } n \text{ substances émises} \quad (\text{IV.6.3})$$

Avec  $E_i$  l'émission de la substance  $i$  exprimée en kg et  $SP_i$  le potentiel de smog d'été de la substance exprimé  $\text{kg.eq}_{\text{C}_2\text{H}_4}/\text{kg}$  de substance émise. Les valeurs de potentiel de smog d'été des différentes substances sont disponibles dans le manuel d'utilisation du logiciel EQUER (Peuportier et Polster 2004).

#### VI.4. Déchets radioactifs

Les déchets sont distingués en fonction de leur activité et de leur durée de vie. Les déchets de catégorie A sont de faible ou moyenne activité et sont destinés à être stockés de l'ordre de 300 ans. Les déchets de catégorie B sont également d'activité moyenne ou faible, mais contiennent des éléments à très longue période comme les déchets de catégorie C, qui eux sont à très haute activité. Les déchets de type B et C doivent rester confinés pendant des milliers d'années. L'indicateur utilisé est calculé par l'addition de l'ensemble de ces déchets, les quantités étant exprimées en  $\text{dm}^3$ , le calcul ne tient pas compte du type de déchet étant donné que tous doivent être stockés sur une période supérieure à 100 ans.

Le calcul de l'indicateur de déchets radioactifs  $I_{\text{radioactif}}$  sera calculé en fonction d'une valeur de référence :

$$I_{\text{radioactif}} = (I_{\text{radioactif}}^{\text{ref}}) / \left( \frac{\sum_{i=1}^n [V_i]}{N_{\text{hab}} * T_{\text{etude}}} \right) \text{ pour } n \text{ déchets radioactifs} \quad (\text{IV.6.4})$$

Avec  $V_i$  le volume du déchet radioactif  $i$ .

## VII. Normalisation des indicateurs et visualisation

Pour l'évaluation de chaque alternative d'aménagement d'un quartier, il convient d'utiliser l'ensemble des indicateurs définis précédemment. La première étape consiste à normaliser l'ensemble des indicateurs pour qu'ils aient tous la même échelle et qu'ils soient tous du type "le plus est le mieux".

Ensuite, l'évaluation elle-même s'effectue par la représentation de ces indicateurs et objectifs : nous proposons de comparer différentes représentations pour définir la plus adaptée.

### VII.1. Valeurs de référence pour la normalisation des indicateurs

Pour la normalisation des indicateurs, les valeurs de référence sont données dans le Tableau 25. Elles sont basées sur les premiers retours de l'utilisation de la méthode sur un cas d'application : ce sont donc une première proposition non pérenne et seuls d'autres retours d'expériences pourront permettre "d'étalonner" précisément ces indicateurs à partir de valeurs de références statistiques. Ces valeurs dépendent de plus du système pris en compte et celles proposées correspondent à l'application présentée dans le chapitre 5.

**Tableau 25 : Présentation des valeurs de référence proposées**

Indicateur	Valeur de référence
<b>Objectif "Préserver les ressources"</b>	
$I_{\text{energie}}^{\text{ref}}$	2018 kWh/(an.habitant)
$I_{\text{eau}}^{\text{ref}}$	11 m <sup>3</sup> /(an.habitant)
$I_{\text{ressources}}^{\text{ref}}$	3.10 <sup>-12</sup> par an.habitant
$I_{\text{sol}}^{\text{ref}}$	1,5
<b>Objectif "Préserver l'écosystème"</b>	
$I_{\text{acidification}}^{\text{ref}}$	0,8 kg <sub>SO<sub>2</sub></sub> /(an.habitant)
$I_{\text{ecotoxicite}}^{\text{ref}}$	3150 (m <sup>3</sup> eau)/(an.habitant)
$I_{\text{eutrophisation}}^{\text{ref}}$	0,1 kg <sub>PO<sub>4</sub></sub> /(an.habitant)
$I_{\text{dechets_I}}^{\text{ref}}$	0,4 kg <sub>eq</sub> /(an.habitant)
<b>Objectif "Améliorer la qualité des ambiances"</b>	
$R_{\text{SV/SH}}^{\text{ref}}$	0,2
$E_H^{\text{ref}}$	37,5 m <sup>2</sup> /habitant
<b>Objectif "Préserver la santé et gérer les risques"</b>	
$I_{\text{GWP}}^{\text{ref}}$	0,3 t <sub>CO<sub>2</sub></sub> /(an.habitant)
$I_{\text{tox\_humaine}}^{\text{ref}}$	1,7 kg.chair/(an.habitant)
$I_{\text{smog}}^{\text{ref}}$	0,5 kg <sub>C<sub>2</sub>H<sub>4</sub></sub> /(an.habitant)
$I_{\text{radioactif}}^{\text{ref}}$	0,01 dm <sup>3</sup> /(an.habitant)

La valeur moyenne de la surface habitable par habitant donnée par l'INSEE (INSEE 2004) est de 37,5 m<sup>2</sup>. Nous n'améliorons pas cette valeur car elle n'est pas spécifique au milieu urbain mais inclut la campagne : la valeur moyenne pour un quartier sera plus faible.

## VII.2. Mode de représentation

Nous avons vu au chapitre 3 page 56 que le mode de représentation adapté est le diagramme radar : il permet de visualiser des indicateurs d'un même objectif et la comparaison entre alternatives est visuelle et claire.

Nous proposons de démontrer ici que le mode de représentation adéquate est la représentation de l'ensemble des indicateurs par objectifs. Pour cela nous prenons un exemple comprenant deux variantes pour lesquelles l'ensemble des indicateurs et des huit objectifs est renseigné. On peut considérer que chaque objectif se décline en moyenne selon quatre indicateurs, nous aurons donc un total de 32 indicateurs. Le Tableau 26 présente les différentes valeurs données à chaque indicateur.

**Tableau 26 : Valeurs des indicateurs associés aux huit objectifs (exemple)**

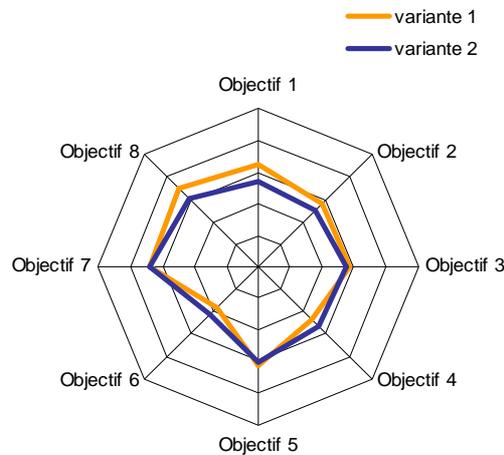
		variante 1	variante 2			variante 1	variante 2
Objectif 1	I_ 1.1	0,5	0,6	Objectif 5	I_ 5.1	0,7	0,7
	I_ 1.2	0,4	0,4		I_ 5.2	0,8	0,5
	I_ 1.3	0,7	0,5		I_ 5.3	0,7	0,7
	I_ 1.4	0,8	0,5		I_ 5.4	0,3	0,5
	I_ 1.5	0,8	0,7		<i>moyenne</i>	<i>0,63</i>	<i>0,60</i>
	<i>moyenne</i>	<i>0,64</i>	<i>0,54</i>		Objectif 6	I_ 6.1	0,3
Objectif 2	I_ 2.1	0,4	0,5	I_ 6.2		0,4	0,3
	I_ 2.2	0,6	0,5	I_ 6.3		0,4	0,6
	I_ 2.3	0,5	0,3	<i>moyenne</i>		<i>0,37</i>	<i>0,43</i>
	I_ 2.4	0,8	0,7	Objectif 7	I_ 7.1	0,5	0,7
	<i>moyenne</i>	<i>0,58</i>	<i>0,50</i>		I_ 7.2	0,7	0,5
Objectif 3	I_ 3.1	0,5	0,7		I_ 7.3	0,6	0,7
	I_ 3.2	0,6	0,5		I_ 7.4	0,9	0,8
	I_ 3.3	0,3	0,4	<i>moyenne</i>	<i>0,68</i>	<i>0,68</i>	
	I_ 3.4	0,9	0,6	Objectif 8	I_ 8.1	0,6	0,4
<i>moyenne</i>	<i>0,58</i>	<i>0,55</i>	I_ 8.2		0,6	0,8	
Objectif 4	I_ 4.1	0,4	0,6		I_ 8.3	0,9	0,9
	I_ 4.2	0,5	0,7		I_ 8.4	0,7	0,3
	I_ 4.3	0,3	0,2		<i>moyenne</i>	<i>0,70</i>	<i>0,60</i>
	I_ 4.4	0,7	0,6				
<i>moyenne</i>	<i>0,48</i>	<i>0,53</i>					

Dans ce tableau, on considère deux variantes avec pour chacune des valeurs normalisées d'indicateurs. Ces valeurs serviront pour la représentation sous forme de diagrammes radars présentés dans la suite.

Le but étant de trouver la ou les représentations les plus adaptées à l'évaluation des variantes et à leur comparaison

Trois types de représentation possible sont :

- La représentation globale de tous les objectifs calculés à partir de l'agrégation des indicateurs présentée Figure 37 :

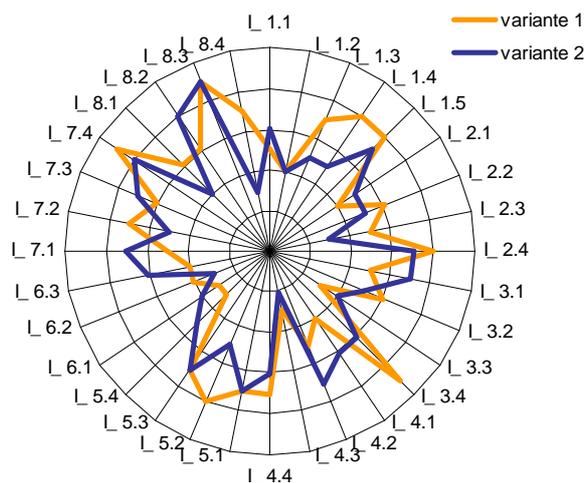


**Figure 37 : Exemple de représentation globale des alternatives**

Avec cette représentation, une partie de l'information est perdue car les indicateurs sont agrégés et il peut y avoir une compensation entre plusieurs indicateurs d'un même objectif : le mauvais score de l'indicateur L\_4.3 est masqué par la performance des autres indicateurs et la note associée à l'objectif 4 reste acceptable. Un autre problème est la tendance à vouloir comparer les résultats de l'objectif i avec l'objectif j : cela n'a aucun sens car bien que les échelles soient normalisés, la même note n'aura pas la même signification d'un objectif à l'autre. Seul la comparaison d'alternatives par objectif est possible.

Les deux autres types de représentation conservent la totalité de l'information.

- La représentation de l'ensemble des indicateurs sur un même diagramme radar présentée Figure 38 :



**Figure 38 : Exemple de représentation de l'ensemble des indicateurs**

Cette représentation n'est pas claire et la comparaison des alternatives est impossible à cause du nombre d'indicateurs car nous avons vu dans la synthèse du chapitre 2 page 57 que la position des indicateurs sur le diagramme influence la visualisation et le calcul de l'aire du diagramme.

- La représentation des indicateurs par objectif qui est montrée Figure 39 :

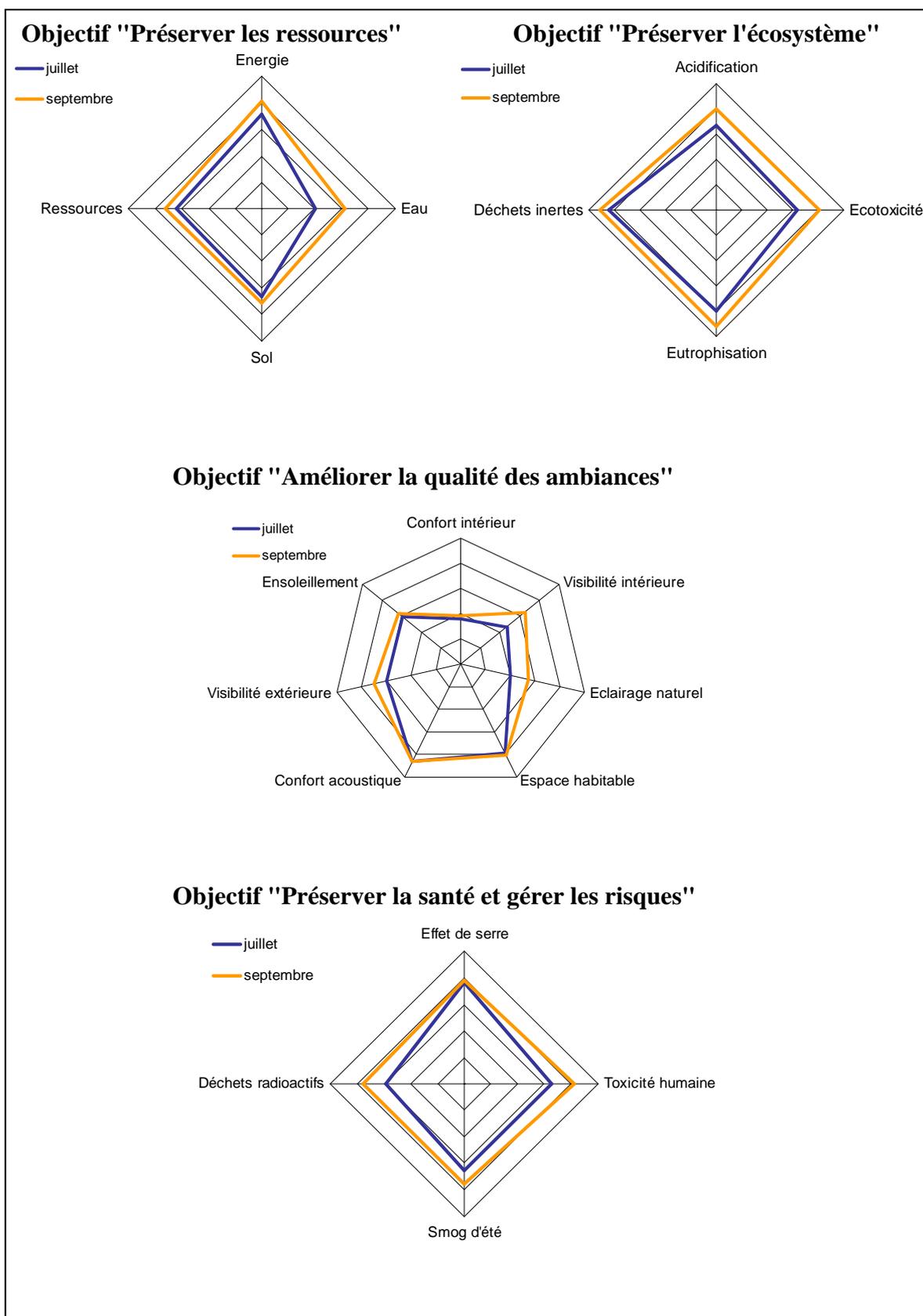


Figure 39 : Exemple de représentation des indicateurs pour chaque objectif

Dans une moindre mesure, le problème de comparaison se pose aussi pour la représentation des indicateurs par objectifs : il s'agit de comparer les deux alternatives selon les différents diagrammes. Cependant, il n'y a pas de perte d'informations et on ne mélange pas les indicateurs de natures différentes car chaque indicateur correspond à un aspect particulier. Cette solution est la plus adaptée à notre méthode car :

- Chaque diagramme est accompagné d'une réflexion spécifique qui concerne les résultats d'une alternative par rapport à l'autre (un exemple est donné dans le cas d'application chapitre 5). Il permet donc d'analyser les alternatives selon un angle ou objectif précis.
- Aucune information n'est perdue.
- L'étude des diagrammes doit susciter une réflexion et des dialogues parmi les intervenants (rôle d'acteur dans le projet); il ne s'agit pas de leur donner un résultat finalisé mais une aide à la décision.

Il est possible d'accompagner chaque diagramme d'une note correspondant à la moyenne des indicateurs, pour aider l'utilisateur qui le souhaite à comparer les alternatives.

### VIII. Outils de gestion statistique et spatiale des indicateurs

Afin d'accompagner l'utilisateur dans la démarche d'évaluation et de comparaison des alternatives, nous avons envisagé dans le cadre du projet ADEQUA deux types d'outils :

- Un outil informatique interactif permettant à partir de données de simulations sur le quartier d'obtenir le profil du quartier sous forme de diagrammes radar,
- Un outil permettant la visualisation spatiale du quartier, des données disponibles et des résultats de simulation ; cet outil est basé sur un Système d'Information Géographique (SIG).

Le premier outil a été développé dans le cadre de cette thèse et le deuxième outil est en cours de développement au laboratoire CERMA.

#### VIII.1. Outil de gestion statistique des indicateurs et objectifs

Actuellement, cet outil est développé dans un tableur car sa principale fonction est de traiter les données de simulations pour calculer les indicateurs puis les objectifs. Il est la concrétisation logicielle des choix précédents : mode de calcul des indicateurs (méthode de calcul des coefficients de pondération et d'agrégation des critères) et mode de représentation et de comparaison des alternatives.

L'outil comporte 13 onglets qui ont chacun une fonction spécifique : le premier onglet sert de menu et il permet de diriger l'utilisateur vers les autres onglets. L'onglet suivant présente les données générales du projet : le nom du projet, la localisation, les intervenants, les variantes d'aménagement du quartier, etc. Ensuite, les huit onglets suivants sont dédiés à chaque objectif : actuellement les onglets PAT, LOC, SOC et VAL sont donc vides. Dans chaque onglet, l'utilisateur doit compléter les cases blanches pour que l'outil puisse calculer les différents indicateurs. Les quatre onglets correspondant aux objectifs traités sont présentés dans l'annexe 3 page 180.

Une capture d'écran du 11<sup>ème</sup> onglet est présentée Figure 40 :

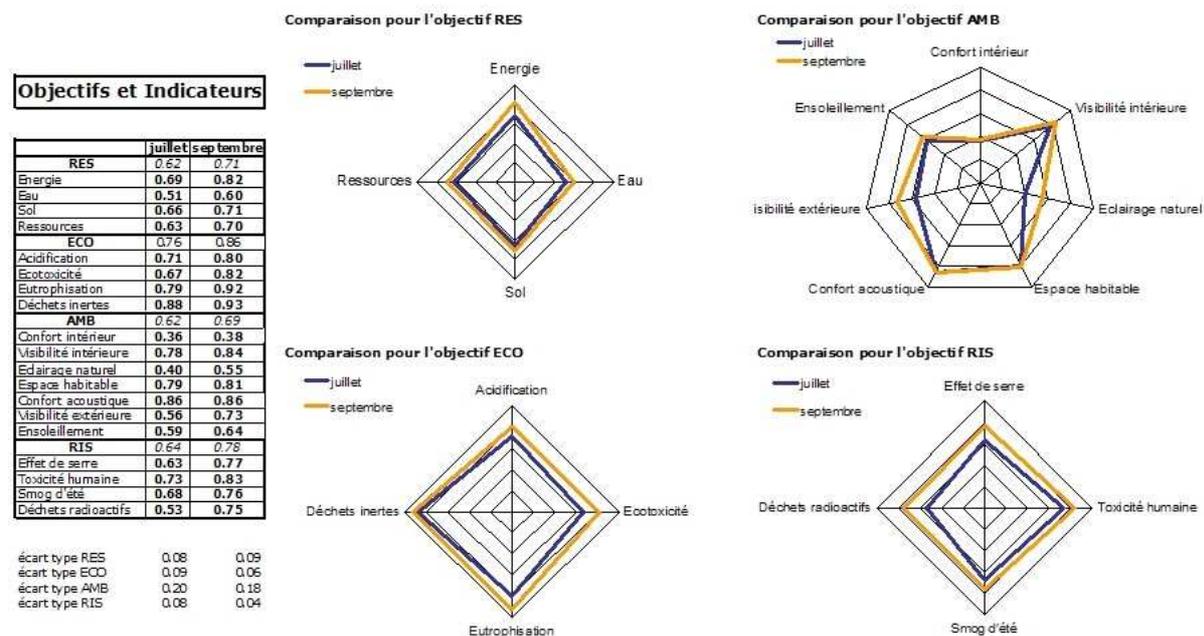


Figure 40 : Capture d'écran de l'onglet "Indicateurs" de l'outil

Cet onglet sert au calcul des indicateurs, il permet d'afficher l'ensemble des valeurs des indicateurs et la note moyenne par objectif. L'utilisateur peut visualiser pour chaque objectif étudié le diagramme radar associé : il peut ainsi aisément comparer les alternatives. La précision à  $10^{-2}$  est requise pour pouvoir distinguer les différences entre les indicateurs étant donné qu'ils sont normalisés entre 0 et 1.

L'onglet suivant sert au calcul des coefficients de pondération par la méthode AHP. Ces coefficients sont utilisés dans le calcul de certains indicateurs de l'objectif AMB, le calcul reprend la démarche présentée au paragraphe II page 88.

L'onglet 12 contient l'ensemble des valeurs de référence permettant de normaliser les indicateurs, ces valeurs sont celles établies dans le Tableau 25 page 112.

L'outil développé est opérationnel et il a été utilisé dans le cadre du cas d'application du chapitre 5.

Cet outil est interactif puisque l'utilisateur constate directement les changements dans indicateurs et les diagrammes dès qu'il change les données fournies. Il peut donc visualiser rapidement les conséquences d'une alternative. L'interactivité est développée jusqu'à la modularité : l'utilisateur a la possibilité d'ajouter de critères pour un indicateur donnée, d'ajouter de nouveaux indicateurs et de mettre en place le calcul de nouveaux coefficients de pondérations.

L'outil pourra par conséquent intégrer les évolutions futures de la méthode : définition de nouveaux critères et indicateurs et intégration des quatre autres objectifs.

## VIII.2. Systèmes d'informations géographiques : gestion spatiale

Nous parlerons dans ce paragraphe des systèmes d'informations géographiques (SIG) car il nous paraît nécessaire à l'avenir d'implanter notre méthode dans un SIG. En effet à terme, un SIG sera au cœur de la méthode pour servir de passerelle entre les logiciels, comme lieu d'implantation de la méthode d'évaluation et également pour visualiser les différents indicateurs. La Figure 41 présente un exemple de SIG.

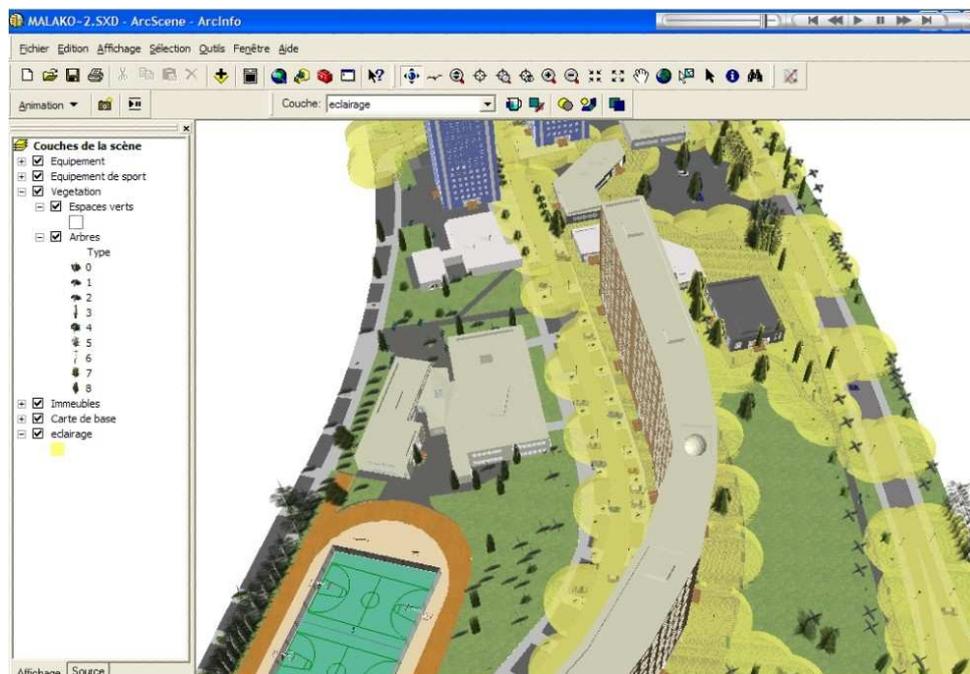


Figure 41 : Capture d'écran d'un SIG, possibilité de visualisation en 3 dimensions<sup>22</sup>

Dans cet exemple, on peut voir une vue aérienne d'un quartier. Dans cette vue sont représentés les bâtiments, routes, équipements sportifs, etc. On constate aussi que le SIG permet d'afficher des informations telles que l'éclairage des voiries et parkings.

Le SIG offre des possibilités de plus en plus importantes de visualisation des informations, cela va même jusqu'à la représentation en trois dimensions avec la possibilité de "naviguer" dans la scène.

### VIII.2.a. Présentation et rôle

Les définitions des SIG sont nombreuses, chacune se focalisant plus spécifiquement sur certains aspects (fonctionnalités, utilisations) : il peut être envisagé "comme un outil pour la gestion de données spatiales, ou comme une structure organisationnelle qui permet de résoudre des problèmes et de prendre des décisions" (Molines 2003). La définition la plus adaptée est celle proposée par (Dueker et Kjerne 1989) : "un système de matériel, logiciel, données, personnel, organisations et structures institutionnelles, pour collecter, stocker, analyser et diffuser de l'information sur la surface terrestre".

D'après André (2003), les SIG permettent à leurs utilisateurs de saisir l'information à intégrer au système, de la mettre en forme, de la gérer et de la modifier ou la manipuler en fonction des besoins. Les buts étant d'analyser l'information, de représenter des résultats, de passer une

<sup>22</sup> Image provenant du site d'ESRI France : <http://www.esrifrance.fr/produit/demo.asp>

série de questions prédéfinies au langage de modélisation, voire à l'injonction de systèmes experts. La Figure 42 présente un exemple d'utilisation du SIG pour analyser des informations.

