



Université
de Toulouse

THÈSE

**En vue de l'obtention du
DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE**

Délivré par :

Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse (INSA Toulouse)

Discipline ou spécialité :

Génie civil

Présentée et soutenue par :

Laure FERNANDEZ

le : lundi 13 septembre 2010

Titre :

Transposition en architecture des connaissances d'ingénierie
environnementale et des savoirs relatifs au choix des matériaux

Ecole doctorale :

Mécanique, Energétique, Génie civil et Procédés (MEGeP)

Unité de recherche :

LMDC - INSA et LRA - ENSA

Directeur(s) de Thèse :

Sylvie LORENTE - Professeur des Universités INSA Toulouse

Frédéric BONNEAUD - Maître assistant ENSA Toulouse

Rapporteurs :

Hubert GUILLAUD - Professeur Sciences et Techniques pour l'architecte ENSA Grenoble

Christian INARD - Professeur des Universités LEPTIAB La Rochelle

Autre(s) membre(s) du jury

Luc ADOLPHE - Professeur des Universités INSA Toulouse

Eric BLANC - Docteur et ingénieur SETEC

REMERCIEMENTS

La réalisation de cette thèse a été possible grâce à mes rencontres et mes échanges avec de nombreuses personnes au cours de ces trois années.

Mes remerciements vont plus particulièrement à :

Sylvie Lorente, pour avoir guidé mon travail et ma réflexion avec intérêt, rigueur et disponibilité,

Frédéric Bonneaud, pour avoir impulsé et rendu possible ce travail, ainsi que pour l'intérêt et l'enthousiasme portés à mes recherches,

je tiens à leur exprimer mon respect et ma profonde gratitude.

L'équipe du comité de suivi de thèse : Luc Adolphe, Eric Blanc et Pierre Fernandez, pour leurs apports constructifs et complémentaires et leur disponibilité.

Les membres du jury Hubert Guillaud et Christian Inard pour le temps qu'ils ont consacré à l'évaluation de mon travail ainsi que pour les remarques constructives qu'ils ont pu me faire.

Les membres des laboratoires LRA ou LMDC : Jean-Pierre Ollivier, Alain Chatelet, Luc Floissac, Sophie Cordier, Jean-Pierre Cordier, Juan Carlos Rojas Arias, Catherine Reginensi, Annie Loiseaux, Nadia Daoudi et Martine Rimbart.

Nathalie Tornay, collègue et amie,

Les professionnels ayant participé aux entretiens et enquêtes.

Jean-Luc Rames pour sa disponibilité et l'intérêt porté à mon travail.

Je remercie également :

Le Ministère de la Culture et de la Communication pour m'avoir octroyé une bourse sur 3 ans.

Ma famille pour son soutien et plus particulièrement Arnaud, Patrick, Colette, Claire, et Anne.

Chris, Ludo, So, Marsaude, Jean-Yves, Anh Tho, Brice et Julie pour leur soutien et leur amitié.

A mes enfants Merlin et Sati,

A mes grands-pères Paul et Antoine.

RESUME

Comment les savoirs issus de l'ingénierie environnementale sur les matériaux sont-ils susceptibles d'aider les concepteurs dans le démarrage de l'esquisse ?

Les démarches environnementales s'accompagnent de plus en plus d'approches et d'outils d'aide à la conception. Toutefois, ces savoir-faire techniques s'avèrent peu exploités dans les projets architecturaux. Partant de ce constat, notre recherche porte sur la qualité environnementale des matériaux et procédés de mise en œuvre. Elle vise à alimenter, par la mise au jour de savoirs et de méthodes innovantes, les pratiques opérationnelles en architecture.

La mise au jour d'outils d'aide à la conception simplifiée informant un public non spécialiste sur différents champs d'études explicites et relatifs à la qualité des matériaux, est une évolution importante dans le domaine de l'architecture.

Nous avançons différentes propositions innovantes pour l'intelligibilité et la cohérence de futurs outils d'aide à la conception. Nous les illustrons par la mise en place d'un prototype d'outil *MaTerre'iO* renseignant globalement les concepteurs en architecture sur les savoirs liés aux matériaux et plus spécifiquement sur les connaissances de l'ingénierie environnementale.

La principale retombée de notre travail de recherche est de contribuer à édifier une passerelle innovante entre les disciplines de l'ingénierie environnementale et les attentes de la conception en architecture.

Mots-clés : matériaux, ingénierie environnementale, outil d'aide à la conception, processus de conception architecturale.

ABSTRACT

How the knowledge coming from environmental engineering on materials is likely to help designers at the beginning of a draft?

Nowadays, environmental proceedings can use more and more methods and design tools to start with the conception. However, these technical methods turn out to be untapped into architectural projects. This question orientated our research towards environmental quality of materials and processes of implementation. Through the update of the knowledge and innovative methods, our work tends to increase the capacity of operational practice in architecture.

The implementation of a design assistance tool - easy to use for non experts and providing several clearly configuration fields, based on caseworks and linked to quality of materials - is a significant evolution in architectural communities.

We point up several innovative propositions for future design assistance tools. We illustrate it by the setting up of a prototype named *MaTerre'iO*. This mock up informs architectural designers about the knowledge upon materials, and more specifically on the environmental engineering knowledge.

The main repercussion of our researched work is to contribute to initiate an innovating interface between environmental engineering topics and expectations of architectural design.

Keywords: materials, environmental engineering, design tools, architectural design process.

TABLE des MATIERES

1. INTRODUCTION GENERALE.....	25
1.1. Les matériaux dans le domaine de l'architecture	25
1.1.1. La notion d'hyper choix	25
1.1.2. La qualité environnementale des matériaux.....	28
1.2. Positionnement du travail	30
1.2.1. Problématique de départ.....	30
1.2.2. Une réponse pour traiter les questions relatives au choix des matériaux et procédés de mise en œuvre : un outil d'aide à la conception.....	31
1.2.3. Organisation du mémoire	31
PARTIE 1 : « EXPLORER, ETUDIER, PROBLEMATISER » : état de l'art et problématique de recherche.....	33
Introduction de la partie 1	35
2. Savoirs et savoir-faire relatifs aux matériaux.....	37
2.1. Introduction	37
2.2. Etat des connaissances et savoirs sur les matériaux	37
2.2.1. Les matériaux à travers leurs aspects techniques.....	38
2.2.2. Les matériaux à travers leurs aspects environnementaux	39
2.2.3. Les matériaux à travers leur perception sensorielle et visuelle.....	40
2.2.4. Evolution des ouvrages sur les matériaux	41
2.3. Classement par thème des connaissances et savoir-faire : mise en place d'une grille d'analyse multicritères	42
2.3.1. La grille d'analyse multicritères : méthode et principes	43
2.3.2. La grille d'analyse multicritères : élaboration.....	47
2.3.3. La grille d'analyse multicritères : proposition	49
2.4. Création d'une base de données matériaux	50

2.4.1.	Recueil des données	51
2.4.2.	Organisation de la base de données.....	52
2.4.3.	Limites de la base de données mise en place	53
2.5.	Conclusion.....	54
3.	Le processus de projet.....	57
3.1.	Introduction	57
3.2.	Caractérisation du processus de projet	57
3.2.1.	Les différentes étapes du processus de projet	57
3.2.2.	Le processus de projet à travers la question des matériaux et procédés de mise en œuvre	58
3.2.3.	Etape décisive du processus de projet : phase de conception (esquisse)	60
3.3.	La conception et les processus qui l'accompagnent : synthèse	61
3.3.1.	L'intégration de deux types de données : objectives et subjectives	62
3.3.2.	L'approche cognitive du processus de conception : quelques notions.....	62
3.3.3.	Le processus de conception : synthèse et illustration.....	64
3.4.	Conclusion	66
4.	La transposition des savoirs : les outils d'aide à la conception.....	69
4.1.	Introduction	69
4.2.	Les outils proposés aux concepteurs en architecture : approche générale.....	69
4.2.1.	Deux grandes familles d'outils.....	70
4.2.2.	Les outils d'aide au projet architectural : qu'en est-il à ce jour ?	72
4.2.3.	Panorama des outils existants qui orientent le choix des matériaux et qui sont susceptibles d'aider les concepteurs en architecture	77
4.3.	La capacité des outils actuels à s'intégrer aux processus de conception.....	81
4.3.1.	Le niveau d'expertise exigé.....	81
4.3.2.	Le respect des phases propres au processus de conception.....	82
4.3.3.	Regard global nécessaire en architecture	82

4.4.	Etat des interfaces d'outils susceptibles d'aider à la conception architecturale	83
4.4.1.	Efficacité des interfaces au travers de l'intelligibilité et la cohérence des outils	83
4.4.2.	Analyse des 5 outils : résultats	86
4.4.3.	Conclusion et limites de cette étude	104
	Conclusion de la partie 1	107
	Problématique et postulats de départ : hypothèses de travail.....	111
	PARTIE 2 : « QUESTIONNER, RECOLTER, ANALYSER » : l'enquête.....	113
	Introduction de la partie 2	115
5.	Les méthodes d'enquêtes	117
5.1.	Introduction : positionnement de notre travail de recherche	117
5.2.	Les méthodes d'enquêtes : réflexion sur la stratégie du protocole d'enquête à mener « de l'entretien au questionnaire fermé »	117
5.2.1.	L'enquête par entretien.....	118
5.2.2.	L'enquête par questionnaire	119
5.2.3.	Conclusion.....	120
5.3.	L'enquête mise en place : méthode de travail à partir d'entretiens semi-directifs ..	121
5.3.1.	Thème de recherche et échantillon.....	121
5.3.2.	La grille d'entretien	122
5.3.3.	Déroulement d'un entretien : de la prise de contact à l'analyse des discours ..	124
5.4.	Conclusion	126
6.	Les trois postulats énoncés au regard des enquêtes menées.....	127
6.1.	Introduction	127
6.2.	Analyse des résultats de l'enquête auprès de concepteurs en architecture : Thématique n°1 - Intégration des matériaux dans le processus de conception architecturale et urbaine et critères pris en considération concernant les matériaux et procédés de mise en œuvre	127
6.2.1.	Intégration des questions relatives au choix des matériaux et procédés de mise en œuvre	127

6.2.2. Critères pris en considération dans les questions relatives au choix des matériaux et procédés de mise en œuvre.....	133
6.3. Thématique n°2 : Analyse des résultats de l'enquête auprès d'experts techniques- Rôle des outils d'aide à la conception dans le processus de conception architecturale	138
6.3.1. Pratique des outils d'aide à la conception	138
6.3.2. Relation entre le projet architectural et l'outil d'aide à la conception	140
6.4. Les trois postulats au regard des résultats obtenus	144
6.4.1. A quelle(s) phase(s) du processus de conception les connaissances et outils actuels sur les matériaux se destinent-ils ?.....	144
6.4.2. Quels champs d'études sur la qualité environnementale des matériaux sont, à ce jour, les plus opérationnels en situation de projet ?	145
6.4.3. Quels niveaux d'expertise nécessitent les connaissances et outils actuels ?....	145
6.5. Conclusion : les limites de notre enquête	146
Conclusion partie 2.....	149
PARTIE 3 : « PROPOSER, DEVELOPPER, AIDER » : <i>MaTerre'iO</i> , un outil d'aide à la conception prototype mis à l'épreuve	151
Introduction de la partie 3	153
7. Innovations proposées pour de futurs outils d'aide à la conception	155
7.1. Introduction	155
7.2. Les différentes innovations proposées.....	155
7.2.1. Evolution de la nature des conditions d'entrées demandées : des données d'entrées adaptées à la phase d'esquisse et en nombre limité (volumétrie, orientation, lieu (ville) dispositifs)	156
7.2.2. Aider à dégager une vision globale du projet : vue d'ensemble des critères étudiés tout en réduisant le nombre de finalités proposées dans l'outil.....	157
7.2.3. Faciliter la compréhension et l'apprentissage des non experts : résultats exprimés selon trois approches distinctes	158
7.2.4. Rassembler les données sur les impacts environnementaux des matériaux : base de données matériaux exhaustive et fiable.....	158
7.2.5. Proposer une interface simple, claire et lisible : jeu de couleurs, choix graphiques, typologie, choix des mots	159

7.3.	Conclusion	160
8.	Approfondissement des critères d'ingénierie environnementale : la pollution physique et l'empreinte énergétique.....	161
8.1.	Introduction	161
8.2.	Le critère "empreinte énergétique".....	162
8.2.1.	Indicateur "Consommations"	163
8.2.2.	Indicateur "Profil énergétique".....	164
8.3.	Le critère de "pollution physique"	164
8.3.1.	Indicateur "Impact Environnement".....	165
8.3.2.	Indicateur "Impact humain et Santé".....	168
8.3.3.	Indicateurs "Impact socio-économiques des déchets".....	169
8.4.	Conclusion	171
9.	<i>MaTerre'iO</i> un prototype d'outil d'aide à la conception	173
9.1.	Introduction	173
9.2.	Développement de l'interface graphique du prototype d'outil d'aide à la conception <i>MaTerre'iO</i>	173
9.2.1.	Développement de la maquette : Interface <i>MaTerre'iO</i>	173
9.2.2.	Intérêt d'accéder à <i>MaTerre'iO</i> depuis Internet.....	174
9.3.	Illustrations des innovations proposées par le prototype d'outil <i>MaTerre'iO</i>	175
9.3.1.	Innovation n°1 : Evolution de la nature des conditions d'entrées.....	175
9.3.2.	Innovation n°2 : Proposer une vision globale	176
9.3.3.	Innovation n°3 : Décomposition des connaissances : 3 degrés de compréhension 177	
9.3.4.	Innovation n°4 : Rassembler les diverses données sur les matériaux	180
9.3.5.	Innovation n°5 : Interface simple, claire et lisible	181
9.4.	Mise en place des bornes pour l'ensemble des indices étudiés dans <i>MaTerre'iO</i> ..	182
9.5.	Les différents calculs mis en place au sein du prototype d'outil d'aide à la conception <i>MaTerre'iO</i>	191

9.5.1.	Les pondérations relatives aux différents critères de notre grille d'analyse multicritères.....	191
9.5.2.	Calcul des indices.....	193
9.6.	Illustration à travers une étude de cas : la Maison Galopin (Maison Sériergues) – G.G.R architectes	197
9.6.1.	Maison Galopin : cas d'étude.....	198
9.6.2.	Les différentes variantes permettant une comparaison de solutions constructives à partir de <i>MaTerre'iO</i>	203
9.6.3.	Commentaires et analyses des comparaisons de variantes testées avec <i>MaTerre'iO</i>	218
9.7.	Conclusion.....	231
10.	Enquête n°2 Innovations proposées et illustrées par le prototype d'outil - <i>MaTerre'iO</i> mis à l'épreuve des concepteurs.....	233
10.1.	Introduction.....	233
10.2.	Protocole d'enquête	233
10.2.1.	L'enquête à partir d'un questionnaire.....	233
10.2.2.	Echantillon retenu et méthode requise.....	235
10.3.	Points de vue de 16 concepteurs en architecture	236
10.3.1.	Questions relatives au logiciel <i>MaTerre'iO</i>	236
10.3.2.	Questions relatives à l'interface du logiciel <i>MaTerre'iO</i>	237
10.3.3.	Questions relatives aux données d'entrées du logiciel <i>MaTerre'iO</i>	237
10.3.4.	Questions relatives aux résultats du logiciel <i>MaTerre'iO</i>	238
10.3.5.	Avis général concernant l'outil.....	238
10.4.	Conclusion	239
10.4.1.	Tendances recueillies en regard des différentes propositions	239
10.4.2.	Limites de l'enquête n°2.....	240
	Conclusion de la partie 3	241
11.	CONCLUSION GENERALE	243
11.1.	Résumé et conclusion	243

11.2.	Contribution de notre travail dans les domaines de l'ingénierie et de l'architecture	244
11.3.	Perspectives et prolongements envisagés	245
	BIBLIOGRAPHIE GENERALE	251
	ANNEXES	263
	Annexe 1 : Quelques propositions de grille mises en place tout au long de notre travail de recherche	263
	Annexe 2 : FDES Fiches de Déclaration Environnementale et Sanitaire : partie environnementale	271
	Annexe 3 : Définition des caractéristiques techniques prises en compte dans la base de données matériaux.....	273
	Annexe 4 : Définition des impacts environnementaux renseignés dans la base de données matériaux.....	275
	Annexe 5 : Présentation succincte des outils retenus dans le cadre de notre recherche	277
	Annexe 6 : Grille d'entretien détaillée de l'enquête n°1	279
	Annexe 7 : Grille d'entretien de l'enquête n°1	283
	Annexe 8 : Résultats de l'enquête n°1 sous forme de graphiques	289
	Annexe 9 : Analyse de l'entretien n° 108v1&211	297
	Annexe 10 : Questionnaire de l'enquête n°2.....	301
	Annexe 11 : Cas d'étude de l'enquête n°2	307
	Annexe 12 : Résultats de l'enquête n°2	317
	Annexe 12 : Résultats de l'enquête n°2	317

TABLE des ILLUSTRATIONS

Figure 1 : Matériaux présents depuis les civilisations anciennes.....	26
Figure 2 : Multitude de choix de matériaux depuis l'ère de l'industrialisation	27
Figure 3 : Les 5 pôles de contact et d'équilibre de l'habitat et de son environnement (Courgey et Oliva, 2006).....	29
Figure 4 : Champs d'études attenants à notre questionnement initial et notre thématique de recherche	35
Figure 5 : Extrait du livre <i>Mémento – Propriétés et caractéristiques des matériaux de construction</i> (Couasnet, 2005).....	38
Figure 6 : Choix multicritères des produits de construction (Bornarel, 2003).....	39
Figure 7 : Extrait du livre <i>L'architecture écologique du Vorarlberg, un modèle social, économique et culturel. Projet pilote du programme européen Cepheus, habitat intermédiaire avec le label Passivhaus à Wolfurt</i> (Gauzin-Müller, 2009)	40
Figure 8 : Extraits du livre <i>Eléments en architecture – matériaux</i> , Steven Hoil Architects, bureaux Sarphatistraat, Amsterdam, 2000, (Riera Ojeda et Pasnik, 2008).....	41
Figure 9 : Extraits du livre <i>Construire – Atlas des matériaux</i> (Hegger et al., 2009)	42
Figure 10 : Aide à la décision multicritères - recherche de la solution en 4 étapes	45
Figure 11 : Principe des approches : montante et descendante	46
Figure 12 : Illustration très synthétique des liaisons entre les différents niveaux s'articulant autour des approches descendante et montante.....	47
Figure 13 : Les différentes approches de notre grille d'analyse multicritères autour de trois degrés de compréhension	48
Figure 14 : Proposition grille d'analyse multicritères.....	55
Figure 15 : Processus de projet architectural et urbain (Fernandez P., 2007).....	58
Figure 16 : L'intégration des matériaux dans le processus de projet, d'après le schéma de Fernandez P. (2007).	59
Figure 17 : Schématisation du paradoxe de la construction (Adolphe, 1991)	61
Figure 18 : Le concepteur : boîte de verre et boîte noire (<i>Designer as a computer – Designer as a magician</i>) (Chupin, 2002)	62

Figure 19 : Le processus de conception : approche cartésienne d'après Bruce Archer en 1969 (Design variety restriction) (Chupin, 2002)	64
Figure 20 : Le processus de conception par Bruce Archer en 1969 (Chupin, 2002)	65
Figure 21 : Le processus de conception d'après John Zeisel en 1981 (Design development spiral) (Chupin, 2002)	66
Figure 22 : Phase d'intégration des outils d'aide à la conception dans le processus de conception architectural	71
Figure 23 : Phases d'intégration des outils d'aide à la décision dans le processus de conception architectural	72
Figure 24 : Les différents types d'approches des outils existants	74
Figure 25 : Classement non exhaustif d'outils en fonction du type d'outil, du type d'approche, de la phase d'utilisation, du type d'utilisateur visé.	75
Figure 26 : Relations outils et types d'approches techniques mises en place	77
Figure 27 : Proposition empirique de quelques critères pour l'évaluation de l'efficacité d'outils d'aide à la conception (Bonneaud et al., 2004).....	84
Figure 28 : Type d'approche de l'outil Elodie (version bêta test)	86
Figure 29 : Impressions écrans de l'outil Elodie version bêta test (manuel)	88
Figure 30 : Récapitulatif des atouts – faiblesses – potentialités – risques de l'outil ELODIE version bêta-test.....	89
Figure 31 : Type d'approche de l'outil COCON v7.0.3. sept.08	90
Figure 32 : Impressions écrans de l'outil CO ² CON versionV7.0.3 sept.08.....	92
Figure 33 : Récapitulatif des atouts – faiblesses – potentialités – risques de l'outil COCON version 7.0.3. sept.08.....	93
Figure 34 : Type d'approche de l'outil EQUER	94
Figure 35 : Impressions écrans de l'outil Equer (manuel)	95
Figure 36 : Récapitulatif des atouts – faiblesses – potentialités – risques de l'outil Equer	96
Figure 37 : Type d'approche de l'outil ECOTECT.....	97
Figure 38 : Impressions écrans de l'outil Ecotect (manuel, démonstration, aide)	99
Figure 39 : Récapitulatif des atouts – faiblesses – potentialités - risques de l'outil Ecotect .	100
Figure 40 : Type d'approche de l'outil DIAL-Europe	101

Figure 41 : Impressions écran de l’outil Dial-Europe	102
Figure 42 : Récapitulatif des atouts – faiblesses – potentialités – risques de l’outil DIAL-Europe	103
Figure 43 : Tableau récapitulatif des résultats pour chacun des critères analysés	104
Figure 44 : Principe de la grille d'entretien	123
Figure 45 : Relation entre les champs d’études de notre travail de recherche et les thématiques de l’enquête	126
Figure 46 : Intégration des questions relatives au choix des matériaux dans le processus de projet architectural, d’après le schéma de FERNANDEZ P. (2007)	132
Figure 47 : Intégration des questions relatives au choix des matériaux dans le processus architectural après enquête, d’après le schéma de FERNANDEZ (2007)	133
Figure 48 : Critères pris en compte concernant les questions relatives au choix des matériaux et procédés de mise en œuvre dans le processus de conception architectural et urbain, d’après le schéma de FERNANDEZ P. (2007).....	137
Figure 49 : Intégration des questions relatives au choix des matériaux et procédés de mise en œuvre tout au long du processus de projet, d’après le schéma de Fernandez (2007).	156
Figure 50 : Interface graphique : liaison entre l’utilisateur et l’outil	159
Figure 51 : Déclinaison des indicateurs et indices du critère d’empreinte énergétique.....	163
Figure 52 : Déclinaison des indicateurs et indices du critère de pollution physique	165
Figure 53 : Impression écran du prototype d’outil d’aide à la conception <i>MaTerre’iO</i> : les données d’entrée de l’outil	176
Figure 54 : Impression écran du prototype d’outil d’aide à la conception <i>MaTerre’iO</i> : approche globale	177
Figure 55 : Impression écran du prototype d’outil d’aide à la conception <i>MaTerre’iO</i> : approche détaillée – second degré.....	178
Figure 56 : Impression écran du prototype d’outil d’aide à la conception <i>MaTerre’iO</i> : approche experte – troisième degré.....	179
Figure 57 : Système de notation des approches globale et détaillée : tendance exprimée entre 0 et 8.....	180
Figure 58 : Système de notation de l’approche experte : résultats chiffrés.....	180
Figure 59 : Légende des choix iconographiques dans le prototype d’outil <i>MaTerre’iO</i>	182

Figure 60 : Proposition de bornes à partir de la base de données	183
Figure 61 : Proposition de bornes pour l'indice "épuisement des ressources"	184
Figure 62 : Classification proposée par le CSTB selon l'aptitude à favoriser ou non les croissances fongique et bactérienne (Déoux et Déoux, 2004)	185
Figure 63 : Proposition de bornes pour l'indice "humidité et microorganismes"	186
Figure 64 : Classification proposée par le CSTB selon les émissions de COV et aldéhydes (Déoux et Déoux, 2004).....	187
Figure 65 : Proposition de bornes pour l'indice "émissions de COV".....	187
Figure 66 : Corrélation de l'index I (indice de concentration d'activité) et du niveau de dose (Déoux et Déoux, 2004).....	188
Figure 67 : Classification proposée par le CSTB selon les émissions radioactives (Déoux et Déoux, 2004).....	189
Figure 68 : Proposition de bornes pour l'indice "émissions radioactives".....	189
Figure 69 : Classification des cancérogènes (Déoux et Déoux, 2004).....	190
Figure 70 : Proposition de bornes pour l'indice "risque cancer"	190
Figure 71 : Proposition de bornes pour l'indice "risque cancer"	191
Figure 72 : Proposition de pondérations pour les indicateurs et indices des critères pollution physique et empreinte énergétique.....	192
Figure 73 : Exemple de calcul de tendance pour 2 dispositifs de la variante 1	195
Figure 74 : Exemple des radars obtenus dans l'outil <i>MaTerre'iO</i> (résultat pour un ensemble de dispositif).....	196
Figure 75 : Exemple de calcul pour les tendances présentées dans l'approche détaillée et globale.	197
Figure 76 : Photographie de la maison Galopin (G.G.R architectes).....	198
Figure 77 : Plan de la maison Galopin (Gauzin-Müller, 2006).....	199
Figure 78 : Présentation des différents dispositifs mis en place dans la Maison Galopin	200
Figure 79 : Comparatif du critère de pollution physique pour les différentes variantes testées dans <i>MaTerre'iO</i>	218
Figure 80 : Comparatif du critère d'empreinte énergétique pour les différentes variantes testées dans <i>MaTerre'iO</i>	219

Figure 81 : Comparatif des indicateurs du critère de pollution physique (approche détaillée)	221
Figure 82 : Comparatif des indicateurs du critère d’empreinte énergétique (approche détaillée)	222
Figure 83 : Comparaison des 8 variantes indice par indice.....	223
Figure 84 : Résultats de chaque variante indice par indice	225
Figure 85 : Classement des différentes variantes	225
Figure 86 : Comparaison des variantes 1, 2 et 8 (différence : épaisseur de l’isolant).....	227
Figure 87 : Approche globale - comparaison des variantes : 1, 1 isolation renforcée, 2, 2 isolation renforcée, 8 et 8 isolant renforcée	228
Figure 88 : Approche détaillée - comparaison des variantes 1, 1 isolation renforcée, 2, 2 isolation renforcée, 8 et 8 isolant renforcée	230
Figure 89 : Echelle de valeur proposée pour les questions d’opinions (extrait du questionnaire)	235

1. INTRODUCTION GENERALE

1.1. Les matériaux dans le domaine de l'architecture

Dans le domaine de l'architecture, les matériaux jouent un rôle décisif concernant l'apparence et l'expressivité d'une construction. Ils sont le lien, l'intermédiaire entre l'homme et le bâtiment. Ils illustrent et explicitent la forme. Ils renseignent sur la construction et sa structure. Ils éveillent chez l'homme des sensations, des émotions qui sont perçues par nos sens : vue, toucher, ouïe et odorat. Les matériaux sont un langage, un moyen d'expression pour le concepteur. Le choix des matériaux détermine de manière décisive la représentation et la perception que nous avons des bâtiments.