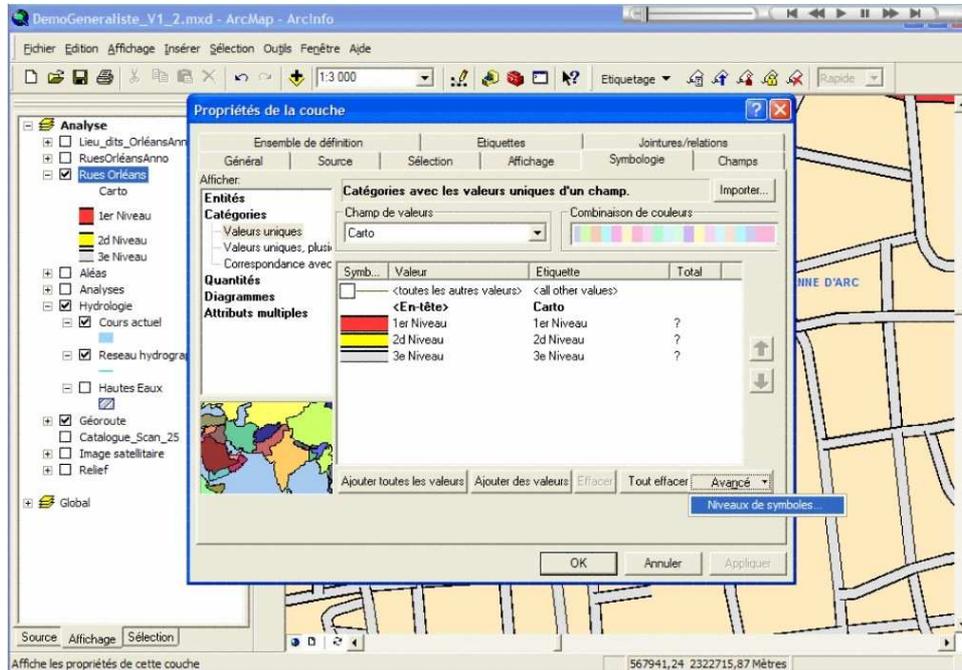


Figure 42 : Possibilités du SIG pour la gestion des calques et l'analyse d'information<sup>23</sup>

Le SIG permet d'analyser des informations visuelles ou numériques : dans l'exemple ci-dessus, l'analyse concerne les réseaux. La capture présente les rues de la ville d'Orléans générées automatiquement à partir d'informations vectorielles matérialisant les axes et les voies. La fenêtre ouverte affiche les propriétés de la couche "Rues Orléans", elle permet par exemple de déterminer les jonctions des différents tronçons ou de définir une représentation (par couleur et taille de tronçon) pour chaque type de rue. Au final, les manipulations permettront par exemple d'obtenir un document cartographique.

#### VIII.2.b. Avantage d'implanter notre méthode dans un SIG

La présentation des fonctions d'un SIG nous montre clairement le rôle que celui-ci pourrait jouer dans notre méthode. Musy et al. (2004) ont montré l'intérêt du couplage pour le diagnostic des potentialités environnementales des bâtiments. Dans ce couplage, le SIG sert d'outil de stockage des données, de liaison avec les différents outils de simulation (envoi de données et récupération des résultats) et également d'outil de visualisation et d'analyse des résultats issus de ces simulations. Ce couplage est en développement au sein du projet ADEQUA dont cette méthode est un élément. Il permettra à terme de simplifier l'évaluation des quartiers en évitant l'entrée successive des mêmes données dans chaque logiciel et surtout il apportera la possibilité de visualiser spatialement les données et indicateurs et dans certains cas de faciliter leur calcul (par exemple la notation de la visibilité des sites remarquables  $N_{\text{visible}}$  pourra se faire grâce à la visualisation spatiale directement depuis le SIG). Les SIG sont aujourd'hui de plus en plus utilisés pour des études de visibilité (Hernandez et al. 2004)

<sup>23</sup> Image provenant du site d'ESRI France : <http://www.esrifrance.fr/produit/demo.asp>

Ce développement est en cours et il doit à terme permettre la communication entre le SIG et les différents outils de simulation ayant chacun un système de classification des données qui leur est propre.

### VIII.2.c. Exemples d'utilisation

La littérature nous fournit déjà des exemples d'utilisation réussie des SIG, elle montre l'intérêt de ce couplage, de par les nombreux développements en cours. Maïzia (2004) a utilisé un SIG couplé à des études d'acoustique, de pollution atmosphérique, de visibilité et une étude d'impact afin de fournir à la Communauté de Communes de la Région de Compiègne un outil d'aide à la décision permettant d'"évaluer" un projet urbain précis (le développement urbain de la rive droite de l'Oise).

Au niveau des projets en cours, le projet SAGACités (Adolphe et al. 2002) a pour but la mise en place d'un système d'objectifs environnementaux et d'indicateurs concernant la qualité énergétique et microclimatique des villes et des quartiers en s'appuyant sur un outil d'aide à la décision inséré dans un SIG et baptisé *Morphologic*. Le projet DAQUAR (Balaÿ et Buffet 2001) vise à produire trois familles de cartes sonores sur un support SIG et à destination des élus, des aménageurs et des habitants. Ces cartes sont produites à partir d'enquêtes, de mesures et de simulations acoustiques. Gasden, Mardaljevic, Lomas et Rylatt (Gadsden et al. 2003; Mardaljevic et Rylatt 2003; Rylatt et al. 2003) développent un outil énergétique afin de prédire le potentiel énergétique solaire et les consommations énergétiques des habitations. Cet outil appelé SEP (Solar Energy Planning) rassemble une base de données commerciales et un SIG afin de pouvoir exploiter les photos aériennes et les données de cartes digitales. L'objectif est de pouvoir déterminer où il sera judicieux de poser des panneaux solaires, en fonction de nombreux paramètres liés au bâtiment (âge, forme et autres paramètres permettant de connaître ses consommations), à son toit (surface, orientation, inclinaison), au rayonnement solaire et aux bâtiments alentours.

Il existe de nombreuses autres études en cours dans le domaine des espaces verts et des paysages (Hehl-Lange 2001; Balram et Dragicevic 2005), de la consommation d'énergie au niveau d'une ville (Crawford 2002), de l'occupation du sol (Joerin et Musy 2000; Weiers et al. 2004; Svoray et al. 2005) ou de la prévision de qualité de l'air (Lim et al. 2005).

Les possibilités sont importantes avec l'utilisation d'un SIG, et cela ne peut qu'aller dans le sens de la transversalité des disciplines.

## IX. Synthèse

La définition des indicateurs et leur quantification permet l'évaluation des huit objectifs et leur représentation dans des diagrammes radar. Cette méthode doit alors conduire les utilisateurs à décider de la meilleure alternative.

La limitation du nombre d'indicateurs, leur normalisation et leur représentation répondent à nos objectifs initiaux. La méthode reste simple d'utilisation et compréhensible. De nouveaux aspects pourront être pris en compte sous forme soit d'indicateurs (temps d'accès aux urgences pour l'objectif RIS par exemple), soit de critères (profondeur de vue pour l'indicateur de visibilité extérieure). Concernant l'agrégation des critères, le mode de détermination des coefficients de pondération est moins transparent mais il reste compréhensible et utilisable et surtout il permet de vérifier la cohérence des choix.

La grande limitation de ce type de méthode est le temps (et le coût) nécessaire pour effectuer les calculs des indicateurs et surtout pour acquérir les données. Notre objectif futur est de simplifier cette démarche en proposant des valeurs moyennes ou des ratios en fonction des typologies de bâtiments, de routes et voies de circulation, de parcs, etc. Le SIG permettra aussi de simplifier les échanges avec les logiciels.

Il est également possible d'utiliser de la méthode à différents niveaux d'avancement du projet : la quantité et la précision des informations disponibles influera sur le mode de calcul de l'indicateur mais la méthode restera applicable. Le niveau de précision des données obtenues croît avec l'avancement d'un projet.

Des inconnues subsistent quant à la définition des indicateurs associés aux autres objectifs : ce n'est pas l'objet de cette thèse de définir l'ensemble des indicateurs qui dépassent notre champ d'expertise (acceptation du quartier, gestion du tourisme, etc.). Le but est de mettre en place une méthode, ce que nous avons présenté ; ainsi qu'un outil informatique facilitant son usage.

Le dernier chapitre présente l'application concrète de notre méthode correspondant à la caractérisation d'un projet urbain à La Rochelle : la restructuration de l'espace autour de la gare.

## CHAPITRE 5 : Etude de cas – Utilisation de la méthode ADEQUA

A l'issue du travail mené, nous confrontons maintenant la méthode élaborée avec un cas d'étude. A la demande de l'aménageur *Espaces Ferroviaires*, le LEPTAB participe à l'aménagement d'une zone située en centre ville de La Rochelle, à travers l'évaluation de variantes envisagées et proposées par le cabinet d'urbanisme *AREP*. L'étude porte sur trois quartiers respectivement à l'est, à l'ouest et au sud de la gare. Nous présentons dans ce chapitre les premiers résultats de l'étude menée sur le quartier est. Ce partenariat a conduit à l'application de la méthode et à un premier retour d'expérience.

La population de l'agglomération rochelaise est en forte croissance (10,5 % entre 1990 et 1999 d'après l'INSEE). Le déficit de logement est important : la Ville et la Communauté d'Agglomération ont donc entrepris un vaste programme de construction et de réhabilitations en différents lieux de la ville et de la communauté. Le projet "Espaces Gare", né de cette réflexion, répond à la volonté de réaliser un aménagement global et ambitieux en s'appuyant sur la reconquête des délaissés ferroviaires. Il devrait également apporter des espaces pour les activités hôtelières, tertiaires et commerciales et de par sa position, il constitue un enjeu majeur en terme de déplacement.

## I. Présentation du projet Espaces Gare

### I.1. Le quartier de la gare et ses environs

Vu du ciel, la gare de La Rochelle occupe une position centrale dans l'agglomération de La Rochelle. Pourtant, à l'époque où elle fut construite, la gare bornait une zone urbanisée qui depuis, l'a débordée de toutes parts, comme le montre la Figure 43. L'opération a pour objet l'urbanisation d'un secteur proche du centre ville historique de La Rochelle. Elle envisage des développements immobiliers restructurant des espaces ferroviaires aujourd'hui délaissés. Elle permet également de créer l'environnement urbain et paysager du futur pôle d'échange de la gare SNCF et replace cet équipement majeur au cœur d'un espace urbain constitué. Les terrains sont des anciennes propriétés de la SNCF, de RFF (Réseau Ferré de France) et de la ville.

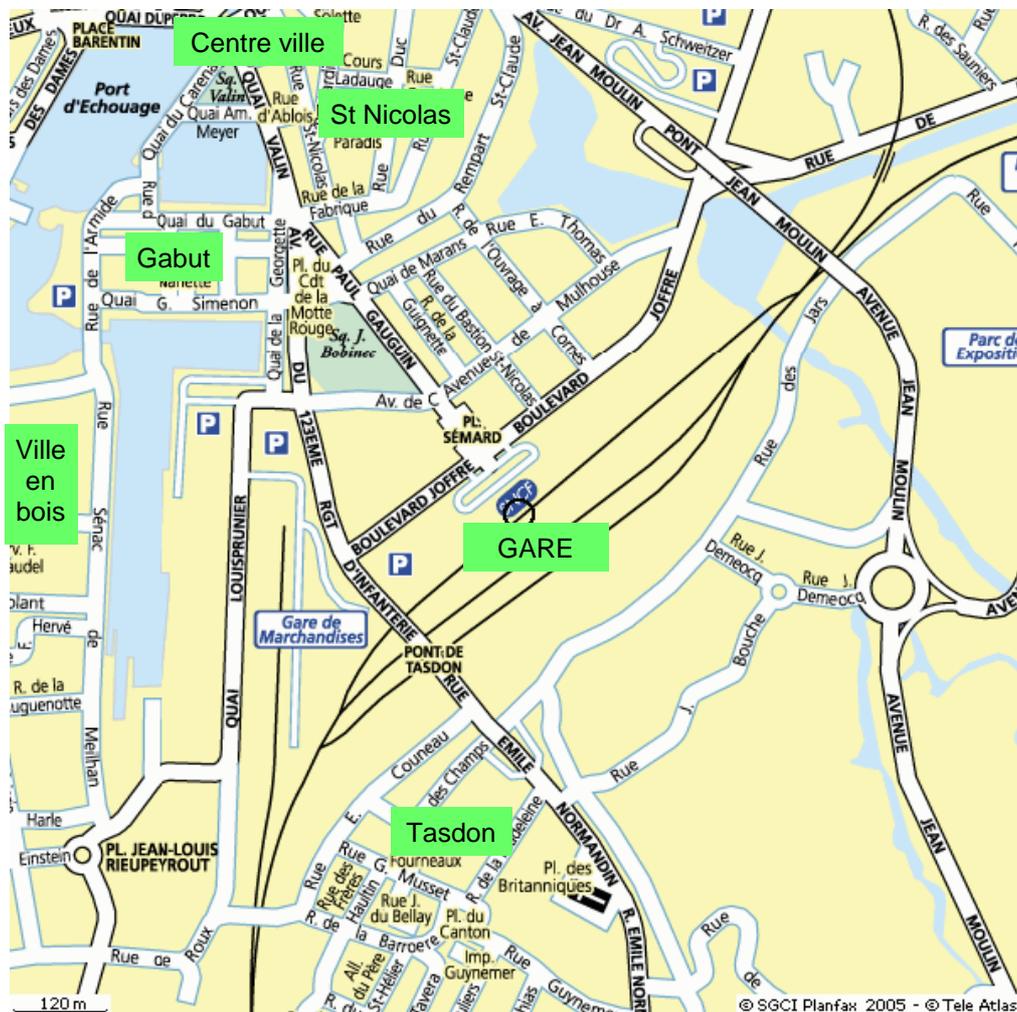


Figure 43 : Plan du secteur de la gare et de sa périphérie<sup>24</sup>

Les environs de la gare se composent d'entités homogènes bien différenciées (AREP et al. 2005). Le centre ville ancien autour du vieux port est très dense et en alignement sur des rues étroites et sinueuses. Le quartier Saint Nicolas est un tissu analogue mais plus modeste, en continuité du centre ancien. Entre ce quartier et le boulevard Joffre, le quartier au nord de la

<sup>24</sup> www.1bis.com

gare est une extension récente de la zone urbaine dense aux rues larges et limité par un bâti (R+4, R+5) parfois discontinu. Le quartier du Gabut, au tissu coloré, est situé entre le bassin à Flot et le bassin des Chalutiers, sur les espaces réservés autrefois aux pêcheurs et dont la hauteur ne dépasse pas le R+2. Le quartier de la Ville en bois, autour de la médiathèque et des facultés, est structuré par de larges avenues face au bassin des chalutiers. Au sud des voies ferrées, les quartiers périphériques plus ou moins anciens et homogènes, sont à dominante habitat et artisanat.

Concernant le planning, les échéances sont réduites : le dossier doit être déposé au 1 janvier 2006, c'est-à-dire qu'à cette date les parcelles et les règles majeures de construction doivent être définies. La collectivité et l'aménageur souhaitent que les travaux commencent avant la fin de l'année 2006.

## I.2. Grandes lignes du projet

L'aménagement "Espaces Gares" s'inscrit dans la logique urbaine de la Ville et de l'Agglomération. Cette logique concerne les aspects d'accessibilité inter quartiers et intra quartiers, de trame viaire (voitures, piétons, transports en commun et transport en commun en site propre), de trame végétale avec ses fonctions sociales, économiques et environnementales et dernièrement de trame bâtie qui en résulte et qui vient accompagner les axes et les nouvelles voies identifiées.

Le projet "Espaces Gare" met en évidence le rôle d'articulation du quartier de la gare :

- Pour la voirie : en favorisant les modes doux et les cheminements piétons au nord (en particulier depuis la gare vers le centre ville et l'aquarium), la fluidité au sud, grâce à la création de la voie de desserte du quartier des Minimes qui, relayée par une mise en place pertinente de parcs relais propose une véritable alternative au niveau de la desserte des pôles d'attractivités majeurs de la ville : espace Encan /aquarium/ musée maritime et parvis de la gare,
- Pour les transports : en favorisant les échanges intermodaux avec un relais efficace entre les véhicules particuliers et les autres modes, ainsi qu'un dispositif sud qui renforce le pôle d'échanges – parking longue durée, dépose, accès gare depuis la passerelle avec une réservation pour les équipements éventuels d'une « gare avancée » (abri et billetterie automatique),
- Pour la cohérence urbaine : en tentant d'articuler l'ensemble des quartiers urbains séparés aujourd'hui par les emprises ferroviaires, côté ouest vers Encan et Aquarium, côté sud vers Tasdon, côté est vers le boulevard Joffre et de favoriser la continuité urbaine en s'affranchissant de la présence des voies ferrées.

Le programme prévisionnel du projet prévoit une surface hors œuvre nette de 50 000 à 60 000 m<sup>2</sup> de logements et une surface de 30 000 à 40 000 m<sup>2</sup> pour des activités hôtelières, tertiaires et commerciales.

Le projet "Espaces Gare" est une Zone d'Aménagement Concertée (ZAC)

## Définition d'une Zone d'Aménagement Concertée

La ZAC est une procédure française d'urbanisme instituée par la loi d'orientation foncière du 30 décembre 1967.

Les ZAC sont des zones à l'intérieur desquelles une collectivité publique décide d'intervenir et de mener une politique volontariste pour réaliser ou faire réaliser l'aménagement et l'équipement des terrains en vue de les céder à des utilisateurs publics ou privés. Une ZAC peut permettre la mise en œuvre d'une politique de renouvellement urbain ou un développement urbain maîtrisé de réserves foncières. La superficie d'une opération de ce type varie de quelques hectares à plus d'une centaine. Les objectifs d'aménagement peuvent concerner le développement des activités économiques ou la production d'une offre diversifiée en logements, éventuellement les deux. Dans tous les cas, des équipements d'intérêt collectif ou public sont réalisés, ce qui différencie la ZAC du lotissement par exemple. Il s'agit donc de véritables opérations urbaines diversifiées. L'ensemble des procédures associées à la ZAC permet :

- La maîtrise foncière (éventuellement par expropriation si une Déclaration d'Utilité Publique est prononcée),
- La maîtrise du découpage des terrains et de l'affectation des sols,
- La réalisation de voiries et d'équipements publics nécessaires au bon fonctionnement d'un nouveau quartier, dont la nature est déterminée après concertation de la population et étude d'impact de l'opération sur l'environnement, l'économie, les déplacements, etc.
- De définir avec précision le contenu du programme, de planifier et de maîtriser la programmation des divers équipements évitant ainsi l'urbanisation au coup par coup, au gré des opportunités foncières.

La ZAC s'inscrit dans un cadre réglementaire avec :

- Une concertation préalable de la population sur les objectifs d'aménagement (le bilan de cette concertation est présenté au Conseil Municipal),
- Une approbation par le Conseil Municipal du bilan de la concertation préalable au projet de création de ZAC et d'un dossier de création comportant un rapport de présentation, un plan de situation, un plan de délimitation du périmètre et une étude d'impact.
- Une approbation par le Conseil Municipal d'un dossier de réalisation avec un programme de construction, un programme des équipements publics prévus et la planification dans le temps du financement de l'ensemble de l'opération
- L'approbation par le Conseil Municipal de la suppression de la ZAC permet d'achever l'opération d'aménagement.
- Elle a pour conséquence le retour au régime de droit commun pour le droit de préemption urbain.

### I.3. Les trois quartiers

Le projet "Espaces Gare" concerne 12 hectares situés autour de la gare, comme le montre la Figure 44.

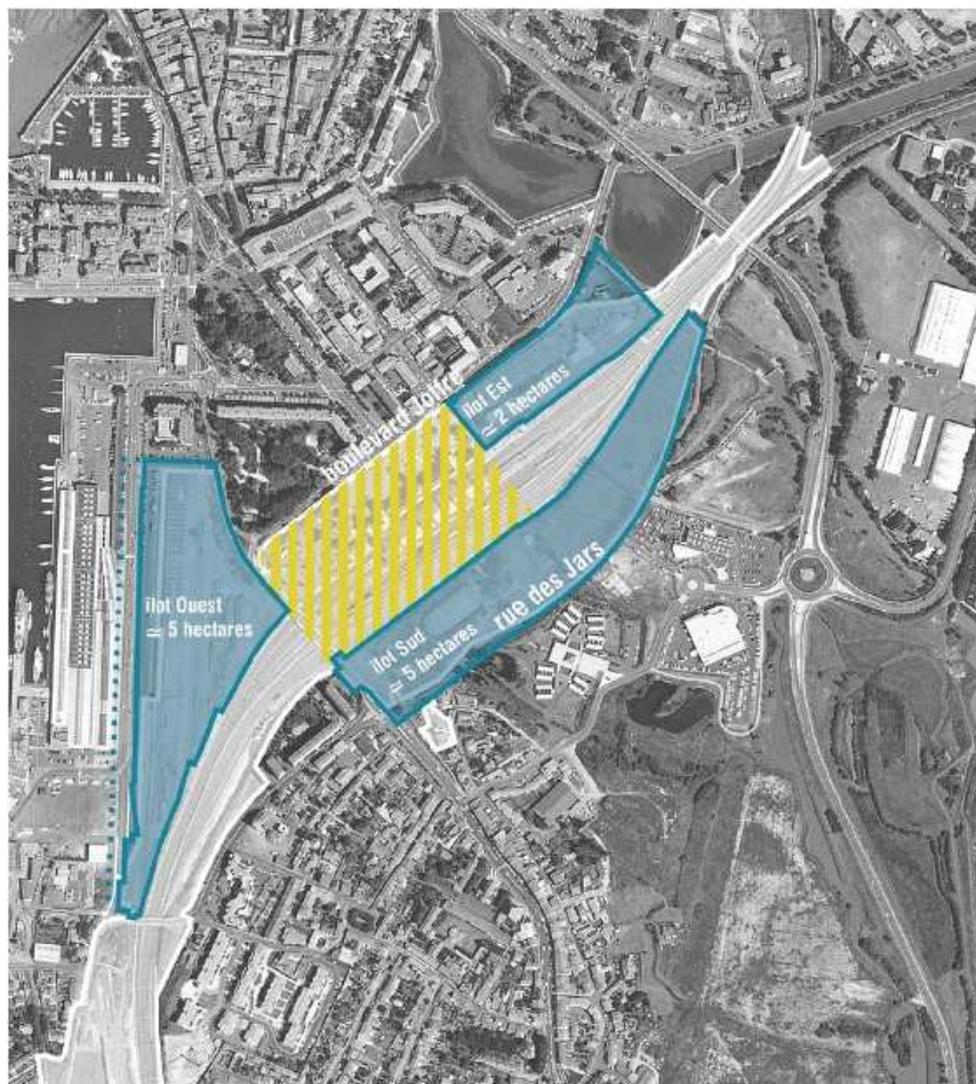


Figure 44 : Présentation du projet "Espaces gare"<sup>25</sup>

Les hachures représentent la gare et les voies d'accès aux trains. "Espaces Gare" se décompose en trois quartiers. Le quartier EST concerne 2 hectares de terrains actuellement occupés par l'ancien centre de tri. Le quartier OUEST situé entre l'Encan et la gare prévoit l'aménagement de 5 hectares. Le quartier SUD représente 5 hectares situés entre les voies ferrées et la rue des Jars.

Les îlots OUEST et EST ont une vocation ferroviaire dès la mise en service de la gare, alors que l'îlot SUD n'a jamais accueilli d'activités ferroviaires au sens strict du terme (un centre de loisirs du CE SNCF se trouve aujourd'hui sur ce terrain, autrefois il était occupé par des jardins ouvriers).

<sup>25</sup> Document AREP

### I.3.a. Le quartier EST

La Figure 45 présente une photo du quartier EST avec une première proposition d'aménagement. Elle permet de visualiser l'environnement du quartier et son étendue.



**Figure 45 : Photomontage du quartier EST avec une première proposition d'aménagement<sup>26</sup>**

Ce quartier possède un terrain minéralisé sans dénivelé important, la végétation est très peu présente, de même la faune est peu abondante ; à cause de la proximité des marais offrant une zone plus accueillante. La vocation spécifique de ce quartier est :

- De structurer le boulevard Joffre "inachevé" et en lui donnant une "façade urbaine" côté gare et un vis-à-vis à la façade Sud du boulevard,
- De participer à la mise en scène du monument de la gare lui-même grâce à un front bâti,
- D'affirmer un alignement côté boulevard qui cadre des fenêtres, perspectives ouvertes sur le coeur d'îlots et au-delà des voies ferrées, offrant ainsi une épaisseur et des plans visuels travaillés,
- De s'articuler avec le bassin de chasse, grâce à la mise en place d'espaces jardinés au centre du quartier.

---

<sup>26</sup> Document AREP

### I.3.b. Le quartier OUEST

La zone à aménager est actuellement principalement occupée par les anciennes halles de la SERNAM (au milieu sur la photo Figure 46) et par un parking desservant l'Encan (à droite), l'Aquarium de La Rochelle et le Musée maritime. La vocation de l'îlot Ouest est de renforcer le rôle de vitrine de l'ensemble de ce quartier situé en vis à vis d'équipements majeurs tels que l'Aquarium, l'espace Encan et le Musée Maritime.



**Figure 46: Vue depuis l'hôtel Mercure de la zone OUEST**

Cette urbanisation sera mise en oeuvre en s'appuyant sur les principes suivants :

- Une composition urbaine dont l'armature est le nouveau parvis de l'espace Encan, axe viaire principal et structurant,
- Une organisation du bâti à dominante d'habitat en alignement sur l'axe structurant plaçant à chaque extrémité des pôles d'attractivité (hôtelier, loisir, etc.) qui affirme le caractère portuaire lié à la proximité des bassins, tout en laissant la possibilité d'aménager des voies piétonnes transversales et de larges percées visuelles vers l'épaisseur des nouveaux îlots,
- Un confortement du statut de "pôle attractif et d'animation" de ce secteur en le complétant éventuellement par un programme de commerces et de logistique urbaine d'équipements : parc de stationnement public souterrain, TCSP (Transports en Commun en Site Propre), mise en valeur de la liaison piétonne avec la gare, le centre ville, le quartier de la ville en bois,
- Une dimension environnementale et paysagère qui permet l'implantation d'un bâti résidentiel, grâce à la création d'un parc public dans le prolongement de l'espace vert existant et qui s'étend jusqu'à la voie ferroviaire, créant ainsi un écran visuel au futur quartier face aux emprises ferroviaires diminuées,
- Un axe viaire à caractère résidentiel en façade du parc, permettant la desserte de l'habitat riverain,
- Un axe piétonnier et cyclable qui relie la gare et l'Aquarium, l'espace Encan et le centre ville.

### I.3.c. Le quartier SUD

La Figure 47 présente une photo du quartier SUD avec une première proposition d'aménagement. Elle permet de visualiser l'environnement du quartier et son étendue.



**Figure 47 : Photomontage du quartier SUD (photo prise depuis la tour de la gare)<sup>27</sup>**

De même que le quartier EST, le terrain est sans dénivélé important, cependant à la différence des deux autres quartiers, la végétation est plus importante. La vocation essentielle de l'îlot Sud est d'amorcer, à l'occasion de l'organisation et de l'extension du pôle d'échanges et de la mise en place d'une voie de desserte intra quartiers, une articulation urbaine avec le quartier de Tasdon (situé à l'ouest de la zone) et les espaces naturels des marais (à l'est). A caractère plutôt résidentiel en son centre, l'urbanisation de cet îlot s'appuiera sur les principes suivants :

- Une densité bâtie plus affirmée à l'Ouest. Le programme de cette partie sera réservé en priorité à la logistique pôle d'échanges, en particulier à la mise en place d'un parking silo destiné au stationnement longue durée, et accompagné éventuellement de commerces destinés à contribuer au renforcement d'une animation et d'une attractivité au-delà des voies ferrées,
- Une nouvelle voie de desserte le long des voies ferrées, destinée à soulager le centre ville et le pont de Tasdon des flux de transit et à améliorer la fluidité du pôle d'échanges. Cette voie pourrait distribuer et justifier à long terme la présence d'un parc relais à l'Est du site afin de capter au maximum les véhicules particuliers et proposer une alternative : des transports en commun et un franchissement piétonnier,
- Un relais des transports en commun et en particulier un TCSP,
- Un bâti résidentiel qui prend comme ancrage le sol naturel à dominante verte, et qui offre une hiérarchie de densité bâtie progressive,
- Les abords de la gare doivent également être remaniés en vue d'une ouverture vers le Sud de l'accès principal.

---

<sup>27</sup> Document AREP

#### I.4. Acteurs et ambitions

La ville et la Communauté d'Agglomération de La Rochelle (CDA) ont fait appel à l'aménageur Espaces Ferroviaires dans le cadre de la ZAC. Les ambitions sont résolument tournées vers la réalisation d'un quartier exemplaire ; la CDA ayant signé récemment un contrat ATEnEE (voir Annexe 2 page 177) avec l'ADEME. La maîtrise de l'énergie et la protection de l'environnement sont des objectifs importants, ils s'accompagnent également d'une volonté de prise en compte des nuisances acoustiques (dus au trafic routier et au trafic ferroviaire) et de gestion des déplacements.

AREP, Bureau d'études pluridisciplinaire en aménagement et construction, a été mandaté pour concevoir et réaliser les différents quartiers. L'équipe du projet est également constituée d'un paysagiste, du bureau d'étude en environnement ATMOSPHER(e) et d'un bureau d'étude VRD nommé IDTP.

Dans ce projet, le LEPTAB intervient dans différents domaines d'expertise pour accompagner les prises de décisions tout au long du déroulement du projet. Les domaines d'expertise que nous pouvons apporter concernent les quatre premiers objectifs (RES, ECO, AMB et RIS). Plus spécifiquement, nous travaillons sur les aspects d'ensoleillement, d'éclairage naturel, de visibilité, d'acoustique extérieure, d'énergétique (consommation) et d'analyse de cycle de vie. Grâce à la méthode ADEQUA, nous apportons aussi au projet une aide à la décision par le choix des objectifs retenus, leur présentation aux intervenants et par la méthode utilisée (mode de gestion et de représentation des indicateurs).

## II. Application de la méthode sur le quartier EST

Le travail du LEPTAB sur le projet "Espaces Gare" concerne l'évaluation de l'ensemble des quartiers. Cependant, nous présentons dans le présent chapitre les résultats de l'évaluation de différentes propositions d'aménagement pour le quartier EST.

### II.1. Objectifs et indicateurs

L'utilisation de la méthode ADEQUA porte sur les quatre premiers objectifs avec leurs indicateurs associés ; ils sont résumés dans le Tableau 27.

**Tableau 27 : Objectifs et indicateurs servant à l'évaluation du quartier EST**

<b>Objectif "Préserver les ressources"</b>
Consommation d'énergie primaire
Consommation d'eau
Occupation du sol
Utilisation de ressources abiotiques épuisables
<b>Objectif "Préserver l'écosystème"</b>
Emission de substances entraînant des pluies acides
Emission de substances toxiques pour la faune et la flore locale
Emissions de substances conduisant à une eutrophisation excessive des milieux aquatiques
Production de déchets inertes ultimes
<b>Objectif "Améliorer la qualité des ambiances"</b>
Confort hygrothermique et aéralique intérieur
Visibilité intérieure
Eclairage intérieur
Espace intérieur
Confort acoustique extérieur
Visibilité extérieure
Ensoleillement
<b>Objectif "Préserver la santé et gérer les risques"</b>
Emission de gaz à effet de serre
Emission de substances toxiques pour l'homme
Emission de gaz conduisant au smog d'été
Production de déchets radioactifs

La description plus précise des indicateurs est donnée dans le chapitre précédent. Pour chaque alternative d'aménagement du quartier EST, les différents indicateurs seront évalués à l'aide d'outils de simulation.

### II.2. Calcul d'ensoleillement

Le premier outil que nous utilisons est SOLENE. Développé par le laboratoire CERMA de Nantes (Miguet et Groleau 2002), il permet de simuler l'ensoleillement sur l'ensemble des surfaces extérieures du quartier. Il permet aussi, grâce à une interface de visualisation en trois dimensions, d'offrir un rendu depuis chaque point de l'espace. C'est un outil indispensable pour le calcul de l'ensoleillement reçu par chaque surface (parking, façade, rue), ou bien également pour le calcul des facteurs de forme entre les surfaces du quartiers et le ciel. Un code en C++ développé en interne au LEPTAB (Bozonnet et al. 2005) permet d'utiliser SOLENE pour une période de simulation de plusieurs mois.

Le logiciel doit connaître la localisation du projet, le type de ciel. Ensuite il s'agit de définir l'enveloppe des bâtiments et les caractéristiques lumineuses des surfaces (coefficient d'absorption, de réflexion et de transmission). Le calcul de l'ensoleillement est basé sur le

modèle de Perez pour le ciel (Perez et al. 1993) et sur la méthode des radiosités pour les échanges entre les surfaces (Miguet et Groleau 2002).

### II.3. Simulations acoustiques

Une autre famille d'outils de simulation à l'échelle du quartier concerne l'acoustique. Deux principaux codes de calcul sont disponibles sur le marché : Mithra et SoundPLAN. Nous avons retenu SoundPLAN car il est en adéquation avec notre échelle d'étude, avec les calculs à effectuer et avec la puissance de calcul offerte par les ordinateurs actuels. Ce logiciel permet de prévoir les niveaux sonores en façade des bâtiments et également dans les espaces extérieurs. Après avoir entré le relief du terrain et les enveloppes des bâtiments, les sources sonores sont identifiées : ce sont les routes, les parkings et les voies ferrées. La norme utilisée pour le calcul du niveau sonore émis par les routes est la norme *NMPB 96* (Nouvelle Méthode de Prévision du Bruit). Les prévisions sont basées sur la norme *ISO 9613-2* pour les parkings et sur la norme allemande *Schall 03 streng* pour les voies ferrées (aucune norme française n'est implémentée dans la version du logiciel dont nous disposons).

Quelle que soit la méthode de calcul utilisée, le calcul acoustique est effectué pour chaque rayon issu du récepteur qui coupe une ligne de source. Les rayons sont tirés dans toutes les directions, avec un pas angulaire  $d\theta$ . Si le pas angulaire est suffisamment petit (quelques degrés), on suppose que le milieu de propagation ne varie pas. Dans ces conditions, le problème se ramène à celui du calcul rectiligne entre une source ponctuelle et un récepteur. Pour cela, il faut définir la puissance acoustique  $W$  associée à l'émetteur et les atténuations par divergence géométrique ( $A_{div}$ ), absorption par l'air ( $A_{atm}$ ), effet de sol ( $A_{sol}$ ), diffraction ( $A_{dif}$ ) et absorption par les surfaces verticales ( $A_{ref}$ ) sur lesquelles le rayon a été réfléchi dans le plan horizontal. Le niveau de puissance  $L_w$  dépend uniquement de la puissance  $W$  de la source, il est exprimé en [dB] et se calcul par la formule :

$$L_w = 10 * \log \left( \frac{W}{W_0} \right) \text{ avec } W_0 = 10^{-12} \text{ Watt} \quad (\text{V.2.1})$$

Ces atténuations sont exprimées en dB. La divergence géométrique correspond à l'atténuation due à la distance. L'effet du sol permet de prendre en compte la réflexion du sol qui augmente le niveau sonore du récepteur, donc l'atténuation est négative (et elle ne peut excéder -3 dB). La diffraction caractérise la propagation du son en présence d'extrémité d'obstacle : la zone de diffraction se conduit alors comme une source ponctuelle (non directive). Les différentes normes de calcul sont présentées ci-après.

#### II.3.a. Parkings

Les prévisions sonores des parkings sont basées sur la norme *ISO 9613-2*. Le niveau sonore se calcule à l'aide de la formule suivante :

$$L_p = L_w - A_{div} - A_{atm} - A_{sol} - A_{dif} - A_{ref} \quad (\text{V.2.2})$$

Le niveau sonore à long terme  $L_{LT}$  est obtenu à partir de ce résultat en appliquant une correction météorologique qui dépend des hauteurs de source ( $h_s$ ) et de récepteur ( $h_r$ ), de la distance source – récepteur ( $dp$ ) et du pourcentage de temps ( $p_t$ ) pendant lequel les conditions météorologiques sont favorables à la propagation.

$$L_{LT} = L_p + C_{météo} \quad (\text{V.2.3})$$

$$\text{Si } dp > 10 * (h_s + h_r) \text{ alors } C_{météo} = C_0 * (1 - 10 * (h_s + h_r) / dp) \quad (\text{V.2.4})$$

$$\text{Avec } C_0 = 10 * \log(p) \text{ et } C_0 > -5 \text{ dB} \quad (\text{V.2.5})$$

$$\text{Si } dp < 10 * (hs + hr) \text{ alors } C_{\text{météo}} = 0 \quad (\text{V.2.6})$$

Dans ce mode de calcul du niveau de long terme, on considère que le niveau sonore en conditions météorologiques défavorables à la propagation du son est négligeable devant le niveau sonore en conditions favorables. Cette hypothèse est vérifiée quand la distance source – récepteur est grande et pour une source et un récepteur proches du sol. Le terme  $C_{\text{météo}}$  qui dépend de la distance et de la hauteur de source et de récepteur est un estimateur de l'écart entre niveau favorable et niveau défavorable.

La source  $L_W$  est définie en fonction du type de parking (centre commercial, parking de motos, discothèque, station de bus, parking poids lourds), puis cette valeur est ajustée en fonction de la taille du parking (en nombre places) et du nombre de mouvement de véhicules par place.

### II.3.b. Voies ferrées

La norme de calcul allemande Schall 03 permet de prendre en compte les voies ferrées. Le niveau sonore émis par chaque type de train est noté  $L_{m,E}$  et calculé grâce à la formule :

$$L_{m,E} = 10 * \log \left[ 10^{(0,1*(51+D_{Fz}+D_D+D_L+D_V))} + D_{Tt} + D_{Br} + D_{LC} + D_{Ra} \right] \quad (\text{V.2.7})$$

Les 51 dB correspondent au niveau sonore de base d'un train et  $D_{Fz}$ ,  $D_D$ ,  $D_L$  et  $D_S$  sont des ajustements pour prendre en compte respectivement le type de train, le pourcentage de freinage du train, sa longueur et sa vitesse.  $D_{Tt}$ ,  $D_{Br}$ ,  $D_{LC}$  et  $D_{Ra}$  définissent respectivement le type de voie, la présence d'un pont, la présence d'un croisement à niveau et le rayon de courbure des voies.  $D_{Fz}$  est donné dans le Tableau 28 issu du manuel d'utilisation de SoundPLAN (1990) :

**Tableau 28 : Valeur de  $D_{Fz}$  selon le type de train (SoundPLAN 1990)**

Type de train	$D_{Fz}$
Train dont la vitesse permise est supérieure à 100 km/h	- 4
Train avec des freins à disque sur les roues	- 2 ou - 1 selon le type de train
Métro	2
Tramway	3
Autres trains	0

Les autres ajustements sont donnés par les formules suivantes :

$$D_D = 10 * \log(5 - 0,04 * P_f) \text{ avec } P_f \text{ le pourcentage de freinage} \quad (\text{V.2.8})$$

Le pourcentage de freinage dépend principalement de la surface de contact entre la roue et le frein.

$$D_L = 10 * \log(0,01 * (\text{longueur du train [m]})) \quad (\text{V.2.9})$$

$$D_S = 20 * \log(0,01 * (\text{vitesse du train [km/h]})) \quad (\text{V.2.10})$$

$D_{Tt}$  est donné dans le issu du manuel d'utilisation de SoundPLAN (1990) :

**Tableau 29 : Valeur de  $D_{Tt}$  selon le type de train (SoundPLAN 1990)**

Type de voie	$D_{Tt}$
Corps de voie avec de l'herbe	- 2
Ballaste avec des traverses en béton spécial	0
Ballaste avec des traverses en bois	0
Ballaste avec des traverses en béton normales	3
Autres trains	0

Le calcul du niveau sonore nécessite de diviser les voies en sections. Le niveau sonore reçu est calculé pour chaque tronçon  $k$  est :

$$L_{r,k} = L_{m,E,k} + 19,2 + 10 * \log(l_k) + D_{l,k} + D_{s,k} + D_{BM,k} + D_{Korr,k} \quad (V.2.11)$$

Avec  $l_k$  la longueur de la section,  $D_{l,k}$ ,  $D_{s,k}$ ,  $D_{BM,k}$  et  $D_{Korr,k}$  respectivement la directivité de la source, la propagation fonction de la distance source – receveur, l'absorption de l'air et l'influence d'écrans et de surfaces réfléchives.

### II.3.c. Routes

Pour le calcul du niveau sonore dû aux routes avec la norme *NMPB 96*, l'estimation d'un niveau long terme suppose qu'il existe sur un site des conditions météorologiques favorables à la propagation du son et des conditions météorologiques défavorables. Or, il n'existe pas actuellement de méthode analytique simple permettant de calculer des niveaux qui seraient représentatifs des conditions moyennes "défavorables", c'est-à-dire favorable à la propagation du son. Pour évaluer les niveaux sonores de long terme, prenant en compte l'ensemble des conditions météorologiques rencontrées sur un site, la méthode *NMPB96* utilise un artifice consistant à majorer les niveaux sonores en conditions "défavorables" par les niveaux correspondants aux conditions homogènes. Cette décision surestime les niveaux sonores réels obtenus dans ces conditions de propagation, mais va dans le sens de la sécurité. Le niveau sonore de long terme se calcule à partir :

- du niveau sonore en conditions favorables à la propagation du son :

$$L_{pF} = L_w - A_{div} - A_{atm} - A_{sol,F} - A_{dif,F} - A_{ref} \quad (V.2.12)$$

- du niveau sonore en conditions homogènes :

$$L_{pH} = L_w - A_{div} - A_{atm} - A_{sol,H} - A_{dif,H} - A_{ref} \quad (V.2.13)$$

Où  $A_{sol,F}$  est l'atténuation par effet de sol avec des conditions météorologiques favorable à la propagation du son,  $A_{dif,F}$  est l'atténuation par diffraction avec des conditions météorologiques favorable à la propagation du son,  $A_{sol,H}$  est l'atténuation par effet de sol avec des conditions météorologiques homogènes,  $A_{dif,H}$  est l'atténuation par diffraction avec des conditions météorologiques homogènes. Le niveau sonore de long terme est obtenu avec la formule suivante :

$$L_{LT} = 10 * \log \left( p * 10^{\frac{L_{pF}}{10}} + (1-p) * 10^{\frac{L_{pH}}{10}} \right) \quad (V.2.14)$$

$p$  est l'occurrence des conditions météorologiques à long terme favorables à la propagation du son ( $p$  est compris entre 0 et 1). Le fascicule de présentation de la nouvelle méthode édité par le CERTU, CSTB, SETRA et LCPC précise le choix de l'occurrence  $p$  en fonction des sites. Ici, nous prenons  $p=0$  pour se placer dans un calcul correspondant au site homogène. En effet,

les conditions météorologiques locales sont difficilement prévisibles en milieu urbain et de plus pour un site donné, l'écart entre calcul homogène ( $p=0$ ) et calcul favorable ( $p=1$ ) est faible (inférieur à 2 dB).

Le calcul de la puissance acoustique  $L_w$  basé sur la méthode des cônes présenté Figure 48.

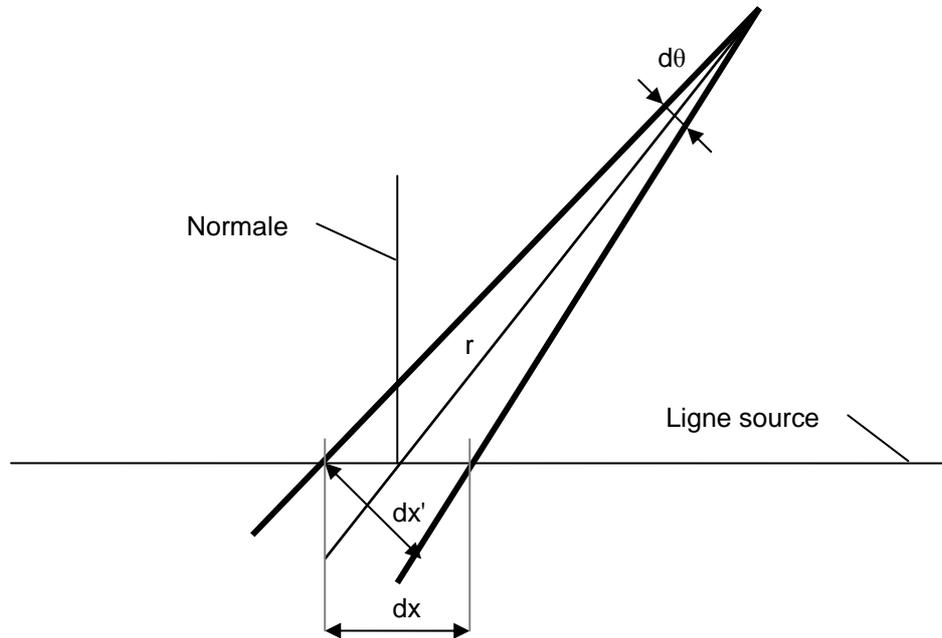


Figure 48 : Méthode de calcul d'une source

Chaque rayon tiré depuis le récepteur est le centre d'un cône dans le plan horizontal. La longueur  $dx$  de la ligne source coupée par le secteur angulaire  $d\theta$  est

$$dx = \frac{r * d\theta}{\cos \theta} \quad (\text{V.2.15})$$

Avec  $r$  est la distance horizontale parcourue par un rayon (associé à un secteur angulaire) qui coupe une ligne de sources de façon directe ou après de multiples diffractions et réflexions,  $\theta$  est l'angle entre le rayon et la normale à la ligne source.

La puissance  $dW$  de la source associée à cet élément de ligne source est :

$$dW = W * dx \quad (\text{V.2.16})$$

Où  $W$  est la puissance par mètre de ligne de source. Ainsi la puissance acoustique de la source s'écrit :

$$L_w = L_w^* + 10 * \log(dx) \quad (\text{V.2.17})$$

La puissance acoustique par mètre de circulation  $L_w^*$  est calculée à partir de la formule :

$$L_w^* = L_w^{VL} + 10 * \log \left( \frac{\text{débit} + \text{débit} * (\% PL) * (EQ - 1) / 100}{V_{50}} \right) - 30 \quad (\text{V.2.18})$$

Où  $L_w^{VL}$  est la puissance acoustique d'un véhicule léger, *débit* le nombre de véhicules par heure par file, *%PL* le pourcentage de véhicules lourds, *EQ* l'équivalence véhicule léger – véhicule lourd et  $V_{50}$  la vitesse du flot de véhicules (elle sera au minimum de 30 km/h). La puissance acoustique d'un véhicule léger est obtenu par :

$$L_w^{VL} = 46 + 30 * \log(V_{50}) + C \quad (\text{V.2.19})$$

Avec C la caractéristique du trafic : C=0, 2 ou 3 respectivement en cas de trafic fluide, pulsé ou dans le cas d'une section de forte accélération.

*EQ* dépend de la vitesse et de la rampe de la voie, ce facteur est donné dans le tableau 3 de la norme NF S.31.085.

Ainsi, pour chaque route, il s'agit de chiffrer le débit de véhicules légers et de véhicules. Ces statistiques ont été obtenues grâce aux comptages effectués par la Ville de La Rochelle. Le trafic ferroviaire concerne les trains voyageurs et le fret.

#### II.4. Analyses de cycle de vie

Pour le calcul des autres indicateurs, il est nécessaire d'utiliser un logiciel effectuant l'analyse du cycle de vie (ACV) complet des bâtiments. Nous avons retenu le logiciel EQUER (Peuportier 2001) développé par le CEP de l'Ecole des Mines et commercialisé par IZUBA Energies. La complémentarité entre ce logiciel et le logiciel COMFIE (Peuportier 2003) permettant de calculer la consommation énergétique ainsi que les conditions intérieures de chaque bâtiment, facilite la saisie des données. L'utilisation d'EQUER est aussi rendue nécessaire par le fait que l'ACV doit utiliser des bases de données correspondant au pays où sont construits les bâtiments. En effet, les quantités de matières premières, l'énergie nécessaire ou le mix électrique ne seront pas les mêmes d'un pays à l'autre. Dans certains cas comme au Canada par exemple, les valeurs du mix électrique peuvent changer d'une province à l'autre (Baouendi et al. 2002). Le CEP finalise un logiciel permettant d'effectuer l'analyse à l'échelle du quartier : ARIADNE.

### III. Présentation des alternatives et hypothèses

Actuellement, l'AREP a proposé plusieurs alternatives pour le quartier EST. Les dernières versions que nous étudions datent de juillet et de septembre 2005. Notre travail consiste à accompagner le bureau d'urbanisme en évaluant chaque alternative, afin de l'aider à mieux cerner les implications des changements effectués. L'évolution des versions dépend aussi des recommandations données par l'Architecte des Bâtiments de France qui donne un avis sur tous les projets situés dans le périmètre de protection des monuments historiques comme la gare et certains bâtiments situés en centre ville. Les propositions sont également évaluées par l'aménageur.

#### III.1. Alternative proposée en juillet

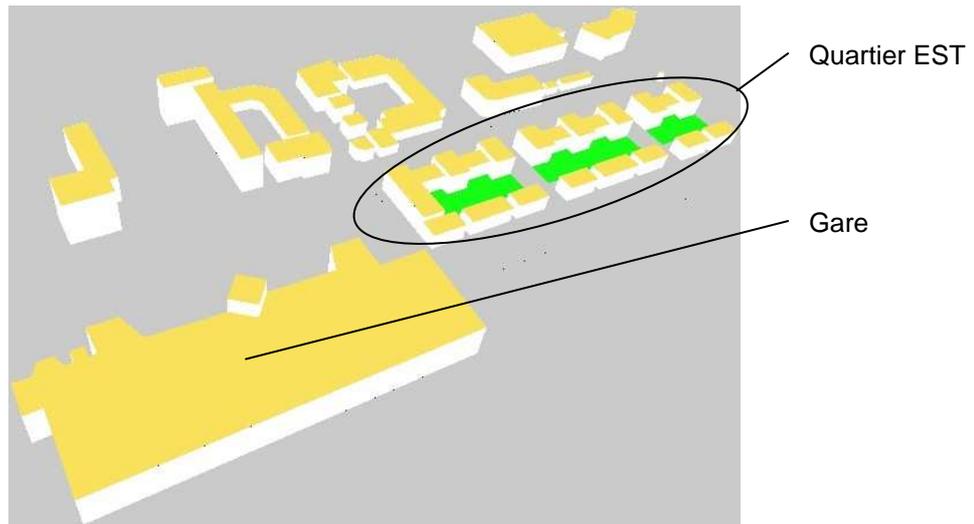
Cette alternative propose la construction de 22 bâtiments en R+3 ou R+4, qui totalisent 19 500 m<sup>2</sup> de surface hors œuvre nette (SHON). La Figure 49 présente cette variante.



**Figure 49 : Présentation de la variante datant de juillet avec la hauteur et le numéro des bâtiments**

On peut constater la présence de trois jardins au cœur du quartier. La forme du bâti offrant une protection acoustique contre les bruits routiers et ferroviaires. Les bâtiments sont nommés par des numéros allant de 1 à 22 à partir d'une rotation dans le sens horaire.

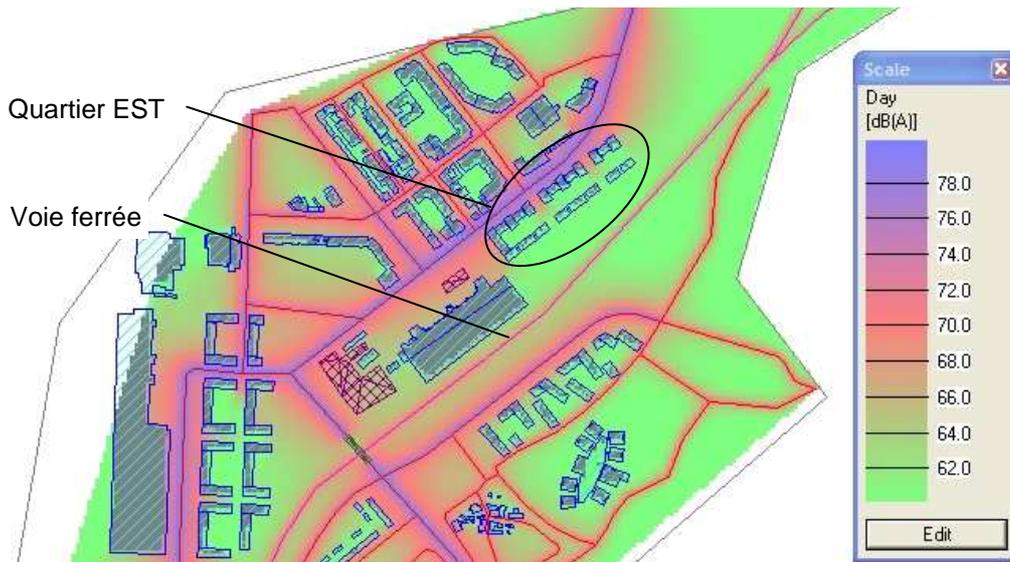
Pour le calcul d'ensoleillement, nous présentons Figure 50 une capture d'écran du quartier EST et des bâtiments environnants tels qu'ils ont été représentés sous SOLENE.



**Figure 50 : Capture d'écran du quartier et des bâtiments environnants (SOLENE)**

La gare est le bâtiment situé en bas à gauche et le quartier est situé à droite de la gare.

Lors du calcul acoustique, nous avons entré l'ensemble des sources environnantes, la Figure 51 présente la prévision du niveau sonore équivalent de jour (de 6h à 22h). L'échelle choisie allant de 60 à 80 dB(A) permet de vérifier les données fournies.