Actuellement, nous avons à notre disposition d'innombrables matériaux. Cette multitude de matières s'accroît avec les recherches technologiques et l'approche environnementale qui relance l'engouement pour des matériaux parfois oubliés comme la paille (Grubert et Grubert, 2003), la terre (Houben et Guillaud, 2006),...

1.1.1. La notion d'hyper choix¹

Dans les civilisations anciennes, la pratique de la construction s'articulait autour de trois « structures rudimentaires » (Weston, 2003) :

- les cavernes existantes dans l'environnement naturel. Elles pouvaient être creusées dans de la terre ou taillées dans de la pierre,
- les huttes. Ces constructions étaient la plupart du temps réalisées en bois trouvé sur le site de construction,
- les tentes. Ces structures étaient en bois recouvertes de peaux de bêtes.

Peu de matériaux étaient disponibles pour l'Homme. Les quatre principaux étaient le bois, la terre, la pierre et les métaux (cf. figure 1). Ils ne subissaient aucun traitement particulier. Ils étaient utilisés dans leur état naturel. Les savoir-faire se transmettaient de

¹ « Durant plusieurs millénaires, le nombre des matériaux est demeuré très restreint. Ceux servant à la construction étaient rares, donc d'autant mieux connus et maîtrisés. Le savoir-faire lié à la mise en œuvre s'est accumulé et transmis de génération en génération. Cet ensemble de connaissances, constitué au fil du temps et bien maîtrisé, a éclaté depuis le début de l'industrialisation. Nous disposons aujourd'hui d'innombrables matériaux » (Hegger et al., 2006)

génération en génération. Malgré des moyens rudimentaires, ces constructions pouvaient atteindre des dimensions spectaculaires (pyramides en Egypte, Muraille de Chine, aqueducs).



Figure 1 : Matériaux présents depuis les civilisations anciennes

L'ère de l'industrialisation a amené une modification et une évolution des moyens de production. Elle offre de nouveaux matériaux dans des dimensions et des quantités importantes. Cette industrialisation de la production permet d'utiliser et de donner de nouvelles fonctions à certains matériaux (pour exemple, les structures métalliques étaient économiquement très difficiles à réaliser avant l'ère de l'industrialisation).

Les savoir-faire et la mise en œuvre évoluent parallèlement à l'élargissement du panel de choix des matériaux en architecture. Cette introduction de nouveaux matériaux a permis de faire progresser les modes de construction traditionnelle et d'accroître la palette de matière disponible (cf. figure 2).



Figure 2 : Multitude de choix de matériaux depuis l'ère de l'industrialisation

Le XXIème siècle propose une variété significative de matériaux au concepteur en architecture. Nous avons à notre disposition des matériaux nouveaux (nanomatériaux, nouvelles technologies,...), des matériaux traditionnels (bois, terre,...) réappropriés à travers une évolution dans leur mise en œuvre (Guillaud, 2007), des matériaux industriels (verre, acier,...). Viennent s'y mêler les matériaux écologiques ou environnementaux dont la prise en compte ces dernières années est importante : paille, chaux, chanvre,... (Evrard).

Le concepteur en architecture doit faire des choix entre une multitude de matériaux. Cette situation d'hyperchoix est la conséquence (Kula et al., 2009) :

- d'une production industrielle entraînant une fragmentation conceptuelle (multitude de solutions et de procédés de mise en œuvre),
- d'un souhait d'atteindre certaines performances et innovations de plus en plus grandes (matériaux performants tout en étant respectueux de l'environnement et de l'Homme),
- de la recherche scientifique qui diminue le laps de temps entre la découverte de matériaux et son utilisation.

Ces choix peuvent s'avérer difficiles. Le principal risque est de se cantonner à une écriture architecturale unique et à l'utilisation de quelques matériaux toujours identiques. Pourtant,

il n'existe pas un matériau unique idéal. La réponse la plus optimale concernant la matière du bâtiment considéré va dépendre du projet, du site, des diverses contraintes, des différents acteurs participants,...

1.1.2. La qualité environnementale des matériaux

L'approche environnementale est une approche globale de la construction. Elle considère le bâtiment comme un être vivant situé dans un environnement qui interagit avec lui. Le principe de cette démarche est de trouver le juste équilibre entre ces trois composantes : habitat, habitant et environnement.

Comme l'illustrent Samuel Courgey et Jean-Pierre Oliva (2006) les habitants (homme) sont situés au centre de leur habitat (cercle) qui interagit avec l'environnement par le biais de 5 pôles. Ces pôles sont les suivants :

- le lieu : site sur lequel s'implante le projet architectural et urbain,
- la forme architecturale : écriture et parti conceptuel mis en place,
- les matériaux : le langage d'écriture architecturale. Ils matérialisent le projet,
- la mise en œuvre : rend le projet réaliste. Ce pôle s'intéresse aux aspects constructifs,
- les fluides et énergies dont le projet architectural et urbain a besoin pour sa construction ainsi que son fonctionnement.

Chacun des pôles impacte et interagit avec les 4 autres. Ils interfèrent également avec l'environnement et les habitants. Le tout va dans le sens d'une recherche d'équilibre et de respect de l'Homme et de la nature (cf. figure 3).

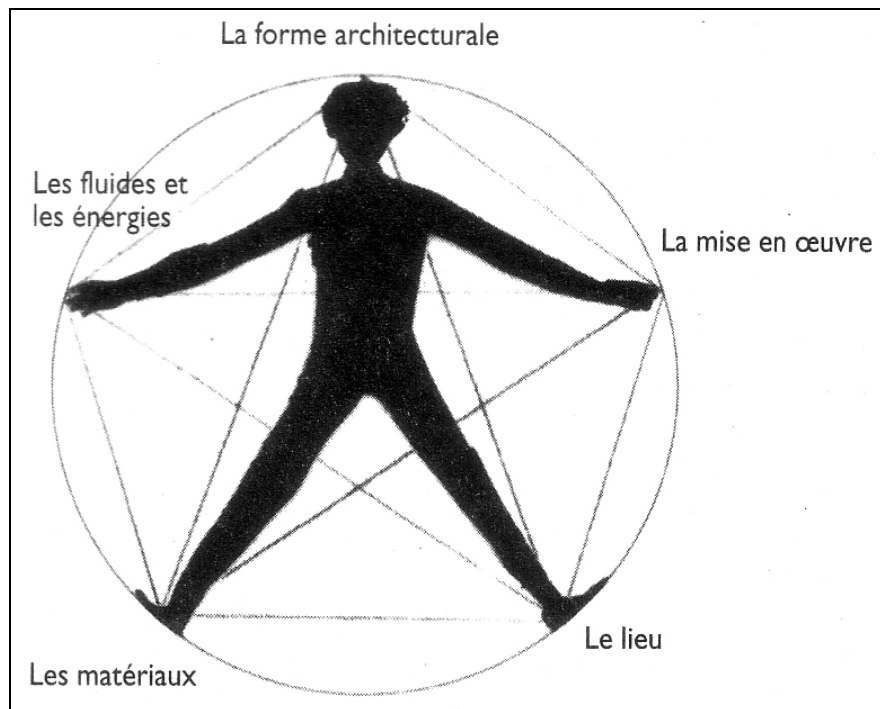


Figure 3 : Les 5 pôles de contact et d'équilibre de l'habitat et de son environnement (Courgey et Oliva, 2006)

Si nous nous plaçons dans le pôle matériaux (thématique de notre recherche), nous remarquons qu'ils jouent un rôle important dans le domaine de l'architecture étant donné qu'ils sont ce que l'on voit immédiatement d'un projet.

La liaison entre le pôle matériaux et le pôle relatif au lieu peut se faire à travers la connaissance des conditions climatiques (du macroclimat au micro climat), de la végétation présente, des caractéristiques propres au site, ... qui vont influencer vers tels types de matériaux et à l'inverse en exclure d'autres.

La relation avec la forme architecturale va essentiellement se faire à travers l'écriture souhaitée et les multiples fonctionnalités attendues du bâtiment.

Le lien entre matériaux et mise en œuvre est le plus évident car les choix faits concernant les matériaux retenus pour le projet vont induire tel ou tel type de mise en œuvre et de structure, et inversement.

Concernant le pôle des fluides et énergies, le choix des matériaux peut influencer l'apport d'énergies pour le rafraîchissement et le chauffage (exemple). Nous pensons notamment au confort thermique que peut apporter une isolation correcte ou bien encore une forte inertie.

1.2. Positionnement du travail

Les matériaux dans le domaine de l'architecture ont une place importante et influencent un grand nombre de points au sein d'un projet architectural et urbain. Les concepteurs en architecture sont soucieux de l'ensemble des caractéristiques relatives aux matériaux retenus pour leur projet. Ceci s'accroît avec l'approche environnementale qui questionne et par conséquent, augmente le nombre de critères à prendre en compte pour faire un choix conscient et réfléchi.

Notre réflexion porte sur le développement d'un outil afin d'aider, principalement les concepteurs en architecture mais également les personnes non expertes et les ingénieurs, à choisir les matériaux et procédés de mise en œuvre pour leur projet architectural et urbain.

La passerelle entre le concepteur en architecture et l'ingénieur se fait essentiellement à travers la dimension technique de la construction. Depuis longtemps, les concepteurs en architecture (maîtres d'œuvres, maîtres d'ouvrages, entreprises, ...) intègrent l'ingénierie pour garantir un ouvrage de qualité. Dans la période actuelle, ces pratiques arrivent souvent dans des phases avancées du processus de conception (après la finalisation de la phase d'avant-projet). Cela entraîne des difficultés pour revenir sur les choix initiaux sans endommager le parti conceptuel mis en place.

Aujourd'hui, nous remarquons qu'une coopération commence à s'établir dans les phases amont du processus de conception notamment à travers l'approche environnementale et le développement d'outils d'aide à la conception.

1.2.1. Problématique de départ

La problématique générale de notre travail est la suivante :

Comment des savoirs issus de l'ingénierie environnementale sur les matériaux sont-ils susceptibles d'aider les concepteurs en architecture dans le démarrage de l'esquisse ?

Les connaissances d'ingénierie et plus particulièrement d'ingénierie environnementale sont complexes. Elles appartiennent à un champ disciplinaire connexe à l'architecture. Les types de raisonnement, le niveau de connaissances entre ingénierie et architecture diffèrent ; leurs pratiques professionnelles également. Il est donc essentiel d'établir des liaisons intelligentes entre ces deux disciplines interdépendantes.

Le principal intérêt de notre recherche est de dégager différentes propositions permettant la transposition en connaissances simplifiées (dans le domaine de l'architecture) de

savoirs complexes (du domaine de l'ingénierie) dans le but d'aider les concepteurs en architecture à choisir les matériaux et procédés de mise en œuvre dans leur projet architectural.

1.2.2. Une réponse pour traiter les questions relatives au choix des matériaux et procédés de mise en œuvre : un outil d'aide à la conception

Pour cela, nous proposons la mise en place d'outils d'aide à la conception. Les objectifs de ce type d'outil reposent sur trois principales notions complémentaires et interdépendantes :

- le recueil et le classement des différentes connaissances et savoirs relatifs au choix des matériaux,
- la compréhension et l'analyse des pratiques des concepteurs en architecture lorsqu'ils traitent les questions relatives au choix des matériaux,
- la retranscription et la restitution de manière simple et compréhensible de données parfois complexes à prendre en compte.

L'intérêt d'un tel outil est d'établir un lien entre les différents acteurs du bâtiment en apportant des savoirs sous la forme d'aide simple et ponctuelle. Son interface doit s'adapter aux logiques et vocabulaires de ses futurs utilisateurs en répondant aux attentes et besoins de ces professionnels.

1.2.3. Organisation du mémoire

Dans une première partie "*Explorer, étudier, problématiser*", nous exposons l'état de l'art découlant de notre problématique. Nous l'organisons autour des trois champs thématiques sous-jacents étudiés. Nous présentons l'état des savoirs et savoir-faire relatifs aux matériaux et proposons un classement de ces connaissances. Nous analysons le processus de projet et plus particulièrement le processus de conception afin de cerner les pratiques des concepteurs en architecture. Nous ciblons ensuite notre travail sur l'étude de la transposition des savoirs à travers l'analyse d'interfaces d'outils d'aide à la conception.

Dans une seconde partie "*Questionner, récolter, analyser*", nous présentons une enquête que nous avons mise en place dans notre travail. Cette enquête a deux objectifs distincts :

- comprendre les pratiques et cerner les besoins des concepteurs en architecture concernant l'intégration des questions relatives au choix des matériaux dans le processus de projet,
- identifier et comprendre le rôle des outils d'aide au projet dans le processus de conception.

L'intérêt de cette enquête est de valider ou invalider nos hypothèses de travail. Ces dernières découlent de l'état de l'art et des différents travaux d'études présentés dans la partie 1 de notre manuscrit.

Dans une troisième partie "*Proposer, développer, aider*", nous répondons à notre problématique de recherche. Nous proposons différentes innovations et leurs intérêts en lien avec les besoins et attentes des concepteurs. Nous approfondissons les critères d'ingénierie environnementale. Nous exposons un prototype d'outil d'aide à la conception mis en place *MaTerre'iO*. Notons tout de suite, que ce prototype a pour vocation d'illustrer nos propositions mais ne porte pas sur le développement d'un outil informatique opérationnel. L'objet de notre recherche ne nous permet pas ce travail de développeur. Nous présentons dans un dernier chapitre les résultats d'une seconde enquête. Son but est de cerner l'adhésion ou non des concepteurs en architecture confrontés au prototype d'outil, et d'apprécier leurs avis concernant les innovations proposées.

Nous concluons notre manuscrit en présentant les limites de notre travail de recherche. Nous proposons également des ouvertures et perspectives pour la suite de nos travaux.

PARTIE 1 : « EXPLORER, ETUDIER, PROBLEMATISER » : état de l'art et problématique de recherche

« Le matériau reste [...] un élément essentiel de l'architecture et de l'aménagement. Avec le temps, il est devenu, en plus, un outil de liberté et de création »

Christian GAUDIN, Citation.

Résumé :

Nous présentons l'état de l'art mis en place pour notre recherche autour des trois champs d'études attenants à notre thématique générale. Cette partie vise à définir les limites de notre étude. Nous concluons en précisant la problématique de recherche de nos travaux ainsi que nos hypothèses de travail.

Introduction de la partie 1

La mise en place d'un état de l'art sur la thématique des matériaux dans le domaine de l'architecture et la démarche environnementale, nous a permis d'entrevoir un champ d'étude particulièrement large et transversal d'un point de vue disciplinaire. Il est question à la fois de phénomènes physiques et chimiques, d'effets sensibles perçus par les habitants, de paramètres économiques notamment au niveau des ressources en matières, de logique de mise en œuvre, de processus de conception architecturale, de jeux d'acteurs, de méthodes et d'outils de travail,... . Il serait illusoire de vouloir réunir l'ensemble des connaissances sur les matériaux relatives à autant de disciplines. Toutefois, le croisement de connaissances issues de disciplines complémentaires a pour intérêt pragmatique de tendre vers une application opérationnelle de notre recherche dans le domaine de l'architecture et de l'urbanisme.

Dans la perspective d'approfondir notre thématique générale et de cerner des hypothèses concernant notre questionnement de départ, nous avons peu à peu distingué trois champs d'études inhérents à notre travail (cf. figure 4).

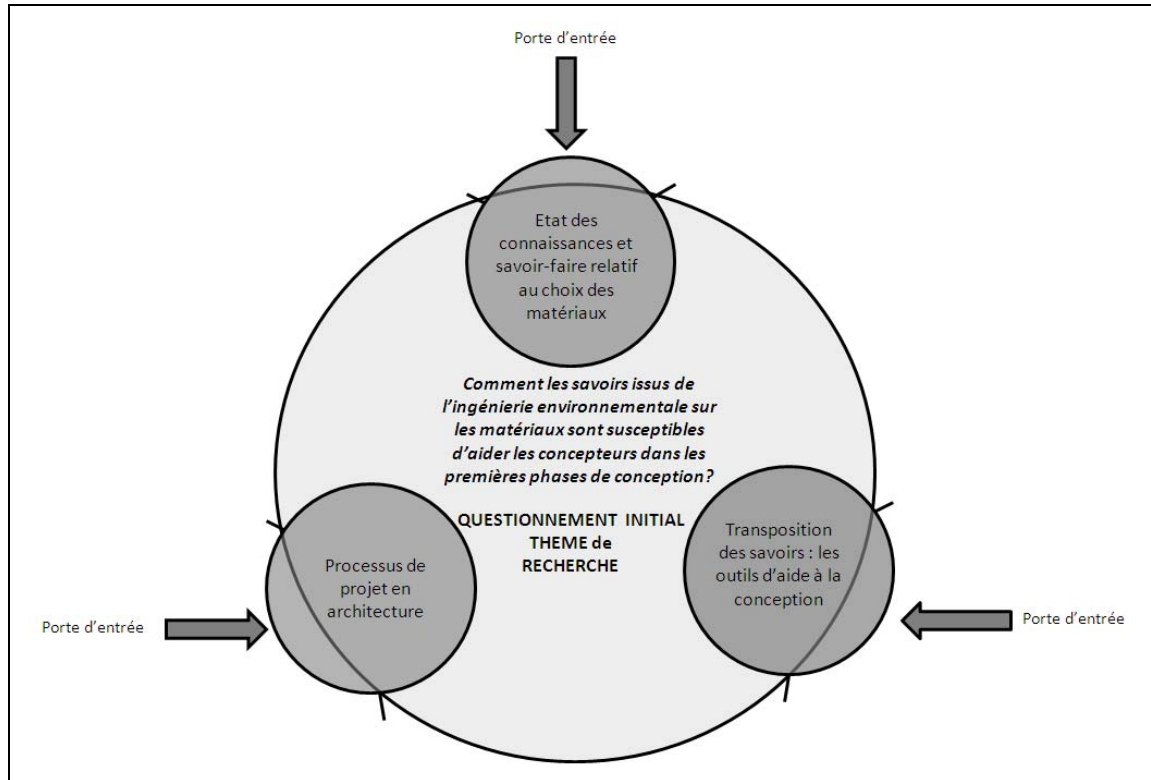


Figure 4 : Champs d'études attenants à notre questionnement initial et notre thématique de recherche

Ces trois champs :

- l'état des connaissances et savoir-faire existants concernant les matériaux en architecture,
- la caractérisation du processus de projet,
- la transposition des savoirs et savoir-faire : les outils d'aide à la conception,

sont complémentaires et cernent le contexte et les limites de notre travail.

Le chapitre 2 porte sur l'état des connaissances et savoir-faire relatifs aux matériaux en architecture. Nous nous intéressons dans ce chapitre à l'ensemble des caractéristiques prises en compte lorsqu'il est question de matériaux et procédés de mise en œuvre en architecture. Nous proposons un classement de ces connaissances et savoirs. Nous exposons notre travail de recueil de données sur les matériaux en présentant la base de données mise en place au sein du LRA Laboratoire de Recherche en Architecture par l'un de ses chercheurs Luc Floissac.

Le chapitre 3 décrit succinctement le processus de projet en architecture. Nous ciblons notre étude sur le processus de conception afin d'identifier des méthodes et raisonnement auxquels recourent les concepteurs. Ce chapitre a pour intérêt de comprendre les différents modes de pensées utilisées par les concepteurs afin de proposer des outils en adéquation avec leurs besoins.

Dans le chapitre 4, nous discutons des outils d'aide à la conception existants. Nous ciblons notre analyse sur les outils renseignant sur l'impact des matériaux et étant susceptibles d'intéresser les concepteurs dans leurs projets. Nous proposons une analyse pour l'évaluation d'interfaces graphiques d'outils d'aide au projet.

Enfin, nous concluons cette partie en explicitant notre problématique de recherche et en détaillant nos hypothèses de travail.

2. Savoirs et savoir-faire relatifs aux matériaux

2.1. Introduction

Les matériaux font partie intégrante de l'architecture. Ils participent à sa construction, à son image, à ses ambiances, à son confort,... . Il est par conséquent nécessaire de penser la matière dans sa globalité : à travers l'esthétique, l'acoustique, la thermique, les divers aspects constructifs, la réglementation, le coût, l'usage,

Jusqu'à peu de temps, les matériaux ont été approchés sous des angles et des domaines bien spécifiques. Nous distinguons l'existence de nombreux ouvrages qui s'intéressent à un matériau spécifique (Asensio, 2005), (Guillaud, 2006). La plupart de ces ouvrages déclinent les possibilités techniques et esthétiques (perception sensible) offertes par ce matériau. Au contraire, d'autres s'intéressent plus particulièrement à un domaine précis tel que la technicité des matériaux. Ils déclinent pour chaque famille de matériaux leurs différentes caractéristiques (Bathias et Bailon, 1980), (Couasnet, 2005), (Déoux et Déoux, 2004). D'autres ont vu le jour avec l'émergence des démarches environnementales dans les années 1990. Ils abordent de manière globale les différents aspects traités lorsqu'il est question d'écologie et de préservation de nos ressources (Gauzin-Müller, 2001), (Wines, 2000), (Oliva et al., 2002). Enfin, la plupart de ces écrits sont illustrés par des "projets références" ou "précédents" (Tornay, 2010) qui illustrent la mise en œuvre, l'image, les ambiances pouvant être obtenues.

2.2. Etat des connaissances et savoirs sur les matériaux

Nous classons les connaissances et savoirs relatifs aux matériaux autour de 3 types d'ouvrages :

- des ouvrages techniques,
- des ouvrages abordant les questions environnementales des matériaux,
- des ouvrages abordant la perception sensible des matériaux.

L'analyse de ces ouvrages nous a permis de cerner une large palette de données et d'approfondir une grande diversité et une multitude de matériaux.

2.2.1. Les matériaux à travers leurs aspects techniques

Les ouvrages techniques sont compréhensibles par des personnes qualifiées dans le domaine considéré. Ils développent l'aspect technique des matériaux. Ils déclinent pour la plupart, les caractéristiques physiques, chimiques, de mise en œuvre..., de la matière considérée (cf. figure 5). Nous pouvons citer sans exhaustivité : la durabilité, la densité, la diffusivité, l'effusivité, la conductivité thermique, la capacité thermique, le coefficient de résistance à la vapeur d'eau, la résistance à l'écrasement, l'affaiblissement acoustique,...

Dans la même lignée, nous voyons apparaître des ouvrages traitant un point précis des matériaux tel que l'impact sur la santé des personnes (Déoux et Déoux, 2004). Ce type d'ouvrage se concentre sur un sujet précis et l'approfondit de manière détaillée. Pour autant, ces ouvrages ne se limitent pas à une famille de matériaux mais englobent dans la mesure du possible, un large panel de matériaux.

La principale limite de ces ouvrages est qu'ils n'intègrent peu ou pas la dimension architecturale des matériaux. Ils se restreignent aux caractéristiques techniques de la matière. La plupart de ces écrits sont organisés autour de définition des critères et de données chiffrées. Ils visent donc plus particulièrement un cercle restreint de personnes composé majoritairement d'experts et de techniciens.

TERRES ET SOLS										
Physiques										
Conductivité thermique (1)	Chaleur spécifique					Masse volumique	Pouvoir calorifique			
	Terrain sablonneux	Terre battue	Terre humide	Terre sèche	Tourbe			ρ (kg/m ³)	P (MJ/kg)	
λ (W/m.°C)	C (kcal/°C.kg)									
1,05	0,28	0,45	0,45	0,2	0,43	1 800	0			
Poids volumique ρ (kg.m⁻³)										
Terre humide	Sable sec	Terre argileuse	Argile	Tourbe	Terre végétale sèche (2)	Terre battue				
2 100	1 700	2 000	1 600 à 2 200	1 300 à 1 700	1 800	1 700				
Mécaniques										
Module de Poisson		Module d'élasticité des sols drainés					Capacité massique			
ν (ad)		E' (MPa)					C (J/kg.°K)			
Sols saturés	Autres cas	Argile	Sable	Grave compacte	Roche tendre	Argiles et limons	Sables et graviers			
0,5	0,3	2 à 30	10 à 100	150 à 500	500 à 10 000	1 670 à 2 500	910 à 1 180			
Teneur en eau										
Teneur en eau volumique des sols				Teneur en eau massique des sols						
U _v (% de m ³ d'eau/m ³ de matériau)				U _m (% de kg d'eau/kg de matériau)						
Sol sableux	Sol silteux	Sol argileux	Sable	Limon	Argile moyenne à raide	Argile molle	Vase et tourbe			
35 à 50	40 à 60	30 à 65	2 à 15	10 à 30	20 à 50	50 à 100	80 à 300			
Autres propriétés										
Vitesse du son (3)					Résistance électrique (terre saturée en eau)					
v (m/s)					R (Ω)					
1 500 à 1 700					96 000					
Angle de frottement interne (4) φ (°)										
Terre normale	Terre sèche	Terre humide	Remblais non compactés	Remblais légèrement compactés	Remblais compactés					
40°	40°	20°	20°	25°	30°					
Coefficient de perméabilité des sols k (m/s)										
Graviers moyens à gros	Petits graviers, sable	Sable très fin, sable limoneux, lass	Limons compacts, argile silteuse	Argile franche						
10 ³ à 10 ¹	10 ³ à 10 ⁵	10 ⁵ à 10 ⁷	10 ⁷ à 10 ⁹	10 ⁹ à 10 ¹²						
Coefficient de réaction du sol K										
Nature des sols		kg/cm ²	MPa/m							
Limon, argile raide		K < 2	K < 20							
Sable moyen Limon traité à la chaux		2 < K < 6	20 < K < 60							
Sable dense Graves compactés Limon chaux + ciment		6 < K < 20	60 < K < 200							
Graves Ciment		10 < K < 30	100 < K < 300							

Figure 5 : Extrait du livre Mémento – Propriétés et caractéristiques des matériaux de construction (Couasnet, 2005)

2.2.2. Les matériaux à travers leurs aspects environnementaux

La démarche environnementale fait apparaître de nouveaux critères par rapport aux approches technique et architecturale ordinaires.