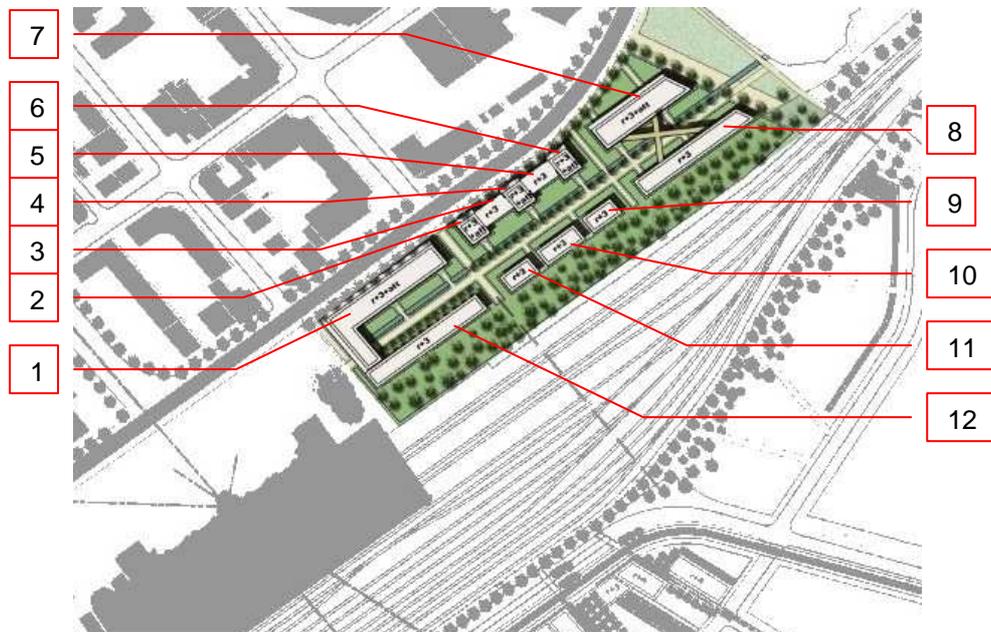


**Figure 51 : Niveau sonore équivalent de jour à 1,5 mètre du sol (SoundPLAN)**

Les émissions correspondent aux routes, à la voie ferrée et aux parkings. Les parkings sont représentés par des surfaces violettes quadrillées ; leurs émissions sont réduites car les mouvements sont faibles dans ces parkings. On peut vérifier que chaque route entraîne une augmentation locale du niveau sonore et que les routes où le trafic est le plus important correspondent bien au niveau sonore le plus élevé.

### III.2. Alternative proposée en septembre

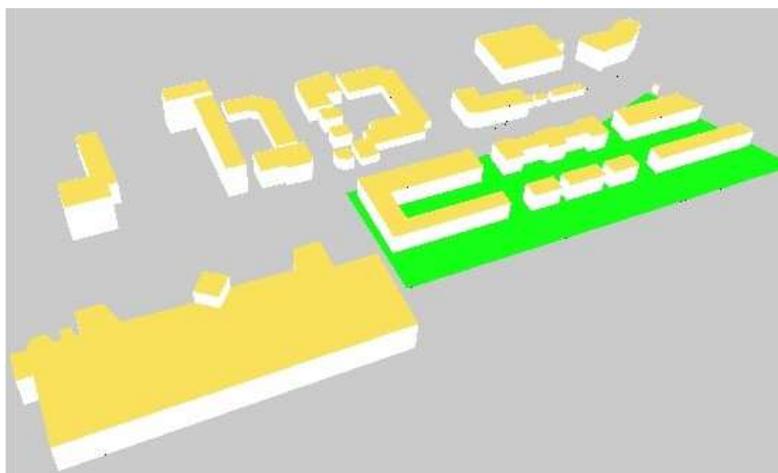
La Figure 52 présente la variante datant de septembre.



**Figure 52 : Présentation de la variante datant de septembre avec la hauteur et le numéro des bâtiments**

Cette alternative propose la construction de 12 bâtiments uniquement en R+3, qui totalisent 19 600 m<sup>2</sup> de surface hors œuvre nette. Les bâtiments sont nommés par des numéros allant de 1 à 12 à partir d'une rotation dans le sens horaire. On peut constater que la SHON est conservée malgré une diminution de la hauteur de certains bâtiments, ce qui correspond au souhait de l'aménageur. La diminution de la hauteur émane principalement d'une demande de l'Architecte des Bâtiments de France, afin de conserver une bonne visibilité depuis et vers la gare. On peut également constater que dans cette variante, la surface de jardin a été nettement augmentée, elle recouvre maintenant la totalité du quartier.

Les principes de calcul et hypothèses sont identiques à la variante précédente. La Figure 53 présente une capture d'écran de la représentation de la variante de septembre sous SOLENE.



**Figure 53 : Capture d'écran du quartier et des bâtiments environnants (SOLENE)**

On peut constater la diminution de la hauteur du bâti (et son uniformisation en R+3), et l'extension de la surface de jardins.

### III.3. Hypothèses de calcul

Etant donné le stade d'avancement du projet, nous disposons de peu de données précises et définitives sur le quartier et les bâtiments qui le compose. La comparaison proposée a pour principal but d'aider à définir la meilleure enveloppe pour les bâtiments et la localisation des espaces. Ces choix auront des conséquences sur l'ensemble des indicateurs.

De nombreuses hypothèses sont donc nécessaires ; le choix des valeurs repose sur l'expérience acquise avec d'autres quartiers ou sur des mesures ou calcul provenant de la littérature. Les hypothèses sont les mêmes pour chaque variante pour limiter l'importance de ces données estimées. Au fur et à mesure de l'avancement du projet, il sera possible de fixer différentes variables et de calculer plus précisément les indicateurs.

Nous présentons les hypothèses majeures que nous avons utilisées lors des différentes simulations.

#### III.3.a. Ensoleillement

On considère comme coefficients de réflexion 0,1 pour le sol et les jardins, 0,77 pour les façades considérées en béton clair et 0,33 pour les toits considérés en béton clair. Ces valeurs proviennent de mesures effectuées lors du projet ZED (Martin Centre for Architectural and Urban Studies 1997).

La surface du sol prolongé hors quartier représente 40 fois la surface du quartier : on peut donc considérer que le sol s'étend à l'infini autour du quartier. Tous les bâtiments susceptibles de masquer une partie du rayonnement solaire sont représentés, ils sont aussi pris en compte dans la simulation car ils réfléchissent une partie du rayonnement solaire. Les façades plus éloignées ne sont pas considérées : la végétation présente sur le site masque le rayonnement réfléchi par ces surfaces. La végétation est également omise car elle est trop complexe à appréhender (coefficient de transmission variable au cours du temps, évolution du feuillage selon les saisons, croissance du végétal, etc.).

L'ensemble est maillé de manière adaptée : maillage plus fin pour les faces du quartier et plus large pour le sol et les bâtiments hors zone d'étude. L'alternative de juillet comporte 2304 éléments et celle de septembre 2335 éléments.

## III.3.b. Acoustique

L'enjeu des prévisions acoustiques est la définition précise des sources sonores proches du quartier, c'est-à-dire les routes et les voies ferrées. Les valeurs utilisées pour le trafic routier sont données dans le Tableau 30 et dans le Tableau 31 pour le trafic ferroviaire.

**Tableau 30 : Trafic routier dans les rues près de la Gare<sup>28</sup>**

Nom du tronçon	Av. du Général de Gaulle	Av. du Général de Gaulle	Av. du 123ème Régiment	Boulevard Joffre	Boulevard Joffre	Boulevard Joffre	Boulevard Joffre	Rue de "l'Encan"	Rue Emile Normandin	Rues de trafic plus faible	Rues au trafic très faible
Début	Quai Valin	Av. de Colmar	Quai Valin	Av. du 123ème Régiment	Av. du Général de Gaulle	Rue de l'Ouvrage à Corne	Rue du Docteur Schweitzer	Rue Sennac de Meillan	Boulevard Joffre		
Fin	Av. de Colmar	Boulevard Joffre	Boulevard Joffre	Av. du Général de Gaulle	Rue de l'Ouvrage à Corne	Rue du Docteur Schweitzer	Av. de Romsay	Av. du 123ème Régiment	Av. Jean Moulin		
<b>Largeur [m]</b>	7	16	14	16	15	10	10	9	8	7	3,75
<b>Type de [voie]</b>	2	2	3	2x2	2x2	2x2	2x2	2	2	2	1
<b>Véhicules légers par heure de jour</b>	456	849	661	1012	1907	1907	1166	1441	1256	200	100
<b>Véhicules légers par heure de nuit</b>	48	89	69	106	200	200	144	152	132	20	10
<b>Véhicules lourds par heure de jour</b>	24	45	35	53	100	100	32	76	66	20	8
<b>Véhicules lourds par heure de nuit</b>	3	5	4	6	11	11	4	8	7	2	1

Le trafic de jour correspond à la période allant de 6 heures du matin à 22 heures le soir et la période de nuit est de 22 heures à 6 heures. Les valeurs sont issues de comptage sur plusieurs semaines et seules les valeurs des deux dernières colonnes sont des estimations. En effet, ces rues ont des trafics ne nécessitant pas de comptages de la part de la ville ou de la communauté d'agglomération.

**Tableau 31 : Trafic ferroviaire pour une journée type en semaine**

Type de train	Débit journalier	Débit nocturne	Vitesse [km/h]	Longueur [m]
<b>Trafic au nord de la gare</b>				
Train de Fret	13	3	60	200
Train de voyageurs	8	0	60	200
<b>Trafic au sud de la gare</b>				
Train de Fret	0	0	60	200
Train de voyageurs	39	2	60	200

<sup>28</sup> Provenant de comptages effectués par le Service Transports et Déplacements de la Communauté d'Agglomération de La Rochelle

III.3.c. Etude énergétique et analyse du cycle de vie

Chaque bloc de bâtiments a été analysé de manière indépendante. La démarche consiste à utiliser les logiciels ALCYONE (Figure 54), COMFIE, puis EQUER. L'alternative de juillet représente 10 blocs de bâtiments et celle de septembre 7 blocs.

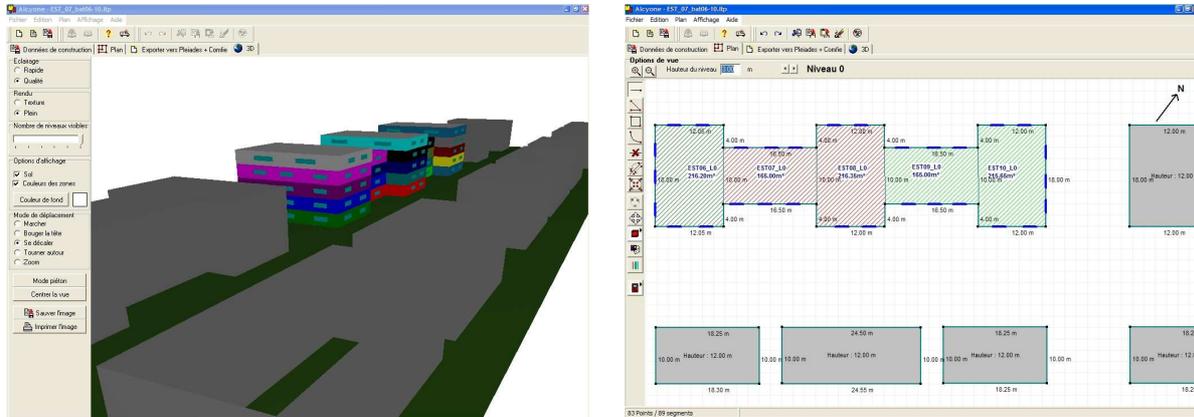


Figure 54 : Capture d'écran du logiciel ALCYONE, représentation en 3D à gauche et vue en plan à droite

Tout d'abord, il s'agit, avec ALCYONE, de définir la géométrie du bâtiment et les masques proches, la position et la taille des ouvertures, puis de définir des zones à l'intérieur du bâtiment. Les choix effectués visent à optimiser de la consommation énergétique des bâtiments. Les premières hypothèses concernent la composition des bâtiments, elles sont détaillées dans le Tableau 32.

Tableau 32 : Composition des bâtiments

Type de paroi	Description
Plancher sur terre plein $U = 0,84 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$	20 cm de béton 4 cm de polystyrène expansé 5 cm de mortier 2 cm de carrelage
Parois verticales $U = 0,38 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$	5 cm de terre cuite (brique) 10 cm de laine de roche 16 cm de béton 1 cm de plâtre Couleur lisse blanche à l'extérieur
Fenêtres $U = 2,47 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$	PVC Double vitrage 4.12.4 Coefficient U de la partie vitrée = $2,80 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$ Coefficient U de la partie non vitrée = $1,70 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$ Facteur solaire moyen : 0,57
Toiture $U = 0,39 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$	16 cm de béton 10 cm de laine de roche

Les données sont ensuite importées par COMFIE qui permet de réaliser une simulation thermique du bâtiment. Cela nécessite différentes hypothèses :

- Le scénario d'occupation correspond à une occupation minimale.
- Le scénario de chauffage considère une consigne de 19°C de 7 heures du matin à 21 heures et une consigne de 15°C le reste du temps.
- Aucune climatisation n'est prévue.
- On considère une ventilation de 0,6 vol/h.

- La simulation correspond à une année entière : fichier météo Test Reference Year (TRY) pour La Rochelle, avec un pas de temps d'une heure.

Le logiciel permet de déterminer pour chaque zone les besoins en chauffage, les températures minimales, maximales et moyennes, et également le taux d'inconfort. Pour le calcul du taux d'inconfort dans les bâtiments, nous considérons le pourcentage du temps d'occupation durant lequel la température de la zone est supérieure à 25°C et inférieure à 16°C, comme expliqué dans le chapitre 4 paragraphe V.1.a (page 100).

Nous obtenons des besoins annuels moyens de chauffage par bâtiment de l'ordre de 40 kWh/m<sup>2</sup> pour chaque alternative ; cela signifie une valeur 30 % meilleure que les 60 kWh/m<sup>2</sup> annoncées pour la RT2005. Ces faibles besoins sont obtenus grâce à la prise en compte des apports solaires avec une surface de vitrages non négligeable, au regroupement de plusieurs bâtiments (réduisant le nombre de parois déperditives), à une isolation performante des parois verticales et également au climat doux de La Rochelle. En effet, la valeur du coefficient U est de 0,38 W/(m<sup>2</sup>.K) pour les parois verticales alors que la nouvelle réglementation thermique RT 2005 préconise une valeur minimale de 0,45 W/(m<sup>2</sup>.K), d'après le projet provisoire du 12 juillet 2005 (DGUHC 2005).

Dernièrement, le logiciel EQUER charge le fichier résultat et effectue les calculs d'ACV en fonction d'hypothèses sur le mix de production électrique de base et pour le chauffage<sup>29</sup>, le rendement du réseau d'eau, la consommation d'eau par personne, les déchets (collecte, tri, incinération et distance au site de tri ou recyclage) et sur les transports (type, distance, mode). Les valeurs proposées par défaut par le logiciel sont retenues lorsqu'il n'y a pas d'informations spécifiques sur le quartier.

Le mix de production électrique est de 78 % de nucléaire, 14 % d'hydroélectrique, 4 % de gaz et 4 % de charbon. Et le mix de production d'électricité pour le chauffage est de 37 % de nucléaire 28 % de charbon, 15 % d'hydroélectrique, 10 % de gaz et 10 % de fuel.

L'énergie utilisée pour le chauffage des bâtiments et de l'eau chaude sanitaire est le gaz naturel.

Des précisions sont données au niveau des déchets et du transport, lesquels sont pris en compte dans le calcul de l'énergie primaire consommée. Pour les déchets, les distances choisies sont : site – décharge de 3 km, site – incinérateur de 7 km et site – centre de recyclage de 10 km. La période d'étude est fixée à 100 ans.

L'occupation des bâtiments est définie comme minimale pour que le comportement des utilisateurs ne prenne pas une part prépondérante sur les consommations et émissions lors du calcul de l'analyse du cycle de vie des bâtiments. En effet l'étude a pour but la définition de l'enveloppe des bâtiments, leur implantation, et l'attribution des surfaces (espaces verts chemins, etc.). L'occupation étant définie bâtiment par bâtiment, il est difficile de définir la même occupation globale pour chaque alternative de quartier ; la définition d'une occupation minimale réduit les erreurs de définition d'occupation. Cela a pour conséquence que l'ACV du quartier concernera quasiment exclusivement le bâti et non les usagers.

---

<sup>29</sup> Le chauffage induit des pointes de consommation en hiver, celles-ci sont assurées en partie par des centrales thermiques alors que l'électricité en base est produite très majoritairement par la filière nucléaire (en France)

## IV. Evaluation des indicateurs pour les différentes alternatives

Nous présentons ici les résultats des différentes simulations menées sur les deux alternatives et les critères servant au calcul des indicateurs. Les valeurs associées à chaque indicateur seront présentées dans le paragraphe V page 152 au moment de la comparaison des alternatives.

### IV.1. Objectif "Préserver les ressources"

L'énergie primaire totale consommée par l'ensemble des bâtiments du quartier provient du calcul effectué par EQUER, comme le montre la première ligne de l'exemple Tableau 33 :

**Tableau 33 : Résultat de calculs effectués par EQUER sur le bâtiment 17 de l'alternative de juillet**

IMPACT	Construction	Utilisation	Rénovation	Démolition	Total
Energie consommée [GJ]	1 900	45 300	300	100	<b>47 600</b>
Eau utilisée [m3]	1 200	108 100	320	40	<b>109 660</b>
Epuisement des ressources abiotiques [ $10^{-9}$ ]	1	16	3	0	<b>20</b>
Déchets inertes produits [t eq]	120	680	0	980	<b>1 780</b>
Déchets radioactifs [dm3]	10	60	0	0	<b>70</b>
Effet de serre [t CO2]	190	1 720	10	10	<b>1 930</b>
Acidification [kg SO2]	760	4 080	60	60	<b>4 960</b>
Eutrophisation [kg PO4]	100	410	0	10	<b>520</b>
Ecotoxicité aquatique [m3]	1 104 400	18 931 200	215 400	164 800	<b>20 415 800</b>
Toxicité humaine [kg]	1500	8500	230	100	<b>10 330</b>
Production d'ozone photochimique [kg C2H4]	400	2 800	20	60	<b>3 300</b>

EQUER distingue les phases de construction du bâtiment, d'utilisation (les données des consommations proviennent de la simulation effectuée par COMFIE), de rénovation et de démolition. Les calculs des différentes variables (énergie primaire consommée, eau utilisée, épuisement des ressources, etc.) s'appuient sur des bases de données. On peut constater dans le tableau ci-dessus que la phase d'utilisation entraîne la plus grande consommation d'énergie primaire.

Après avoir effectué le calcul pour l'ensemble des bâtiments du quartier, les valeurs sont sommées et on obtient respectivement pour les alternatives de juillet et de septembre une consommation d'énergie primaire de 190 000 MWh et 160 000 MWh. La plus faible valeur pour l'alternative de septembre s'explique tout d'abord par l'erreur due à la différence d'occupation des bâtiments d'une alternative à l'autre<sup>30</sup>. Cette différence est minimisée par la prise en compte d'une occupation minimale. Cependant, l'écart provient principalement de l'implantation des bâtiments : l'alternative de septembre propose des bâtiments plus regroupés et de forme plus régulière, offrant ainsi moins de parois déperditives (voir Figure 49 et Figure 52).

La démarche est la même pour la consommation d'eau : on obtient 1 500 000 m<sup>3</sup> pour l'alternative de juillet et 1 300 000 m<sup>3</sup> l'alternative de septembre. Cette différence s'explique par l'écart d'occupation entre les alternatives, étant donné que l'eau consommée correspond essentiellement aux usages domestiques.

<sup>30</sup> L'occupation étant définie bâtiment par bâtiment, il est difficile de définir la même occupation globale pour chaque alternative de quartier.

Il faut prendre en considération la récupération d'eau de pluie : pour cela on considère que 30 % des toitures servent à la récupération, soit 1 300 m<sup>2</sup> pour l'alternative de juillet et 1 480 m<sup>2</sup> pour l'alternative de septembre, et la pluviométrie annuelle, d'après les statistiques météorologiques de La Rochelle est de 678 mm de pluie par an, soit 0,68 m<sup>3</sup>/an. La récupération sera donc de 886 m<sup>3</sup>/an pour l'alternative juillet et 1000 m<sup>3</sup>/an pour l'alternative de septembre.

Pour la consommation de surface équivalente de terrain, on considère la répartition suivante :

**Tableau 34 : Répartition des surfaces au sol [m<sup>2</sup>]**

Type de sol	Etat actuel	Alternative de juillet	Alternative de septembre
Emprise de bâtiments	4000	4400	4900
Site industriel	9200	0	0
Tissu urbain discontinu	0	15500	6000
Zone urbaine verte	9200	2500	11500
<i>Total</i>	<i>22400</i>	<i>22400</i>	<i>22400</i>

Le tissu urbain discontinu correspond à une surface mixte végétale – artificielle avec une dominante artificielle (50 à 80 % de surface étanche). La surface équivalente de terrain sera ainsi de 18 900 m<sup>2</sup>.eq pour l'état actuel, 19 100 m<sup>2</sup>.eq pour l'alternative de juillet et 17 800 m<sup>2</sup>.eq pour l'alternative de septembre.

La consommation de ressources abiotiques épuisables s'obtient de la même manière que l'énergie primaire, à partir de la somme de l'ensemble des consommations de bâtiments. Elle correspond aux ressources consommées divisées par les réserves actuellement disponibles. Pour l'alternative de juillet, on obtient  $310.10^{-9}$  [-] et  $280.10^{-9}$  [-] pour l'alternative de septembre.

#### IV.2. Objectif "Préserver l'écosystème"

Les valeurs d'acidification, d'écotoxicité aquatique, d'eutrophisation et de déchets inertes ultimes sont obtenues grâce au logiciel EQUER, en additionnant l'ensemble des bâtiments étudiés. Pour l'acidification, on obtient 73 000 kg.eq.SO<sub>2</sub> pour juillet et 65 000 kg.eq.SO<sub>2</sub> pour septembre. On constate que la phase d'utilisation des bâtiments est la plus productrice de substances entraînant des pluies acides et les phases de rénovations et de démolitions sont les moins émissives ; les émissions sont en effet principalement dues à la production d'énergie.

L'écotoxicité aquatique représente environ 307 300 000 m<sup>3</sup> d'eau contaminée avec l'alternative de juillet et 250 000 000 m<sup>3</sup> d'eau contaminée pour l'alternative de septembre. La répartition des émissions selon les phases est proche de la répartition pour l'acidification : la phase d'utilisation est prépondérante et la phase de construction joue également un rôle majeur mais de moindre ampleur (il y a un rapport proche de dix entre ces deux valeurs).

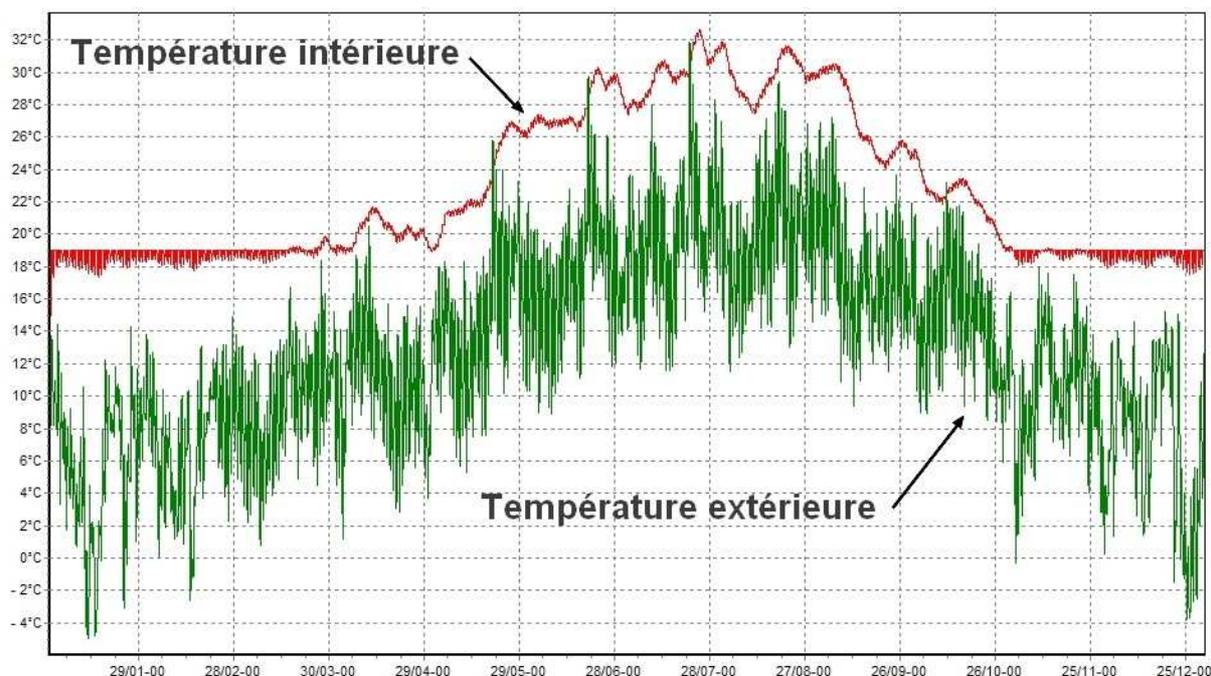
L'eutrophisation induite par l'alternative de juillet est de 8200 kg.eq.PO<sub>4</sub>(3-) et pour l'alternative de septembre de 7200 kg.eq.PO<sub>4</sub>(3-). La phase d'utilisation est aussi la phase prépondérante, mais le rapport entre les émissions de substances (conduisant à une eutrophisation excessive) de phase d'utilisation et de construction est inférieur à 4.

Les déchets inertes ultimes proviennent de la phase de démolition du bâtiment, et la phase d'utilisation produit une part comparable : le rapport est de 2/3, voir même de 1 pour certains bâtiments. Les déchets inertes ultimes produits pour l'alternative de juillet représentent 29 7000 tonnes équivalentes et 28 100 tonnes équivalentes pour l'alternative de septembre.

### IV.3. Objectif "Améliorer la qualité des ambiances"

Nous décrivons maintenant le détail de calcul des critères relatifs à cet objectif.

Pour le confort intérieur, la note choisie est la même pour les différentes alternatives, elle est de 5/10. Cela représente signifie que le confort intérieur fait l'objet d'une attention particulière, sans toutefois qu'il soit envisagé un confort optimum (aucune climatisation n'est pour l'instant prévue). Les simulations réalisées avec COMFIE nous ont permis d'obtenir le taux d'inconfort par zone : à partir la somme pondérée en fonction de la surface de chaque zone, on obtient une valeur du taux d'inconfort pour l'ensemble des bâtiments du quartier. Cette valeur est de 30 % pour l'alternative de juillet et 33 % pour l'alternative de septembre. Le faible écart entre les valeurs s'explique par une disposition et une forme des masses bâties assez proche, ainsi l'ensoleillement reçu sera similaire. L'ensoleillement joue un rôle important dans l'inconfort étant donné qu'aucune climatisation n'est installée dans les bâtiments. La Figure 55 présente comme illustration l'évolution de la température intérieure et extérieure d'une zone au cours de l'année.



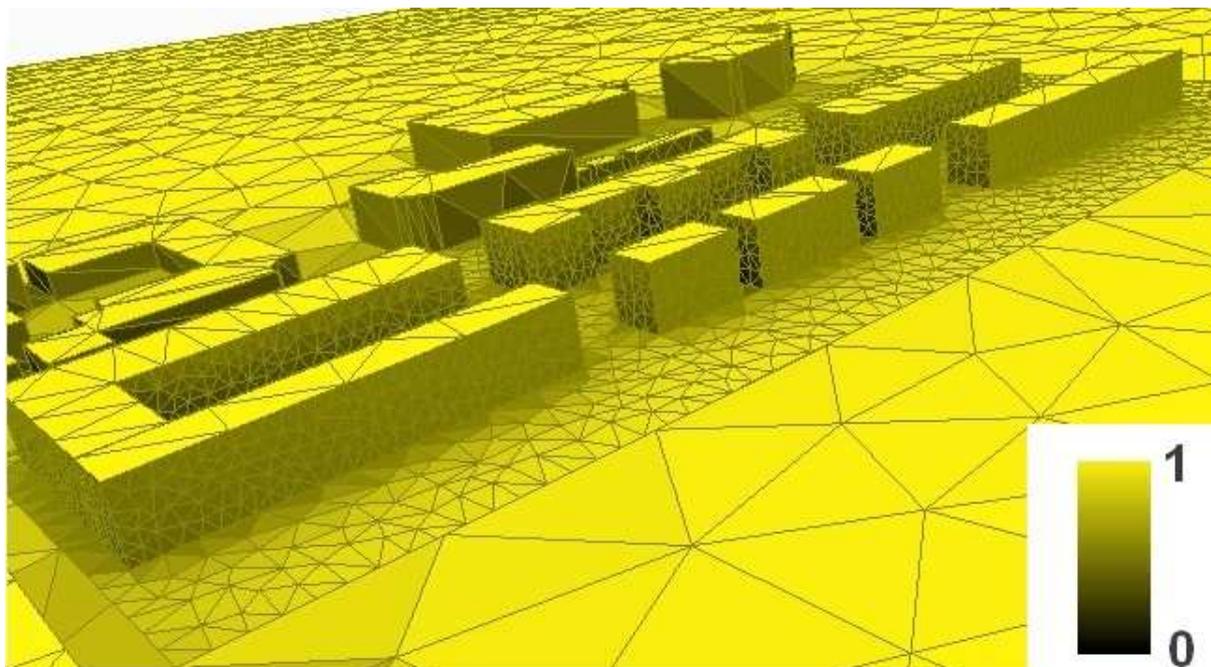
**Figure 55 : Evolution de la température intérieure et extérieure au cours de l'année pour le deuxième étage du bâtiment 16 de l'alternative de juillet, résultats de COMFIE**

On constate que la stratégie de chauffage permet de maintenir une température de confort minimale (la température intérieure chute régulièrement car le thermostat est programmé pour maintenir un minimum de 15°C de 21 heures à 7 heures). Par contre, la température de confort maximale de 25°C est dépassée une bonne partie de l'année. Néanmoins, au stade d'avancement du projet il n'est pas prévu de solutions de protection contre l'inconfort d'été. Les solutions passives telles que la mise en place de protections solaires, de vitrage performant ou de ventilation nocturne ne sont pas intégrables à notre échelle d'intervention, mais elles doivent être envisagées par la suite lors des études spécifiques sur chaque bâtiment, avant d'envisager la solution moins écologique d'installer des climatiseurs. Le taux d'inconfort élevé n'implique donc pas la nécessité de climatiser les bâtiments.

Pour le calcul de l'indicateur de confort intérieur, nous avons choisi de donner un coefficient de pondération de 0,3 à la note de confort et 0,7 au taux de confort. La priorité est donnée au

calcul sur le taux de confort car cette information est plus approfondie que l'attribution de la note.

La visibilité intérieure est définie par la somme pondérée par les surfaces des facteurs de forme des façades avec le ciel. Le calcul des facteurs de forme avec le ciel correspond dans SOLENE au facteur de forme *hors scène*. Il est déterminé après avoir maillé l'ensemble des surfaces de la scène, c'est-à-dire l'ensemble des bâtiments et le sol. La Figure 56 présente une capture d'écran du résultat du calcul des facteurs de forme *hors scène* pour l'alternative de septembre.



**Figure 56 : Résultat du calcul des facteurs de forme entre les faces du quartier et le ciel (SOLENE)**

Ce calcul nécessite de mailler entièrement le quartier étudié et les alentours ; le nombre d'éléments est de 9255 pour l'alternative de juillet et 9452 pour l'alternative de septembre. Le maillage est choisi de manière plus fine au niveau des façades étudiées et du sol du quartier. Ensuite il s'agit de relever la valeur façade par façade, et de la multiplier par la surface de la façade, puis le résultat est divisé par la surface totale de façade. On obtient un facteur de forme pondéré de 0,39 pour l'alternative de juillet et de 0,42 pour septembre. Ces valeurs sont ensuite multipliées par deux étant donné qu'elles sont bornées entre 0 et 0,5 (voir chapitre 4-V.1.c page 101).

L'éclairage intérieur étant calculé à partir de la surface de vitrage et de la surface habitable, nous avons utilisés les informations issues d'ALCYONE, après avoir fait des hypothèses réalistes sur la position et la dimension des fenêtres. Au stade d'avancement, l'importance de cet indicateur doit être relativisée étant donnée que cet indicateur dépend exclusivement des hypothèses sur les ouvertures. Le rapport (surface vitrée / surface habitable) est défini bâtiment par bâtiment et ensuite la valeur considérée pour le quartier correspond à la moyenne des rapports. Cette valeur est de 0,09 pour l'alternative de juillet et de 0,11 pour l'alternative de septembre. Cette différence s'explique par les différences de ratio de longueur sur largeur des bâtiments. Les dimensions des bâtiments sont données Figure 57 et Figure 58.

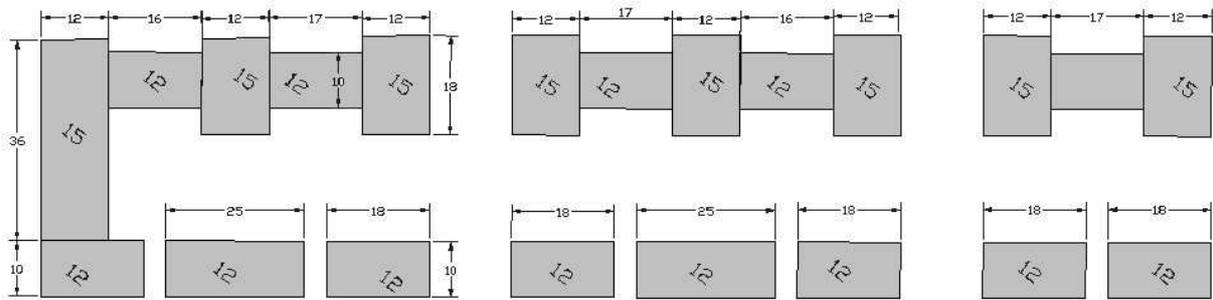


Figure 57 : Cotation des bâtiments pour l'alternative de juillet

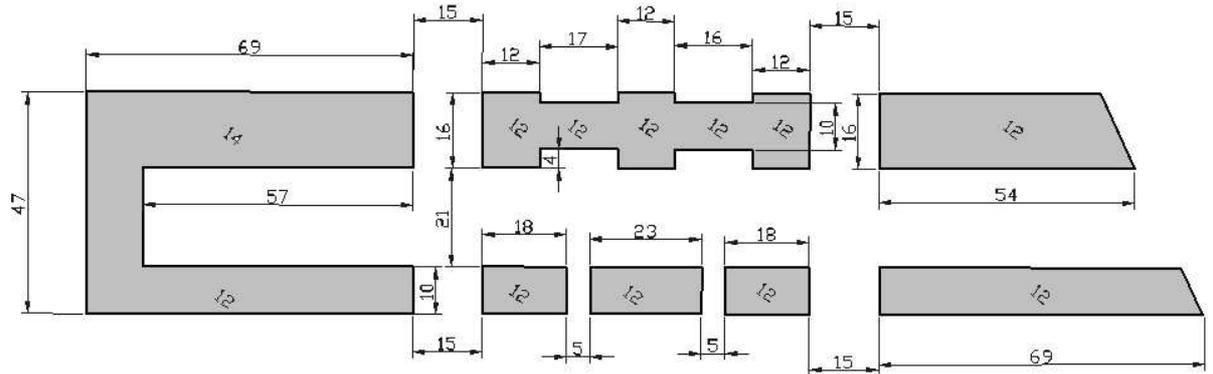


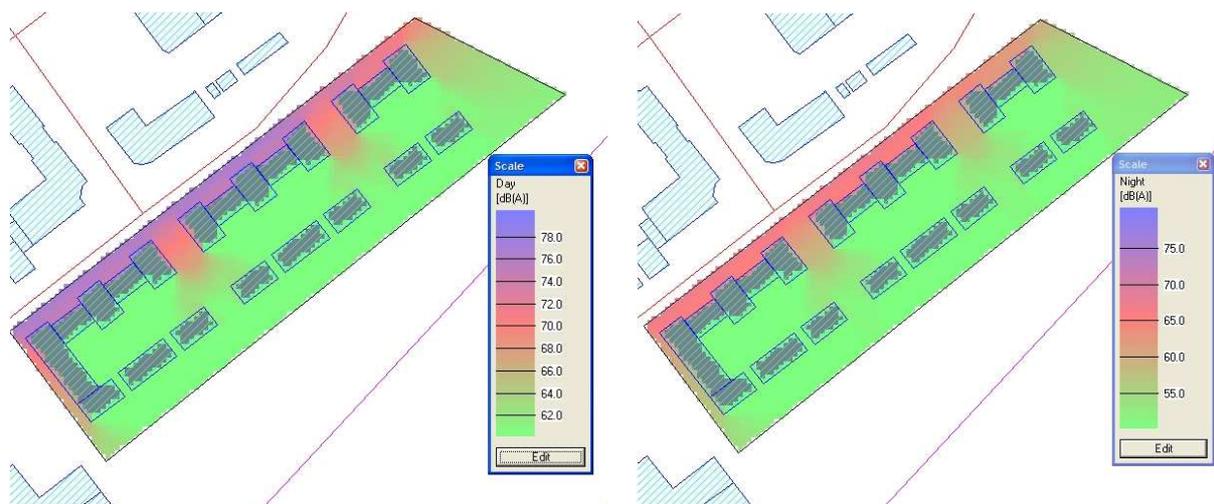
Figure 58 : Cotation des bâtiments pour l'alternative de septembre

On constate que la largeur des bâtiments nord est plus importante pour l'alternative de juillet par rapport à l'alternative de septembre, pour des mêmes longueurs de bâtiments. Ainsi les bâtiments situés au nord pour l'alternative de septembre auront un plus grand ratio *surface de façades / surface habitable*. Pour une même proportion de surface vitrée par m<sup>2</sup> de façade, l'alternative de septembre aura donc un indicateur d'éclairage naturel plus élevé.

Pour le calcul de l'espace intérieur, nous considérons une future population de 650 habitants, en divisant cette valeur par l'espace habitable pour chaque alternative, nous obtenons un espace habitable de 29,8 m<sup>2</sup> par habitant pour l'alternative de juillet et 30,3 m<sup>2</sup> par habitant pour l'alternative de septembre. Ces valeurs sont très proches, la surface habitable étant conservée selon le souhait de l'aménageur.

Nous décrivons maintenant le détail de calcul des critères relatifs aux indicateurs d'ambiance extérieure.

Concernant le confort acoustique extérieur, les différents niveaux sonores sont obtenus par le logiciel SOUNDPLAN. Nous présentons Figure 59 les résultats des prévisions sonores à 1,5 mètre du sol pour l'alternative de juillet.



**Figure 59 : Alternative de juillet : prévision du niveau sonore extérieur à 1,5 m du sol, de jour à gauche avec une échelle allant de 60 à 80 dB(A) et de nuit à droite avec une échelle allant de 50 à 80 dB(A)**

A partir de ces cartes, nous constatons que pour l'alternative de juillet que 86,9 % de la surface est exposée à un niveau sonore inférieur à 70 dB(A) de jour et 87,2 % de la surface est exposée à un niveau sonore inférieur à 60 dB(A) de nuit. Les valeurs pour l'alternative de septembre sont de 87,0 % de la surface exposée à un niveau sonore inférieur à 70 dB(A) de jour et 60 dB(A) de nuit. Au niveau des prévisions du niveau sonore en façade, les valeurs de la surface exposée à un niveau sonore inférieur à 65 dB(A) de nuit sont égales pour les deux alternatives à 100,0 %. De jour, la surface de façade exposée à un niveau inférieur à 70 dB(A) est de 82,7 % pour l'alternative de juillet et 83,0 % pour l'alternative de septembre. La faible différence entre ces quatre valeurs n'est pas significative, la différence entre les masses bâties n'est en effet pas significative.

L'ouverture du ciel depuis les espaces publics (facteur de forme avec le ciel) est obtenue grâce au logiciel SOLENE pour chaque espace public (un exemple de résultat est donné Figure 56), ensuite nous effectuons une somme pondérée en fonction de la surface. Nous obtenons une valeur de 0,67 pour l'alternative de juillet et 0,81 pour l'alternative de septembre. Et la note jugeant de la prise en compte de la visibilité des sites remarquables est de 0,4 pour l'alternative de juillet et 0,6 pour celle de septembre ; la diminution de la hauteur des bâtiments permet d'améliorer la visibilité de la gare. Les coefficients de pondérations sont choisis respectivement égaux à 0, 0,6 et 0,4 pour la visibilité depuis la rue, depuis les espaces publics et la note de visibilité. La valeur de 0 pour la rue est due au fait qu'il n'y a pas de rues à l'intérieur du quartier étudié, ce sont des chemins.

Concernant l'ensoleillement, nous obtenons pour une année entière des valeurs moyennes respectivement pour les façades, les espaces publics et les toits de 585 kWh/(m<sup>2</sup>.jour), 4040 kWh/(m<sup>2</sup>.jour) et 3320 kWh/(m<sup>2</sup>.jour) pour l'alternative de juillet et 725 kWh/(m<sup>2</sup>.jour), 4600 kWh/(m<sup>2</sup>.jour) et 3360 kWh/(m<sup>2</sup>.jour) pour l'alternative de septembre. Les écarts type relatifs pour chaque orientation de façade sont compris entre 0,01 et 0,38 pour les deux alternatives.

Ces ensoleillements concernent le rayonnement global, ainsi bien que le rayonnement direct soit maximum au niveau des toits, le rayonnement global est maximum au niveau des espaces publics grâce à une part plus importante de rayonnement réfléchi.

Le tableau des comparaisons par paire permettant de déterminer les coefficients de pondération est donné dans le Tableau 35.

**Tableau 35 : Comparaison par paire pour l'indicateur d'ensoleillement solaire extérieur (CR=0,059)**

<b>AMB : Ensoleillement</b>				
	<b>parcs</b>	<b>façades</b>	<b>toits</b>	<b>écart type relatif</b>
<b>parcs</b>	1	1	9	3
<b>façades</b>	1	1	9	3
<b>toits</b>	1/9	1/9	1	1/9
<b>écart type relatif</b>	1/3	1/3	9	1

Les coefficients de pondération obtenus par l'AHP sont respectivement de 0,39 , 0,39 , 0,04 et 0,18 pour l'ensoleillement des façades, des espaces publics, des toits et pour les écarts type. Il n'est actuellement pas envisagé d'utiliser le rayonnement solaire au niveau des toits des bâtiments, c'est pour cela que le coefficient de pondération associé est faible.

#### IV.4. Objectif "Préserver la santé et gérer les risques"

Les valeurs calculées pour les différents indicateurs proviennent de calculs effectués par le logiciel EQUER pour chaque bâtiment. Ensuite les résultats sont sommés pour considérer le quartier dans sa totalité, ce sont les valeurs présentées dans le Tableau 36.

**Tableau 36 : Résultats des calculs pour l'objectif RIS**

<b>Effet de serre</b>		
	<b>juillet</b>	<b>septembre</b>
<b>Emissions [t.eqCO2]</b>	31100	25200
<b>Toxicité humaine</b>		
	<b>juillet</b>	<b>septembre</b>
<b>Toxicité [kg.eqChHum]</b>	151000	133000
<b>Smog d'été</b>		
	<b>juillet</b>	<b>septembre</b>
<b>Emissions [kg.eqC2H4]</b>	48000	43000
<b>Déchets radioactifs</b>		
	<b>juillet</b>	<b>septembre</b>
<b>Volume généré [dm3]</b>	1220	870

On constate des valeurs globalement plus élevées pour l'alternative de juillet, ce qui est due à la consommation d'énergie et à la différence d'occupation entre les alternatives.

Pour ces valeurs, la phase prépondérante est la phase d'utilisation du bâtiment, cependant la phase de construction n'est pas négligeable pour la toxicité humaine et le smog d'été. Les émissions de gaz à effet de serre dépendent de la consommation énergétique du bâtiment et la production de déchets radioactifs dépend principalement des occupants car les bâtiments n'utilisent pas de chauffage électrique.

## V. Comparaison des alternatives

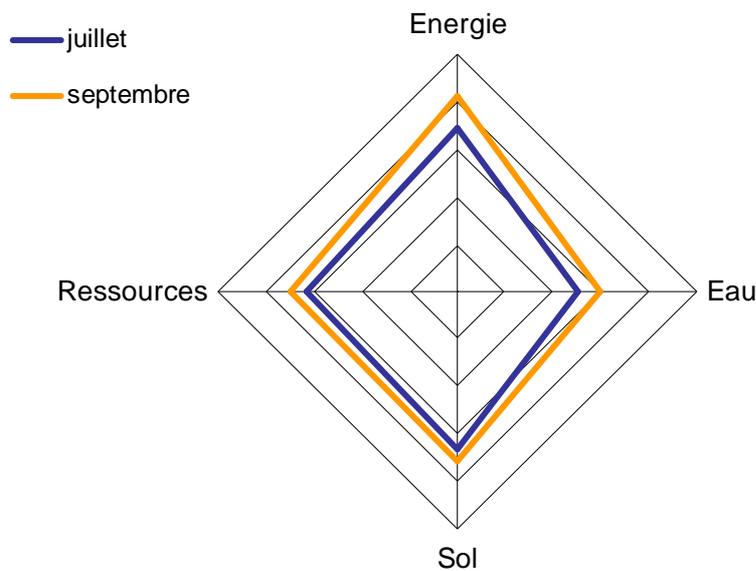
A partir des résultats obtenus par les simulations, nous utilisons l'outil que nous avons développé et qui est présenté au chapitre 4 - VIII.1 page 117. Nous présentons ci-dessous la comparaison des alternatives.

### V.1. Valeur des indicateurs pour les alternatives

	juillet	septembre
<b>RES</b>		
Consommation d'énergie primaire	0,69	0,82
Consommation d'eau	0,51	0,60
Consommation de la surface équivalente de terrain	0,66	0,71
Consommation de ressources abiotiques épuisables	0,63	0,70
<b>ECO</b>		
Emissions de substances entraînant des pluies acides	0,71	0,80
Emissions de substances toxiques	0,67	0,82
Emissions de substances entraînant une eutrophisation excessive des milieux aquatiques	0,79	0,92
Production de déchets inertes ultimes	0,88	0,93
<b>AMB</b>		
Conditions de confort hygrothermique et aéraulique intérieur	0,36	0,38
Prise en compte de la visibilité intérieure	0,78	0,84
Optimisation de l'éclairage naturel	0,40	0,55
Espace habitable disponible par habitant	0,79	0,81
Conditions de confort acoustique extérieur	0,86	0,86
Prise en compte de la visibilité extérieure	0,56	0,73
Conditions d'ensoleillement	0,59	0,64
<b>RIS</b>		
Emissions de gaz à effet de serre	0,63	0,77
Emissions de substances toxiques pour l'homme	0,73	0,83
Emissions de gaz conduisant au smog d'été	0,68	0,76
Production de déchets radioactifs	0,53	0,75

Ce tableau permet de comparer pour chaque alternative la valeur des différents indicateurs. Pour faciliter la comparaison des alternatives, nous utilisons les diagrammes radar pour visualiser pour chaque objectif les valeurs des différents indicateurs.

## V.2. Objectif "Préserver les ressources"



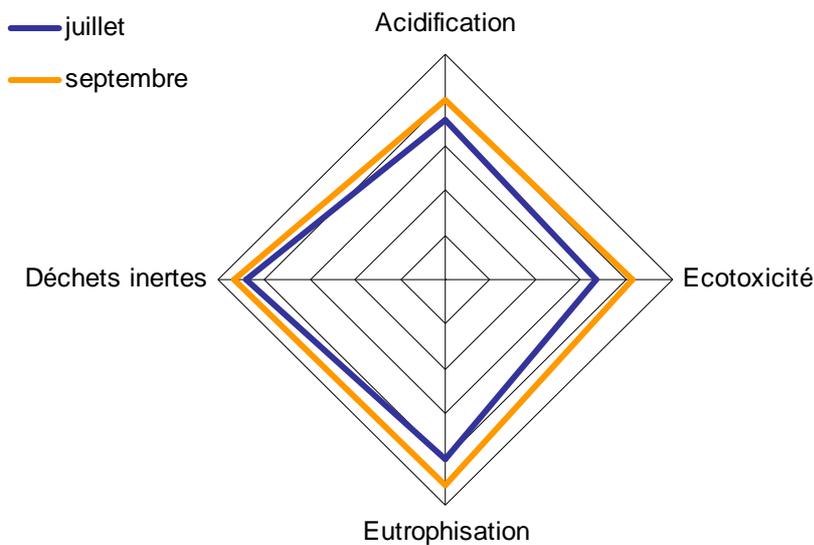
**Figure 60 : Comparaison des alternatives selon l'objectif RES**

Pour l'alternative de juillet, la moyenne est de 0,62 avec un écart type entre indicateurs de 0,08 et pour l'alternative de septembre, la moyenne est de 0,71 avec un écart type de 0,09.

On peut constater Figure 60 que les différences sont faibles pour les quatre indicateurs. Au niveau ressources et énergie, les écarts sont dues à la consommation énergétique réduite pour l'alternative de septembre à cause principalement de la réduction de la surface de parois en contact avec l'extérieur (voir page 145). De plus, l'ensoleillement des façades est plus important pour l'alternative de septembre.

L'amélioration de l'occupation du sol s'explique par une plus grande surface d'espace vert (le coefficient d'usage est de 0,7 pour un espace vert et 0,85 pour le tissu urbain discontinu). Le gain au niveau de la consommation d'eau s'explique en partie par une plus grande surface de récupération d'eau et par la différence d'occupation d'une alternative à l'autre (la consommation d'eau dépend fortement du nombre d'occupants).

### V.3. Objectif "Préserver l'écosystème"



**Figure 61 : Comparaison des alternatives selon l'objectif ECO**

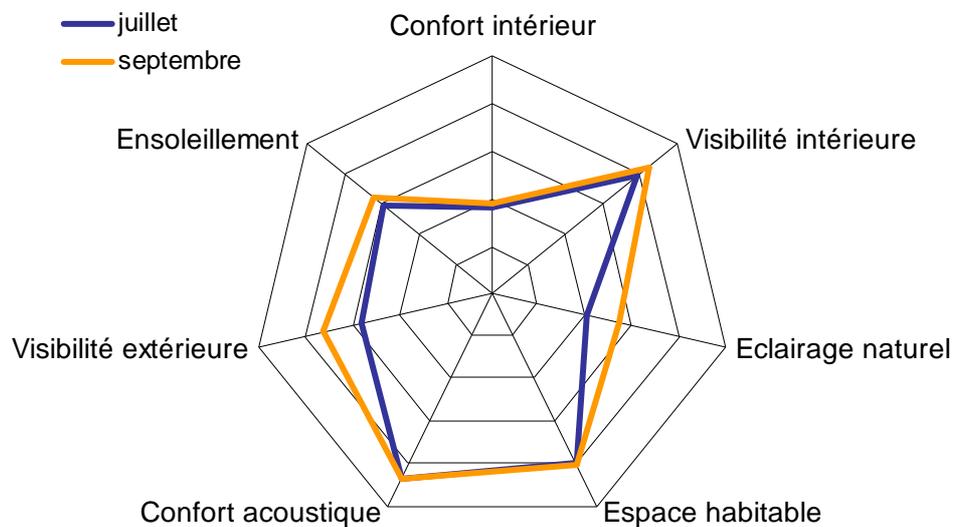
Pour l'alternative de juillet, la moyenne est de 0,76 avec un écart type entre indicateurs de 0,09 et pour l'alternative de septembre, la moyenne est de 0,86 avec un écart type de 0,06.

Les émissions de substances conduisant à des pluies acides, de substances écotoxiques et de substances eutrophisantes sont liées principalement à la phase d'utilisation. La phase de construction joue également un rôle au niveau de la production de substances écotoxiques et eutrophisantes mais moindre dans le cas des substances écotoxiques.

Les déchets inertes ultimes proviennent de la phase de démolition du bâtiment et du comportement des occupants. Au niveau démolition, la différence s'explique par le regroupement des bâtiments qui réduit la quantité de parois extérieures à construire et donc à démolir.

#### V.4. Objectif "Améliorer la qualité des ambiances"

Le diagramme radar permettant de comparer les alternatives est présenté Figure 62.



**Figure 62 : Comparaison des alternatives selon l'objectif AMB**

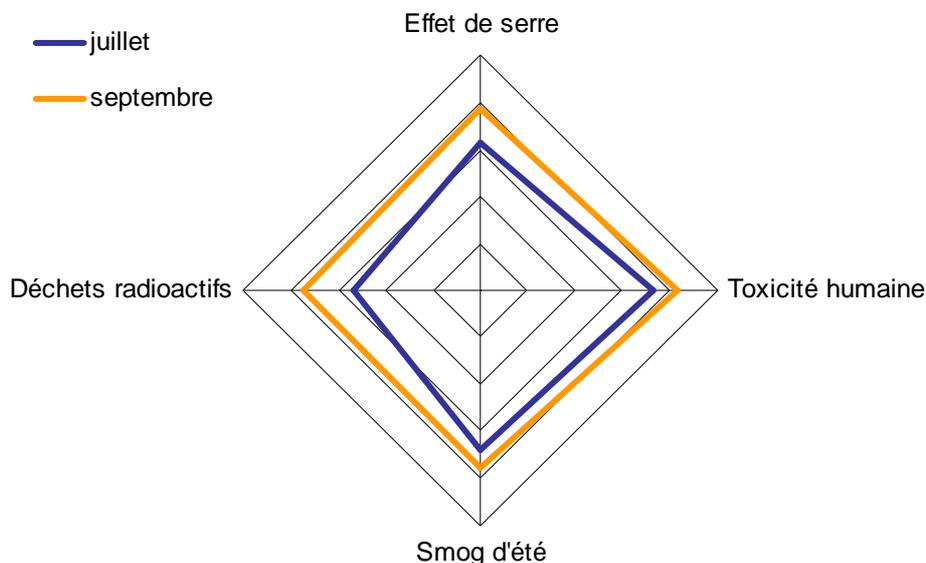
Pour l'alternative de juillet, la moyenne est de 0,62 avec un écart type entre indicateurs de 0,20 et pour l'alternative de septembre, la moyenne est de 0,69 avec un écart type de 0,18.