Alain Bornarel (2003) les synthétise sous la forme d'un tableau récapitulatif (cf. figure 6) :

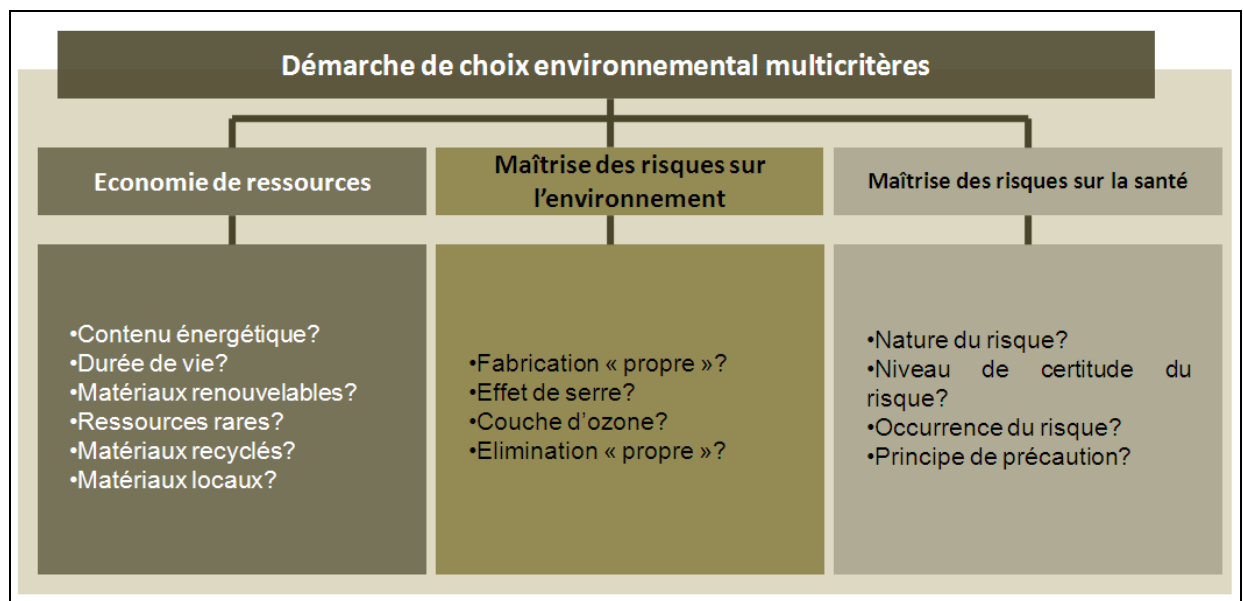


Figure 6 : Choix multicritères des produits de construction (Bornarel, 2003)

Les ouvrages traitant des matériaux à travers l'approche environnementale (Gauzin-Müller, 2001), (Legrand et Chêne, 2003), (Wines, 2000) abordent généralement cette question de manière large sans approfondir précisément les différents aspects. Ils cernent globalement les critères environnementaux entrant en compte lors du choix des matériaux mais les détaillent rarement (cf. figure 7). Nous pouvons citer, sans exhaustivité la prise en compte de l'empreinte énergétique, la consommation de ressources, la pollution, les déchets, etc. Par conséquent, ces ouvrages sont une aide mais ne suffisent pas pour approfondir la compréhension des différents critères et phénomènes.

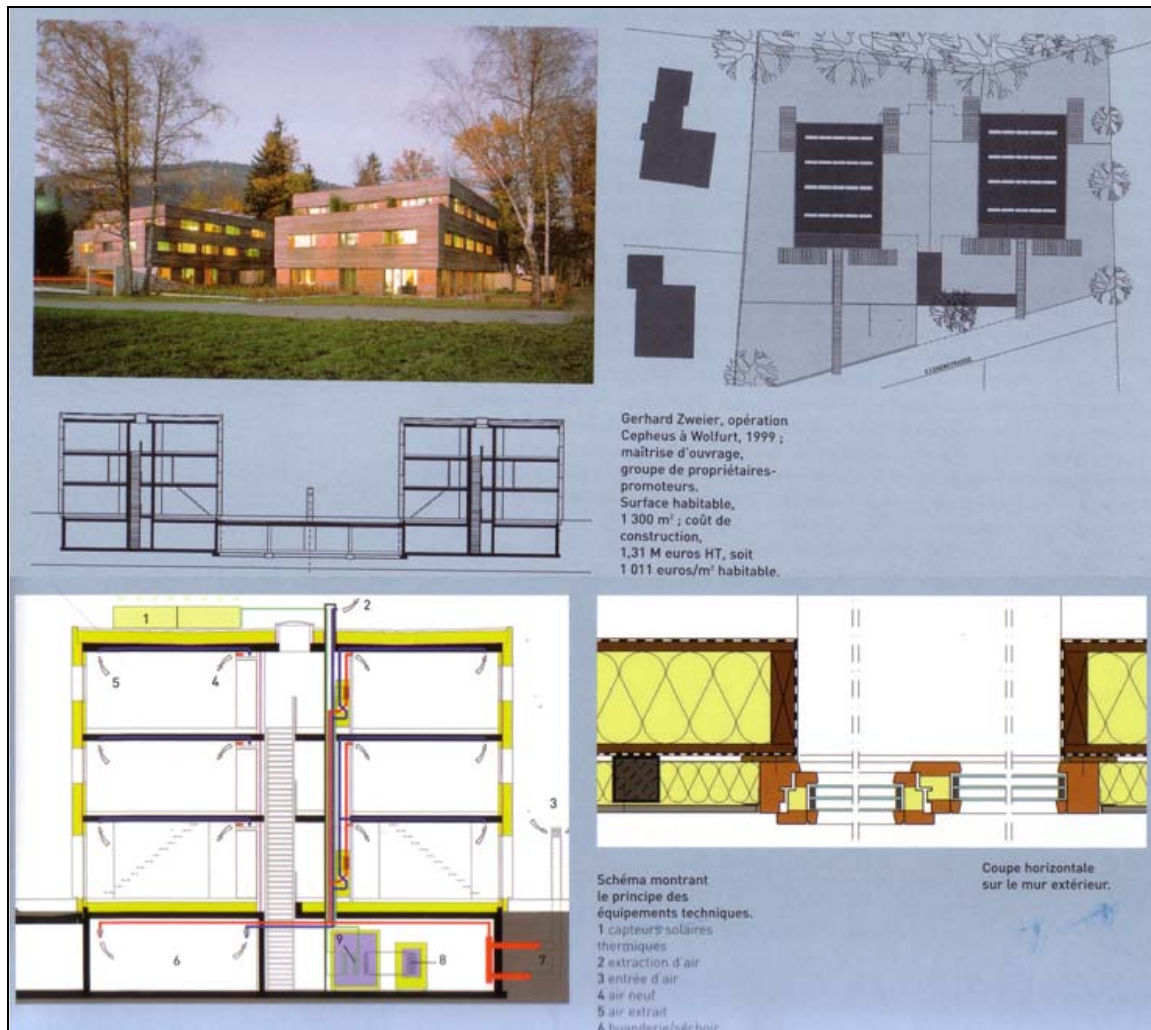


Figure 7 : Extrait du livre *L'architecture écologique du Vorarlberg, un modèle social, économique et culturel*. Projet pilote du programme européen Cepheus, habitat intermédiaire avec le label Passivhaus à Wolfurt (Gauzin-Müller, 2009)

2.2.3. Les matériaux à travers leur perception sensorielle et visuelle

Les ouvrages traitant de la perception sensorielle et visuelle des matériaux visent généralement un public de concepteurs / architectes. Ils ont pour réel intérêt d'illustrer la mise en œuvre des différents matériaux à partir de projets existants pris en références (cf. figure 8). Ils proposent des images, des plans, des détails constructifs, des concepts, des innovations, des expressivités ainsi que des textes relatant les différentes caractéristiques du projet et des matériaux utilisés. Certains de ces ouvrages ont pour principal objectif de relever les matériaux les plus utilisés dans le domaine de l'architecture à une époque donnée.

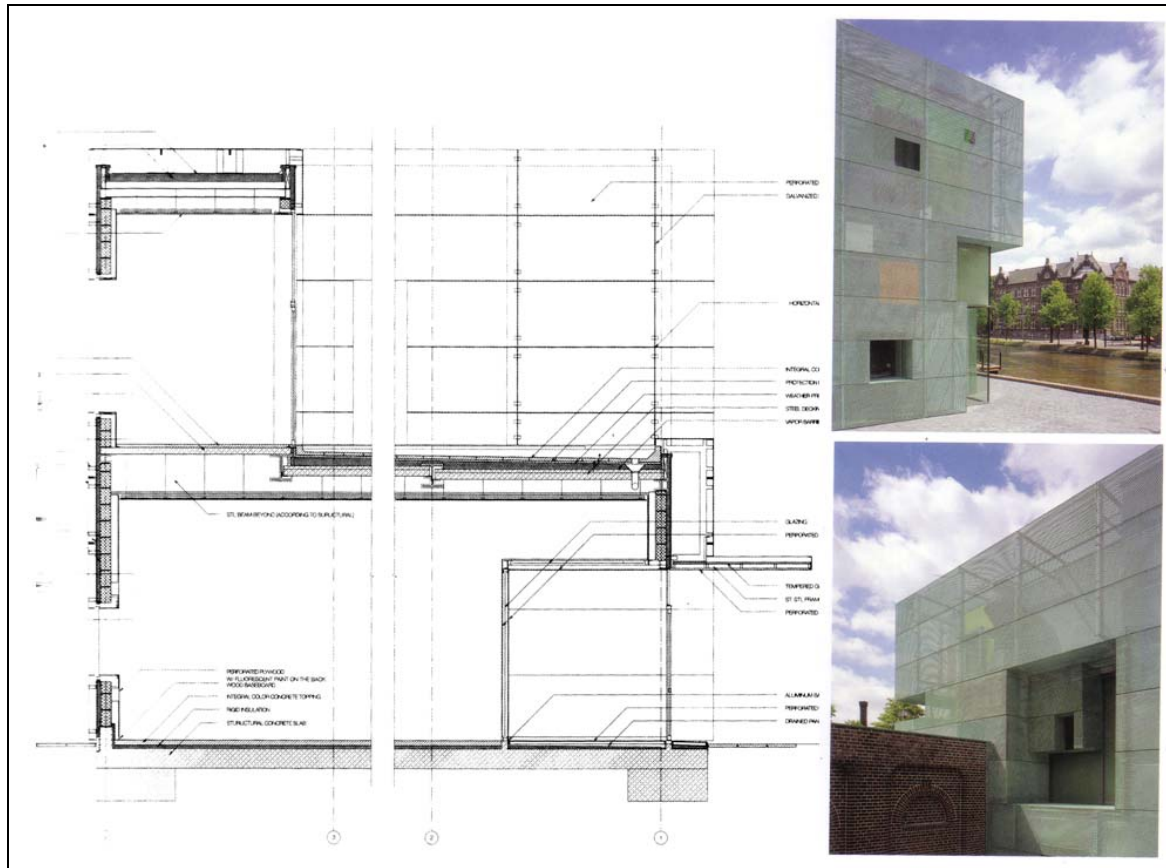


Figure 8 : Extraits du livre *Eléments en architecture – matériaux*, Steven Hoil Architects, bureaux Sarphatistraat, Amsterdam, 2000, (Riera Ojeda et Paskin, 2008)

2.2.4. Evolution des ouvrages sur les matériaux

Des écrits récents (Hegger et al., 2009), (Kula et al., 2009) tentent de relier l'ensemble des données existantes dans les différents ouvrages traitant de la matière. Leur but est de proposer une vision globale des matériaux en regroupant les caractéristiques techniques, environnementales, sensibles,... . Bien que peu nombreux à ce jour, ces ouvrages regroupent de manière globale et exhaustive la majorité des caractéristiques des matériaux. Ils sont intéressants du point de vue des concepteurs. Tout en proposant des réflexions générales sur les processus de fabrication, de mise en œuvre..., ils présentent parallèlement des caractéristiques et des données plus techniques et précises (cf. figure 9). Cela leur confère une double lecture possible en fonction des caractéristiques recherchées. Le tout est abondamment illustré par des "projets références".

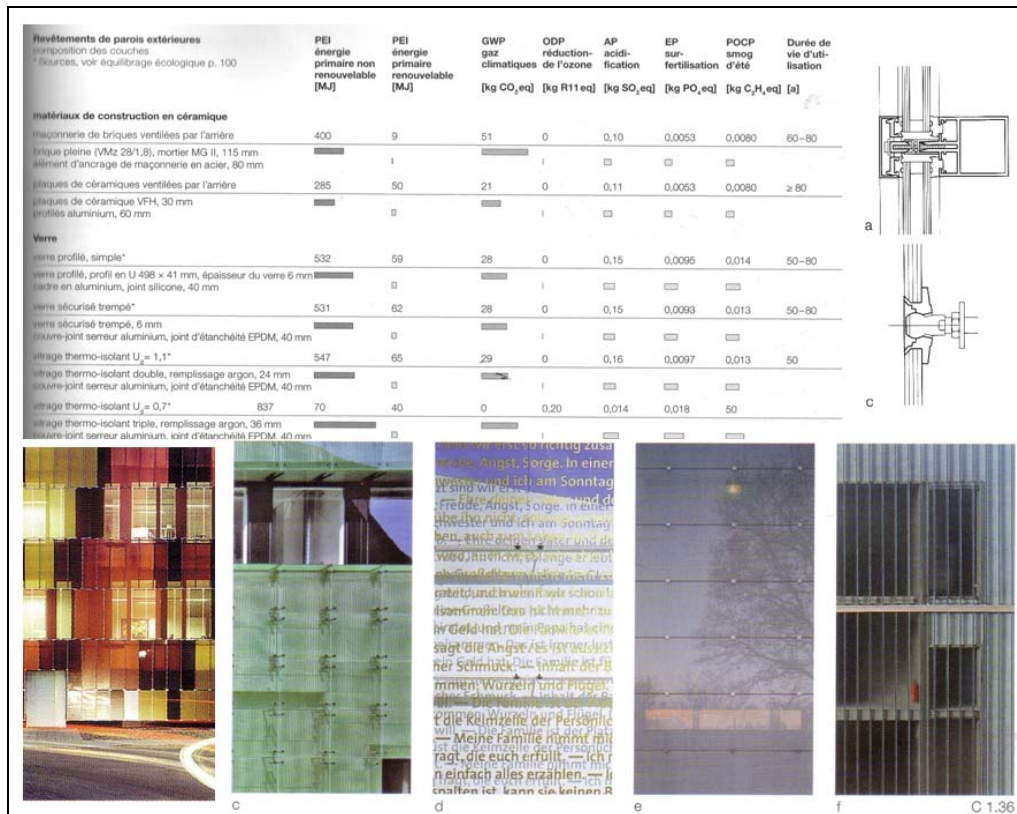


Figure 9 : Extraits du livre *Construire – Atlas des matériaux* (Hegger et al., 2009)

2.3. Classement par thème des connaissances et savoir-faire : mise en place d'une grille d'analyse multicritères

L'énumération et le recueil des différentes connaissances et savoirs propres aux matériaux découlent de l'état de l'art que nous avons progressivement mis en place. Les connaissances et savoir-faire identifiés ont été classés par thème afin d'organiser l'ensemble de ces critères. La méthode de travail mise en place pour ce classement est la suivante :

- identifier les fondements des différents champs thématiques et les distinguer des savoir-faire,
- classer les phases de conception attenantes à chaque savoir-faire reconnu,
- classer les connaissances et savoir-faire par rapport aux champs d'études concernés,
- identifier les niveaux d'expertises nécessaires pour les assimiler et s'en servir au niveau du projet.

Ce classement nous a permis d'identifier un ensemble des critères pris en compte dans le projet architectural. Ce travail vise deux objectifs :

- cerner de manière large les problématiques relatives au choix des matériaux et procédés de mise en œuvre,
- établir un classement compréhensible par des non-experts.

Cette étude a abouti à différentes propositions de grille de classement. Il a été complexe de choisir une grille et plusieurs essais ont été réalisés. La principale difficulté s'est située au niveau des redondances et interdépendances entre critères. L'annexe 1 : "*Quelques propositions de grilles mises en place tout au long de notre travail de recherche*" restitue le caractère laborieux et itératif de notre travail de classement.

L'agencement retenu s'exprime sous la forme d'une structure hiérarchique afin d'organiser les connaissances expertes et les connaissances simplifiées qui en découlent. Cette structure est le résultat de :

- l'intégration des méthodes d'analyse multicritères dans notre travail
- de diverses discussions au sein du laboratoire afin d'organiser ce classement.

2.3.1. La grille d'analyse multicritères : méthode et principes

Nous recherchions une méthode qui sache tenir compte de plusieurs critères sans les réduire à un seul. Pour cela, nous nous sommes intéressés aux méthodes multicritères (Rutman et al., 2005).

L'objectif du multicritères n'est pas de dissoudre (décomposer un objet par la séparation de ses parties) mais de chercher une solution acceptable et réaliste en tenant compte de l'environnement dans lequel nous nous situons. Dans ce contexte, les critères d'appréciation sont multiples (ceci exclut donc l'attitude de résoudre et de dissoudre).

Qu'est-ce que l'aide à la décision multicritères

L'analyse multicritères est fondée sur 4 considérations qui sont importantes dans le cadre de notre travail (Schärli, 1999) :

- plusieurs critères sont pris en considération,
- ces critères sont en général conflictuels,
- elle tente à réaliser des arbitrages et/ou compromis et non pas à atteindre un optimum,
- ces arbitrages et/ou compromis donnent aux critères différentes valeurs afin d'atteindre une solution réaliste et acceptable (équilibre).

Il est donc nécessaire, dans l'aide à la décision multicritères, de :

- prendre en compte un ensemble de critères parfois antagoniques,
- les classer en leur donnant des valeurs en fonction du projet, du site, de tout un ensemble de contraintes propres au projet et au concepteur,
- chercher la solution qui semble la plus harmonieuse pour atteindre une "sorte" d'équilibre qui réponde aux objectifs du projet.

A partir de cette méthode reconnue, la recherche de la solution se fait en 4 étapes (cf. figure 10) :

- Etape 1 : dresser la liste des solutions possibles ou envisageables appelées actions potentielles. Cette liste doit être aussi complète que possible.
- Etape 2 : dresser la liste des critères à prendre en considération appelées familles. Cette liste doit être aussi exhaustive que possible.
- Etape 3 : juger chacune des solutions aux yeux de chacun des critères afin de mettre en place la matrice de jugement.
- Etape 4 : agréger ces jugements pour désigner la solution qui a globalement les meilleures évaluations. Cette étape est délicate car il n'y a pas de méthode générale mais un grand nombre de méthodes non absolues (agrégation complète, partielle et locale).

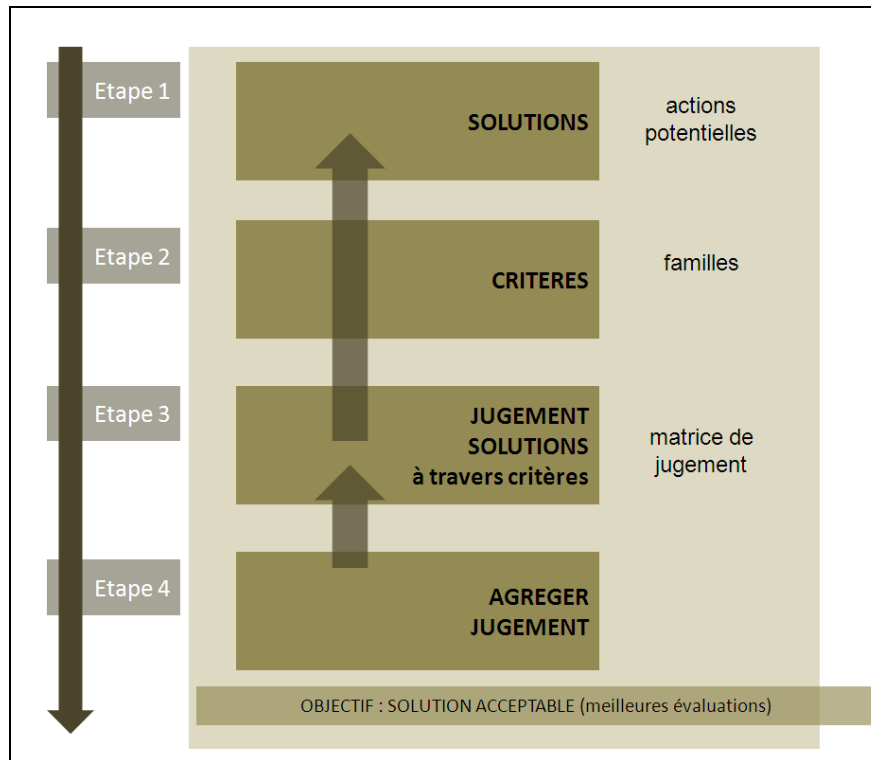


Figure 10 : Aide à la décision multicritères - recherche de la solution en 4 étapes

Ces 4 étapes peuvent exprimer le travail réalisé par un concepteur en phase de conception de projet architectural.

Notre travail visant un classement des connaissances et savoirs des matériaux en vue de proposer un outil d'aide à la conception, nous avons ciblé l'étape 2 de l'aide multicritères. Cette étape est une action difficile à mettre en place étant données la complexité et l'exhaustivité du domaine traité.

Deux approches sont possibles afin de définir un *ensemble fini des critères* (Vincke, 1992) :

- l'approche du haut vers le bas : construction d'une structure hiérarchique ayant à son premier niveau un objectif global éclaté en sous-objectif, eux-mêmes éclatés en sous-sous-objectifs, jusqu'à atteindre un niveau mesurable qualifié d'attribut. Cet ensemble d'attributs doit posséder certaines propriétés telles que l'exhaustivité, la non redondance, la cohérence, l'indépendance, la lisibilité, l'opérationnalité (Roy, 1985),

- l'approche du bas vers le haut : construction d'une structure dans laquelle il est nécessaire d'identifier en premier lieu toutes les conséquences puis remonter vers l'objectif global (cf. figure 11).

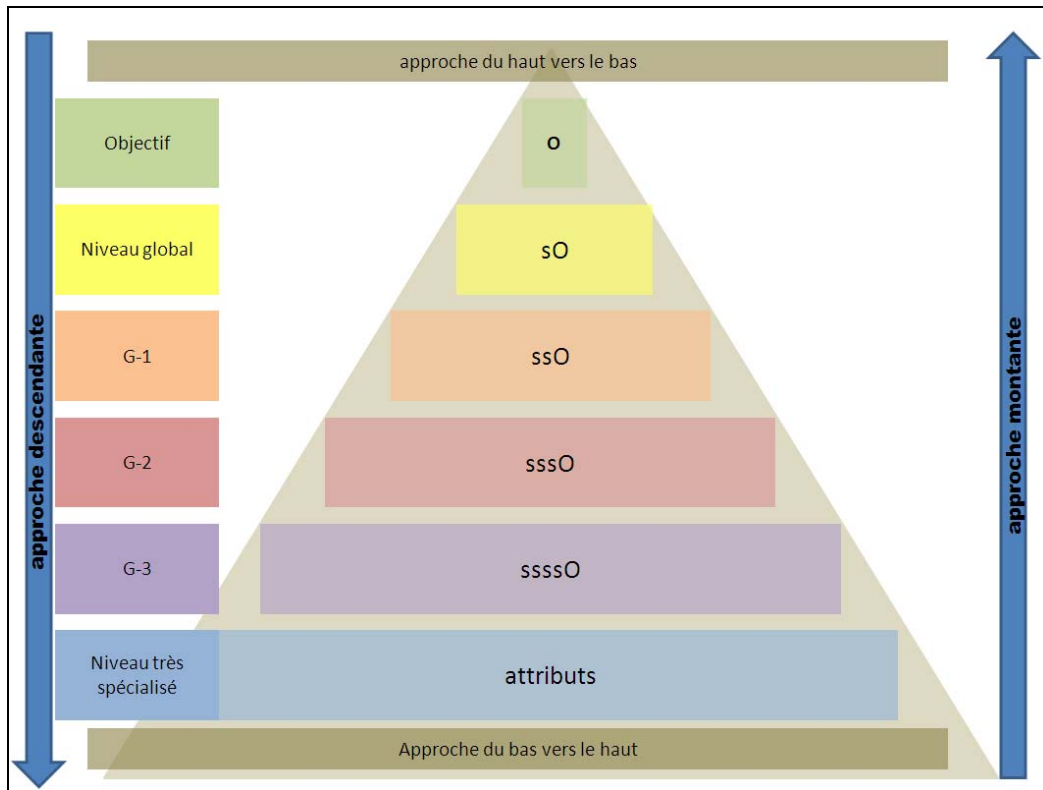


Figure 11 : Principe des approches : montante et descendante

Proposition de grille d'analyse multicritères : ingénierie environnementale des matériaux

Dans le but d'aboutir à une proposition de grille cohérente, non redondante, lisible et pertinente, nous avons travaillé à partir de ces deux types d'approches. Nous avons émis une première proposition découlant de l'état de l'art mis en place. Cette grille initiale a été mise en place à partir d'une approche dite du haut vers le bas. Elle s'articule autour d'une branche dont la base (objectif) est : "les matériaux et procédés de mise en œuvre". Les inconvénients de cette proposition se situent principalement dans la redondance et le manque d'exhaustivité des critères retenus. Nous avons, par la suite, retravaillé notre grille à partir d'une approche dite du bas vers le haut. Cette proposition s'articule autour de plusieurs branches : les 3 piliers du développement durable. La difficulté rencontrée se situe autour des dépendances et redondances entre les différents critères pris en compte. Pour pallier à ces inconvénients, nous avons fait, à nouveau, le chemin inverse (approche du haut vers le bas) avec pour objectif de proposer une vision globale composée de critères indépendants et peu nombreux (cf. figure 12).

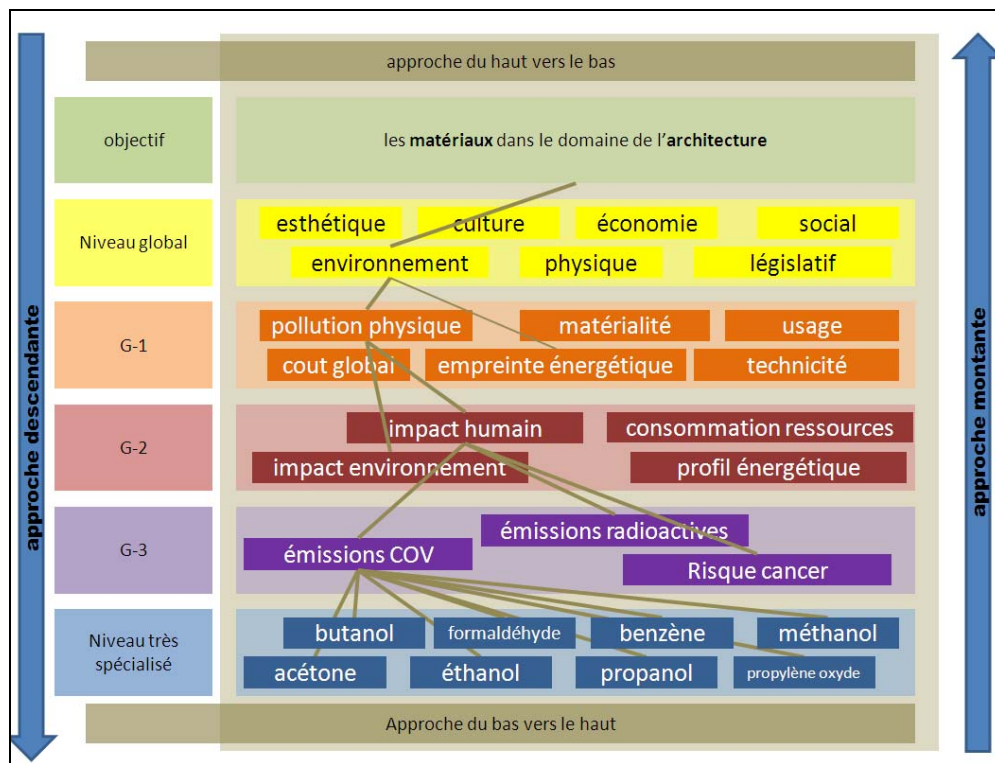


Figure 12 : Illustration très synthétique des liaisons entre les différents niveaux s'articulant autour des approches descendante et montante

L'établissement de l'ensemble fini des critères nous a amenés à porter une réflexion sur :

- l'agrégation des indicateurs,
- le traitement des indicateurs liés à plusieurs branches,
- la réduction de redondances entre indicateurs.

Au final, nous proposons une grille d'analyse multicritères basée sur une branche. Elle est composée de trois degrés de compréhension en lien avec le degré de connaissances des personnes : non initiées aux questions environnementales, sensibilisées et expertes.

2.3.2. La grille d'analyse multicritères : élaboration

Notre proposition de grille d'analyse multicritères (arborescence de critères sur les matériaux) est donc caractérisée par :

- la volonté de proposer une structure autour de trois degrés de compétences (cf. figure 13) :
 - ✓ une vision globale et simple pour des personnes non initiées. Sur la base de l'analyse multicritères, l'information doit être simplifiée afin de pouvoir être aisément comprise et croisée avec les autres problématiques de conception. Le vocabulaire employé doit être simple et intelligible par tous,
 - ✓ une vision plus détaillée sur les différents critères retenus pour les personnes sensibilisées à ces diverses questions. Le critère global cité dans le premier degré de la grille d'analyse multicritères est décliné en différentes sous-problématiques : indicateurs, compréhensibles pour des personnes ayant des notions sur les problématiques en question,
 - ✓ une vision experte pour les spécialistes du domaine. Ce degré d'appréciation nécessite que les personnes aient une compréhension fine des phénomènes physiques, des effets sensibles, du coût global, des questions socio-économiques,... . Cette catégorie de la structure hiérarchique (indices) est un balayage synthétique des différentes dimensions physiques, techniques, environnementales et sensibles des matériaux qui permettent de caractériser les indicateurs déclinés précédemment.

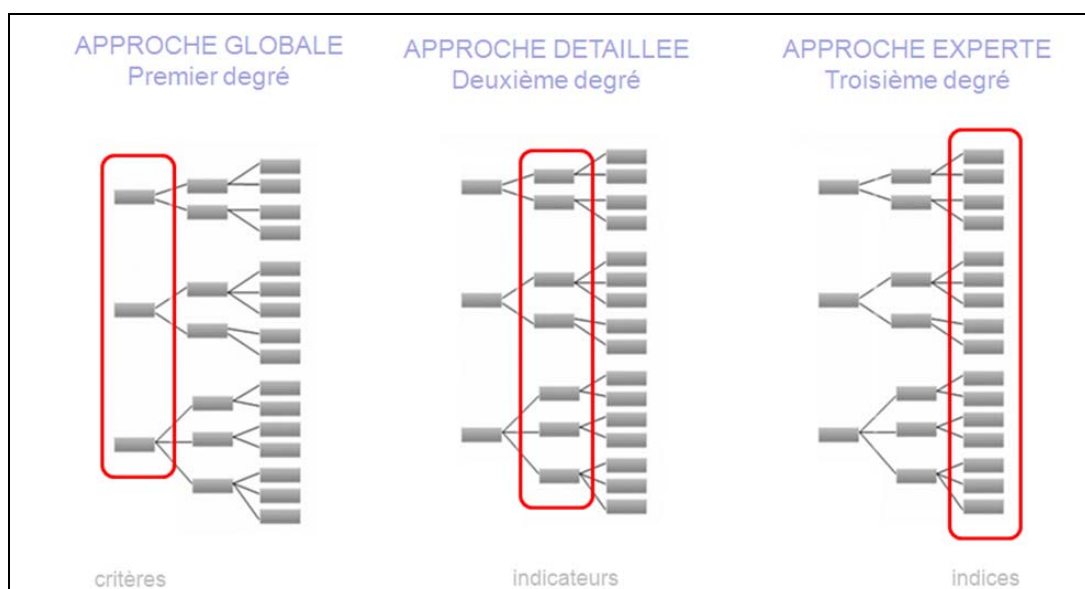


Figure 13 : Les différentes approches de notre grille d'analyse multicritères autour de trois degrés de compréhension

- la volonté de ne pas réduire la question des matériaux en architecture à un critère primordial mais bien de montrer que les choix ne sont que compromis et arbitrages en fonction du projet, du site, des contraintes, des choix des concepteurs,.....,
- la volonté d'être la plus exhaustive possible concernant l'approche environnementale des matériaux en architecture et urbanisme.

2.3.3. La grille d'analyse multicritères : proposition

L'approche globale de notre grille est composée de 7 critères que nous définissons de la manière suivante :

- la pollution physique : nous nous intéressons à « *l'introduction de substances dans l'environnement, à un point que ses effets deviennent nuisibles à la santé humaine, à celles d'autres organismes vivants, à l'environnement et / ou au climat* »². Nous prenons en compte l'impact sur l'environnement (eau, air, sol, biodiversité), sur l'Homme (Composés Organiques Volatiles, moisissures, fibres) ainsi que sur la gestion socio-économique des déchets (Déoux et Déoux, 1993).
- l'empreinte énergétique : nous considérons que l'empreinte énergétique est l'impact laissé sur l'ensemble des ressources. Ce critère prend en compte l'impact au niveau de la consommation des diverses ressources, ainsi que la consommation des différentes énergies (Peuportier, 2003).
- la technicité : nous nous intéressons au caractère technique du matériau en rapport avec sa mise en œuvre ou son emploi. Nous prenons donc en considération les qualités techniques du système constructif à travers sa facilité de mise en œuvre, sa durabilité, sa stabilité, ...
- l'usage : nous nous intéressons à travers ce critère aux aspects d'habitabilité et d'adaptabilité des matériaux. Nous prenons donc en compte la potentialité des dispositifs à se modifier au gré des besoins des usages et de leurs activités ainsi que le confort thermique à travers la compacité du bâtiment, son implantation / orientation, son hygrométrie,...

² Support de cours de V. Micholey « *Pollution physique, chimique, organique et biologique* » (pdf).

- la matérialité : nous considérons l'aspect visuel et perceptible des matériaux considérés. Nous prenons en compte à la fois l'aspect esthétique, culturel, sensible ainsi que les ambiances liées aux matériaux et dispositifs architecturaux (Tornay, 2010).
- le coût global : nous considérons le coût global selon l'équation suivante : coût global = coût initial + coûts différés. Nous mettons en balance des choix d'investissement en regard des économies qu'ils peuvent générer. Nous prenons en compte les différents coûts de production, extraction, transformation, distribution, mise en œuvre, entretien et maintenance, déconstruction, élimination, énergie de fonctionnement (Cordier, à paraître).
- la réglementation et les normes : ce critère s'intéresse à l'ensemble des mesures légales, règlements, règles, lois auxquelles un concepteur doit se conformer. Nous prenons en compte les différentes normes et réglementations en vigueur concernant les matériaux : toxicité, sécurité incendie, personnes à mobilité réduite, réglementation thermique, acoustique,...

Le choix de ces 7 critères a été défini dans le but de proposer un classement de l'ensemble des connaissances relatives aux matériaux. Cet agencement a pour objectif d'avoir une vision la plus globale possible, tout en proposant un nombre réduit de finalités. Il est le résultat de nos recherches et discussions auprès des chercheurs de notre entourage. Ces choix peuvent être critiqués et articulés différemment. C'est pourquoi, cette proposition sera confrontée aux avis des personnes expertes et des concepteurs en architecture interviewés dans le cadre de l'enquête n°1.

2.4. Création d'une base de données matériaux

Parallèlement à ce travail, nous avons participé à l'enrichissement d'une base de données. Cette réalisation, initiée par Luc Floissac chercheur au LRA de l'ENSA de Toulouse, a pour intérêt :

- de centraliser et classer un maximum de données concernant les caractéristiques des différents matériaux,
- de pouvoir participer à l'élaboration de futurs outils d'aide à la conception renseignant les concepteurs sur l'impact de leurs choix concernant les matériaux et procédés de mise en œuvre.

Nous avons souhaité rassembler un grand nombre d'informations relatives aux caractéristiques physiques, environnementales, économiques..., des matériaux et

dispositifs (mise en œuvre, assemblage de plusieurs matériaux). Cette base de données est régulièrement complétée au gré des parutions et publications.

2.4.1. Recueil des données

Le recueil des données renseignant cette base s'est fait à partir de plusieurs sources dont les principales sont les suivantes :

- les avis techniques des produits : ce sont les documents attestant de l'expertise (qui se doit d'être neutre et impartiale) sur l'emploi d'un produit ou d'un système destiné à la construction. Ils certifient des performances techniques et réglementaires du produit ou système. Ils tiennent compte des exigences réglementaires françaises, des « *objectifs de performances et de durabilité résultant de l'application des règles de l'art dans le domaine des techniques traditionnelles correspondantes lorsqu'elles existent* »³. Les avis techniques informent donc les différents acteurs de la construction sur diverses données telles que la définition du produit, le domaine d'emploi accepté, sa description qui comprend entre autres certaines caractéristiques physiques, des résultats expérimentaux.... Ils sont donc conçus pour répondre aux contraintes et caractéristiques du marché français de la construction.
- les Fiches de Déclaration Environnementale et Sanitaire FDES : elles informent sur les caractéristiques environnementales et sanitaires d'un produit sur l'ensemble du cycle de vie. Elles sont réalisées selon dix impacts environnementaux : consommations de ressources énergétiques, épuisement des ressources, consommation d'eau, déchets solides, changement climatique, acidification atmosphérique, pollution de l'air et de l'eau, destruction de la couche d'ozone et formation d'ozone photochimique. (cf. Annexe 2 : "*FDES Fiches de Déclaration Environnementale et Sanitaire : partie environnementale*").
- l'Association Française des Organismes de CERTification des produits de construction AFOCERT Asso. qui est, entre autres, une instance représentative et de concertation des organismes de certification des produits de construction en France. Elle encourage et valorise la certification des produits de construction. Le marquage CE est

³ <http://aqcen.cstb.fr/les-produits-et-services-de-construction/avis-techniques-et-agrement-technique-europeen-pour-les-produits-innovants.html>

réglementaire et traduit la conformité d'un produit aux exigences des directives communautaires.

- le programme Wärme Und Feuchte Instationär WUFI développé par IBP Fraunhofer Institut Bauphysik. Cet outil réalise des calculs de transfert transitoire de chaleur et de masse dans les composants de construction à plusieurs couches soumises à des conditions climatiques naturelles. Nous nous sommes intéressés à la base de données qui l'alimente pour compléter les parties manquantes de notre base.

2.4.2. Organisation de la base de données

La base de données a été créée à partir d'un tableur Excel et s'articule de la manière suivante :

- verticalement les matériaux ainsi que le nom de leurs fabricants sont renseignés. Ils sont classés par famille selon le matériau utilisé ou la fonction qu'ils occupent dans le bâtiment (bardage, étanchéité, isolants minéraux naturels, isolants minéraux et dérivés pétroliers...),
- horizontalement leurs caractéristiques physiques, environnementales, économiques... sont déclinées de manière précise. Les caractéristiques physiques prises en compte sont les suivantes (cf. Annexe 3 : "*Définition des caractéristiques techniques prises en compte dans la base de données matériaux*") :
 - ✓ densité
 - ✓ conductivité thermique λ en W/m.K
 - ✓ chaleur spécifique ou chaleur massique c
 - ✓ capacité thermique S en Wh/m³.K
 - ✓ diffusivité thermique $\lambda/\rho.c$
 - ✓ effusivité thermique $(\lambda.\rho.c)^{1/2}$
 - ✓ coefficient de résistance à la diffusion de vapeur d'eau μ
 - ✓ absorption de l'eau en g/m²
 - ✓ porosité
 - ✓ affaiblissement acoustique R en dB

- ✓ résistance à l'écrasement en Mpa
- ✓ vieillissement

Les caractéristiques environnementales ont été reprises des FDES. Elles sont composées des impacts environnementaux mis en avant par la norme NF P 01 010. Les impacts retenus sont les suivants (cf. Annexe 4 : "*Définition des impacts environnementaux renseignés dans la base de données matériaux* ") :

- ✓ les consommations des ressources énergétiques
- ✓ l'épuisement des ressources
- ✓ les consommations d'eau
- ✓ les déchets solides
- ✓ le changement climatique
- ✓ l'acidification atmosphérique
- ✓ la pollution de l'air
- ✓ la pollution de l'eau
- ✓ la destruction de la couche d'ozone
- ✓ la formation d'ozone photochimique

2.4.3. Limites de la base de données mise en place

Les limites de l'établissement de cette base de données se situent aux niveaux des domaines abordés. Afin d'être exhaustif et en adéquation avec les pratiques des concepteurs, il serait nécessaire de proposer des images du matériau présenté ainsi que de projets références (domaine des références, du visuel).

Les données économiques sont actuellement difficiles d'accès et sont soumises à des fluctuations dues au site de production, à la fabrication, à la mise en œuvre,...

Enfin, les données recueillies dans les FDES sont à étudier avec précautions. Ces fiches sont auto-déclaratives et facultatives. Nous remarquons que certaines FDES sont régulièrement supprimées de la base Inies. Elles concernent souvent des fiches dans lesquelles nous relevons des anomalies (exemple : l'indice énergies totales primaires). Les

erreurs sont toujours dans un sens favorable au produit considéré. Autre limite, le nombre de FDES est actuellement peu conséquent en regard de la multitude des produits de construction sur le marché. Il est donc difficile de comparer divers matériaux.

Actuellement, la base de données compte environ 370 matériaux ou dispositifs recensés et constitue un recueil de données conséquent.

2.5. Conclusion

Dans le domaine de l'architecture, les matériaux sont abordés sous l'angle de champs pluridisciplinaires. Cette multitude de champs d'études complexifie la question. Par conséquent, il peut être délicat pour les concepteurs de considérer la question des matériaux à partir d'une vision globale. Ce fait est accentué par l'intégration des préoccupations environnementales dans le processus de conception.

Pourtant, il est indispensable d'avoir une vue d'ensemble afin d'effectuer des choix judicieux dans le projet architectural et urbain.

Nous avons cherché, à travers l'établissement de notre grille d'analyse multicritères, à être le plus exhaustif possible. Le principal objectif est d'apporter une vision globale de la qualité environnementale des matériaux. Ce travail, issu du croisement entre les diverses connaissances et savoirs recueillis dans notre état de l'art, nous a permis d'appréhender la question des matériaux de manière précise et détaillée. A ce stade de notre travail, nous proposons la grille d'analyse multicritères suivante (cf. figure 14).

Nous indiquons uniquement les deux premiers degrés : approche globale et approche détaillée. Nous n'énumérons pas l'ensemble des indices (approche experte) car il est illusoire de prétendre maîtriser l'ensemble des domaines et disciplines abordées dans cette grille. Nous risquerions d'omettre certains indices ou de ne pouvoir expliciter de manière précise le choix et la définition de chacun d'eux.

APPROCHE GLOBALE premier degré : critères	APPROCHE DETAILLEE Second degré : indicateurs
POLLUTION PHYSIQUE	IMPACTS ENVIRONNEMENT
	IMPACTS HUMAIN
	IMPACTS socio-éco DECHETS
EMPREINTE ENERGETIQUE	CONSOMMATIONS
	PROFIL ENERGETIQUE
TECHNICITE	TECHNIQUE Syst.CONSTRUCTIF
	DURABILITE
USAGE	HABITABILITE ADAPTABILITE
	CONFORT THERMIQUE
MATERIALITE	ESTHETIQUE
	CULTUREL
	AMBIANCE
COÛT GLOBAL	COÛT MATERIAUX
	COÛT FONCTIONNEMENT
REGLEMENTATION NORMES	SECURITE INCENDIE
	NORME PERSONNES A MOBILITE REDUITE
	REGLEMENTATION THERMIQUE

Figure 14 : Proposition grille d'analyse multicritères

3. Le processus de projet

3.1. Introduction

La connaissance du processus de projet architectural ainsi que des différentes phases opérationnelles qui le composent, nous semble primordiale. Elle nous permet de comprendre les pratiques des concepteurs concernant l'intégration des questions relatives au choix des matériaux dans le domaine de l'architecture.

La mise en parallèle des différentes phases du processus de projet architectural (Fernandez P., 2007) avec le paradoxe de la construction (Adolphe, 1991) (cf. figure 17) nous amène à approfondir plus précisément le processus de conception. Cette phase est fondamentale, puisque c'est au cours de cette dernière que sont mis en place concept, partis, choix et stratégies retenus dans le projet.

Nous nous intéressons dans un premier temps au processus de projet qui englobe l'ensemble des étapes dans l'élaboration d'un projet architectural. Dans un second temps, nous ciblons notre étude sur le processus de conception, phase décisive dans les choix et décisions pris par le concepteur.

3.2. Caractérisation du processus de projet

3.2.1. Les différentes étapes du processus de projet

Robert Prost (1992) décompose le processus de projet en quatre étapes successives qu'il nomme :

- formulation de problème : cette étape a pour objectif de relever les contraintes et d'identifier les particularités de la situation concernée.
- formulation de solution : cette étape a pour visée de définir les objectifs qui seront à la base des diverses actions à accomplir.
- concrétisation de solution : cette étape a pour but d'exposer les raisons qui sont à la base des objectifs énoncés.
- appropriation de solution : cette étape a pour intention de proposer et mettre en place des « *stratégies d'actions pour se donner les moyens de son projet* » (Fernandez P., 1996).

Ces quatre étapes importantes, mises en parallèle avec les quatre grandes étapes du projet d'architecture (Fernandez P., 2007), permettent de décrire clairement le processus de projet dans le domaine de l'architecture (cf. figure 15).

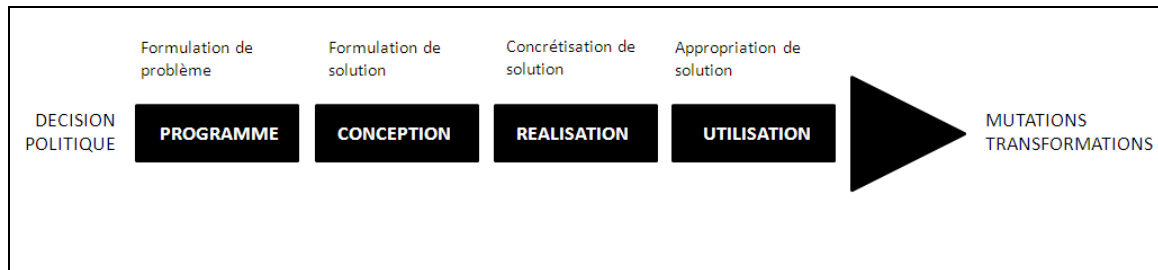


Figure 15 : Processus de projet architectural et urbain (Fernandez P., 2007)

3.2.2. Le processus de projet à travers la question des matériaux et procédés de mise en œuvre

Il est également intéressant de pousser ce travail et de le mettre en parallèle avec l'intégration des questions relatives aux matériaux, aux différentes phases opérationnelles qui composent le processus de projet. Pour cela, nous nous basons principalement sur l'ouvrage d'Alain Bornarel (2003) qui met en avant 11 phases opérationnelles et qui détaille précisément pour chacune d'elles :

- quelles sont les prestations mises en place ?
- avec qui travailler ?
- quelles sont les décisions qui seront prises au cours de cette phase opérationnelle ?
- et quels sont les points environnementaux à ne pas omettre : référence à l'approche environnementale dont la méthode est basée sur 14 cibles elles-mêmes réparties en 4 familles.

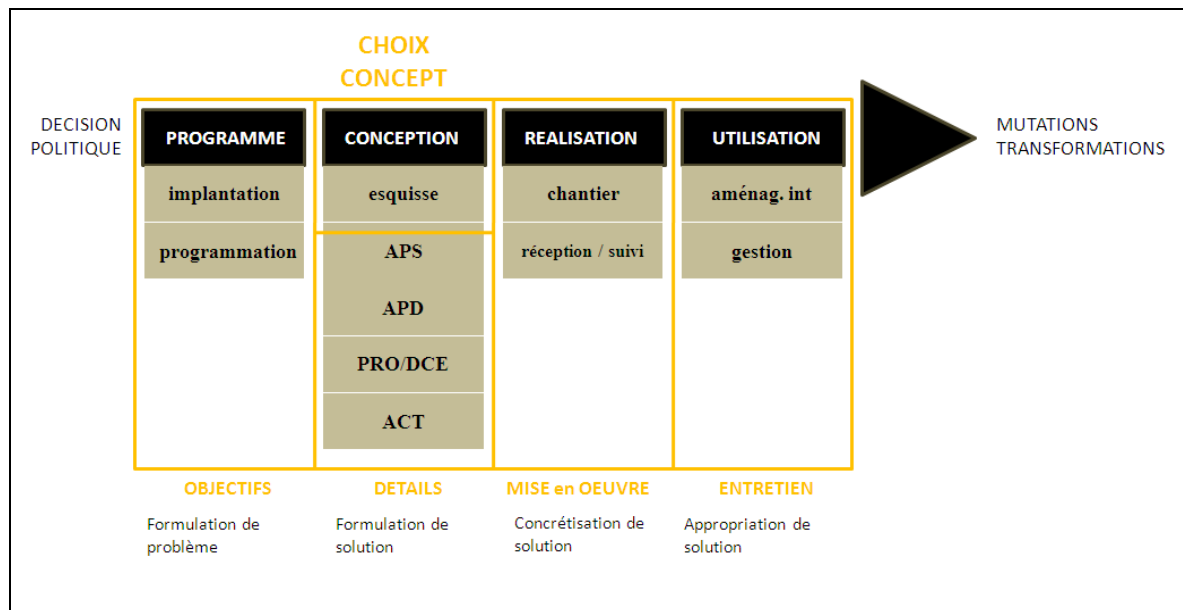


Figure 16 : L'intégration des matériaux dans le processus de projet, d'après le schéma de Fernandez P. (2007).

Comme résumé dans la figure 16, les questions relatives aux matériaux sont présentes tout au long du processus de projet architectural sous diverses formes répondant aux attentes de chaque étape.

La phase de programme : formulation de problème :

Les matériaux sont abordés à travers les attentes, les tendances et les objectifs souhaités et mis en avant par l'équipe de maîtrise d'ouvrage. Au cours de ces phases opérationnelles (implantation et programmation), différents points sont abordés notamment une description claire de l'opération mise en place, les exigences fonctionnelles et techniques (référence aux réglementations, solutions techniques souhaitées ou exigées, performances à atteindre...). Les matériaux sont traités à travers des tendances et objectifs à atteindre et non à travers, a priori, l'exigence d'utilisation de tel ou tel matériau.

La phase de conception

Les matériaux sont intégrés sous deux angles différents en fonction de la phase opérationnelle considérée. En début de conception : esquisse et prémisses de l'avant-projet sommaire, le concept du projet et son image commencent à se dessiner. Les questions relatives au choix des matériaux sont prises en compte à ce moment (premières phases du processus de conception). Cette étape s'intéresse aux relations du bâtiment avec l'environnement alentour, à la qualité des espaces extérieurs, au parti constructif retenu, à l'esthétique et l'image du bâtiment, à la prise en compte des nuisances, orientations, exigences demandées, En fin de conception avant-projet détaillé, Etude de Projet et Dossier de consultation des entreprises PRO / DCE et Assistance aux Contrats de Travaux

ACT, les détails techniques sont approfondis afin de répondre aux attentes architecturales des dispositifs mis en place et d'être en accord avec les réglementations et normes en vigueur.