On constate pour les deux alternatives, une mauvaise prise en compte du confort intérieur. Cela s'explique par le choix de ne pas mettre en place de climatisation dans les bâtiments ; néanmoins il paraît important de rappeler que nous avons vu précédemment que le taux d'inconfort élevé n'implique donc pas la nécessité de climatiser les bâtiments (page 147).

Les similitudes pour les autres indicateurs sont la conséquence des similitudes dans l'implantation et l'enveloppe des bâtiments. La différence sur la visibilité extérieure provient majoritairement des modifications au niveau des espaces verts. Leur extension à la grande majorité du quartier entraîne proportionnellement un plus grand facteur de forme avec le ciel depuis ces espaces. Cette conséquence se reporte également sur l'ensoleillement des parcs, mais elle est moins significative étant donné le plus grand nombre de variables prises en compte (ensoleillement des toitures, des façades et écart type relatif moyen). L'amélioration de l'indicateur d'éclairage naturel est due aux changements du ratio longueur sur largeur dans la forme des bâtiments nord (voir explications 149).

## V.5. Objectif "Préserver la santé et gérer les risques"

Le diagramme radar permettant de comparer les alternatives est présenté



**Figure 63 : Comparaison des alternatives selon l'objectif RIS**

Pour l'alternative de juillet, la moyenne est de 0,64 avec un écart type entre indicateurs de 0,08 et pour l'alternative de septembre, la moyenne est de 0,78 avec un écart type de 0,04.

L'amélioration des indicateurs est principalement due à une réduction des consommations énergétiques, et dans une moindre mesure elle provient également de différences au niveau de la phase de construction (la surface de parois construite est moins importante avec l'alternative de septembre car les bâtiments sont regroupés).

L'écart pour l'indicateur de production de déchets radioactifs est également dû à la différence d'occupation globale du quartier.

Pour ces valeurs, la phase prépondérante est la phase d'utilisation du bâtiment, cependant la phase de construction n'est pas négligeable pour la toxicité humaine et le smog d'été.

## VI. Synthèse

A partir de ce cas d'étude, on peut tout d'abord constater que l'alternative de septembre offre de nombreuses améliorations par rapport à celle de juillet. Cependant, les différences ne sont pas significatives pour certains indicateurs, car les alternatives ne représentent pas de modifications radicales dans l'implantation et l'enveloppe des bâtiments. L'alternative de septembre sera préférée pour la réduction de nombreuses émissions, des déchets produits, pour l'amélioration de la visibilité extérieure et de l'éclairage naturel. La notion de synthèse est aussi plus marquée avec l'alternative de septembre car les écarts type entre indicateurs d'un même objectif sont plus faibles qu'avec l'alternative de juillet. Dernièrement, le choix est nettement simplifié par le fait qu'il n'existe pas d'indicateur pour lequel l'alternative de septembre est défavorable à celle de juillet.

Concernant l'utilisation des logiciels, on constate que le couplage ALCYONE-COMFIE-EQUER, prévu initialement pour l'étude d'un bâtiment, requiert des ressources en temps importantes pour l'acquisition des données (les calculs sont quasiment immédiats) et le problème de différence d'occupation totale du quartier entraîne des écarts au niveau de certains indicateurs comme la consommation d'eau. Le CEP finalise un logiciel adapté à l'analyse du cycle de vie du quartier : ARIADNE.

Le choix des valeurs de référence devra aussi être affiné car il influe sur l'écart entre les indicateurs et il permet aussi de juger les alternatives de manière absolue et non l'une par rapport à l'autre.

La confrontation de la méthode ADEQUA avec un cas d'application concret est un succès. Nous avons pu montrer que l'ensemble des objectifs et indicateurs associés sont quantifiables et représentables. Et qu'ils aboutissent bien à une évaluation du quartier. La comparaison d'alternative d'aménagement du quartier est également faisable et elle donne des résultats qui semblent probants. Dans la mesure où ce cas d'application n'est pas un exercice théorique ou pratique mais bel et bien un travail demandé par et pour des professionnels, le caractère opérationnel et généralisable de cette méthode est démontré. Bien sûr il faut relativiser cette affirmation par l'absence de références pérennes et par les contraintes de ressources et de finances associées à l'utilisation des différents logiciels de simulation.

Seuls les retours d'expériences pourront permettre "d'étalonner" précisément les indicateurs à partir de valeurs de références statistiques. La comparaison d'alternative ne nécessitant pas de référence absolue, est dès à présent utilisable de manière pratique.

Ce premier cas d'étude avait pour but de démontrer la faisabilité d'utiliser une méthode adéquate à l'évaluation d'alternatives d'aménagement d'un quartier. A partir de ce constat, nous pouvons maintenant élargir son utilisation aux autres quartiers du projet "Espaces Gare" et à d'autres quartiers.



## CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Ce travail a consisté à mettre en place une méthode permettant d'évaluer différentes alternatives d'aménagement d'un quartier à partir d'objectifs et d'indicateurs représentant une approche en accord avec la notion de développement durable.

Dans le premier chapitre, nous avons montré l'évolution de la prise en compte du développement durable au niveau du bâtiment et la nécessité d'élargir l'échelle. Cette problématique répond, dans la continuité des réflexions entreprises à l'échelle internationale depuis plusieurs dizaines d'années, à la décision d'inclure la notion de développement durable dans le domaine de la construction. C'est la volonté de ce travail de thèse, supporté par le projet ADEQUA. Ce projet a pour objectif principal l'élaboration d'une méthodologie d'aide à la décision lors de la réalisation ou de la réhabilitation d'un quartier résidentiel.

Le thème est vaste et a nécessité une description détaillée de nos attentes en terme d'évaluation et de comparaison d'alternatives. Le chapitre 2 a établi le cadre de travail méthodologique indispensable à partir de la définition des limites spatiales et temporelles. Le quartier est une échelle pertinente et cohérente avec les réflexions concernant la planification urbaine et les projets d'aménagement. Il représente également un idéal entre une prise en compte trop parcellaire ou restreinte et une complexité ingérable ; cette échelle correspond au niveau de résolution de nombreux problèmes et offre une plus grande facilité de concertation entre les acteurs. Du point de vue temporel, la méthode doit intervenir dès les phases initiales du projet, et elle doit pouvoir être applicable durant l'ensemble des phases de conception et construction du projet jusqu'à la vie du quartier ; la difficulté étant de s'adapter aux données disponibles. Nous avons également analysé les besoins et les attentes des acteurs intervenant lors d'opération d'aménagement : l'aménageur est l'acteur clé, il reste cependant en relation étroite avec une partie ou l'ensemble des intervenants, le processus de construction étant un travail collectif et non pas une succession d'étapes. Une méthode claire et une implication indispensable de tous sont les bases nécessaires.

Etant donné le nombre d'aspects à prendre en compte, nous privilégions une approche multicritères d'aide à la décision utilisant des indicateurs quantifiables et des outils de simulation pour les quantifier. L'établissement d'un état de l'art se voulant le plus exhaustif possible des démarches, guides, logiciels, outils d'évaluation et projets concernant l'aménagement des quartiers a conduit à l'élaboration d'une méthode et à la définition de ses caractéristiques. La démarche retenue est une méthode d'aide à la décision basée sur des objectifs évalués à partir d'un ensemble d'indicateurs quantifiables. La comparaison ou la visualisation d'alternatives est basée sur le diagramme radar : il offre de nombreux avantages tant au niveau de la compréhension que de la représentation et ses limites ont été clairement identifiées.

Nous avons ensuite établi une base de discussion sur les objectifs, leurs rôles, les caractéristiques des indicateurs associés et les modèles permettant leur mise en place. La dimension exhaustive de l'évaluation d'un projet requiert une analyse fine du système à mettre en place. Nous avons donc décidé de définir nos objectifs en accord avec les systèmes existants ; le développement durable est une notion qui doit se retrouver d'une échelle à l'autre et d'un domaine à l'autre. En effet, il est nécessaire de penser globalement et d'établir une bonne communication entre les métiers. Ainsi nous veillons particulièrement à insérer notre démarche dans le contexte politique national et européen, afin de répondre aux différentes

stratégies mises en place. Le chapitre 3 présente les huit objectifs retenus : "préserver les ressources", "préserver l'écosystème", "améliorer la qualité des ambiances", "préserver la santé et gérer les risques", "prendre en compte le patrimoine", "favoriser le développement local", "renforcer la vie locale" et "valoriser la place du quartier dans la ville". Nous avons ensuite proposé des pistes de réflexion concernant les objectifs qui n'appartiennent pas à nos domaines de compétence, pour nous focaliser sur les quatre premiers objectifs.

Dans la continuité de ce travail, le chapitre 4 se rapporte au coeur de la méthode : les indicateurs. Pour chaque objectif, nous proposons un ensemble d'indicateurs ; ces indicateurs sont justifiés, décrits et une méthode de calcul est proposée. Cette dernière prend en compte la normalisation de l'indicateur et sa transformation de façon à ce qu'il soit du type "le plus est le mieux". Le mode d'agrégation pour le calcul des indicateurs a été défini et justifié : il s'agit de la méthode AHP pour la recherche des coefficients de pondération et de la somme pondérée pour l'agrégation. L'AHP, malgré sa complexité est la seule méthode permettant de vérifier la cohérence des relations d'importance entre critères. La somme pondérée offre l'avantage de la clarté et de la simplicité d'utilisation.

L'évaluation du projet est ensuite accomplie grâce à une représentation des indicateurs pour chaque objectif, à l'aide de diagrammes radar

Le dernier objectif que nous nous sommes fixés est d'offrir une méthodologie utile, c'est-à-dire concrètement applicable sur des projets de développement à l'échelle du quartier. Aussi, nous nous sommes associés à un projet urbain localisé à La Rochelle : la restructuration de l'espace autour de la gare. La confrontation de la méthode ADEQUA avec ce cas d'application concret est un succès. Nous avons pu montrer que l'ensemble des objectifs et indicateurs associés sont quantifiables et représentables. Et qu'ils aboutissent bien à une évaluation du quartier. La comparaison d'alternatives d'aménagement du quartier est également faisable et elle donne des résultats qui semblent probants.

L'outil développé au sein de cette thèse offre un moyen d'évaluer et de comparer les alternatives d'aménagement d'un quartier ; il permet à l'utilisateur d'interagir grâce à la visualisation immédiate des changements des diagrammes, en fonctions de la modification des données. L'utilisateur peut aussi ajouter des critères, adapter les coefficients de pondération et ajouter des indicateurs, en fonction des spécificités d'un projet.

*Ce travail de thèse a englobé un sujet vaste et encore novateur, les perspectives de recherche sont donc nombreuses.*

Tout d'abord, la méthode, telle qu'elle est actuellement, a montré ces limites qui sont une demande importante en temps et en ressources, des références non pérennes et la nécessité de terminer le diagramme, c'est à dire de traiter les quatre autres objectifs.

La recherche de références nécessite l'application de la méthode ADEQUA à plusieurs cas d'étude afin d'obtenir des statistiques suffisamment importantes. Les deux autres quartiers du projet "Espaces Gare" constitueront les prochaines applications et d'autres applications sont programmées.

La deuxième piste de recherche concerne la définition de nouveaux indicateurs : deux projets complémentaires d'ADEQUA se mettent en place. Un premier projet concerne les aspects environnementaux qui ne sont pas renseignés à ce jour et qui sont importants à l'échelle du quartier, comme par exemple l'hydrologie, les sols, leur pollution, les réseaux et les infrastructures. Le deuxième projet a pour but de compléter les objectifs non traités : ce projet pluridisciplinaire soutenu par l'Institut de Recherche Sciences et Techniques de la Ville basée à Nantes regroupera entre autres des géographes, juristes et sociologues.

Dernièrement, pour que la méthode de calcul des indicateurs se diffuse largement auprès des collectivités et des aménageurs, il faut qu'elle soit plus proche des données opérationnelles disponibles. La grande limitation actuelle est le temps et les coûts nécessaires pour effectuer les calculs des indicateurs et surtout pour acquérir les données. Il s'agit maintenant de rapprocher les expériences de terrain et les données directement disponibles des critères à évaluer et également de définir des outils simplifiés basés sur des valeurs moyennes ou des ratios en fonction des typologies de bâtiments, de routes et voies de circulation, de parcs, etc.

A terme, l'outil développé et appelé *méthode ADEQUA* devra être inclus dans un SIG pour simplifier l'utilisation des données et la visualisation des résultats. Cela permettra aussi à l'utilisateur de faire des requêtes spatiales sur ces résultats comme par exemple afficher la surface extérieure exposée à un niveau sonore dépassant un seuil ou l'ensemble des façades présentant un indicateur d'éclairage naturel inférieur à 0,5.



## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE

- ADEME** (2004a). *Approche environnementale de l'urbanisme - Fiches techniques "Environnement sonore"*, décembre 2004, 62 p.
- ADEME** (2004b). *Approche Environnementale sur l'Urbanisme - Pour une meilleure prise en compte de l'environnement dans les opérations d'aménagement. - L'AEU en 5 questions*. Rennes, mai 2004.
- ADEME** (2005). *Approche environnementale de l'urbanisme - Cahier "Environnement sonore"*, janvier 2005, 31 p.
- Adolphe L., Maïzia M., Izard J.-L., Chatelet A., Boussoulim A., Aït-Ameur K., Barlet A., Casal A., Lehtihet K. et Marcillat J.** (2002). *SAGACités : Towards a management aided system for integrating outdoor climate into the design of urban spaces*. PLEA 2002, Toulouse, France, 22-24 juillet 2002, p. 107-112.
- Al Khalil M. I.** (2002). Selecting the appropriate project delivery method using AHP. *International Journal of Project Management*, août 2002, 20(6), p. 469-474.
- Alavedra P.** (2001). *Spanish state-of-the-art report*, CRISP, 2001, 6 p.
- Al-Harbi K. M. A.-S.** (2001). Application of the AHP in project management. *International Journal of Project Management*, janvier 2001, 19(1), p. 19-27.
- Ali-Toudert F. et Mayer H.** (2004). *Planning-oriented Assessment of Street Thermal Comfort in Arid Regions*. 21st International Conference Passive and Low Energy Architecture, Eindhoven, Pays-Bas, 19-22 septembre, p. 247-252.
- André P., Delisle C. E., Revéret J.-P. et Séné A.** (2003). *L'évaluation des impacts sur l'environnement. Processus, acteurs et pratique*, Montreal, Presses internationales Polytechnique, 520 p., ISBN 2553011326.
- Antonini E., Blum A., Grossi A. et Robbins C.** (2002). *Analysis and adaptation of most appropriate tools and methods*, projet HQE<sup>2</sup>R, janvier 2002, 118 p.
- ARENE** (2001). *Qualité environnementale sur une zone d'activité, guide de solutions techniques*, Ile de France, septembre 2001.
- AREP, ATMOSPHERE et IDTP** (2005). *La Rochelle, Zone d'Aménagement Concerté "Espaces Gare" - Dossier de création*. La Rochelle, mai 2005, 20 p.
- ARPE** (2001). *Guide pratique développement durable : le diagnostic des villes moyennes*, 176 p.
- ARPE** (2004). Indicateurs du développement durable urbain : présentation et description des indicateurs.
- Astleithner F., Dangschat J., Dictus J., Hamedinger A. et Janak G.** (2002a). *Indicators into action: a practitioners guide for improving their use at the local level*, European Commission, mai 2002, 35 p.
- Astleithner F., Dangschat J., Dictus J., Hamedinger A. et Janak G.** (2002b). *Indicators into action: local sustainability indicator sets in their context*, European Commission, 97 p.
- Ayong Le Kama A., Lagarenne C. et Le Lourd P.** (2004). *Indicateurs nationaux du développement durable : lesquels retenir ?*, La documentation Française, Ministère l'Ecologie et du Développement Durable, 236 p., ISBN 2-11-005690-8.

- Balaÿ O. et Buffet V.** (2001). DAQUAR : du diagnostic acoustique d'un quartier à l'urbanité sonore. *Echo bruit le magazine de l'environnement sonore*, 2001,(97), p. 46-49.
- Balram S. et Dragicjevic S.** (2005). Attitudes toward urban green spaces: integrating questionnaire survey and collaborative GIS techniques to improve attitude measurements. *Landscape and Urban Planning*, 28 mars 2005, 71(2-4), p. 147-162.
- Bana e Costa C. A., De Corte J.-M. et Vansnick J.-C.** (2003). MACBETH. *Multiple Criteria Decision Analysis: The State of the Art Surveys*. M. Ehrgott. 76, p. 409-442.
- Baouendi R., Zmeureanu R., Bradley B. et Friedman A.** (2002). *EEE: a prototype tool for the evaluation of embodied energy and greenhouse gases emissions of exterior envelope of canadian houses*. eSim 2002, Montréal, Quebec, Canada, IBPSA Canada, 11 - 13 septembre 2002, p. 7.
- Barrera-Roldan A. et Saldivar-Valdes A.** (2002). Proposal and application of a Sustainable Development Index. *Ecological Indicators*, décembre 2002, 2(3), p. 251-256.
- Becue V. et Tahon C.** (2004). *Méthode et outils d'évaluation pour un renouvellement urbain durable - La mixité des fonctions urbaines : Condition de mise en oeuvre et/ou de maintien des activités dans la ville*. AUGC, Marne-la-Vallée, 3 et 4 juin 2004, p. 8.
- Belton V. et Gear T.** (1983). On a shortcoming of Saaty's method of analytical hierarchy. *Omega*, 1983, 11(3), p. 228-230.
- Belton V. et Gear T.** (1985). The legitimacy of rank reversal - a comment. *Omega*, 1985, 13(3), p. 143-144.
- Ben Mena S.** (2000). Introduction aux méthodes multicritères d'aide à la décision. *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*, février 2000, 4, p. 83-93.
- Bikas D. et Milonas S.** (2001). *Greek state-of-the-art report*, CRISP, avril 2001, 17 p.
- Bornarel A., Coffre J.-L. et Detrait G.** (2004). *Urbanisme commercial et qualité environnementale - guide méthodologique*, Ile de France, aout 2004.
- Bossel H.** (1999). *Indicators for Sustainable development: Theory, Methods, Applications*,.
- Boukhezer H.** (2002). *Caractérisation environnementale des tissus urbains en vue de leur classification*. master. D.E.A. "Ambiances Architecturales et Urbaines", Ecole polytechnique de l'Université de Nantes, Université de Nantes, Nantes, 153 p.
- Boulanger P.-M.** (2004). *Les indicateurs de développement durable : un défi scientifique, un enjeu démocratique*. Les séminaires de l'Iddri, n°12, Paris, avril 2004, p. 24.
- Boutaud A.** (2005). *Le développement durable : penser le changement ou changer le pansement ?* Thèse, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne et Université Jean Monnet, Saint-Etienne, 512 p.
- Bozonnet E., Belarbi R. et Allard F.** (2005). Modelling solar effects on the heat and mass transfer in a street canyon, a simplified approach. *Solar Energy*, juillet 2005, 79(1), p. 10-24.
- Brentrup F., Küsters J., Lammel J. et Kuhlmann H.** (2002). Life Cycle Impact Assessment of Land Use Based on the Hemeroby Concept. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 2002, 7(6), p. 339-348.
- Brodhag C.** (2004). *Développement durable et énergie*, Journées X-ENS-UPS Physique, Ecole Polytechnique, 14 mai 2004.

- Brophy V., O'Dowd C., Bannon R., Goulding J. et Lewis J. O.** (2000). *Sustainable urban design*. Dublin : Energy Research Group University College Dublin , School of Architecture Dublin, Dublin, European Commission, 2000, 27 p.
- Brownhill D. et Rao S.** (2002). *A sustainability checklist for developments: a common framework for developers and local authorities*, BRE, Watford : Construction Research Communications, 88 p., ISBN 1860815332.
- Brundtland G. H.** (1987). *Our common future*, Oxford University Press, Oxford, World Commission on Environment and Development, 400 p., ISBN 019282080X.
- Brundtland G. H.** (1988). *Notre avenir à tous*, Edition du Fleuve, Montréal, Canada, La Commission mondiale sur l'environnement et le développement, 400 p., ISBN 2-89372-011-5.
- Brunner N. et Starkl M.** (2004). Decision aid systems for evaluating sustainability: a critical survey. *Environmental Impact Assessment Review*, mai 2004, 24(4), p. 441-469.
- Bussemey-Buhe C.** (1997). *Développement d'une méthode de conception environnementale des bâtiments prenant en compte l'environnement de proximité*. Thèse, Université de Savoie, Savoie, 163 p.
- Carfantan G., Vignes-Rubio C. et Bonnet K.** (2005). *Méthodologie pour une démarche de qualité environnementale sur les opérations d'aménagement dans une perspective de développement durable*. Chartres-de-Bretagne, SETUR, mars 2005, 109 p.
- CERQUAL** (2005a). *Habitat & Environnement - Référentiel Millésime 2005*, référentiel. Paris, Qualitel, 1 janvier 2005, 307 p.
- CERQUAL** (2005b). *Qualitel - Référentiel Millésime 2005*, référentiel. Paris, Qualitel, 1 janvier 2005, 248 p.
- CERQUAL** (2005c). *Règles de certification de la marque NF Logement*, référentiel. Paris, Qualitel, 16 décembre 2004, 43 p.
- Chan S.-L. et Huang S.-L.** (2004). A systems approach for the development of a sustainable community--the application of the sensitivity model (SM). *Journal of Environmental Management*, 2004/9, 72(3), p. 133-147.
- Charlot-Valdiou C. et Outrequin P.** (2001). *Pour un développement durable des quartiers - méthode d'analyse d'opérations de renouvellement urbain dans des quartiers de logements sociaux*. Sophia Antipolis, CSTB, juin 2001, 8 p.
- Charlot-Valdiou C. et Outrequin P.** (2002). *State of the art review of indicators and systems of indicators*, décembre 2002, 36 p.
- Charlot-Valdiou C. et Outrequin P.** (2003). *Méthodologie HQE<sup>2</sup>R pour un renouvellement urbain durable à l'échelle des bâtiments et des quartiers*, The European Commission Community Research, janvier 2003, 43 p.
- Charlot-Valdiou C. et Outrequin P.** (2004). *La démarche HQE<sup>2</sup>R de conduite de projet urbain intégrant le développement durable*, The European Commission Community Research, octobre 2004, 36 p.
- Cherqui F., Groleau D., Wurtz E. et Allard F.** (2005a). *A step toward the global assessment of district projects: solar indicators and way to quantify them*. Ninth International IBPSA Conference, Montréal, Canada, Organizing Committee Building Simulation 2005, 15-18 août 2005, p. 167-174.
- Cherqui F., Popovici E., Mora L., Peuportier B. et Wurtz E.** (2005b). *Projet ADEQUA - rapport d'avancement N°1*. La Rochelle, LEPTAB, CEP, 25 juin 2005, 44 p.

- Cherqui F., Wurtz E. et Allard F.** (2004a). Elaboration d'une méthodologie d'aménagement durable d'un quartier. *Annales du bâtiment et des travaux publics*, février 2004, 1, p. 38-44.
- Cherqui F., Wurtz E. et Allard F.** (2004b). *Evaluation d'un projet de quartier, présentation du projet ADEQUA*. XXIIème Rencontres Universitaires de Génie Civil, Marne-la-Vallée, France, 3-4 juin 2004.
- Cherqui F., Wurtz E., Allard F. et Mora L.** (2004c). *Caractérisation du développement durable à l'échelle du quartier : application du projet ADEQUA au cas d'étude de La Rochelle*. IBPSA France 2004, Toulouse, 8-9 octobre 2004.
- CIRAD** (2004). *La notion de Développement durable*, <http://www.reds.msh-paris.fr/communication/textes/devdur.htm>.
- Cloquell-Ballester V.-A., Cloquell-Ballester V.-A., Monterde-Diaz R. et Santamarina-Siurana M.-C.** Indicators validation for the improvement of environmental and social impact quantitative assessment. *Environmental Impact Assessment Review* In Press, Corrected Proof.
- Collie J. S., Gislason H. et Vinther M.** (2003). Using AMOEBA's to display multispecies, multifleet fisheries advice. *ICES Journal of Marine Science*, août 2003, 60(4), p. 709-720.
- Comélieu L., Holec N. et Piéchaud J.-P.** (2002). *Approche territoriale du développement durable - Repères pour l'Agenda 21 local*, association 4D, 131 p.
- Condon P. M., Proft J., Teed J. et Muir S.** (2002). *Sustainable Urban Landscapes: Site Design Manual for B.C. Communities*, University of British Columbia, James Taylor Chair in Landscape and Liveable Environments, 153 p., ISBN 0-88865-654-8.
- Cooksey R. W.** (1996). *Judgement analysis: Theory, methods and applications*, Sydney, Australia, Academic Press.
- Cornforth I. C.** (1999). Selecting indicators for assessing sustainable land management. *Journal of Environmental Management*, juillet 1999, 56(3), p. 173-179.
- Costa C. S., Morgenstern D., Kasperidus H., Mathey J., Thiele K., Caserio M., Grayson N., Coles R., Wohlleber S., Farcher S. et Rößler S.** (2004). *Making greener cities, a practical guide*. Leipzig, URGE – Development of Urban Green Spaces to Improve the Quality of Life in Cities and Urban Regions, juin 2004, 120 p.
- Crawford K.** (2002). *Analysing the extend to which morphological indicators give a useful description of the urban form*. PLEA 2002, Toulouse, France, 22-24 juillet 2002, p. 135-139.
- CRITERION** (2005). *INDEX PlanBuilder - Planning Support System For ArcEditor 9.0 - User Notebook*, mai 2005, 446 p.
- de Valicourt D.** (2001). *Référentiel du système de management environnemental pour le maître d'ouvrage concernant des opérations de construction, adaptation ou gestion des bâtiments*, HQE, 23 novembre 2001, 18 p.
- den Butter F. A. G. et van der Eyden J. A. C.** (1998). A pilot index for environmental policy in The Netherlands. *Energy Policy*, février 1998, 26(2), p. 95-101.
- Desmyter J., Putzeys K. et Simons B.** (2001). *Belgian state-of-the-art report*, CRISP, mars 2001, 7 p.
- DGUHC** (2005). *RT2005 - Projet d'arrêté relatif aux caractéristiques de référence et aux caractéristiques minimales*. Conférence consultative de la RT2005, 12 juillet 2005.