La phase de réalisation : chantier, réception et suivi

Les matériaux sont abordés sous l'angle de leur mise en œuvre. Ils sont traités à travers leur aspects techniques : mise en œuvre, santé du personnel de chantier, gestion et collecte des déchets, contrôle des composants, des produits, modifications le cas échéant de processus de mise en œuvre, de matériaux... C'est également au cours de cette phase que les mesures de performances seront relevées.

La phase d'utilisation (aménagement intérieur et gestion)

Les matériaux sont approchés sous l'angle de l'entretien et maintenance. Nous nous intéressons donc à la recyclabilité des matériaux, à la gestion des déchets, à la facilité, la consommation et la dangerosité d'utilisation des produits d'entretien. Le but principal étant de limiter les risques sur l'environnement et l'homme. La vérification des performances est également mise en place au cours de cette phase.

3.2.3. Etape décisive du processus de projet : phase de conception (esquisse)

Le démarrage de la phase de conception est une étape décisive concernant les questions relatives au choix des matériaux. Ce fait prend toute son importance lorsque nous nous penchons sur le "paradoxe de la construction" (cf. figure 17). Les choix de conception (début de la phase de conception) s'accomplissent au moment où les concepteurs ont le moins d'informations disponibles. Cette tendance s'inverse en avançant dans le processus. La quantité d'informations disponibles sur le projet augmente alors que le poids des choix de conception diminue.

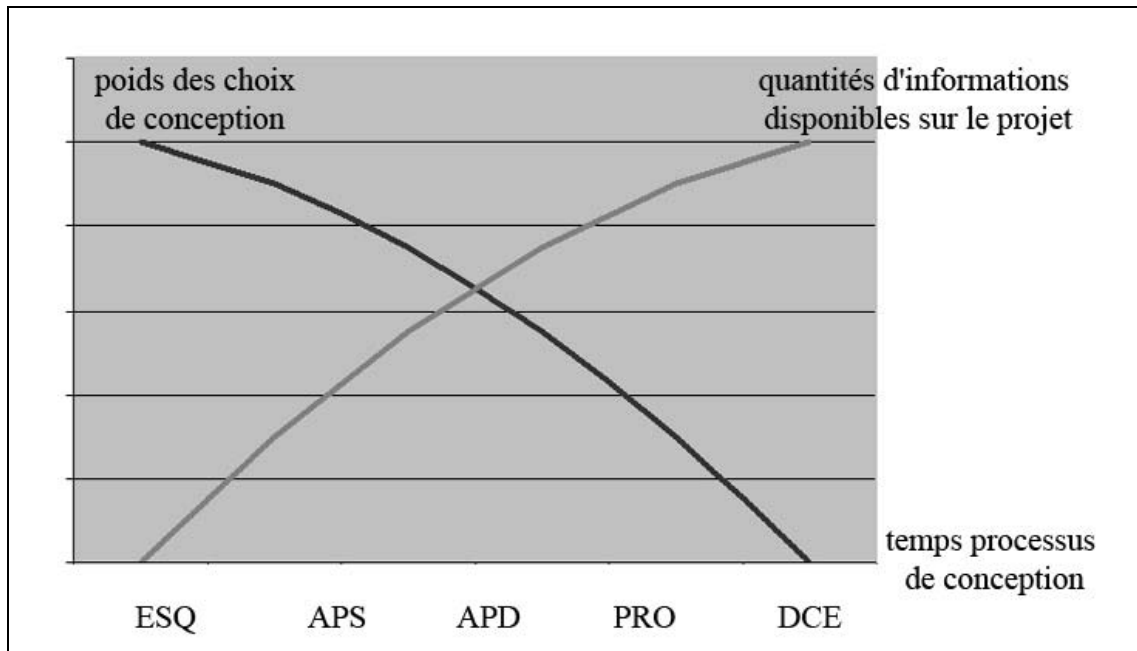


Figure 17 : Schématisation du paradoxe de la construction (Adolphe, 1991)

Ayant comme objectif d'aider les concepteurs en architecture, il est essentiel de viser les premières phases du processus de conception afin d'apporter les données essentielles pour l'élaboration d'un projet de qualité (Adolphe, 1991). Le concepteur en architecture a besoin de soutien, de méthodes, d'outils d'aide à la conception dans les phases au cours desquelles il n'a pas accès aux diverses informations nécessaires pour faire ces choix. Sans rentrer dans des détails inutiles, les outils d'aide à la conception pourraient appuyer et aider à réaliser des choix judicieux sans pour autant prétendre offrir une solution optimale.

Afin de proposer des outils en adéquation avec les maîtres d'œuvre, il est important de comprendre les raisonnements et les phénomènes de conception dans l'élaboration du projet architectural et urbain.

3.3. La conception et les processus qui l'accompagnent : synthèse

La difficulté dans la modélisation du processus de conception architecturale (Fernandez P., 2007), est qu'il existe autant de "conceptions" que de concepteurs.

3.3.1. L'intégration de deux types de données : objectives et subjectives

L'élaboration du projet prend en compte à la fois des données objectives telles que le lieu, le site, le climat, le programme, la réglementation, les exigences attendues... et des données subjectives qui correspondent aux choix des concepteurs, au parti, aux références et à la façon de les analyser. La modélisation du processus de conception est délicate à exprimer.

L'intégration des données objectives peut être illustrée par la boîte de verre (Chupin, 2002) qui caractérise la dimension rationnelle. Cette dimension prend en compte les données fournies, les analyse, les synthétise et les évalue afin d'obtenir la solution optimale.

L'intégration des données subjectives peut être illustrée par la boîte noire (Chupin, 2002) qui caractérise la dimension irrationnelle, la face cachée de la conception. Cette dimension dépend de l'être humain, de ce qu'il comprend, de son mode de raisonnement, de ses références et préférences... (cf. figure 18).

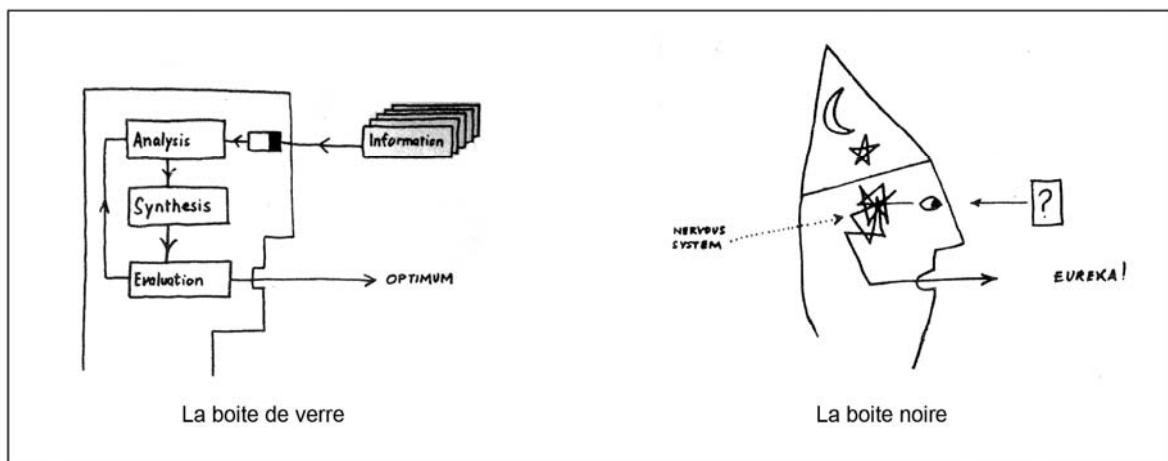


Figure 18 : Le concepteur : boîte de verre et boîte noire (Designer as a computer – Designer as a magician) (Chupin, 2002)

3.3.2. L'approche cognitive du processus de conception : quelques notions

De nombreux chercheurs démontrent que des démarches standard se dissimulent derrière les pratiques individuelles (nous faisons référence aux différents travaux de Philippe Boudon et de Robert Prost concernant la méthodologie en architecture). Nous pouvons mettre en avant deux périodes qui ont des positions contradictoires (Fernandez P., 2002) :

- la première période met en avant une démarche scientifique : formulation de méthode (1960 – 1980),
- la seconde période identifie des procédures en transposant les approches cognitives dans le domaine de la conception. Cette approche permet de distinguer 4 types de raisonnement aux mécanismes différents. Ces types de raisonnement nous permettent de comprendre les activités mentales des concepteurs dans l'élaboration d'un projet (1980 – 2000).

Un raisonnement peut être défini par : « *les activités mentales qui consistent à augmenter l'information disponible en produisant de nouvelles informations à partir d'informations existantes* » (Fernandez, 2007). Les quatre types de raisonnement reconnus sont les suivants :

- Le raisonnement à partir d'activités inférentielles : élaboration par le concepteur, à partir d'informations de départ, d'informations nouvelles sur une thématique donnée. Ces activités sont intériorisées et permettent d'accumuler des connaissances.
- Le raisonnement par analogie : transfert des connaissances et informations d'une "situation source" qui est maîtrisée par le concepteur à une "situation cible" qui a pour principale caractéristique d'être une situation analogue à la "situation source".
- Le raisonnement à partir d'activités de jugement : évaluation des informations par le concepteur qui exprimera alors ses préférences : choix d'options, hiérarchisation et classement des options, pondérations,... ou des prévisions : estimation de probabilités.
- Le raisonnement à partir d'activités de diagnostic : analyse des données afin de valider des solutions : "de la détection à l'action".

Comme le précise Pierre Fernandez (2007, p.38), « *il est fort vraisemblable que les concepteurs auront recours à l'ensemble de ces raisonnements à un moment donné du projet, même si leur sensibilité les amène à privilégier naturellement l'un ou l'autre d'entre eux* ». Il n'est donc pas envisageable, dans notre proposition d'outil d'aide à la conception, de se focaliser sur un unique mode de raisonnement. Nous devons tenir compte de ces 4 types d'approches afin de proposer des outils pertinents. Cependant, notre réflexion à propos de l'outil envisagé, tend à s'articuler plus particulièrement sur les raisonnements à partir d'activités de jugements et de diagnostic.

3.3.3. Le processus de conception : synthèse et illustration

En résumé, le processus de conception a été illustré de diverses façons. Nous en retiendrons deux qui sont à la base de travaux de recherche reconnus et qui montrent des similitudes quant aux principes qui en ressortent.

La première, réalisée par Bruce Archer en 1969, est une approche cartésienne du processus de conception (cf. figure 19). Ce schéma illustre la multitude de données non organisées à prendre en compte (situation) ainsi que la structuration nécessaire des informations retenues (interprétation) afin d'obtenir une forme finie qui deviendra le projet (réalisation).

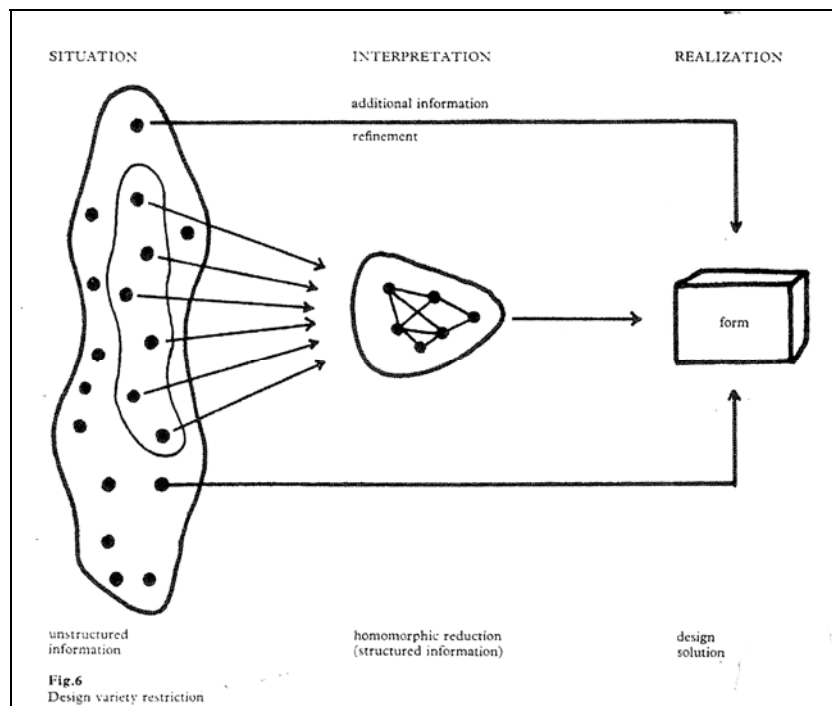


Figure 19 : Le processus de conception : approche cartésienne d'après Bruce Archer en 1969 (Design variety restriction) (Chupin, 2002)

Bruce Archer met par la suite cette approche cartésienne en rapport avec les approches cognitives⁴ du processus de conception et propose un modèle du processus de conception sous la forme d'une vis infinie. Cette spirale illustre le processus de conception dans le sens unidirectionnel d'une recherche de solution optimale (cf. figure 20).

⁴ Les approches cognitives sont les approches qui s'intéressent aux modes de pensées, des représentations, des images mentales et des croyances du concepteur.

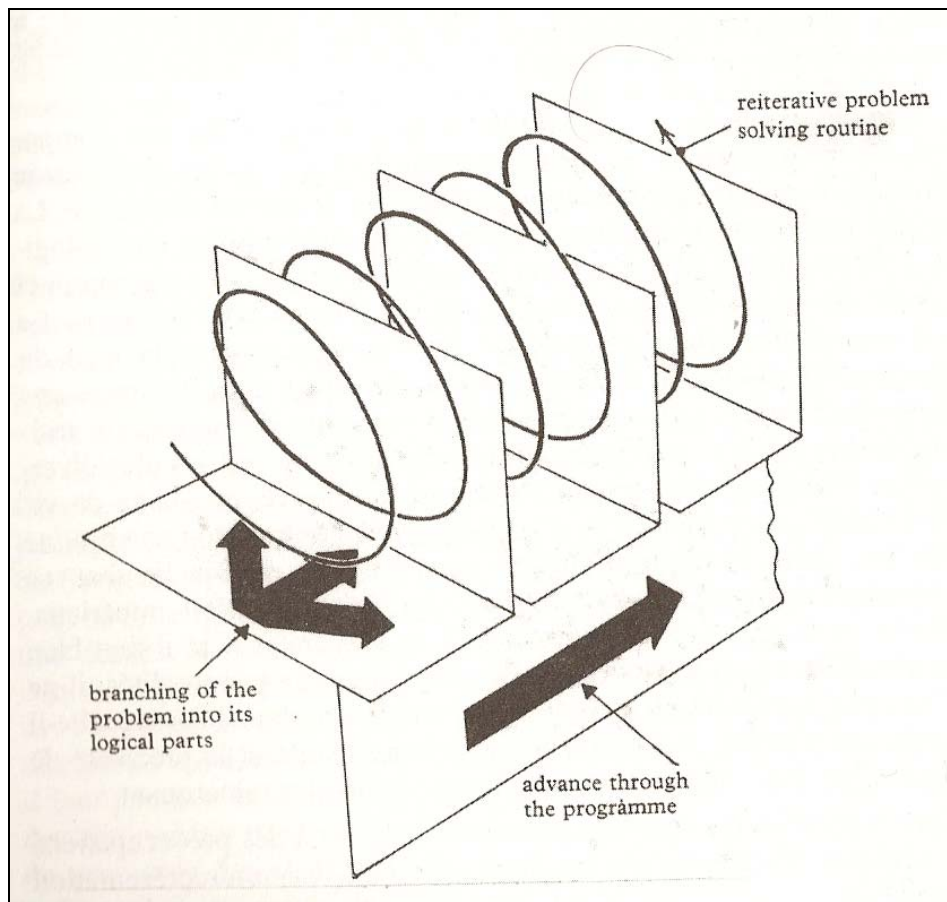


Figure 20 : Le processus de conception par Bruce Archer en 1969 (Chupin, 2002)

Le second modèle du processus de conception retenu est proposé par John Zeisel en 1981. Il met en avant la part subjective⁵ de ce processus en proposant une vision que Jean-Pierre Chupin (2002) définit comme « électromagnétique ». Le processus de conception est alors illustré de la manière suivante (cf. figure 21) :

⁵ Part subjective : qui est propre au sujet. Caractère personnel, opinioné. Dans le domaine de l'architecture, la part subjective prend en compte le parti retenu, l'interprétation des projets références par le concepteur...

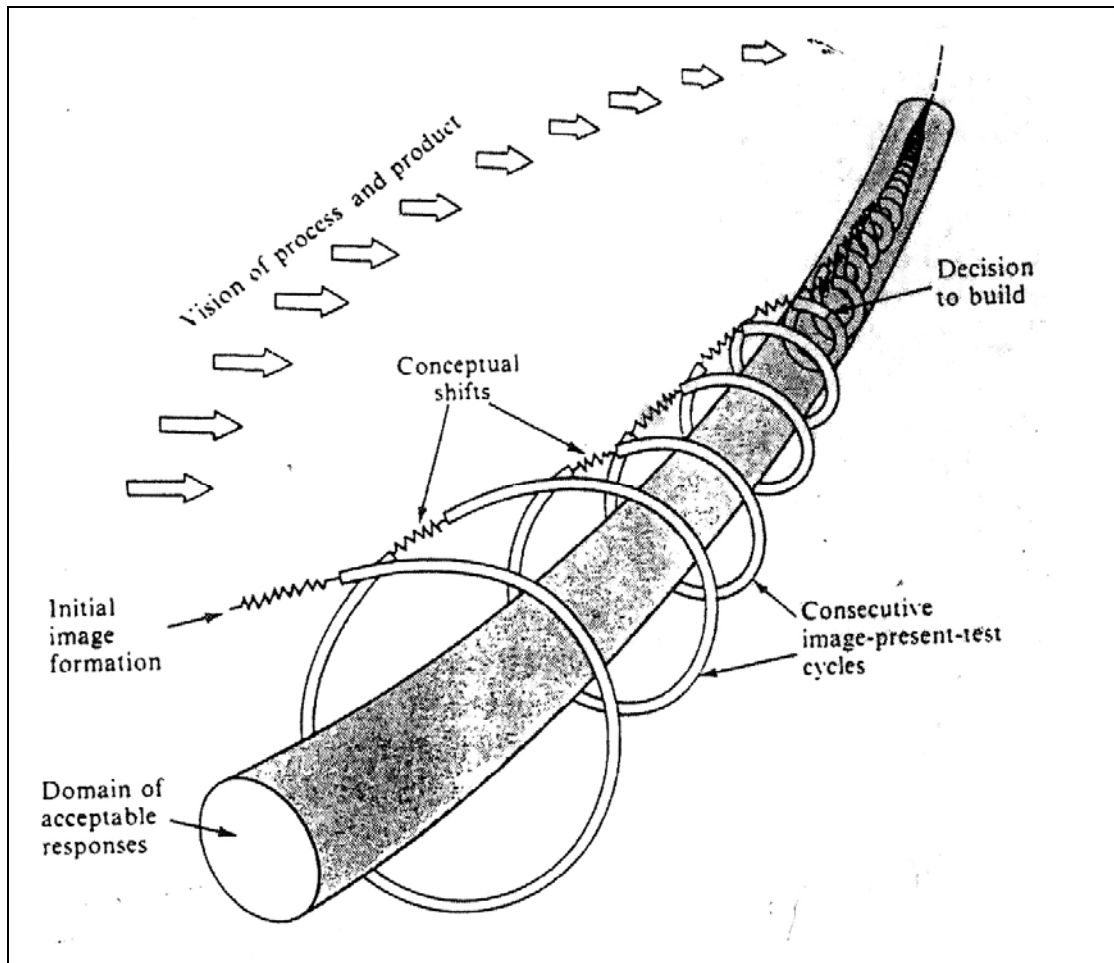


Figure 21 : Le processus de conception d'après John Zeisel en 1981 (Design development spiral) (Chupin, 2002)

Une spirale en plusieurs cycles (processus de conception) regroupe les différents éléments de la conception à savoir la répétition d'actions, le retour en arrière possible, les "éclaircs conceptuels" (initial image formation, conceptual shifts, consecutive image-present-test cycles) le tout dans une direction : la résolution du problème. La solution finale retenue (decision to build) se trouve au point de rencontre entre le processus de conception et le domaine des réponses acceptables (domain of acceptable reponses).

3.4. Conclusion

Le projet d'architecture naît de la rencontre entre les données subjectives et objectives, le contexte et les éléments extérieurs au contexte qui caractérisent le processus de conception. Les modes de raisonnement impliqués dans ce processus sont différents mais restent complémentaires dans la mise en place du projet par le concepteur. La

modélisation de ce processus est donc complexe. Nous avons simplement cherché à travers ce chapitre à poser les bases autour desquelles se construit notre problématique.

Les questions relatives au choix des matériaux sont importantes dans le domaine de l'architecture. Elles sont intégrées dans les premières phases du processus de conception.

Comprendre et tenir compte des modes de raisonnement, des différents éléments qui composent le processus de conception et des pratiques professionnelles des concepteurs en architecture est essentiel afin de proposer des outils et méthodes efficaces. Etre en adéquation avec leur réflexion nous permettra de proposer des innovations réellement pertinentes. Il est nécessaire de tenir compte du déroulement du processus qui s'établit dans l'activité de conception architecturale qui est complexe notamment dans les premières phases du processus.

4. La transposition des savoirs : les outils d'aide à la conception

4.1. Introduction

Les démarches environnementales dans la conception architecturale intègrent de plus en plus souvent à leur méthode de travail des approches et des outils d'aide au projet.

Nous remarquons par ailleurs, que les approches et méthodes d'aide au projet architectural ne sont pas forcément rattachées aux techniques informatiques. Elles revêtent des formes diversifiées telles que les méthodes globales ou disciplinaires, méthodes qualitatives, préconisations de dispositifs architecturaux, abaques, évaluations par indices croisés, protocoles d'enquêtes, logiciels simplifiés et rapides à prendre en main, outils de simulations physiques complexes. Par conséquent, ces approches et méthodes d'aide à la conception amènent à brasser des connaissances généralement rattachées à des corpus de savoirs identifiables, pluridisciplinaires voire interdisciplinaires et partagés entre spécialistes.

Ces savoir-faire techniques s'avèrent peu exploités dans les projets architecturaux. Ils restent avant tout du ressort de l'enseignement supérieur, de la recherche et d'activités d'expertises spécialisées (assistance à maîtrise d'ouvrage ou d'œuvre, bureaux d'études spécialisés). Pourtant, il existe une attente sociale forte concernant les questions environnementales en architecture.

Notre questionnement s'articulant autour de l'évaluation des outils d'aide à la conception, il nous paraît important de comprendre l'intérêt et le rôle des différents types d'outils existants. Le présent chapitre présente les diverses familles d'outils actuelles. Il propose un panorama des outils existants qui orientent le choix des matériaux. Nous observons la capacité de ces outils à s'intégrer au processus de conception. Nous faisons état des interfaces existantes afin de cerner les avantages et inconvénients de cinq de ces outils.

4.2. Les outils proposés aux concepteurs en architecture : approche générale

Nous nous sommes principalement appuyés sur le travail de Patrick Depecker (1985) qui traite de la constitution et des modes de transferts d'un savoir scientifique dans le champ de l'architecture.

Il met en avant deux types d'outils d'aide au projet utilisables par les concepteurs en architecture :

- les outils de premier genre ou lois générales : nous les qualifions d'outils d'aide à la conception,
- les outils de second genre ou systèmes généraux de CAO Conception Assistée par Ordinateur que nous qualifions d'outils d'évaluation.

Ces outils sont souvent indispensables au concepteur « *soucieux de la qualité et de la spécificité* » (Depecker, 1985) de son projet. Leurs limites se situent au niveau des qualités de résultats à savoir :

- qu'ils soient facilement compréhensibles,
- que le graphisme soit attractif,
- que le coût économique permette à des agences de petite taille de pouvoir en bénéficier.

4.2.1. Deux grandes familles d'outils

Les outils de premier genre ou outils d'aide à la conception

Les outils de premier genre abordent un problème, une question à un niveau de globalité compatible avec l'objet architectural en cours d'élaboration, en transmettant des savoirs synthétisés (Depecker, 1985). Ces outils permettent d'orienter des choix. Ils dégagent des situations favorables dès les phases initiales du projet. Ils sont élaborés par des spécialistes dont les champs relèvent souvent des sciences appliquées. La limite de ces outils est qu'il existe peu de lois générales disponibles et qu'elles sont rarement exprimées pour le concepteur en architecture.

L'intérêt principal de ces outils est d'être une aide pour les choix importants réalisés dans la phase d'esquisse. Ils ne sont pas des instruments d'évaluation. Ils n'ont pas vocation à remplacer les instruments de calcul. Ils aident à mieux comprendre et permettent d'échanger avec les différents spécialistes pouvant intervenir dans le projet architectural et urbain. Ils sont utilisés dans une phase importante : celle où le projet n'est pas encore figé où des modifications sont encore possibles, mais au cours de laquelle les choix primordiaux s'opèrent.

Les outils de premier genre sont des outils d'aide à la conception car leur réel intérêt est de donner des orientations, d'indiquer des tendances, de comparer des solutions, de guider

le concepteur en architecture en admettant toutes les modifications possibles sur le projet architectural. Ces outils interviennent dans les phases amont du processus de conception, d'où le terme « outils d'aide à la conception » (cf. figure 22). Toutefois, comme le rappelle Luc Adolphe (1991), il est primordial que les outils d'aide à la conception soient intégrés dans le processus de conception sans perturber la créativité des concepteurs en architecture.