- Dhakal S.** (2002). *Report on Indicator related research for Kitakyushu Initiative*, Ministry of Environment, juin 2002.
- Diamantini C. et Zanon B.** (2000). Planning the urban sustainable development The case of the plan for the province of Trento, Italy. *Environmental Impact Assessment Review*, juin 2000, 20(3), p. 299-310.
- Diaz-Balteiro L. et Romero C.** (2004). In search of a natural systems sustainability index. *Ecological Economics*, 1 juillet 2004, 49(3), p. 401-405.
- Dodgson J., Spackman M., Pearman A. et Phillips L.** (2005). *Multi-criteria analysis manual*, <http://www.odpm.gov.uk/index.asp?id=1142251>  
(ancien)  
[http://www.odpm.gov.uk/stellent/groups/odpm\\_researchandstats/documents/page/odpm\\_research\\_608524.hcsp](http://www.odpm.gov.uk/stellent/groups/odpm_researchandstats/documents/page/odpm_research_608524.hcsp), National Economic Research Associates. 2005.
- Dueker K. J. et Kjerne D.** (1989). Multipurpose cadastr: terms and definitions. ASPRS/ACSM. Falls Church, Va., USA. vol. 5, p. 94-103.
- Dufresnes E.** (2005). *Management Environnemental - Aménagement Durable des Quartiers*, réunion interne au projet ADEQUA, Nantes, 4 mai 2005.
- Dufresnes E. et Achard G.** (2004). *Note d'étape ADEQUA N°1 : Constitution d'un jeu d'indicateurs d'aménagement durable*, décembre 2004, 55 p.
- Dupagne A., Teller J., Ruelle C., Zwetkoff C., Rogister Y., Cornélis B., Tweed C., Sutherland M., Kohler N., Bender T., Hassler U., Joachim M., Algreen-Ussing G., Wedebrunn O., Bond A., Langstaff L., Géron G. et Vanderheyden E.** (2004). *SUIT : Sustainable development of urban historical areas through an active integration within towns*, brochure, LEMA, université de Liège, Belgique.
- Dyer J.** (1990). Remarks on the analytical hierarchy process. *Management Science*, 1990, 3, p. 249-258.
- Dyer J. et Wendel R.** (1985). *A critique of the analytical hierarchy process*, 1990.
- Eco Maires** (2005). *Pour un Développement durable à l'échelle du quartier*, 2005.
- Eden M. et Glaumann M.** (2001). *Swedish state-of-the-art report*, CRISP, mars 2001, 14 p.
- Equiterre** (2002). *Guide pratique de l'Agenda 21 communal*. Genève, Suisse, novembre 2002, 76 p.
- European Commission** (2002). *Rapport de la commission au conseil, Analyse de la "liste ouverte" d'indicateurs - clés environnementaux*, 20 septembre 2002, 39 p.
- European Commission** (2003a). *Concerto - in tune with your local energy strategy*, Bruxelles, Belgique, 2003.
- European Commission** (2003b). *European Common Indicators, Towards a Local Sustainability Profile*. Milan, Ambiente Italia Research Institute, mai 2003, 212 p.
- European Commission** (2003c). Recommandation de la commission du 10 juillet 2003 relative à des orientations pour la mise en oeuvre du règlement (CE) n° 761/2001 du Parlement européen et du Conseil permettant la participation volontaire des organisations à un système communautaire de management environnemental et d'audit (EMAS) concernant la sélection et l'utilisation d'indicateurs de performance environnementale. *Le Journal Officiel de l'Union Européenne*, 23 juillet 2003, L184, p. 19-32.
- Fédération nationale des agences d'urbanisme** (2001). *Systèmes d'observation des quartiers dans les agglomérations françaises - Tome 2 - synthèse et pistes de travail*. Lille, Délégation Interministérielle à la Ville, mars 2001, 81 p.

- Finnveden G., Nilsson M., Johansson J., Persson A., Moberg A. et Carlsson T.** (2003). Strategic environmental assessment methodologies--applications within the energy sector. *Environmental Impact Assessment Review*, janvier 2003, 23(1), p. 91-123.
- Fossdal S.** (2001). *Norwegian state-of-the-art report*, CRISP, mars 2001, 10 p.
- Frey H. W.** (2004). *The search for a sustainable city, an account of current debate and research*. 21st conference on Passive and Low Energy Architecture, Eindhoven, Pays-Bas, 19-22 septembre 2004.
- Frischknet et al** (1995). *Ökoinventare für Energie systeme*, Zürich, Eidgenössische Technische Hochschule, 1817 p.
- Gadsden S., Rylatt M., Lomas K. et Robinson D.** (2003). Predicting the urban solar fraction: a methodology for energy advisers and planners based on GIS. *Energy and Buildings*, janvier 2003, 35(1), p. 37-48.
- Gagliardi F. et Roscia M.** (2002). *Method of Allocation of the Weights by Fuzzy Logic for a Sustainable Urban Model*. First Dubrovnik Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems, Dubrovnik, Croatie, 2-7 Juin 2002.
- Geissler S. et Macoun T.** (2001). *Austrian state-of-the-art report*, CRISP project, novembre 2001, 28 p.
- Giampietro M. et Pastore G.** (1999). Multidimensional Reading of the Dynamics of Rural Intensification in China: The Amoeba Approach. *Critical Reviews in Plant Sciences*, mai 1999, 18(3), p. 299-329.
- Gobin C.** (2005). *ADEQUA - Vers la maîtrise de la dimension économique : Note méthodologique n°1*, projet ADEQUA, Paris, 8 avril 2005.
- Gomez S., Crowhurst D. et Curwell S.** (2001). *UK state-of-the-art report*, CRISP, avril 2001, 7 p.
- Gomez-Sal A., Belmontes J.-A. et Nicolau J.-M.** (2003). Assessing landscape values: a proposal for a multidimensional conceptual model. *Ecological Modelling*, 15 octobre 2003, 168(3), p. 319-341.
- Groleau D. et Marenne C.** (1995). *Environmental specificities of the urban built forms*. Rebuild - Rebuilding the European City - Integration of Renewable Energies in Established Urban Structures, Corfu, Grece, 29 juin - 1 juillet 1995.
- Hajkowicz S. et Prato T.** (1998). *Multiple Objective Decision Analysis of Farming Systems in Goodwater Creek Watershed, Missouri*, Research Report No. 24. Columbia, University of Missouri-Columbia, juin 1998, 21 p.
- Hakkinen T.** (2001). *Finnish state-of-the-art report*, CRISP, avril 2001, 14 pages p.
- Hammerl M. et Everts W.** (2004). *ECOLUP-GUIDANCE - Environmental Management for Communal Urban Land Use Planning*. Constance, Lake Constance Foundation, mars 2004, 118 p.
- Hansen K. et Dammann S.** (2002). *Survey on Danish environmental indicators in the building sector*, CRISP, février 2002, 32 p.
- Hanson N., Gilbreath J., Knight E., Siebensohn C., Sadler S., Bloomquist R. G., Allen E., McKeever M. et Mitchum J.** (1997). *The energy yardstick: Using PLACE3S to Create More Sustainable Communities*, avril 1997, 166 p.
- Harger J. R. E. et Meyer F.-M.** (1996). Definition of indicators for environmentally sustainable development. *Chemosphere*, novembre 1996, 33(9), p. 1749-1775.
- Harker P. et Vargas L.** (1987). The theory of ratio scale estimation: Saaty's analytic hierarchy process. *Management Science*, 1987, 33(1), p. 1383-1403.

- Hehl-Lange S.** (2001). Structural elements of the visual landscape and their ecological functions. *Landscape and Urban Planning*, 25 janvier 2001, 54(1-4), p. 107-115.
- Heijungs R.** (1992). *Environmental life cycle assessment of products*. Leiden, Centre of environmental science (CML).
- Hernandez J., Garcia L. et Ayuga F.** (2004). Integration Methodologies for Visual Impact Assessment of Rural Buildings by Geographic Information Systems. *Biosystems Engineering* In Press, Corrected Proof.
- Hill M. J., Braaten R., Veitch S. M., Lees B. G. et Sharma S.** (2005). Multi-criteria decision analysis in spatial decision support: the ASSESS analytic hierarchy process and the role of quantitative methods and spatially explicit analysis. *Environmental Modelling & Software*, juillet 2005, 20(7), p. 955-976.
- Homedes N.** (1996). *The disability-adjusted life year (DALY) definition, measurement and potential use*, 16128, Banque Mondiale, 31 juillet 1996, 26 p.
- IFEN** (2003). *45 indicateurs de développement durable : une contribution de l'Ifen*. Etudes et travaux, Vol n°41, 144 p.
- INSEE** (2004). *France portrait social (2004-2005)*. Références, 272 p.
- International Panel on Climate Change (IPCC)** (1994). *Scientific assessment working group of IPCC, Radiative forcing of climate change*, World meteorological organization and United nations environment programme, 28 p.
- Jackson L. E.** (2003). The relationship of urban design to human health and condition. *Landscape and Urban Planning*, 15 août 2003, 64(4), p. 191-200.
- Janssen R.** (1992). *Multiple objective decision support for environmental management*, London, England, Kluwer Academic, 232 p.
- Jesinghaus J.** (1999). *Indicators for Decision-Making*. Ispra, Italie, European Commission, 12 décembre 1999, 26 p.
- Joerin F. et Musy A.** (2000). Land management with GIS and multicriteria analysis. *International Transactions in Operational Research*, janvier 2000, 7(1), p. 67-78.
- Katzschner L.** (2003). *Urban bioclimate and open space planning*. ICUC'5 Fifth International conference on urban climate, University of Lodz, Lodz, 1-5 septembre 2003.
- Katzschner L.** (2004). *Open space design strategies based on thermal confort analysis*. 21st International Conference Passive and Low Energy Architecture, Eindhoven, Pays-Bas, 19-22 septembre.
- Keeney R. L. et Raiffa H.** (1976). *Decisions with Multiple Objectives: Performances and Value Trade-Offs*, Wiley, New York.
- Kelly K. L.** (1998). A systems approach to identifying decisive information for sustainable development. *European Journal of Operational Research*, 1 septembre 1998, 109(2), p. 452-464.
- Khalfan M. M. A.** (2002). *Sustainable Development and Sustainable Construction - A literature review for C-SanD*, Loughborough University, 24 janvier 2002, 45 p.
- Ko T. G.** (2005). Development of a tourism sustainability assessment procedure: a conceptual approach. *Tourism Management*, juin 2005, 26(3), p. 431-445.
- Krajnc D. et Glavic P.** (2005). A model for integrated assessment of sustainable development. *Resources, Conservation and Recycling*, janvier 2005, 43(2), p. 189-208.

- Kunszt G. et Tiderenczl G.** (2000). *Hungarian state-of-the-art report*, CRISP, octobre 2000, 6 p.
- Kurtz J. C., Jackson L. E. et Fisher W. S.** (2001). Strategies for evaluating indicators based on guidelines from the Environmental Protection Agency's Office of Research and Development. *Ecological Indicators*, août 2001, 1(1), p. 49-60.
- Lair J., Chevalier J.-L., Gobin C. et Buyle-Bodin F.** (2003). *Ingénierie du développement durable : Vers la formalisation d'une doctrine française*. AUGC, La Rochelle, 2 et 3 juin 2003, p. 405-414.
- Larousse** (1996). *Le Petit Larousse Illustré*, Paris, Larousse, 1784 p., ISBN 2-03-301196-8.
- Lazarsfeld P.** (1958). Evidence and inference in social research. *Daedalus*, automne 1958, 87(4), p. 99-109.
- Le Grand Lyon** (2004a). *L'eau - Agenda 21 volet environnemental*. Lyon, Observatoire de l'environnement du Grand Lyon, 2004, 23 p.
- Le Grand Lyon** (2004b). *L'empreinte écologique - Agenda 21 volet environnemental*. Lyon, Observatoire de l'environnement du Grand Lyon, 18 novembre 2004, 26 p.
- Le Petit Robert** (Ed.) (1996). *Le nouveau Petit Robert*, 2553 p. ISBN 2-85036-506-8.
- Leopold L. B., Clarke F. E., Hanshaw B. B. et Basley J. R.** (1971). *A procedure for evaluating environmental impacts*, Geological Survey Circular 645. Washington, D.C, United States Geological Survey, 1971.
- Lewis G. M. et Brabec E.** (2005). Regional land pattern assessment: development of a resource efficiency measurement method. *Landscape and Urban Planning*, 15 mai 2005, 72(4), p. 281-296.
- Lim L. L., Hughes S. J. et Hellawell E. E.** (2005). Integrated decision support system for urban air quality assessment. *Environmental Modelling & Software*, juillet 2005, 20(7), p. 947-954.
- Link J. S.** (2005). Translating ecosystem indicators into decision criteria. *ICES Journal of Marine Science*, mai 2005, 62(3), p. 569-576.
- Lopez-Ridaura S., Masera O. et Astier M.** (2002). Evaluating the sustainability of complex socio-environmental systems. the MESMIS framework. *Ecological Indicators*, novembre 2002, 2(1-2), p. 135-148.
- Lourdel N.** (2005). *Méthodes pédagogiques et représentation de la compréhension du développement durable : Application à la formation des élèves ingénieurs*. Thèse, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne et Université Jean Monnet, Saint-Etienne, 299 p.
- Lützkendorf T. et Tanz K.** (2001). *Directory of tools - A Survey of LCA Tools, Assessment Frameworks, Rating Systems, Technical Guidelines, Catalogues, Checklists and Certificates*, International Energy Agency, octobre 2001, 123 p.
- Maïzia M.** (2004). *La modélisation des systèmes techniques urbains intégrés*. AUGC, Marne-la-Vallée, 3 et 4 juin 2004, p. 8.
- Malkina-Pykh I. G.** (2002). Integrated assessment models and response function models: pros and cons for sustainable development indices design. *Ecological Indicators*, novembre 2002, 2(1-2), p. 93-108.
- Mardaljevic J. et Rylatt M.** (2003). Irradiation mapping of complex urban environments: an image-based approach. *Energy and Buildings*, janvier 2003, 35(1), p. 27-35.
- Martin Centre for Architectural and Urban Studies** (1997). *Project ZED: Towards zero emission urban development - the interrelationship between energy, buildings, people and microclimate*, Contract RENA-CT94-0016. The Martin Centre, Cambridge, European Commission, 1997, 129 p.

- Martin-Houssart G. et Tabard N.** (2002). Les équipements publics mieux répartis sur le territoire que les services marchands. *France Portrait Social, édition 2002-2003*, INSEE, p. 123-140.
- Maystre L. Y., Pictet J. et Simos J.** (1994). *Méthodes multicritères ELECTRE*, Lausanne, Presses polytechniques et universitaires romandes, 321 p., ISBN 2-88074-267-6.
- McDonach K. et Yanaske P. P.** (2002). Environmental management systems and sustainable development. *The Environmentalist*, Kluwer Academic Publishers. 22, p. 217-226.
- McMahon S. K.** (2002). The development of quality of life indicators--a case study from the City of Bristol, UK. *Ecological Indicators*, novembre 2002, 2(1-2), p. 177-185.
- Mendoza G. A. et Prabhu R.** (2003). Qualitative multi-criteria approaches to assessing indicators of sustainable forest resource management. *Forest Ecology and Management*, 17 février 2003, 174(1-3), p. 329-343.
- Meziere D. et Theveniaud M.** (2002). *Energie et patrimoine communal - Le bilan 2000 et les principales évolutions par rapport à 1995 - Résultats définitifs détaillés*, ADEME, AITF, ATTF, EDF, GDF, juin 2002, 171 p.
- Miguet F. et Groleau D.** (2002). A daylight simulation tool for urban and architectural spaces - application to transmitted direct and diffuse light through glazing. *Building and Environment*, 2002, 37(8-9), p. 833-843.
- Moffett A., Garson J. et Sarkar S.** (2005). MultCSync: a software package for incorporating multiple criteria in conservation planning. *Environmental Modelling & Software*, octobre 2005, 20(10), p. 1315-1322.
- Molines N.** (2003). *Méthodes et outils pour la planification des grandes infrastructures linéaires et leur évaluation environnementale*. Thèse. Faculté de Sciences Humaines et Sociales, Département de Géographie, Université Jean Monnet, Saint-Etienne, 449 p.
- Monfreda C., Wackernagel M. et Deumling D.** (2004). Establishing national natural capital accounts based on detailed Ecological Footprint and biological capacity assessments. *Land Use Policy*, juillet 2004, 21(3), p. 231-246.
- Musy M., Ramos F., Siret D., Moreau G. et Marenne C.** (2004). *Développement d'un SIG 3D dédié au diagnostic des potentialités environnementales des bâtiments*. XXIIème Rencontres Universitaires de Génie Civil, Marne-la-Vallée, France, 3-4 juin.
- Nassar K., Thabet W. et Beliveau Y.** (2003). A procedure for multi-criteria selection of building assemblies. *Automation in Construction*, septembre 2003, 12(5), p. 543-560.
- Nibel S.** (2001). *CRISP Lettre d'information N°1*, juillet 2001.
- Nibel S., Charlot-Valdieu C., Chevalier J.-L. et Outrequin P.** (2001a). *French state-of-the-art report*, CRISP, juillet 2001, 50 p.
- Nibel S., Nagy L. et de Valicourt D.** (2001b). *Définition explicite de la qualité environnementale - référentiel des caractéristiques HQE*, 15 novembre 2001, 26 p.
- Nikolopoulou M. et Steemers K.** (2003). Thermal comfort and psychological adaptation as a guide for designing urban spaces. *Energy and Buildings*, janvier 2003, 35(1), p. 95-101.
- Nivet M.-L.** (1999). *De Visu : un logiciel pour la prise en compte de l'accessibilité visuelle dans le projet architectural, urbain et paysager*. Thèse. Faculté des sciences et techniques, Université de Nantes, Nantes, 215 p.
- OCDE** (2005). *Panorama des statistiques de l'OCDE 2005*, Editions OCDE, 266 p., ISBN 9264008209.

- Oliveira de Souza A., Diab Y. et Morand D.** (2004). *Elaboration d'un système d'indicateurs de conservation durable des sites urbains d'intérêt historique : appliqués aux sites brésiliens*. XXIIème Rencontres Universitaires de Génie Civil, Marne-la-Vallée, France, 3 et 4 juin 2004.
- Owens S.** (1986). *Energy, Planning and Urban Form*, Newnham College, Cambridge, Pion Limited, 118 p., ISBN 0850861187.
- Payraudeau S. et van der Werf H. M. G.** (2005). Environmental impact assessment for a farming region: a review of methods. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2 mai 2005, 107(1), p. 1-19.
- Perez J.** (1995). Some comments on Saaty's AHP. *Management Science*, 1995, 41(6), p. 1091-1105.
- Perez R., Seals R. et Michalsky J.** (1993). All-weather model for sky luminance distribution--Preliminary configuration and validation. *Solar Energy*, mars 1993, 50(3), p. 235-245.
- Peuportier B.** (2003). *Eco-conception des bâtiments, bâtir en préservant l'environnement*, Les presses de l'Ecole des Mines, Paris, 276 p., ISBN 2-911762-43-6.
- Peuportier B.** (2004). *Elaboration d'objectifs pour des projets d'habitat "durable"*, Paris, 13 octobre 2003.
- Peuportier B. et Polster B.** (2004). *Logiciel EQUER, Simulation du cycle de vie des bâtiments - Manuel d'utilisation*. Paris, Ecole des Mines de Paris, Centre d'Energétique, 46 p.
- Peuportier B. L. P.** (2001). Life cycle assessment applied to the comparative evaluation of single family houses in the French context. *Energy and Buildings*, mai 2001, 33(5), p. 443-450.
- Pictet J.** (1996). *Dépasser l'évaluation environnementale, procédure d'étude et insertion dans la décision globale*, Presses polytechniques et universitaires romandes, 187 p., ISBN 2-88074-324-9.
- Repetti A. et Desthieux G.** A Relational Indicatorset Model for urban land-use planning and management: Methodological approach and application in two case studies. *Landscape and Urban Planning* In Press, Corrected Proof.
- Robinson D., Stankovic S., Morel N., Deque F., Rylatt M., Kabele K., Manolakaki E. et Nieminen J.** (2002). *Integrated resource flow modelling of urban neighbourhoods: project SUNtool*. Eighth International IBPSA Conference, Eindhoven, Netherlands, IBPSA, 11-14 aout 2003, p. 1117 - 1122.
- Rommens P. et Lanting R.** (2000). *Dutch state-of-the-art report*, CRISP, octobre 2000, 19 p.
- Ronchi E., Federico A. et Musmeci F.** (2002). A system oriented integrated indicator for sustainable development in Italy. *Ecological Indicators*, novembre 2002, 2(1-2), p. 197-210.
- Roy B. et Bouyssou D.** (1993). *Aide Mutlicritère à la Décision : Méthodes et Cas*. Collection Gestion, Economica, 695 p., ISBN 2-7178-2473-1.
- Rylatt M., Gadsden S. et Lomas K.** (2003). Using GIS to estimate the replacement potential of solar energy for urban dwellings. *Environment and planning B - Planning and design*, janvier 2003, 30(1), p. 51-68.
- Saaty T. L.** (1977). A scaling method for priorities in hierarchical structures. *Journal of mathematical psychology* 15(3), p. 234-281.
- Sadler B. et Jacobs P.** (1990). A Key to Tomorrow: On the Relationship of Environmental Assessment and Sustainable Development. *Sustainable Development and Environmental Assessment: Perspectives on Planning for a Common Future*. Peter Jacobs and Barry Sadler. Ottawa, Canadian Environmental Assessment Research Council.
- Sala M.** (2003). *Italian state-of-the-art report*, CRISP, 2003, 14 p.

- Sarma K. M., Bankobeza G. M. et Mulumba M. A.** (2000). *Protocole de Montréal relatif à des substances qui appauvrissent la couche d'ozone*, PNUE, Nairobi, Kenya, Secrétariat de la Convention de Vienne pour la protection de la couche d'ozone & du Protocole de Montréal relatif à des substances qui appauvrissent la couche d'ozone, 49 p., ISBN 92-807-1888-6.
- Sarradin F., Siret D. et Hegron G.** (2002). *Visual Analysis of Urban Environment*. First International Workshop on Architectural and Urban Ambient Environment, Nantes, France, 6-8 février 2002, p. 26.
- Sébastien L. et Brodhag C.** (2004). A la recherche de la dimension sociale du développement durable. *Développement Durable et Territoires*, mars 2004, dossier 3 "Les dimensions humaine et sociale du développement durable".
- Shi C., Hutchinson S. M. et Xu S.** (2004). Evaluation of coastal zone sustainability: an integrated approach applied in Shanghai Municipality and Chong Ming Island. *Journal of Environmental Management*, juillet 2004, 71(4), p. 335-344.
- Shields D. J., Solar S. V. et Martin W. E.** (2002). The role of values and objectives in communicating indicators of sustainability. *Ecological Indicators*, novembre 2002, 2(1-2), p. 149-160.
- Smeets E. et Wetering R.** (1999). *Environmental Indicators: Typology and overview*, Technical report, N° 25, EEA, 1999.
- Souami T., Bougrain F., Dard P., Devalière I. et Marc C.-P.** (2005). *Analyse des stratégies d'acteurs et des méthodes de management dans les opérations de la consultation "Renouvellement Urbain et Environnement - 2000" du PUCA*. Paris, PUCA et CSTB, juin 2005, 35 p.
- SoundPLAN** (1990). SoundPLAN chapter 6 - Noise / Acoustics. *SoundPLAN Wins User's Manual*. Braunstein + Berndt GmbH. 6, p. 461.
- Spangenberg J. H., Pfahl S. et Deller K.** (2002). Towards indicators for institutional sustainability: lessons from an analysis of Agenda 21. *Ecological Indicators*, novembre 2002, 2(1-2), p. 61-77.
- Stoa E.** (2004). *Co-housing in Europe - Experiences from France, Netherlands, Germany and Norway*. Trondheim, Norvège, Projet E\_co-housing, 22 janvier 2004, 60 p.
- Stoglehner G.** (2003). Ecological footprint -- a tool for assessing sustainable energy supplies. *Journal of Cleaner Production*, mai 2003, 11(3), p. 267-277.
- Storey K.** (2005). *Geography 6250/4410 - Seminar in Resource Management: Environmental Impact Assessment*, St. John's, hiver 2005.
- Suler J.** (2000). *Romanian state-of-the-art report*, CRISP, septembre 2000, 6 p.
- Svoray T., Bar Kutiel P. et Bannet T.** (2005). Urban land-use allocation in a Mediterranean ecotone: Habitat Heterogeneity Model incorporated in a GIS using a multi-criteria mechanism. *Landscape and Urban Planning*, 15 mai 2005, 72(4), p. 337-351.
- Tamiz M., Jones D. et Romero C.** (1998). Goal programming for decision making: An overview of the current state-of-the-art. *European Journal of Operational Research*, 16 décembre 1998, 111(3), p. 569-581.
- Tavasszy L.** (2004). *ACER 1.0 User Guide*, TNO Inro and Demis, 2004, 13 p.
- Teller J. et Azar S.** (2001). Townscope II--A computer system to support solar access decision-making. *Solar Energy* 70(3), p. 187-200.
- Ten Brink B. J. E., Hosper S. H. et Colijn F.** (1991). A quantitative method for description & assessment of ecosystems: The AMOEBA-approach. *Marine Pollution Bulletin* 23, p. 265-270.

- The California Energy Commission** (2001). *Shining PLACE3S: Sacramento and National Examples of Smart Growth*. City of Sacramento, juin 2001, 50 p.
- URGE** (2004). *The Evaluations Methods*, 10 juin 2004, 24 p.
- US department of energy** (2004). *Building energy software tools directory*, [http://www.eere.energy.gov/buildings/tools\\_directory/](http://www.eere.energy.gov/buildings/tools_directory/), US Department of Energy, office of building, 2004.
- van der Linden K., Boerstra A. C., Raue A. K. et Kurvers S. R.** (2002). Thermal indoor climate building performance characterized by human comfort response. *Energy and Buildings*, août 2002, 34(7), p. 737-744.
- van Vuuren D. P. et Bouwman L. F.** (2005). Exploring past and future changes in the ecological footprint for world regions. *Ecological Economics*, 5 janvier 2005, 52(1), p. 43-62.
- Verne J.** (1879). *Les Cinq Cents Millions de la Bégum*, Paris, J. Hetzel, 254 p., ISBN 225301270X.
- Villeneuve C. et Huybens N.** (2002). Les éco-conseillers, promoteurs et acteurs du développement durable. *VertigO - La revue en science de l'environnement*, décembre 2002, 3(3), p. 8.
- Vreeker R., Nijkamp P. et Ter Welle C.** (2001). *A Multicriteria Decision Support Methodology for Evaluating Airport Expansion Plans*. Amsterdam, Pays-Bas, Tinbergen Institute, 17 Janvier 2001, 26 p.
- Wefering F. M., Danielson L. E. et White N. M.** (2000). Using the AMOEBA approach to measure progress toward ecosystem sustainability within a shellfish restoration project in North Carolina. *Ecological Modelling*, 1 juin 2000, 130(1-3), p. 157-166.
- Weiers S., Bock M., Wissen M. et Rossner G.** (2004). Mapping and indicator approaches for the assessment of habitats at different scales using remote sensing and GIS methods. *Landscape and Urban Planning*, 15 mars 2004, 67(1-4), p. 43-65.
- Wetzel C., Wörle G. et Mayer E.** (2001). *German State-of-the-art report*, CRISP, février 2001.
- Wurtz E., Achard G., Dufrasnes E., Cherqui F., Peuportier B., Musy M., Bornarel A. et Gobin C.** (2003). *Projet ADEQUA : élaboration d'une méthodologie d'aide à la décision lors de la réalisation ou de la réhabilitation d'un quartier résidentiel*, présentation du projet, 2003, 44 p.
- Youker R.** (1989). Managing the project cycle for time, cost and quality: lessons from World Bank experience. *International Journal of Project Management*, février 1989, 7(1), p. 52-57.