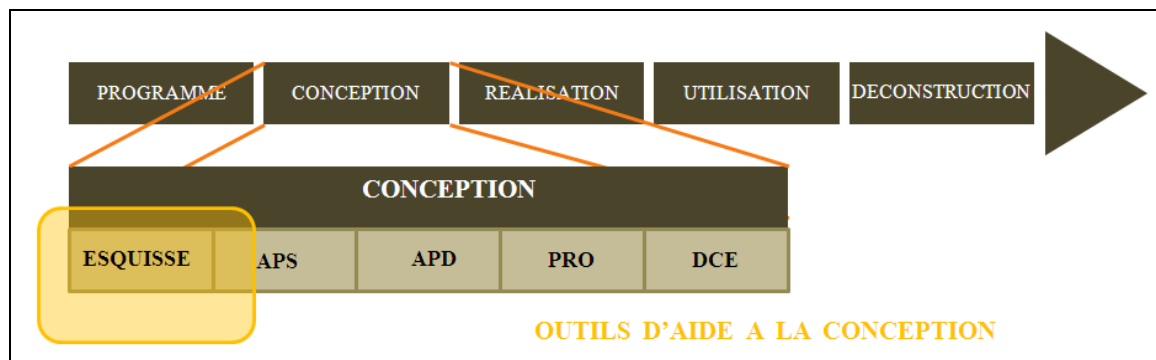


Figure 22 : Phase d'intégration des outils d'aide à la conception dans le processus de conception architectural

Ces outils sont peu nombreux actuellement et ne sont quasiment pas utilisés par les concepteurs en architecture (à l'exception de certaines agences d'architecture environnementale). Les AMO assistants à maîtrise d'œuvre ou d'ouvrage ainsi que les chercheurs en architecture et en sciences pour l'ingénieur sont les principaux utilisateurs de ces outils.

Les outils de second genre ou outils d'aide à la décision

Les outils de second genre sont des codes permettant de vérifier et de valider des solutions. Ils sont là pour dimensionner et déterminer la nature des éléments architecturaux (systèmes constructifs, ventilation, etc.) en intégrant un grand nombre de données techniques. Ce type d'outils est complexe (Chela et al., 2009). Ils sont déclenchables dans les phases avancées du processus de conception lorsque l'état d'avancement du projet est suffisamment important pour offrir l'ensemble des données nécessaires à leur bon fonctionnement. Ils permettent de quantifier des phénomènes, d'indiquer de la performance, de tester et d'évaluer une proposition. Certains permettent de comparer des solutions et sont une aide à la décision entre plusieurs alternatives. Ces outils ne concernent que des ajustements étant donnée la phase d'utilisation (phases avancées du projet).

Ces outils d'évaluation n'ont pas la même fonction (mission) que les outils d'aide à la conception. Ils permettent aux concepteurs en architecture de cibler les caractéristiques techniques de leur bâtiment dans une phase suffisamment avancée du processus de projet. Ils se concentrent souvent sur un domaine précis, sur une discipline liée à l'architecture. Ils ne gèrent pas la pluridisciplinarité et l'interdisciplinarité de la conception architecturale, excepté de rares exceptions. Ils sont une aide ponctuelle dans une discipline spécifique (cf. figure 23).

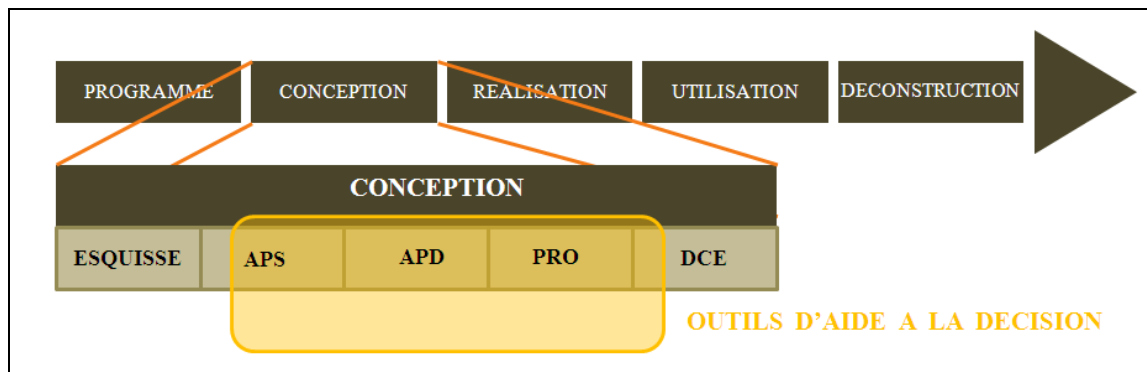


Figure 23 : Phases d'intégration des outils d'aide à la décision dans le processus de conception architectural

Les outils d'aide à la décision sont actuellement très peu, voir pas du tout utilisés par les concepteurs en architecture. Leur emploi se fait principalement par les AMO assistants à maîtrise d'œuvre ou d'ouvrage et les BE bureaux d'études afin d'optimiser le projet étudié dans un domaine précis tel que la thermique, l'acoustique..., dans des phases avancées du processus de conception. Ils ont pour fonction d'évaluer et/ou de simuler des phénomènes et des performances.

Il est important de souligner que les outils d'aide à la conception et à l'évaluation sont complémentaires à la fois dans leur approche, leur vision du projet architectural ainsi que dans leur phase d'intégration au cours du processus de conception.

4.2.2. Les outils d'aide au projet architectural : qu'en est-il à ce jour ?

Aujourd'hui, nous voyons apparaître de plus en plus d'outils ayant pour objectif d'aiguiller les concepteurs en architecture. Ces outils sont encore peu, voire pas utilisés, dans la pratique architecturale, si ce n'est dans l'enseignement et la recherche. Dans le

cadre de notre travail, nous avons recensé un certain nombre d'outils existants (liste non exhaustive) dont nous avons analysé les principales fonctions.

Nous distinguons trois catégories d'outils :

- les outils d'aide à la conception. Ces outils, nous le rappelons, apportent appui, aide, comparaisons de différentes solutions envisageables. Ils sont un support dès les phases amont du processus de conception,
- les outils d'évaluation et de simulation du projet qui sont des outils d'aide à la décision. Ils montrent, vérifient, valident les performances du bâtiment en fonction de critères définis,
- les outils qui combinent les 2 précédents : aide à la conception et évaluation (aide à la décision). Ils ont donc le double objectif. Dans la quasi-totalité des cas, ce type d'outil présente une priorité affichée pour l'aide à la conception ou l'évaluation.

L'étude de différents outils appartenant à ces trois catégories nous a permis de classer un certain nombre d'entre eux en fonction de 4 caractéristiques :

- leur catégorie : outil d'aide à la conception, d'évaluation ou présentant le double objectif,
- l'approche mise en place dans l'outil. Nous distinguons 4 types d'approches :
 - ✓ l'approche sensible qui s'organise autour des questions relatives à la perception, à la matérialité des projets architecturaux à travers l'analyse et la présentation de référents
 - ✓ 3 types d'approches techniques qui sont (cf. figure 24) :
 - l'approche constructive qui traite des différents domaines liés à la structure et aux aspects constructifs mis en place (acoustique) ;
 - l'approche énergétique qui s'intéresse aux domaines liés à l'énergie, à la lumière naturelle, à l'éclairage, à la thermique, au chauffage et à la climatisation ;
 - l'approche environnementale qui prend en compte l'impact sur l'environnement, l'Homme et le climat (gaz à effet de serre GES, composés organiques volatiles COV, pollution, déchets ...).

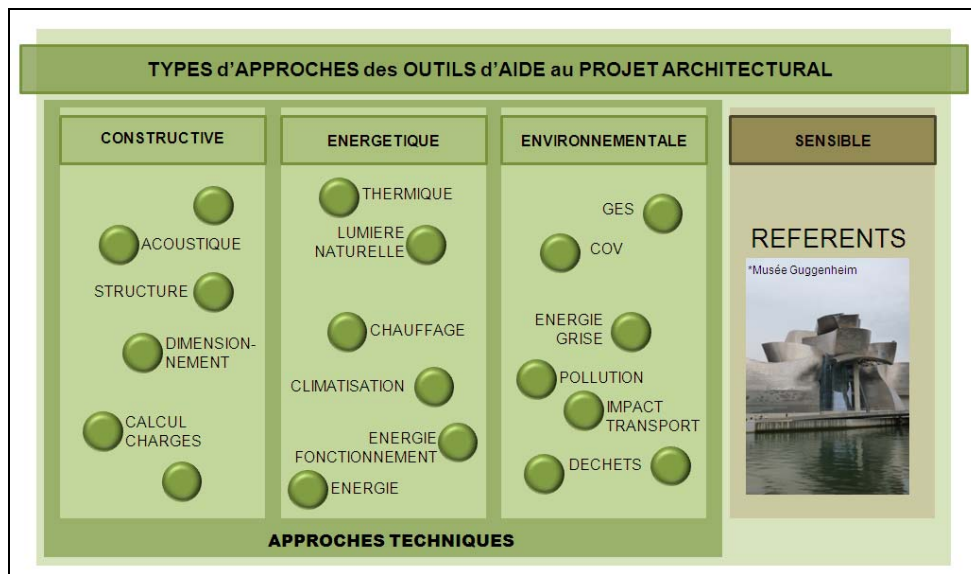


Figure 24 : Les différents types d'approches des outils existants
 Remarque : (la position en abscisse et ordonnée n'a aucune signification)

Dans le cadre de notre recherche (approche technique) nous concentrerons notre étude sur les approches techniques : constructive, énergétique et environnementale car elles sont en lien avec notre problématique d'étude.

- les phases d'utilisation visées dans le processus de conception : esquisse / APS / APD / PRO-DCE
- les utilisateurs concernés par l'outil. Nous avons classé les utilisateurs potentiels en 5 familles : les architectes (concepteurs en architecture), les ingénieurs (BE et BE spécialisés), les AMO, les particuliers et les chercheurs.

Nous avons résumé dans le tableau ci-dessous (cf. figure 25) les caractéristiques relatives à 11 outils existants (cf. Annexe 5 : « *Présentation succincte des outils retenus dans le cadre de notre recherche* »).

X : caractéristique annoncée
X : caractéristique supplémentaire suite à l'analyse de l'outil

	CATEGORIE	APPROCHE	PHASE UTILISATION				UTILISATEUR				
	Aide à la conception Evaluation Combine aide et évaluation	Constructive Energétique Environnementale Sensible	esquisse	APS	APD	PRO - DCE	architectes	BE	AMO	Particuliers	Chercheurs
ARCHINFORM	X		X	X	X	X	X	X	X	X	
ARCHIWISARD	X	X	X				X				
AUDIENCE	X	X	X				X			X	
COCON	X	X	X				X		X	X	
DIAL -Europe	X	X	X				X			X	
ECOTECT		X	X	X			X	X			
ELODIE	X	X	X				X	X	X		
EQUER	X	X	X	X			X	X	X	X	
GREEN BUILDING ST		X	X	X			X	X			
SKETCHUP	X	X	X	X			X				
TRNSYS	X	X				X	X	X	X	X	

Figure 25 : Classement non exhaustif d'outils en fonction du type d'outil, du type d'approche, de la phase d'utilisation, du type d'utilisateur visé.

Il est à souligner que la majorité des outils analysés concerne des outils dits d'aide à la conception et des outils combinant les 2 objectifs : aide à la conception et à l'évaluation. Les outils d'évaluation / de simulation sont complexes. Il est impossible de les utiliser sans bénéficier d'une formation intense et d'une utilisation quotidienne. Par ailleurs, ces outils demandent souvent beaucoup de temps dans l'intégration et le traitement des différentes données d'entrée (Rutman et al., 2005). Il nous est donc difficile de les analyser.

Cette étude vient valider le fait que :

- les outils d'aide à la conception ont un intérêt dans les phases amont du processus de conception et concerne en premier lieu les concepteurs en architecture,
- les outils d'évaluation arrivent dans des phases avancées du processus et s'adressent aux spécialistes dans un domaine lié à l'architecture.

Nous remarquons également que les outils combinant aide à la conception et évaluation sont annoncés comme utilisables dès la phase esquisse. Après analyse de ce type d'outil nous pensons qu'ils ne sont praticables qu'en phase avant-projet sommaire voire avant-projet détaillé pour certains. Nous expliquons ceci par l'interface graphique de ces outils souvent attractive et par l'expression des résultats visuels. L'utilisateur peut alors croire, que ces outils sont aisément accessibles. Or, les données d'entrées étant précises, il est souvent nécessaire de se situer dans des phases avancées du processus de conception et de bénéficier de suffisamment de connaissance dans le domaine traité pour cerner de manière correcte les résultats obtenus.

Nous observons également, et ceci quelque soit le type d'outil concerné, que nous avons 3 types de fonctionnements relatifs aux approches mises en place dans des outils. Nous pouvons citer :

- les outils qui s'intéressent à un type d'approche, un domaine d'analyse. Nous pensons notamment aux outils Dial-Europe, Elodie, ...
- les outils qui traitent deux types d'approches à travers des critères complémentaires et interdisciplinaires tels que COCON, ...
- les outils qui visent une vue d'ensemble, une approche la plus globale possible. Ils interagissent autour des 3 types d'approches techniques retenues sans pour autant traiter les 3 aspects de manière précise et détaillée tels que Ecotect (cf. figure 26).

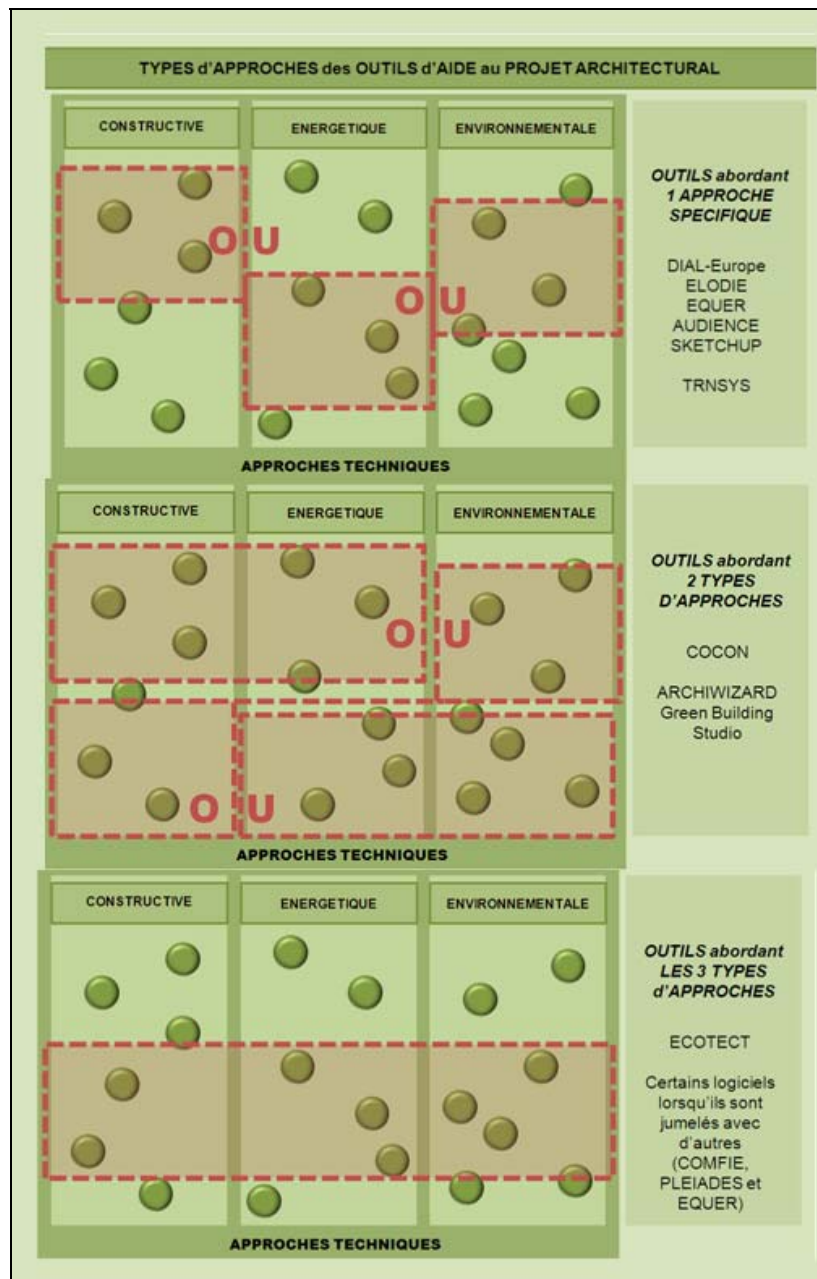


Figure 26 : Relations outils et types d'approches techniques mises en place

Remarque : (la position en abscisse et ordonnée n'a aucune signification)

4.2.3. Panorama des outils existants qui orientent le choix des matériaux et qui sont susceptibles d'aider les concepteurs en architecture

Concernant l'impact des matériaux et de leur mise en œuvre au sein d'un projet, nous distinguons trois grandes familles d'outils susceptibles d'aider les concepteurs sur (Fernandez L. et al., 2008) :

- les outils de type base de données qui s'apparentent aux outils de second genre : outils d'aide à la décision,
- les outils de quantification de l'impact d'un bâtiment que nous pouvons classer dans la famille des outils de premier genre ou outils d'aide à la conception,
- les outils qui tentent d'intégrer des questions de choix de matériaux en les combinant à d'autres questionnements environnementaux qui sont soit des outils d'aide à la conception soit des outils combinant aide à la conception et évaluation.

Les outils de type base de données

Les bases de données sont relativement nombreuses. Nous en distinguons deux grandes familles : celles qui tentent de quantifier les impacts environnementaux des matériaux de construction et celles qui mêlent les qualités esthétiques de matériaux mis en œuvre avec des indices environnementaux simplifiés.

Base de données : quantification des impacts

Toutes les bases de données sur les impacts environnementaux fonctionnent globalement sur un mode identique. Elles délivrent une grande variété d'informations physiques ; chimiques, énergétiques, mécaniques.... Les informations délivrées informent de manière quantitative sur l'impact énergétique, l'impact carbone, la pollution des process de fabrication, la santé des habitants.... Leur classification s'ordonne généralement en fonction de la destination du matériau considéré : fondation, structure, cloison, toiture, ouverture.

Nous avons identifié des bases de données collectives développées dans le cadre de projets régionaux, nationaux ou internationaux. A titre d'exemple, nous pouvons citer la base de données française Inies qui référence les FDES fiches renseignant sur les caractéristiques environnementales et sanitaires des produits de construction

Les bases de données quantifiées sur l'impact environnemental des matériaux sont des travaux essentiels pour l'avenir de la qualité environnementale des bâtiments. A ce jour, elles interrogent sur différents points :

- le choix d'un matériau pour une cloison, une structure, une toiture..., revient généralement à choisir des dispositifs complexes constitués de différents matériaux dont les poids ou les volumes sont difficiles à estimer. Les ratios par poids ou volume de matériaux semblent constituer des informations décalées des questions courantes de conception architecturale,

- d'une base de données à l'autre, les indices ou les ratios délivrés ne renseignent généralement que sur une petite partie des matériaux accessibles sur le marché.... Il s'agit bien souvent de bases de données qu'il reste à remplir et compléter,
- la validité des données des différentes bases que nous avons identifiées n'est pas toujours explicite. Dans les cas où nous sommes informés sur la méthode de mesure employée, alors nous constatons souvent qu'un même indice, d'une base de données à l'autre, ne signifie pas forcément la même information,
- la source des données de certaines bases ne sont pas totalement objectives, notamment lorsqu'elles sont directement renseignées, sans contrôle extérieur, par des fabricants de matériaux eux-mêmes : c'est par exemple le cas des Fiches de Déclarations Environnementale et Sanitaires (FDES) en France.

Bases de données : qualités esthétiques des matériaux

Ce type de bases de données renseigne sur l'aspect de matériaux, sur les effets de matérialités et sont souvent nommées par les concepteurs : références. Il s'agit principalement de bases de données qui s'appuient sur de nombreuses images et termes descriptifs. Elles proposent quelques ratios environnementaux, économiques et constructifs. Les images sont des photographies de projets de référence, de zoom sur les matériaux et de détails constructifs. Un grand nombre de ces bases de données sont développées individuellement, principalement de manière artisanale au sein d'agences d'architecture. Quelques unes ont été réalisées collectivement afin d'être diffusées. C'est le cas d'ArchINFORM, base de données internationale mettant en avant des architectures classées en fonction de leur nom, de leur lieu de localisation et de mots clés tels que des matériaux ou des dispositifs architecturaux.

Outils sur l'impact d'un bâtiment

Les outils de quantification de l'impact environnemental d'un bâtiment ont pour principal objectif d'exploiter de manière plus aisée les données contenues dans les bases de données vues précédemment. Au lieu de raisonner par poids ou volume de matériaux, ils permettent de raisonner par dispositifs architecturaux : assemblage de multiples matériaux (ELODIE). Les outils sur l'impact environnemental d'un bâtiment sont peu nombreux. Ils sont essentiellement orientés vers la quantification d'impacts environnementaux des matériaux. L'information conjointe de différents impacts permet d'élargir le regard des concepteurs sur l'impact général d'un bâtiment étudié. L'utilisation de ces outils consiste bien souvent à minimiser l'impact d'une architecture par différentes

étapes. On teste, petit à petit, différentes solutions de dispositifs que l'on compare les unes par rapport aux autres.

Ces outils restent encore confidentiels. Ils sont peu utilisés par les professionnels de l'architecture, si ce n'est par des experts qui assurent des missions d'assistance à maîtrise d'ouvrage ou de conseil environnemental à la maîtrise d'œuvre. Nous pensons que différents questionnements peuvent expliquer le manque d'engouement des concepteurs envers ces outils :

- ils sont souvent en phase de développement,
- ils dépendent de la qualité même de la base de données à laquelle ils ont recours. Ils souffrent donc eux aussi du manque de données fiables et comparables,
- ils délivrent des informations quantifiées dont la compréhension exige un niveau d'expertise pointu sur les impacts environnementaux des bâtiments. De la sorte, ces informations s'avèrent pour la majorité des concepteurs difficiles à interpréter en termes de choix architecturaux,
- ils ne croisent pas les informations quantifiées qu'ils délivrent avec des informations essentielles pour les concepteurs, telles que les effets esthétiques, le coût ou la technique de mise en œuvre sur le chantier.

Outils combinant matériaux et autres questions environnementales

Dans le but de délivrer un regard de plus en plus global sur la qualité environnementale des bâtiments, nous distinguons également des outils qui combinent les matériaux avec d'autres domaines environnementaux tels que l'énergétique, le confort, la thermique....

Ce type d'outil est rare. Le plus connu est le logiciel Ecotect qui combine un modèleur 3D avec diverses analyses : solaires, thermiques, acoustiques et économiques. Il s'agit d'outils qui se basent sur une modélisation informatique en trois dimensions d'un bâtiment. Une fois le bâtiment dessiné précisément, l'outil informe par des graphiques, sur ses performances environnementales, facteurs de lumière du jour, bilan thermique en régime permanent, empreinte énergétique, empreinte carbone... L'intérêt pédagogique de ce type d'outil est indéniable. Il oblige à assimiler un grand nombre de notions et établit un lien entre la conception d'un projet et certains impacts environnementaux dont ceux liés aux matériaux. Du point de vue de leur intérêt dans des activités opérationnelles de la conception des bâtiments, au moins deux limites actuelles à l'utilisation de ces outils peuvent être avancées :

- ces outils exigent des niveaux d'expertise pointus sur un grand nombre de questions environnementales, expertise que détiennent très peu de concepteurs.

Les informations délivrées nécessitent de comprendre les grandeurs physiques mises en jeu, puis de savoir les interpréter en termes de choix architecturaux,

- ces outils nécessitent de modéliser de manière précise et en trois dimensions le projet architectural que l'on étudie. Cela implique de connaître précisément son emplacement, sa volumétrie, sa structure, ces ouvertures... Ces différents choix sont généralement réalisés en phase avancée du processus de conception, soit à un moment où nous n'avons plus le temps pour revenir sur les choix fondateurs du projet, démarrage de l'esquisse. C'est pourtant dans cette phase de la conception architecturale : démarrage de l'esquisse, que la majorité des choix inhérents à la qualité architecturale d'un projet se concrétisent.

4.3. La capacité des outils actuels à s'intégrer aux processus de conception

L'observation du rôle des outils, du point de vue de leur capacité à s'intégrer aux processus de conception architecturale, nous amène à aborder les questions du niveau d'expertise requis par l'utilisateur, du recueil de données sur les matériaux, du phasage avec le processus de conception et enfin de la nécessité, pour la qualité architecturale de dégager un regard global des concepteurs (Fernandez L. et al., 2008).

4.3.1. Le niveau d'expertise exigé

La question des matériaux et de leurs procédés de mise en œuvre est abordée essentiellement dans trois types d'ouvrages :

- à l'image du mémento de Couasnet (2005), des ouvrages strictement techniques et compréhensibles par des personnes qualifiées dans ce domaine. Ces ouvrages développent l'aspect technique des matériaux et déclinent, dans la plupart des cas, les caractéristiques de chaque matériau considéré,
- à l'image de l'ouvrage de Déoux et Déoux (2004) sur la santé, des recueils qui détaillent un aspect précis de la question des matériaux,
- à l'image de l'écrit de Kur (1998), des ouvrages de sensibilisation sur les matériaux à travers la démarche environnementale.

L'assimilation de ces connaissances induit un niveau d'expertise pointu. Les données sur l'impact environnemental d'un matériau s'avèrent trop complexes pour qu'une personne,

non experte dans le domaine, sache les évaluer. Par conséquent, il lui est difficile de les prendre en considération pour ses choix de conception.

Cette limite à l'utilisation des connaissances existantes sur les matériaux peut d'ailleurs être élargie à différents domaines de la qualité environnementale des bâtiments. Les outils spécialisés (éclairage, acoustique, thermique...) s'adressent d'abord aux experts de chaque domaine. Une personne non avertie peut avoir des difficultés à en analyser les résultats calculés.

4.3.2. Le respect des phases propres au processus de conception

Les connaissances et outils actuels se basent avant tout sur des quantités précises de matériaux mis en œuvre.

Cela exige, en situation de projet, d'être dans une phase avancée du processus de conception pour pouvoir caractériser la proposition architecturale. La tendance est de ne pouvoir informer le concepteur de l'impact environnemental des matériaux qu'aux phases abouties de la conception du projet.

Autrement dit, la majorité des connaissances et outils actuels permettent de constater des caractéristiques environnementales des matériaux à une phase où il est généralement trop tard pour revenir sur les choix initiaux (phase de l'esquisse).

Face à cela, certains outils en cours de développement (Elodie) annoncent des raisonnements en « métré de façade » à partir du choix simplifié d'une combinaison de matériaux choisis. Cette voie d'évolution semble intéressante car elle simplifie les conditions d'entrées à renseigner par les concepteurs.

4.3.3. Regard global nécessaire en architecture

La majorité des connaissances et outils actuels concernant la qualité environnementale des matériaux sont principalement axés sur l'empreinte énergétique ou le bilan carbone. Ces champs d'études sont importants du point de vue de l'écologie, mais paraissent souvent anecdotiques aux yeux des concepteurs de projets architecturaux lorsqu'ils en arrivent à choisir des matériaux et leurs procédés de mise en œuvre.

En effet, en matière d'architecture, il est essentiel d'avoir un regard plus global dès lors que l'on aborde le choix des matériaux : effets esthétiques de matérialité, coût d'approvisionnement et de mise en œuvre, impacts sur le confort et consommations du bâtiment, impacts sur la santé,... . Le fait d'aborder exclusivement les questions environnementales est anecdotique et réducteur face à la complexité du processus de

conception qui intègre une pluridisciplinarité nécessaire à la qualité de la conception architecturale.

Il est donc nécessaire de proposer des outils aidant à dégager une vision globale de la question du choix des matériaux tout en laissant le choix aux concepteurs de pondérer tel ou tel critère en fonction des contraintes du projet. Ainsi, l'ensemble des données est pris en compte. Les concepteurs sont responsables des critères qu'ils choisissent de pondérer en fonction du contexte, du projet et de leurs sensibilités.

4.4. Etat des interfaces d'outils susceptibles d'aider à la conception architecturale

L'analyse des interfaces d'outils existants nous permet de cerner les différents atouts et faiblesses des outils d'aide à la conception. L'objectif de ce travail est de pouvoir proposer des innovations concernant de futurs outils. Nous avons choisi 5 outils existants qui traitent des matériaux et procédés de mise en œuvre au sein du projet architectural au travers d'une ou plusieurs thématiques (énergétique, thermique, environnementale, cycle de vie). Notre choix s'est porté sur les outils Elodie, COCON, Equer et Ecotect. Nous avons ajouté à cette liste d'outils, le logiciel DIAL-Europe qui a la particularité de proposer une interface graphique très intuitive et adaptée à la phase esquisse du processus de conception. Il nous semble donc intéressant de faire état de ce type d'interface afin d'en cerner ses avantages et inconvénients.

4.4.1. Efficacité des interfaces au travers de l'intelligibilité et la cohérence des outils

Notre analyse s'articule autour de notions essentielles concernant l'efficacité des outils d'aide à la conception. Nous nous basons sur la grille d'analyse multicritères proposé par Bonneaud et al. (2004). Cette grille est composée de 3 domaines : adhésion du concepteur, intelligibilité de l'outil et cohérence de l'outil et de 12 critères (cf. figure 27).

Le premier domaine "adhésion du concepteur" s'intéresse aux comportements des concepteurs face à des outils d'aide à la conception. Les critères énumérés dans ce champ sont des phénomènes subjectifs et complexes qui participent à la réussite de l'utilisation d'un outil technique dans le processus de conception, et plus spécifiquement dans les toutes premières phases de ce processus. Les second et troisième domaines "intelligibilité et cohérence de l'outil" s'intéressent à la forme et au contenu de l'outil.

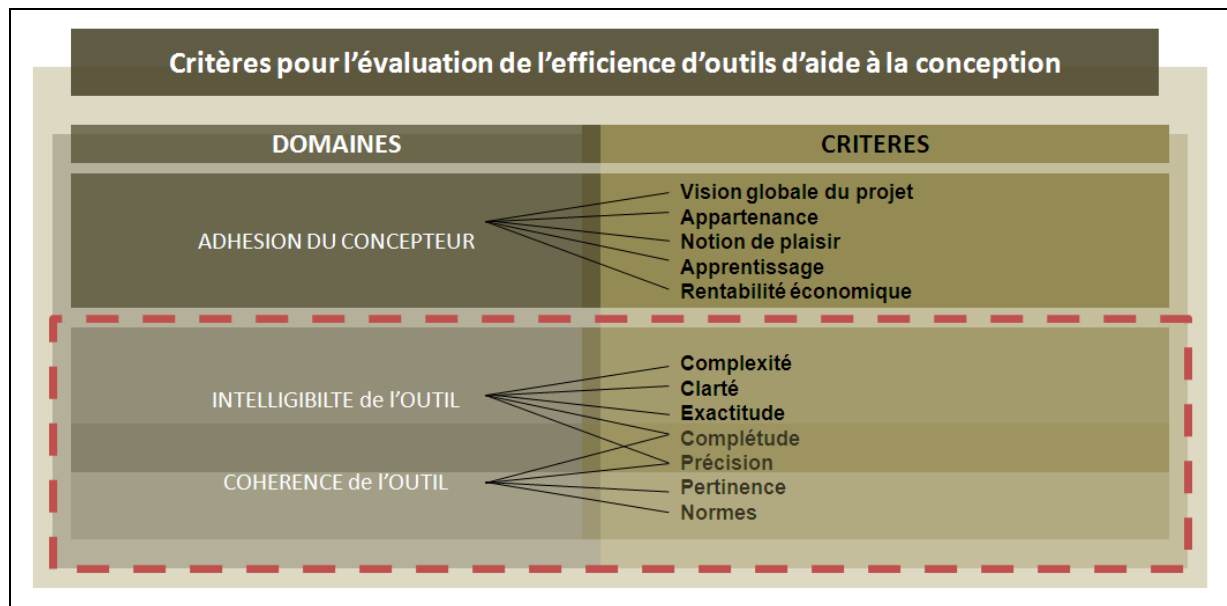


Figure 27 : Proposition empirique de quelques critères pour l'évaluation de l'efficacité d'outils d'aide à la conception (Bonneaud et al., 2004)

Au vu de notre problématique : évaluation d'interfaces d'outils existants, nous avons choisi d'étudier les outils à travers les 2 domaines qui qualifient les outils : intelligibilité et cohérence. Afin d'analyser les outils sur une trame commune, nous observons les interfaces d'outils en nous basant sur les 7 critères de la grille d'analyse multicritères proposée composant les domaines retenus.

Présentation et définition des 7 critères d'analyse

Les 7 critères propres aux domaines de l'intelligibilité et de la cohérence de l'outil mis en avant dans l'article de Bonneaud et al. (2004) sont les suivants :

- la complexité évalue la facilité et la simplicité dans la découverte et l'utilisation de l'outil,
- la clarté analyse la simplicité des expressions et iconographies présentes dans l'outil. Ce critère repose sur l'appréciation de la forme qui se doit d'être claire afin d'être compréhensible par les concepteurs,
- l'exactitude s'intéresse à la fois au contenu à travers l'incompatibilité d'une information par rapport à une autre et à la forme de l'outil à travers des éléments plus subjectifs qu'il nous est difficile d'analyser. Dans le cadre de notre analyse, nous regroupons l'exactitude avec le critère de précision défini ultérieurement,

- la complétude consiste à détecter les lacunes de l'outil présentes à la fois dans la représentation conceptuelle des différentes informations et dans l'exhaustivité de la thématique traitée,
- la précision consiste à éviter les imprécisions laissant plusieurs interprétations possibles au concepteur ou nuisant à la compréhension de l'outil et qui seraient par conséquent source d'erreur potentielle,
- la pertinence consiste à éviter les informations superflues qui peuvent être nuisibles dans la compréhension, l'utilisation de l'outil car elles le surchargent inutilement,
- le respect des normes consiste à vérifier l'adéquation entre les contraintes et conventions propres aux domaines techniques, sociaux et culturels et les outils d'aide à la conception.

Méthode d'analyse mise en place

Chacun des outils d'aide à la conception retenus est analysé à partir des 7 critères développés précédemment. La prise en main des outils Elodie et Equer s'est faite à partir du tutorial établi pour chacun d'eux. Ces "projets-références" (exemple : maison Mozart pour le logiciel ELODIE) nous permettent d'utiliser et de comprendre de manière rapide les principales caractéristiques de ces outils.

COCON a été exploité à partir du projet référence proposé dans le manuel de l'outil ELODIE. Ecotect étant un outil plus complexe, il est nécessaire, pour sa prise en main et la compréhension de l'ensemble de son contenu et des résultats proposés, de suivre une formation d'apprentissage. Ayant pris conscience de ce fait tardivement dans l'avancement de notre travail, l'analyse de cette interface a été menée à partir du tutorial et des démonstrations auxquelles nous avons eu accès. DIAL-Europe a, quant à lui, été simple à utiliser puisque nous en avons déjà l'habitude.

Une fois l'exploitation de l'outil réalisée, nous avons relevé diverses observations et remarques en fonction des 7 critères d'analyse retenus. Nous les avons synthétisés sous la forme d'un tableau AFOM : Atouts, Faiblesses, Opportunités, Menaces ; que nous avons préféré nommer AFPR Atouts, Faiblesses, Potentialités, Risques. Ces tableaux ont pour intérêt de récapituler et de classer de manière lisible et rapide les différents critères analysés selon les avantages et inconvénients de l'outil.

4.4.2. Analyse des 5 outils : résultats

Elodie (version bêta test)

Présentation

L'outil Elodie est un logiciel travaillant à partir d'une approche unique : l'approche environnementale (cf. figure 28).

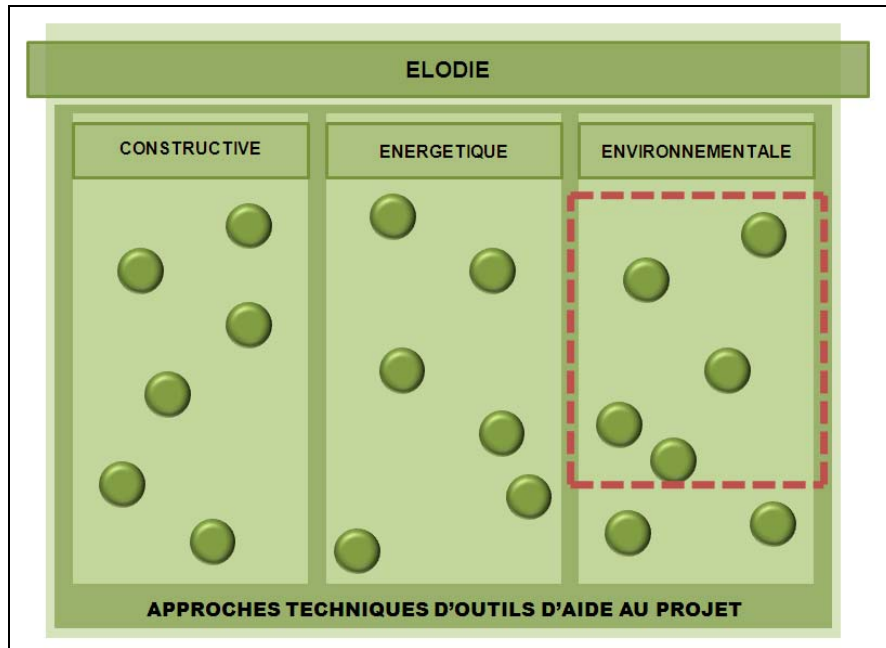


Figure 28 : Type d'approche de l'outil Elodie (version bêta test)
Remarque : (la position en abscisse et ordonnée n'a aucune signification)

ELODIE, *Evaluation à L'échelle de l'Ouvrage Des Impacts Environnementaux*, permet d'évaluer la contribution des matériaux et produits de construction aux impacts environnementaux d'un ouvrage. Il est développé par le CSTB, Centre Scientifique et Technique du Bâtiment. Il est accessible gratuitement depuis Internet (ELODIE).

Les particularités de cet outil sont :

- la base de données Inies, qui est composée des FDES Fiches de Déclaration Environnementales et Sanitaires, à partir de laquelle s'articule Elodie,
- le lien entre un métré quantitatif de bâtiment et les caractéristiques environnementales des produits de construction utilisés.

Elodie permet de faire les calculs d'énergie grise, le bilan carbone et le profil environnemental multicritères d'une opération.

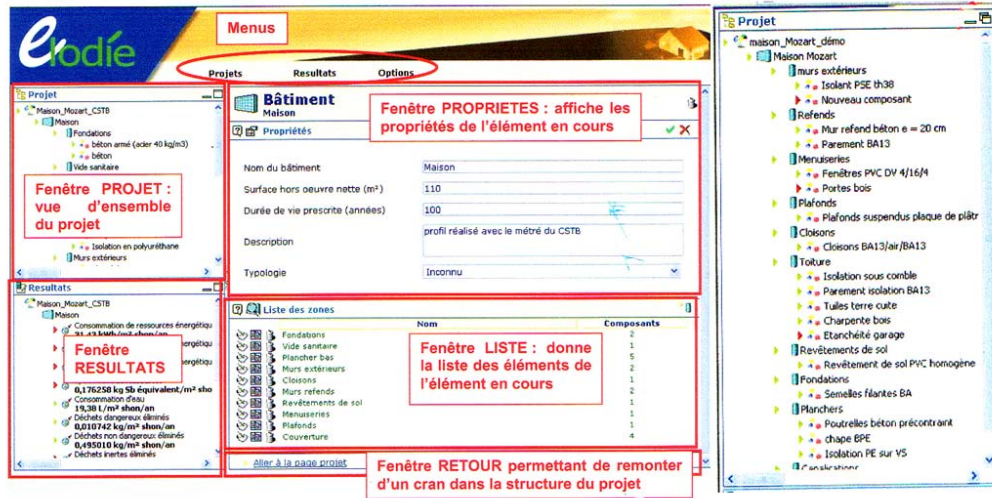
Résultats

Les faiblesses de l'outil Elodie se situent à différents niveaux. L'outil est relativement complexe d'accès car le renseignement des données d'entrées est laborieux et l'utilisation de ce dernier nous oblige à naviguer entre une multitude de fenêtres graphiques. Elodie est également peu clair quant à la lisibilité des dessins iconographiques qui sont nombreux et dont nous ne connaissons pas la définition ni les différents liens sans faire appel au manuel. Son interface graphique est peu ludique et conviviale (cf. figure 29).

Cet outil se base sur une banque de données (Inies) peu fournie, même si elle reste la base de données environnementales la plus complète en France. Toutefois, cette base de données est réactualisée régulièrement. Le nombre de matériaux renseigné augmente. Le champ d'action de cet outil reste limité. Il s'intéresse exclusivement aux résultats des FDES (fait souhaité et annoncé par les concepteurs de l'outil). Dans les phases amonts du processus de conception, le choix d'exprimer les résultats instantanément (matériau après matériau jusqu'à ce que le dispositif soit complet) nous paraît peu intéressant et judicieux (non parlant et pouvant porter à confusion). De plus, il est impossible, dans la "version bêta test" analysée, de comparer les performances environnementales de 2 bâtiments ou alternatives de bâtiments. Enfin, plusieurs fonctionnalités ne sont pas opérationnelles.

Notons toutefois que ces commentaires sont à nuancer. La version analysée est une version en cours de développement (version bêta test), donc non finalisée. Des modifications et des améliorations vont être apportées à cet outil et peuvent rendre obsolètes nos diverses remarques.

Données d'entrées à renseigner



Résultats sous forme chiffrée et sous forme graphique et radar

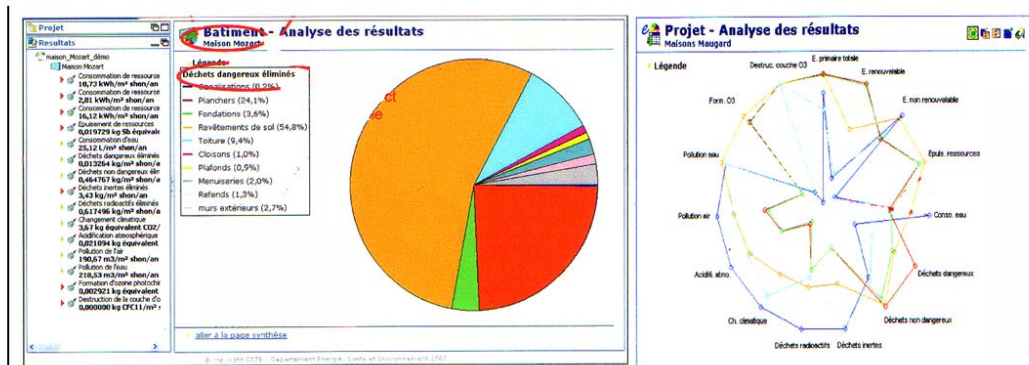
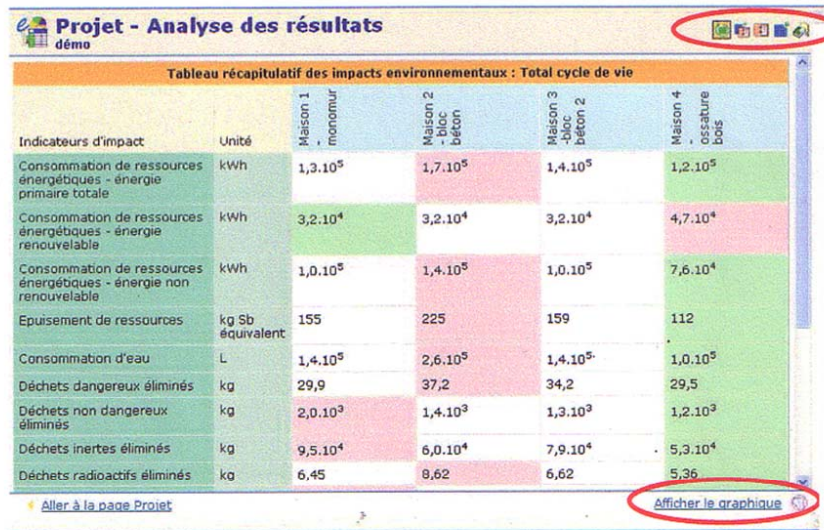


Figure 29 : Impressions écrans de l'outil Elodie version bêta test (manuel)

Les atouts de l’outil se situent principalement au niveau de la précision des résultats qui sont exprimés sous deux formes : chiffrés et graphiques. Ils sont alors compréhensibles par un large public. Ainsi, à partir des résultats chiffrés, il est possible d’affiner les choix de matériaux retenus. A partir des résultats graphiques, nous bénéficions d’une vue d’ensemble rapide et efficace de l’impact environnemental du projet étudié. Enfin, cet outil est accessible gratuitement depuis Internet, ce qui lui donne un intérêt particulier : toute agence de concepteurs peut y avoir accès.



Figure 30 : Récapitulatif des atouts – faiblesses – potentialités – risques de l’outil ELODIE version bêta-test

Présentation

L'outil COCON est un logiciel qui s'articule autour de 2 approches techniques en simultané : l'approche environnementale et l'approche énergétique (cf. figure 31).

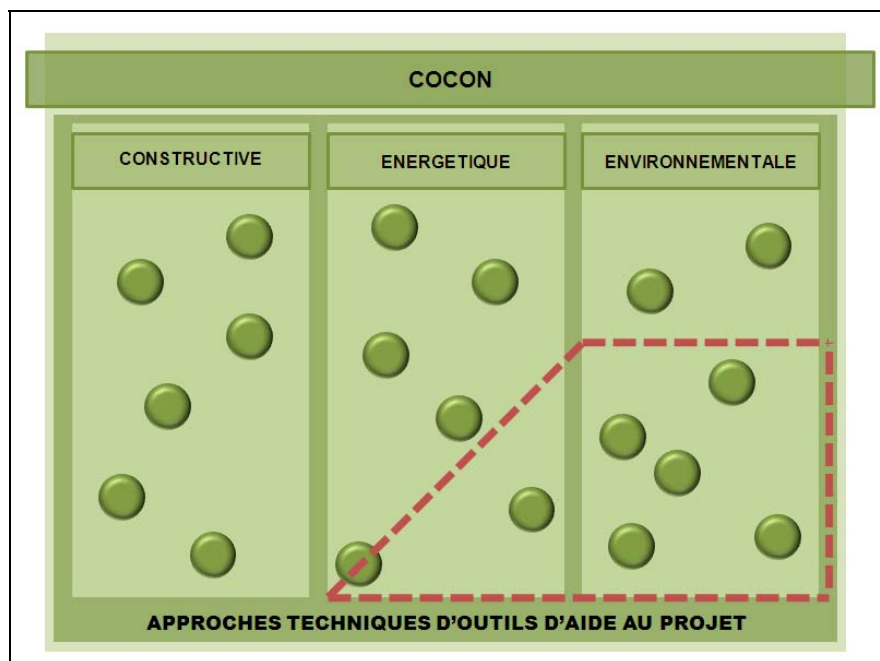


Figure 31 : Type d'approche de l'outil COCON v7.0.3. sept.08
Remarque : (la position en abscisse et ordonnée n'a aucune signification)

COCON, *Comparaison de solutions constructives en terme de bilan environnemental, de performances thermiques et de confort*, permet de comparer des solutions constructives d'un point de vue thermique et environnemental (COCON, a). Cet outil est actuellement en cours de développement. Il est quotidiennement amélioré au sein du LRA Laboratoire de Recherche en Architecture de Toulouse par Luc Floissac (conseiller environnemental, chercheur associé au LRA et créateur de l'outil COCON). Nos différentes observations font état de l'outil à sa version 7.0.3. sept.08.

COCON analyse pour une série de parois et de bâtiments composés par l'utilisateur (COCON, b) :

- les performances thermiques (résistance thermique, inertie quotidienne, déphasage),
- le positionnement en regard des exigences et labels,

- les impacts environnementaux (émissions GES, énergie grise, pollution air, eau, déchets radioactifs...)
- la "taxe carbone"⁶ appliquée aux matériaux de construction, aux parois et constituants du bâtiment,
- l'impact environnemental et énergétique de la localisation d'un bâtiment en fonction de la part modale des transports utilisés par les usagers au cours de leurs déplacements.

Résultats

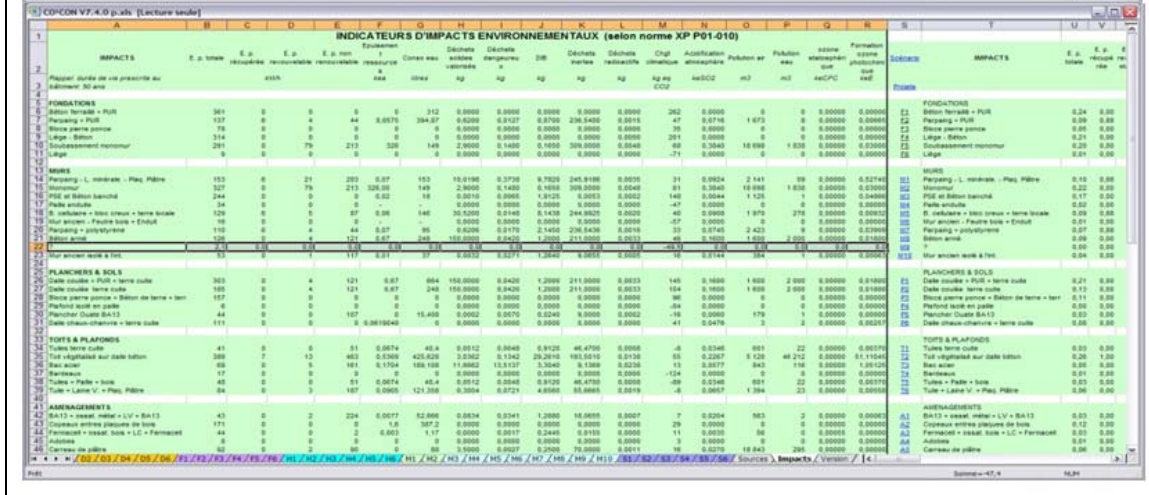
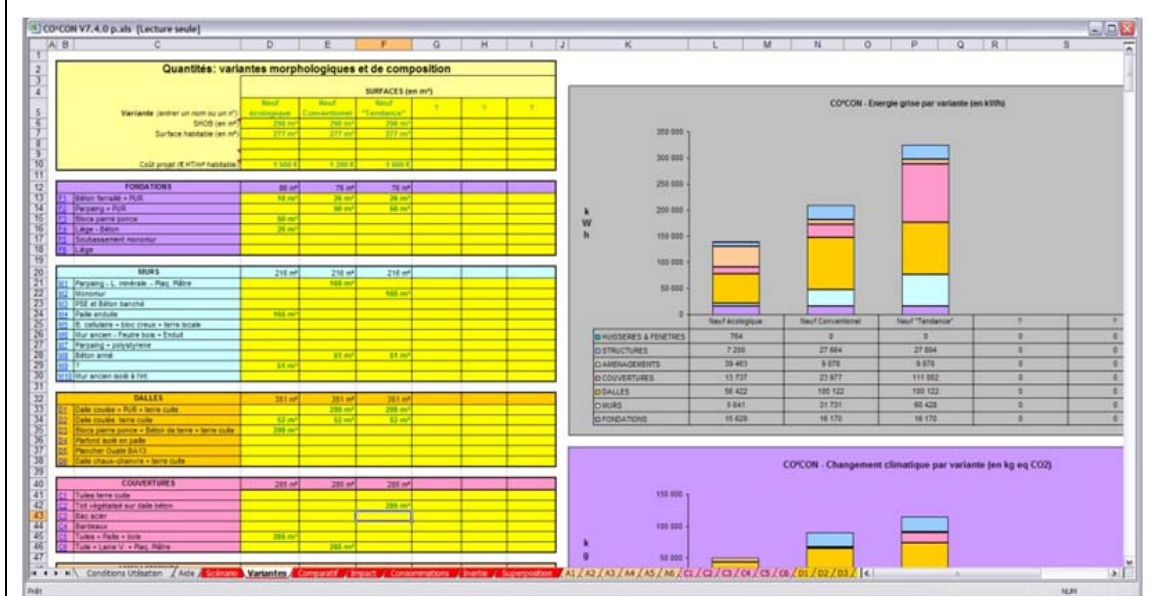
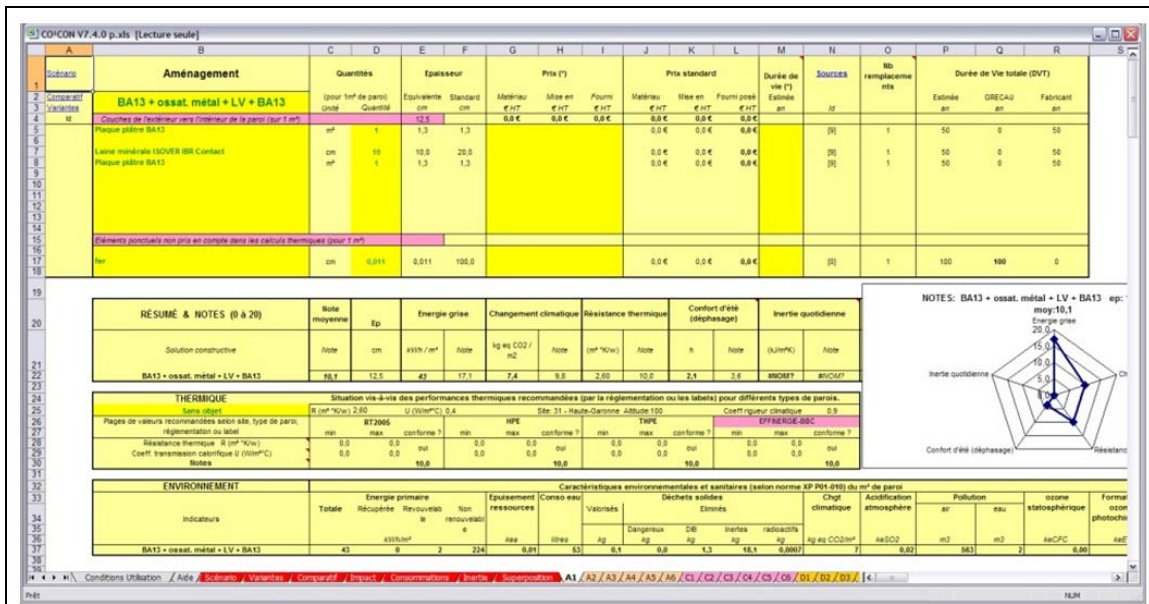
Les principales faiblesses de l'outil COCON se situent au niveau de la complexité et de la clarté de l'interface. Cet outil, développé sous un tableur Excel, propose une multitude de pages inégales concernant :

- leur compréhension : de facile à difficile,
- leur organisation : données à renseigner au milieu de résultats ayant diverses formes ce qui accentue le manque de clarté soulevé,
- la multitude de graphiques, tableaux, onglet présents sur une même page sans hiérarchie particulière,
- un code couleurs difficilement compréhensible.