# ANNEXES

## I. Sigles utilisés

ACV	Analyse du Cycle de Vie
ADEME	Agence de l'Environnement et de la maîtrise de l'Energie
ADEQUA	Aménagement Durable à l'Echelle du QUArtier
AEE	Agence Européenne de l'Environnement
AITF	Association des Ingénieurs Territoriaux de France
AMB	Objectif " <i>Améliorer la qualité des Ambiances</i> "
AO	Appel d'Offres
AP	Acidification Potential
ARENE	Agence Régionale de l'Environnement et des Nouvelles Energies
ARPE	Agence Régionale Pour l'Environnement
ATTF	Association des Techniciens supérieurs Territoriaux de France
BREEAM	BRE's Environmental Assessment Method
CASBEE	Comprehensive Assessment System for Building Environmental Efficiency
CIRAD	Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement
CMED	Commission Mondiale sur l'Environnement et le Développement
CSTB	Centre Scientifique et Technique du Bâtiment
CTE	Contrat Territorial d'Exploitation
DCE	Dossier de Consultation des Entreprises
DD	Développement Durable
DDE	Direction Départementale de l'Équipement
DDAF	Direction Départementale de l'Agriculture et de la Forêt
DEQE	Définition Explicite de la Qualité Environnementale
DGUHC	Direction Générale de l'Urbanisme, de l'habitat et de la Construction
DPSR	Driving forces Pressure State Impact Response
ECA	Ecotoxicological Classification factor for Aquatic ecosystems
ECO	Objectif " <i>Préserver l'Ecosystème</i> "
ECT	Ecotoxicological Classification factor for Terrestrial ecosystems
EU	Eaux Usées
FPEIR	Forces motrices Pression Etat Impact Réponse
GES	Gaz à Effet de Serre
GWP	Global Warming Potential
HCA	Human toxicological Classification factor for the Air
HCS	Human toxicological Classification factor for the Soil
HCW	Human toxicological Classification factor for Water
IDD	Indicateurs de Développement Durable

IFEN	Institut Français de l'Environnement
iiSBE	International Initiative for a Sustainable Built Environment
INSEE	Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques
IPCC	International Panel on Climate Change
LEED	Leadership in Energy and Environmental Design
LOC	Objectif " <i>Favoriser le développement <b>Local</b></i> "
OCDE	Organisation pour la Coopération et le Développement Economique
ONG	Organisation Non Gouvernementale
OPC	Ordonnancement Pilotage Coordination
PAT	Objectif " <i>Prendre en compte le <b>Patrimoine</b></i> "
PER	Pression Etat Réponse
PLU	Plan Local d'Urbanisme
PMR	Personnes à Mobilité Réduite
POS	Plan d'Occupation des Sols
PSR	Pressure State Response
PUCA	Plan Urbanisme Construction Architecture
QE	Qualité Environnementale (QE)
RES	Objectif " <i>Préserver les <b>Ressources</b></i> "
RFF	Réseau Ferré de France
RIS	Objectif " <i>Préserver la santé et gérer les <b>Risques</b></i> "
RSE	Responsabilité Sociétale des Entreprises
SCoT	Schémas de Cohérence Territoriale
SDIS	Service Départemental d'Incendie et de Secours
SDAP	Services Départementaux de l'Architecture et du Patrimoine
SHON	Surface Hors Oeuvre Nette
SIG	Système d'information géographique
SEDD	Stratégie Européenne pour un Développement Durable
SEEU	Stratégie Européenne pour l'Environnement Urbain
SNDD	Stratégie Nationale de Développement Durable
SME	Système de Management Environnemental
SMO	Système de Management d'Opération
SNAL	Syndicat National des Aménageurs Lotisseurs
SOC	Objectif " <i>Renforcer la vie <b>Sociale</b></i> "
TC	Transports en Commun
TCSP	Transports en Commun en Site Propre
TIC	Technologie de l'Information et des Communications
UICN	Union Internationale de la Conservation de la Nature
VAL	Objectif " <i>Valoriser la place du quartier dans la ville</i> "
VTT	Valtion Teknillien Tutkimuslaitos (centre de recherche technique de Finlande)
ZAC	Zone d'Aménagement Concerté
ZNIEFF	Zone Naturelle d'Intérêt Ecologique, Faunistique et Floristique

## II. Autres projets

Nom	Description
<p style="text-align: center;"><b>Contrat ATEnEE</b></p>	<p><a href="http://www.ademe.fr/Collectivites/Atenee/">http://www.ademe.fr/Collectivites/Atenee/</a></p> <p>Le 29 mars 2002, le Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable (MEDD), l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) et la Délégation à l'Aménagement du Territoire et à l'Action Régionale (DATAR) ont lancé l'appel à projets national "Contrat ATEnEE" - <b>A</b>ctions <b>T</b>erritoriales pour l'<b>E</b>nvironnement et l'<b>E</b>fficacité <b>E</b>nergétique. Cet appel à projets, ouvert sur la période 2002- 2003 et prolongé jusqu'à décembre 2006, vise à mobiliser les territoires de projets -agglomérations, pays et parcs naturels régionaux - afin qu'ils intègrent les volets environnement et efficacité énergétique dans les politiques territoriales.</p>
<p style="text-align: center;"><b>BEER (Building Energy Efficiency Research)</b></p>	<p><a href="http://www.arch.hku.hk/research/BEER/index.html">http://www.arch.hku.hk/research/BEER/index.html</a></p> <p>L'objectif de ce projet de recherche est de formuler des stratégies permettant de concevoir des bâtiments efficaces énergétiquement, à travers l'analyse de différents climats et des performances énergétiques des bâtiments. L'étude concerne aussi bien l'architecture du bâtiment que les systèmes installés et a pour but de proposer aux concepteurs des informations pratiques et pertinentes.</p> <p>Les performances énergétiques des bâtiments sont étudiées grâce à de nombreux logiciels de simulations (DOE-2, EnergyPlus, Energy-10, ENER-WIN...).</p> <p>Ce projet recense aussi les différents codes de la construction mis en place dans de nombreux pays dans le monde.</p>
<p style="text-align: center;"><b>EcoCity</b></p>	<p><a href="http://www.ecocityprojects.net/">http://www.ecocityprojects.net/</a></p> <p>Le but de ce projet européen est de développer des motifs d'implantation de villes dont le système de transport est compatible avec l'environnement et plus généralement de créer un cadre d'intégration de solutions conduisant à un modèle "d'écoville". Ce projet regroupe 30 participants venant de neuf pays. A travers 7 sites, le projet doit pouvoir montrer la faisabilité et la désirabilité de villes dont le mode de vie est compatible avec les principes du développement durable.</p>
<p style="text-align: center;"><b>ENERBUILD</b></p>	<p><a href="http://www.enerbuild.net/">http://www.enerbuild.net/</a></p> <p>Ce réseau thématique européen entend renforcer la coopération des partenaires européens impliqués dans des projets de recherche et de développement concernant l'énergie dans les bâtiments. Il présente les résultats de 57 programmes européens de recherche visant à optimiser l'utilisation de l'énergie et les performances environnementales des bâtiments. Les thèmes de recherche concernent le solaire, l'éclairage, les systèmes mécaniques de climatisation, les composants dans les bâtiments et la conception.</p>
<p style="text-align: center;"><b>ISHTAR</b></p>	<p><a href="http://www.inrets.fr/ur/cir/bl/ISHTAR/presentation/">http://www.inrets.fr/ur/cir/bl/ISHTAR/presentation/</a></p> <p>Projet européen regroupant 19 partenaires et piloté par l'ENEA (Italie), il a commencé en 2001 et s'est terminé en mars 2005 par sa conférence finale à Rome. L'acronyme signifie <b>I</b>ntegrated <b>S</b>oftware for <b>H</b>ealth, <b>T</b>ransport efficiency and <b>A</b>rtistic heritage <b>R</b>ecovery. Il a pour but la construction d'un logiciel intégré pour l'analyse des effets sur la qualité de vie des actions concernant les déplacements et le trafic routier en zone urbaine. Les effets analysés concernent l'environnement, la santé, la qualité du trafic, la sécurité routière et les dommages sur les monuments. Le logiciel intègre des modèles d'émission, de dispersion et d'impact avec un SIG au centre.</p>

Nom	Description
<b>ISHTAR</b>	<p><a href="http://www.inrets.fr/ur/cir/bl/ISHTAR/presentation/">http://www.inrets.fr/ur/cir/bl/ISHTAR/presentation/</a></p> <p>Projet européen regroupant 19 partenaires et piloté par l'ENEA (Italie), il a commencé en 2001 et s'est terminé en mars 2005 par sa conférence finale à Rome. L'acronyme signifie <b>I</b>ntegrated <b>S</b>oftware for <b>H</b>ealth, <b>T</b>ransport efficiency and <b>A</b>rtistic heritage <b>R</b>ecovery. Il a pour but la construction d'un logiciel intégré pour l'analyse des effets sur la qualité de vie des actions concernant les déplacements et le trafic routier en zone urbaine. Les effets analysés concernent l'environnement, la santé, la qualité du trafic, la sécurité routière et les dommages sur les monuments. Le logiciel intègre des modèles d'émission, de dispersion et d'impact avec un SIG au centre.</p>
<b>MASURIN (Management of Sustainable Revitalisation of Urban Industrial Sites)</b>	<p><a href="http://www.masurin.org/">http://www.masurin.org/</a></p> <p>Le projet européen de Management de la Revitalisation Durable de Sites Industriels Urbains regroupe TNO (Pays-Bas), l'INERIS (France), l'ENEA (Italie), le NILU et le NIVA (Norvège), le CMI (Pologne) et l'ARC (Autriche) pour la 3<sup>ème</sup> année de 2002 à 2004.</p> <p>Le projet MASURIN est centré sur le management et la prise de décision relative à la revitalisation des sites industriels en milieu urbain avec prise en compte de leurs impacts socio-économiques et environnementaux. Les principaux objectifs du projet sont de fournir un guide de management et des outils pratiques afin de faciliter le dialogue entre l'industrie et le public, et de maintenir un développement durable. Plusieurs instituts de recherche ont invité des villes de leurs pays respectifs à collaborer sur ce projet européen, afin que les produits à développer puissent immédiatement être testés sur des cas concrets. Ce projet a conduit à la réalisation d'un logiciel nommé ACER (Tavasszy 2004) montrant les impacts de scénarios de renouvellement de site industriels sur l'emploi, la production. Les impacts évalués concernent le site lui-même mais aussi la ville dans laquelle le site se trouve.</p>
<b>LASALA</b>	<p><a href="http://www.localevaluation21.org">http://www.localevaluation21.org</a></p> <p>Le projet LASALA (<b>L</b>ocal <b>A</b>genda <b>21</b> <b>S</b>elf-<b>A</b>ssessment for <b>L</b>ocal <b>A</b>uthorities on-line) développe un cadre d'évaluation des Agendas 21 locaux qui a été utilisé par plus de 150 autorités locales. Il a débuté en février 2003 et s'est terminé en mai 2004 ; regroupant le Royaume-Uni, la Finlande, le Portugal, la Hongrie et l'Italie, sous la coordination de l'ICLEI (Allemagne). Le site du projet LASALA offre une plateforme permettant une autoévaluation de Agenda 21 par une collectivité.</p>
<b>LCA-IWM (Life Cycle Assessment tools for the development of Integrated Waste Management strategies for Cities and Regions)</b>	<p><a href="http://www.iwar.bauing.tu-darmstadt.de/abft/Lcaiwm/main.htm">http://www.iwar.bauing.tu-darmstadt.de/abft/Lcaiwm/main.htm</a></p> <p>Ce projet européen a débuté en septembre 2002, pour une durée de 36 mois. Il est piloté par la TUD (Allemagne) et regroupe les universités URV (Espagne), ABF-BOKU (Autriche), WUT (Pologne), DUTH (Grèce), KUT (Lituanie), SUBTA (Slovaquie), ainsi que des instituts de recherche du Luxembourg, de l'Allemagne, de la Pologne.</p> <p>Les objectifs annoncés sont de développer un outil de mise en place ou d'amélioration d'un système de gestion des déchets dans les villes européennes. Les premières applications concernent les régions avec un développement économique important : les pays entrants dans l'union européenne et les pays comme la Grèce, l'Espagne, le Portugal, etc. La priorité est donnée à ces pays car un développement économique rapide induit une augmentation significative de la quantité de déchets produits, tandis que ces pays possèdent généralement un système de gestion nettement perfectible. Ce projet s'adresse aux municipalités, aux autorités locales et régionales, aux instituts de développement et aux consultants en charge de ces questions.</p>
<b>NEHOM (Neighbourhood Housing Models)</b>	<p><a href="http://www.nhh.no/geo/NEHOM/">http://www.nhh.no/geo/NEHOM/</a></p> <p>Ce projet européen a commencé en décembre 2000 jusqu'en janvier 2004 ; il regroupe la Norvège, le Royaume-Uni, la France, l'Italie, la Hongrie, l'Estonie, l'Allemagne et la Suède. Il concerne les initiatives sur les habitations et sur les quartiers qui ont pour but l'amélioration de la qualité de vie des zones urbaines défavorisées. Le projet évalue ces initiatives et leur diffusion à travers l'Europe. Il est principalement centré sur la cohésion sociale dans les quartiers. Le projet se décompose en quatre étapes majeures : construction d'une base de données sur les cas d'études, mise en place de recommandations utilisables par d'autres initiatives, identification d'une série de principes qualitatifs et quantitatifs pour évaluer un projet en fonction de sa qualité de vie, et enfin diffuser ces informations à travers l'Europe.</p>

Nom	Description
<b>SAGACités</b>	Ce projet (Adolphe et al. 2002) dont l'acronyme signifie Système d'Aide à la Gestion des Ambiances Urbaines a pour but la mise en place d'un système d'objectifs environnementaux et d'indicateurs concernant la qualité énergétique et microclimatique des villes et des quartiers.
<b>SPECTRA</b>	Le projet SPECTRA a pour but de mettre en commun la recherche sur les principes de développement durable avec la compréhension des opérations de planification spatiale. Cela doit conduire à analyser comment les systèmes de planification prennent en compte ces principes, à définir des moyens pour améliorer cette prise en compte, à identifier les méthodes et les outils les plus adaptés et dernièrement à définir de nouvelles méthodes, outils et conditions. Ce projet réunit sept organisations internationales de recherche : l'UWE (Angleterre), le VTT (Finlande), l'Université d'Athènes (Grèce), Ambiente Italia (Italie), l'Ecole Nijmegen pour les études environnementales (Pays-Bas) et l'ICLEI (Allemagne).
<b>SUIT (Sustainable Development of Urban Historical Areas through an Active Integration within Towns)</b>	<p><a href="http://www.lema.ulg.ac.be/research/suit/">http://www.lema.ulg.ac.be/research/suit/</a></p> <p>Le projet SUIT (Dupagne et al. 2004) d'établir une méthodologie d'évaluation environnementale consistante et flexible vise à assister la conservation active des sites historiques. Piloté par le laboratoire LEMA (Belgique), il comporte sept partenaires venants de Belgique, d'Angleterre, d'Allemagne et du Danemark. La méthodologie est conçue pour aider les municipalités et les autorités locales à évaluer la pertinence de nouveaux projets urbains visant à promouvoir l'exploitation durable du patrimoine culturel architectural et urbain. Elle doit aussi mettre en liaison les sites historiques existants et les exigences socio-économiques actuelles, notamment à travers l'intégration de ces sites dans les nouveaux projets.</p>
<b>SUREURO (Sustainable Refurbishment EUROpe)</b>	<p><a href="http://www.sureuro.com/">http://www.sureuro.com/</a></p> <p>SUREURO met en place et test des nouveaux concepts techniques pour la réhabilitation durable d'habitations construites depuis 1950, durant l'après-guerre. Ce projet européen dont les principaux partenaires sont issus de Suède, Finlande, Danemark, Pays-Bas, Allemagne, France, Angleterre et république Tchèque, a débuté en mars 2000. En Europe, 80 000 zones résidentielles et 56 millions d'appartements ont été construits pendant la période d'après-guerre : ce projet a donc pour but de mettre en place une assistance visant à optimiser ces réhabilitations. Les cas d'étude associés au projet concernent 12 projets dans neuf pays.</p>
<b>URBACT</b>	<p><a href="http://www.urbact.org">www.urbact.org</a></p> <p>Les travaux d'URBACT concernent en premier lieu les villes et les quartiers caractérisés par un taux élevé de chômage, de délinquance et de pauvreté, et par une insuffisance du niveau des services publics. URBACT, programme d'initiative communautaire met en réseau les villes de l'ensemble des Etats membres autour de trois grands objectifs :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Développer les échanges transnationaux d'expériences entre les villes des programmes URBAN I et URBAN II, des villes bénéficiaires d'un Projet Pilote Urbain, et des villes de plus de 20.000 habitants des nouveaux Etats membres de l'Union.</li> <li>- Tirer les leçons de l'analyse de ces expériences, et des politiques menées localement, et proposer des démarches innovantes de traitement de ces difficultés.</li> <li>- Diffuser à l'ensemble des acteurs des villes européennes les expériences dans différents domaines, les leçons qui en sont tirées et les propositions qui sont faites.</li> </ul> <p>C'est dans cette optique que les réseaux thématiques sont constitués. Chacun d'eux réunit des villes de différents pays. L'une d'entre elles est le chef de file du réseau. Chaque réseau travaille sur un des thèmes de la politique de développement urbain intégré : l'inclusion sociale, développement économique, régénération urbaine, participation des habitants.</p>

### III. Tableaux de données pour l'évaluation des alternatives

Les résultats des évaluations des alternatives d'aménagement du quartier EST sont présentés ci-après sous forme de tableaux synthétisant l'ensemble des critères nécessaires au calcul des indicateurs.

<b>RES : Préserver les ressources</b>				
<b>Energie</b>				Infos
<b>Variante</b>	<b>juillet</b>	<b>septembre</b>		
<b>Consommation [MWh]</b>	1.90E+05	1.60E+05		
<b>Eau</b>				Infos
<b>variante</b>	<b>juillet</b>	<b>septembre</b>		
<b>Consommation [m3]</b>	1.50E+06	1.30E+06		
<b>Surface de toiture utile</b>	1300	1480		
<b>Précipitations</b>	0.68	0.68		
<b>Sol</b>				Infos
		<b>juillet</b>	<b>septembre</b>	
<b>Catégorie de surface</b>	<b>Coefficient d'usage <math>C_u</math></b>	<b>Surfaces initiales <math>m^2</math></b>	<b>Surfaces projet <math>m^2</math></b>	<b>Surfaces projet <math>m^2</math></b>
Tissu urbain continu	0.95	4000	4354	4919
Site industriel ou	0.95	9180	0	0
Zones portuaires	0.95	0	0	0
Aéroports	0.9	0	0	0
Décharges	0.9	0	0	0
Routes et réseaux ferrés	0.9		0	0
Tissu urbain discontinu	0.85	0	15495	5958
Zones agricoles cultivées	0.75	0	0	0
Zones urbaines vertes	0.7	9180	0	0
Equipements de sport et	0.7	0	2511	11483
Zones agricoles d'élevage	0.55	0	0	0
Zones forestières	0.35	0	0	0
Plages et dunes	0.25	0	0	0
Zones humides	0.15	0	0	0
	Surface totale	22360	22360	22360
<b>Ressources abiotiques épuisables</b>				Infos
	<b>Variante</b>	<b>juillet</b>	<b>septembre</b>	
	<b>Épuisement des ressources [<math>10^{-9}</math>]</b>	310	280	

<b>ECO : Préserver l'écosystème</b>			
<b>Acidification</b>			Infos
	<b>Variantes</b>	<b>juillet</b>	<b>septembre</b>
	<b>Emissions [kg.eqSO2]</b>	73000	65000
<b>Ecotoxicité</b>			Infos
	<b>Variantes</b>	<b>juillet</b>	<b>septembre</b>
	<b>Ecotoxicité [m3 d'eau]</b>	3.07E+08	2.50E+08
<b>Eutrophisation</b>			Infos
	<b>Variantes</b>	<b>juillet</b>	<b>septembre</b>
	<b>Eutrophisation [kg.eqPO4(3-)]</b>	8200	7100
<b>Déchets inertes ultimes</b>			Infos
	<b>Variantes</b>	<b>juillet</b>	<b>septembre</b>
	<b>Déchets ultimes [t.eq]</b>	29700	28100

<b>RIS : Préserver la santé et gérer les risques</b>			
<b>Effet de serre</b>			Infos
	<b>Variantes</b>	<b>juillet</b>	<b>septembre</b>
	<b>Emissions [t.eqCO2]</b>	31100	25200
<b>Toxicité humaine</b>			Infos
	<b>Variantes</b>	<b>juillet</b>	<b>septembre</b>
	<b>Toxicité [kg.eqChHum]</b>	151000	133000
<b>Smog d'été</b>			Infos
	<b>Variantes</b>	<b>juillet</b>	<b>septembre</b>
	<b>Emissions [kg.eqC2H4]</b>	48000	43000
<b>Déchets radioactifs</b>			Infos
	<b>Variantes</b>	<b>juillet</b>	<b>septembre</b>
	<b>Volume généré [dm3]</b>	1220	870

<b>AMB : Améliorer la qualité des ambiances</b>			
<b>Ambiances intérieures</b>			Infos
<b>Confort hygrothermique</b>			
	<b>Variantes</b>	<b>juillet</b>	<b>septembre</b>
<b>Note confort (0-10)</b>		5	5
<b>Taux d'inconfort [%]</b>		30	33
<b>Visibilité intérieure</b>			Infos
	<b>Variantes</b>	<b>juillet</b>	<b>septembre</b>
<b>Facteur de forme avec le ciel</b>		0.78	0.84
<b>Eclairage naturel</b>			Infos
	<b>Variantes</b>	<b>juillet</b>	<b>septembre</b>
<b>Ratio Svitrage/SHON</b>		0.08	0.11
<b>Espace intérieur</b>			Infos
Nombre d'habitants: 650	<b>Variantes</b>	<b>juillet</b>	<b>septembre</b>
<b>SHON tot [m<sup>2</sup>]</b>		19360	19675
<b>Espace habitable moyen [m<sup>2</sup>]</b>		<b>29.8</b>	<b>30.3</b>
<b>Ambiances extérieures</b>			Infos
<b>Confort acoustique</b>			
	<b>Variantes</b>	<b>juillet</b>	<b>septembre</b>
<b>% Façade jour &lt; 70 dB(A)</b>		82.7	83.0
<b>% Façade nuit &lt; 65 dB(A)</b>		100.0	100.0
<b>% Sol jour &lt; 70 dB(A)</b>		86.9	87.0
<b>% Sol nuit &lt; 60 dB(A)</b>		87.2	87.0
<b>Visibilité extérieure</b>			Infos
	<b>variantes</b>	<b>juillet</b>	<b>septembre</b>
<b>Visibilité des monuments [0-1]</b>		0.4	0.6
<b>Facteur de forme rue - ciel</b>		0.00	0.00
<b>Facteur de forme espaces publics - ciel</b>		0.67	0.81
<b>Ensoleillement</b>			Infos
	<b>Variantes</b>	<b>juillet</b>	<b>septembre</b>
<b>Ensoleillement relatif des espaces verts [%]</b>		90.5	100.0
<b>Ensoleillement relatif des façades [%]</b>		13.0	15.7
<b>Ensoleillement relatif des toitures [%]</b>		73.8	73.0
	<b>Variantes</b>	<b>juillet</b>	<b>septembre</b>
<b>Ecart-type relatif d'ensoleillemnt à l'est [0-1]</b>		0.13	0.38
<b>Ecart-type relatif d'ensoleillemnt à l'ouest [0-1]</b>		0.24	0.14
<b>Ecart-type relatif d'ensoleillemnt au sud [0-1]</b>		0.12	0.01
<b>Ecart-type relatif d'ensoleillemnt au nord [0-1]</b>		0.05	0.02
<b>(1-moyenne)</b>		0.87	0.87



# Méthodologie d'évaluation d'un projet d'aménagement durable d'un quartier - méthode ADEQUA

La démarche HQE, puis l'émergence rapide et incontrôlée d'une volonté de "développement durable" dans le domaine de la construction, sont à l'origine de nouvelles exigences d'aménagement urbain. Or la prise en compte de ce concept requiert une analyse holistique d'un projet urbain. Cela nécessite une échelle d'étude plus large que celle du bâtiment. Ce travail concerne la mise en place d'une méthode d'analyse multi indicateurs basée sur huit objectifs à l'échelle du quartier. La méthode développée est une contribution au projet national initié par le Ministère de l'Équipement et l'ADEME : le projet ADEQUA. La quantification des indicateurs associés aux objectifs permet au professionnel de la construction, l'aménageur ou la collectivité, d'évaluer quantitativement et de comparer différentes alternatives d'aménagement d'un quartier, à l'aide de diagrammes radars. Cette quantification est basée sur l'utilisation d'outils de simulation et sur une agrégation multicritères.

Mots-clés : simulation, quartier, développement durable, environnement, évaluation, indicateurs, analyse multicritères.

## Methodology for assessing sustainable urban district project - ADEQUA method

The fast and uncontrolled emergence of a will to promote sustainable development in the field of building construction generates new requirements for urban development. Besides technical solutions, the project manager or urban planner must take into consideration the overall impact of his project on the local and global environment as well as social trends, economic development, health and safety for users. Integration of a huge number of evaluation criteria makes the assessment of such strategy very hard to carry out without a real methodological work. In the last few years, a strong effort has been made in order to organize this debate and various methods evaluating environmental quality of a building project have been proposed. However, this concept of sustainable development requires solutions at a higher level than the single building. This paper proposes a first methodological approach in order to evaluate the sustainability of a district project, in the framework of the French ADEQUA project. This methodology allows actors in the building sector to consider different sustainable alternatives for a project. There is not a unique alternative which fit perfectly to sustainable development principles, but there are several best solutions according to specific characteristics of a project and to its own objectives.

Keywords: simulation, district, sustainable development, environment, assessment, indicators, multi-criteria analysis.