L'expression des résultats sous diverses formes (radar, notes, étiquettes tableaux chiffrés) est pertinent. Il est pourtant délicat de visualiser clairement les résultats car l'organisation des pages reste complexe (cf. figure 32).

Il est à souligner que cet outil a été développé dans l'objectif premier de mettre en place le contenu et le fond de l'outil. La qualité de l'interface n'a pas été mise en avant au moment où nous étudions cette version de COCON. Il est primordial, afin d'être utilisé et compris, de proposer une interface graphique ergonomique. La création d'une interface conviviale fera l'objet de travaux au sein du LRA ultérieurement.

⁶ La "taxe carbone" est une taxe environnementale dans le but de limiter et contrôler le réchauffement climatique. Cette taxe concerne les émissions de dioxyde de carbone et de gaz à effet de serre. Son objectif est de favoriser et d'encourager les activités et produits peu énergivores.



Les atouts de l'outil COCON se situent au niveau de la base de données qui l'alimente. Cette base est exhaustive et fiable. Son contenu est vérifié (croisement de données). L'exactitude de l'outil est donc un de ces principaux avantages. De plus, COCON ne se réduit pas à un domaine mais tente de croiser divers champs d'étude dont les aspects énergétiques à travers la résistance thermique, l'inertie quotidienne et le déphasage des dispositifs, et les aspects environnementaux à travers les émissions de gaz à effet de serre, l'énergie grise, la pollution de l'air, de l'eau et les déchets.

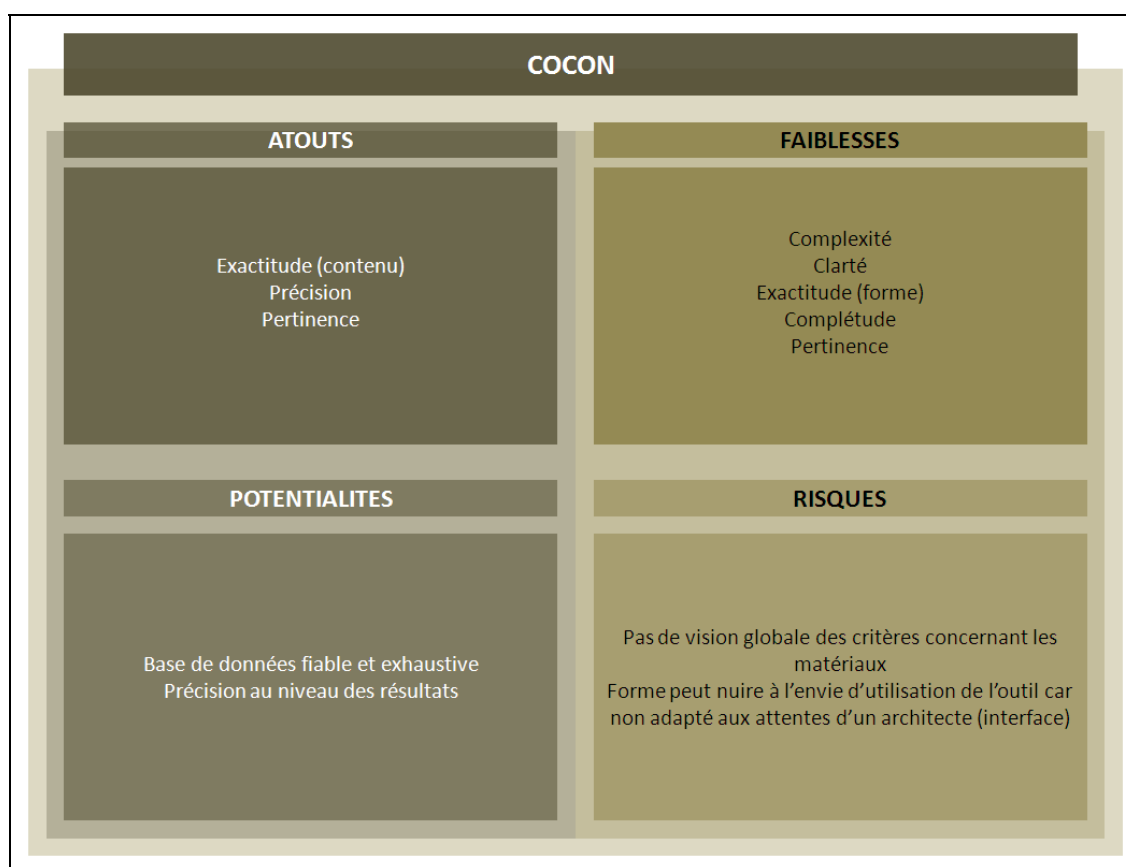


Figure 33 : Récapitulatif des atouts – faiblesses – potentialités – risques de l'outil COCON version 7.0.3. sept.08

Equer

Présentation

L'outil EQUER est un logiciel travaillant à partir d'une approche technique : l'approche environnementale (cf. figure 34).

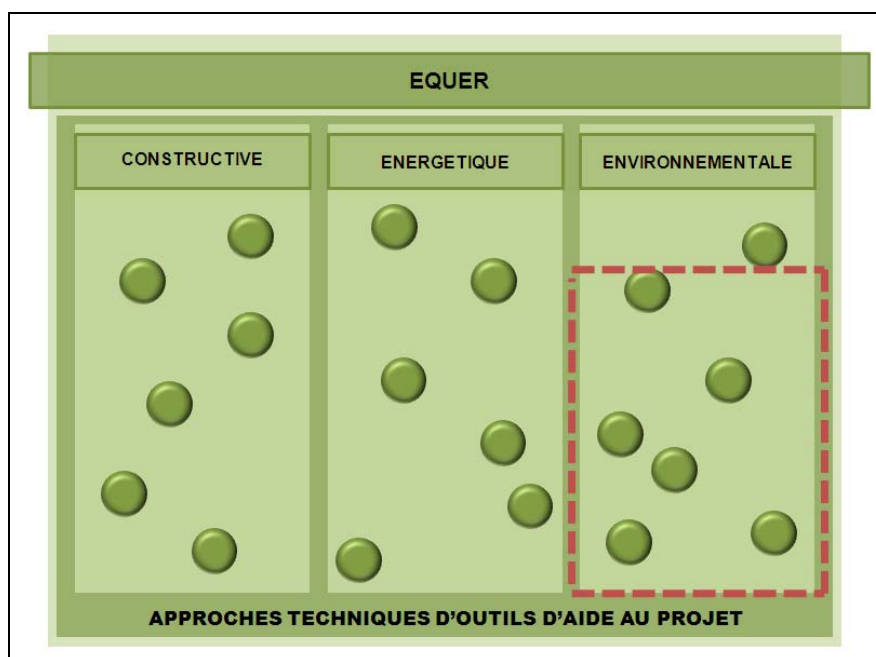


Figure 34 : Type d'approche de l'outil EQUER
Remarque : (la position en abscisse et ordonnée n'a aucune signification)

EQUER, *Simulation des cycles de vie des bâtiments*, est un outil d'évaluation de la qualité environnementale des bâtiments. Il a pour objectif d'aider les concepteurs à mieux cerner les conséquences de leurs choix en terme d'impacts environnementaux. Le principe général à la base de cet outil est l'amélioration de la qualité des ambiances intérieures tout en réduisant les impacts environnementaux extérieurs. Equer a été développé par Bruno Peuportier (Ecole des Mines de Paris). C'est un module d'analyse environnementale qui est associé aux outils Pléiades et Comfie édités par Izuba Energies (EQUER).

Résultats

Les faiblesses de l'outil Equer se situent principalement au niveau de la complexité des données d'entrées à renseigner dans les outils jumelés et indispensables au fonctionnement d'Equer (Pléiades et Comfie). Cependant les données d'entrées propres à

l'outil Equer sont peu nombreuses, claires et précises (cf. figure 35). Nous regrettons que la base de données soit si peu fournie (130 matériaux reste insuffisant dans le contexte actuel).

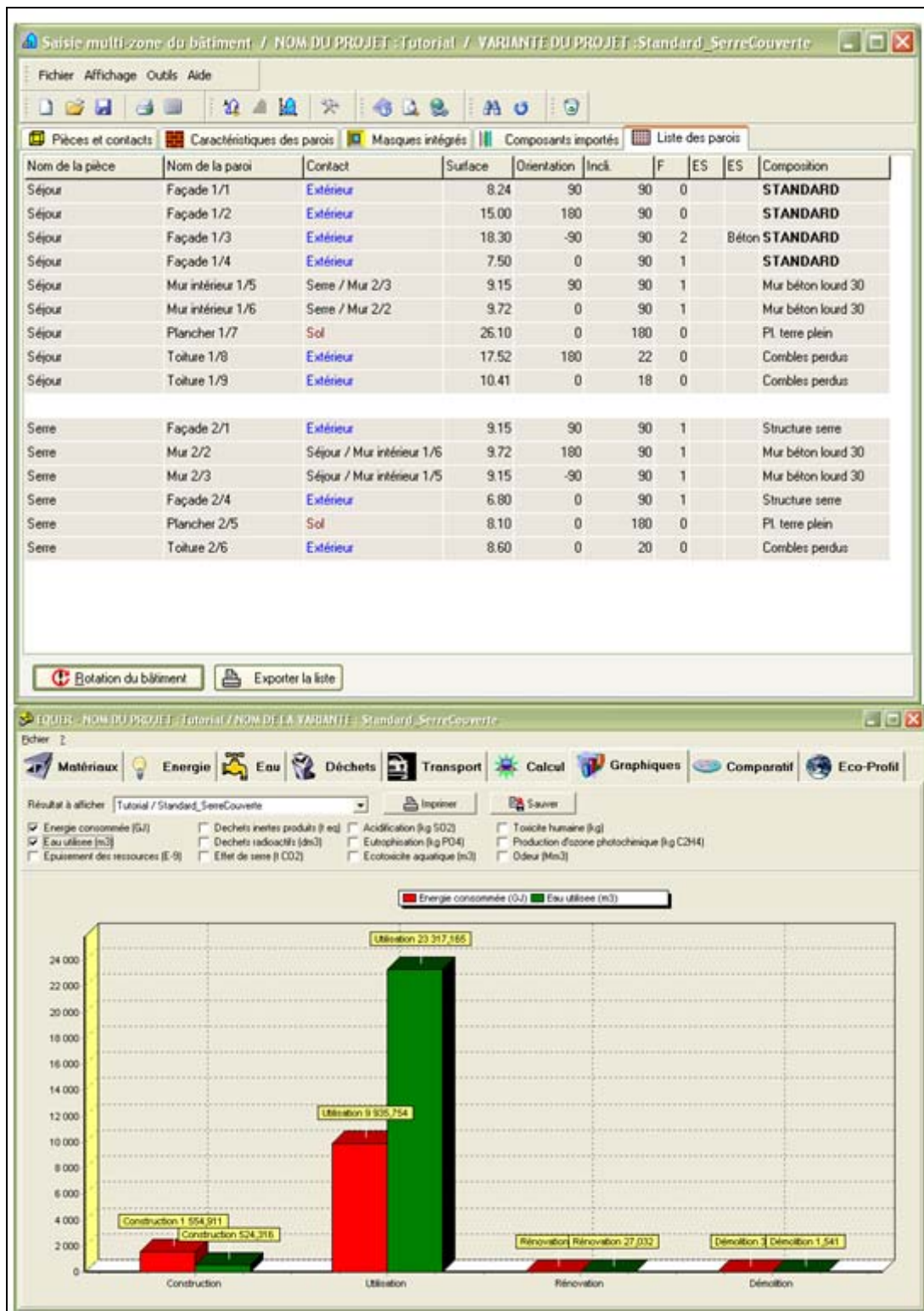


Figure 35 : Impressions écran de l'outil Equer (manuel)

Les atouts de cet outil se situent au niveau de sa mise en œuvre et de sa compréhension : facile et rapide. Nous soulignons l'absence de fonctionnalités inutiles. Chaque icône est associée à un mot, ce qui facilite la compréhension de l'outil. Equer est relativement ludique et clair. Les calculs sont détaillés dans le manuel. Les résultats sont exprimés sous deux formes : chiffrés et graphiques, permettant à l'utilisateur une meilleure lisibilité. Enfin, Equer offre la possibilité de comparer plusieurs solutions.

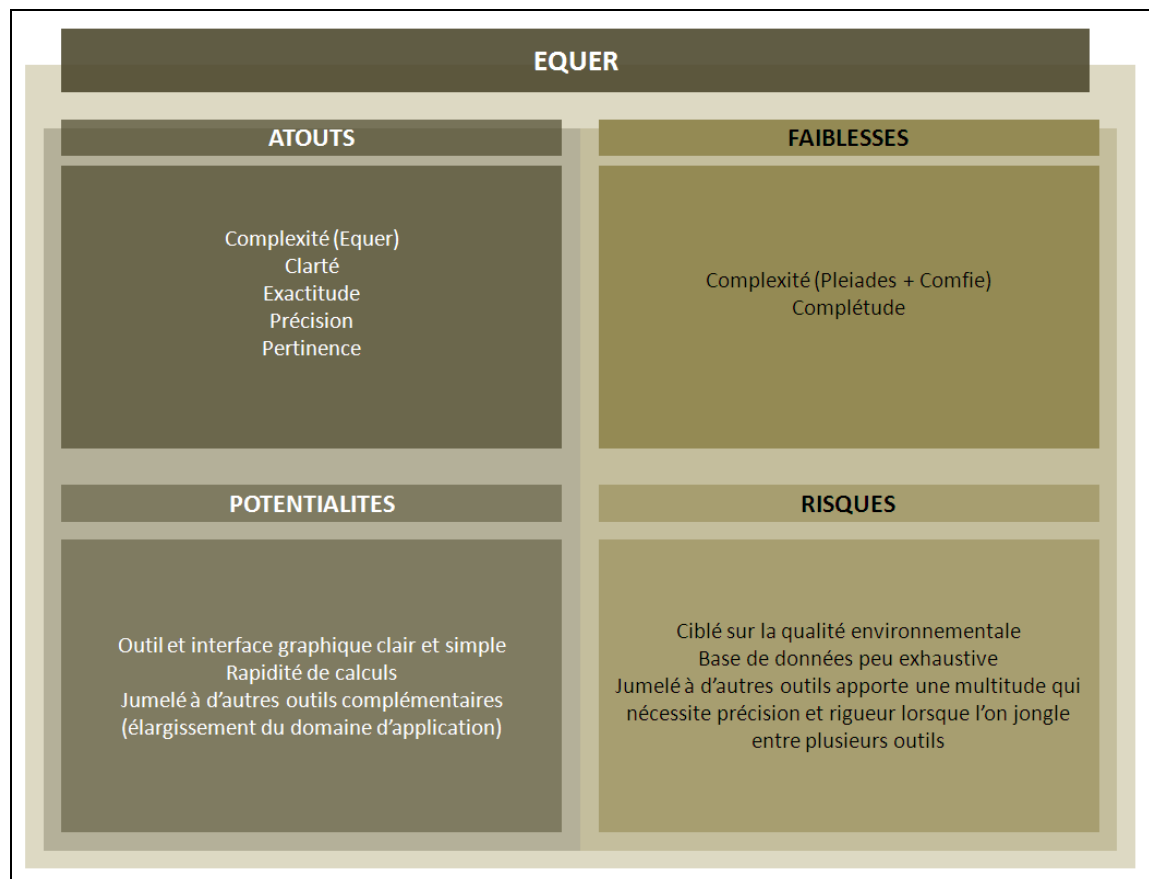


Figure 36 : Récapitulatif des atouts – faiblesses – potentialités – risques de l'outil Equer

Ecotect

Présentation

L'outil Ecotect est un logiciel qui aborde les 3 approches techniques relevées : l'approche constructive, environnementale et énergétique (cf. figure 37).

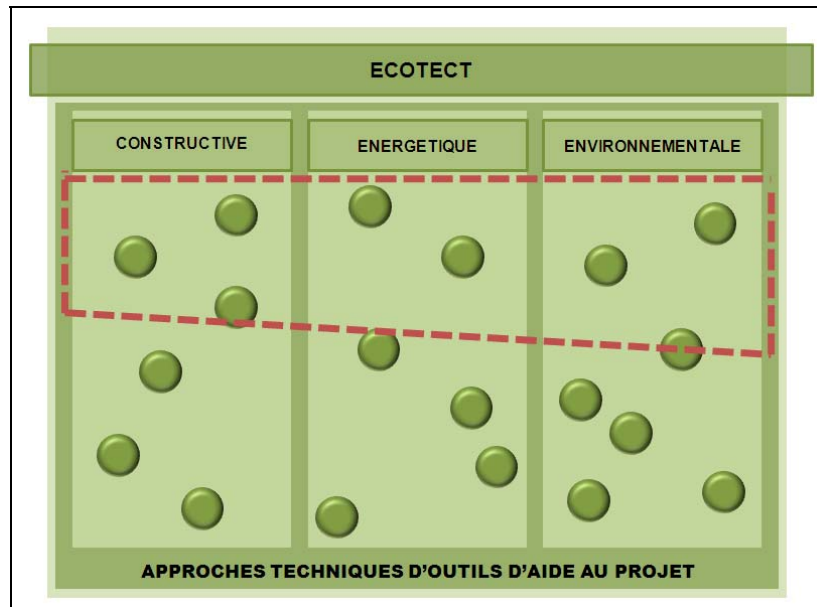


Figure 37 : Type d'approche de l'outil ECOTECT

Remarque : (la position en abscisse et ordonnée n'a aucune signification)

Ecotect, *Building Performance Modeling*, est un outil d'analyse solaire, thermique, acoustique et économique développé par Andrew Marsh pour des architectes. Sa particularité est l'association d'un modèleur 3D avec diverses analyses : solaires, thermiques, acoustiques, de coût. Le principe à la base de cet outil est que : « *la conception environnementale la plus efficace est à valider pendant les étapes conceptuelles du projet* » (ECOTECT).

Ecotect analyse et évalue différents domaines : l'analyse solaire (éblouissement à l'intérieur d'une pièce, les ombres sur les façades, les ombres de l'environnement alentour, conception de protection solaire), la conception de l'éclairage (calcul de l'éclairage intérieur naturel, éclairage artificiel), performances thermiques, acoustiques et coût et impacts sur l'environnement (coût des matériaux et émissions des gaz à effet de serre des composants).

Résultats

Les faiblesses de l'outil concernent principalement le temps nécessaire à l'intégration du projet dans l'outil. Ecotect permet d'importer des fichiers DXF (Autocad) pour l'importation d'objet. Seule la géométrie 2D est reconnue dans l'outil. L'utilisateur doit par la suite modéliser en 3D l'ensemble de son projet. Il doit également définir un ensemble de zones en fonction de l'étude menée : zone thermique, zone acoustique etc. qui peut varier selon la thématique abordée. Les données d'entrées sont fastidieuses à mettre en place. Elles nécessitent d'y accorder un temps non négligeable.

L'outil a pour objectif d'être utilisé dans les premières phases du processus de conception. Au vu des données à intégrer, il nous semble illusoire de pouvoir utiliser cet outil dès la phase esquisse. L'emploi d'Ecotect demande du temps. Ce n'est pas en adéquation avec les pratiques et les modes de fonctionnement des concepteurs en phase amont du processus. Il nous semble également indispensable de suivre une formation afin d'utiliser correctement cet outil (cf. figure 38).

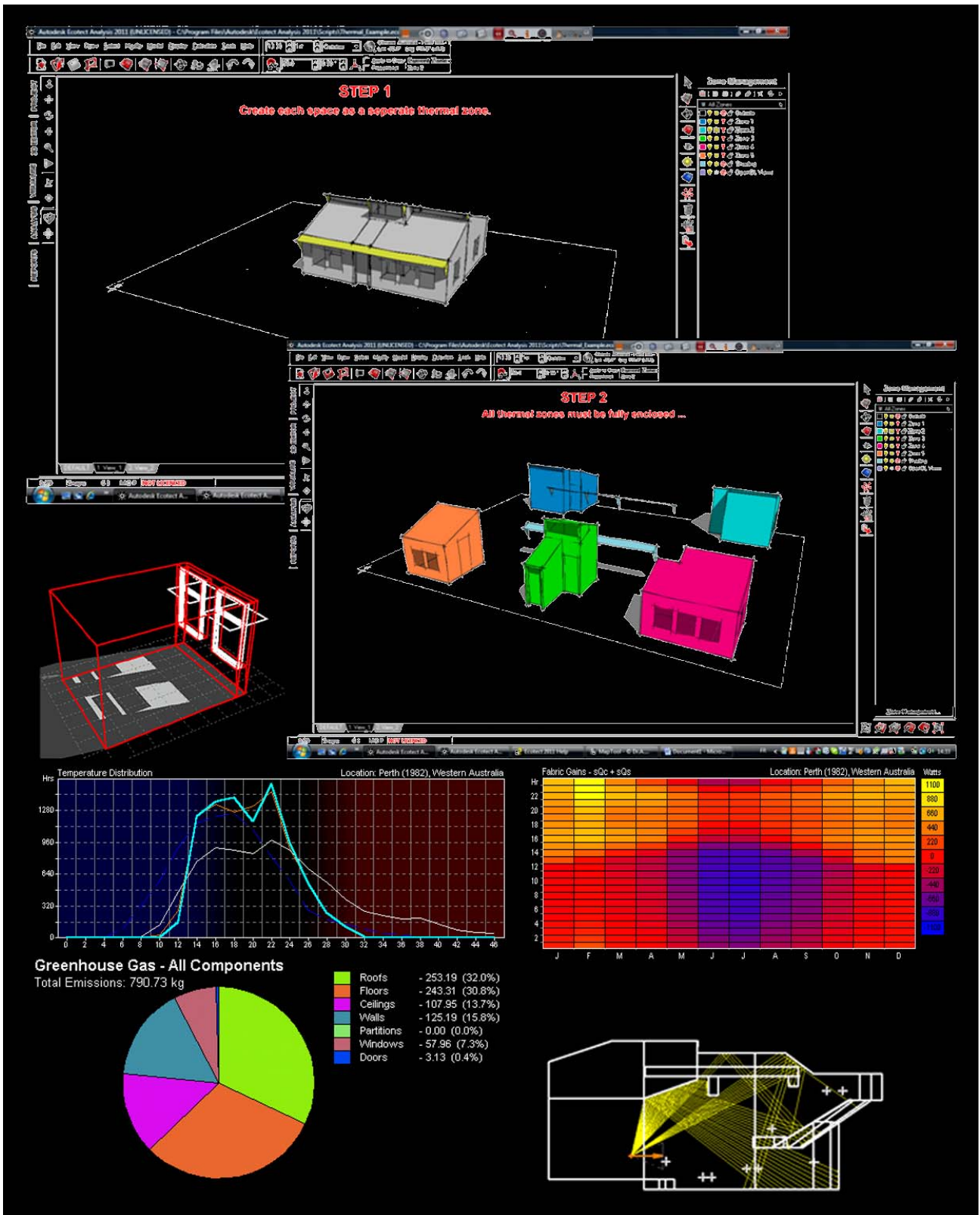


Figure 38 : Impressions écrans de l'outil Ecotect (manuel, démonstration, aide)

Les atouts principaux d'Ecotect sont :

- l'interface de l'outil. Sa similitude avec les outils de dessins informatiques utilisés par les concepteurs en architecture, lui confère une utilisation plus aisée,
- l'approche plus globale de l'outil qui propose différents domaines d'études,
- l'expression graphique et visuelle des résultats.

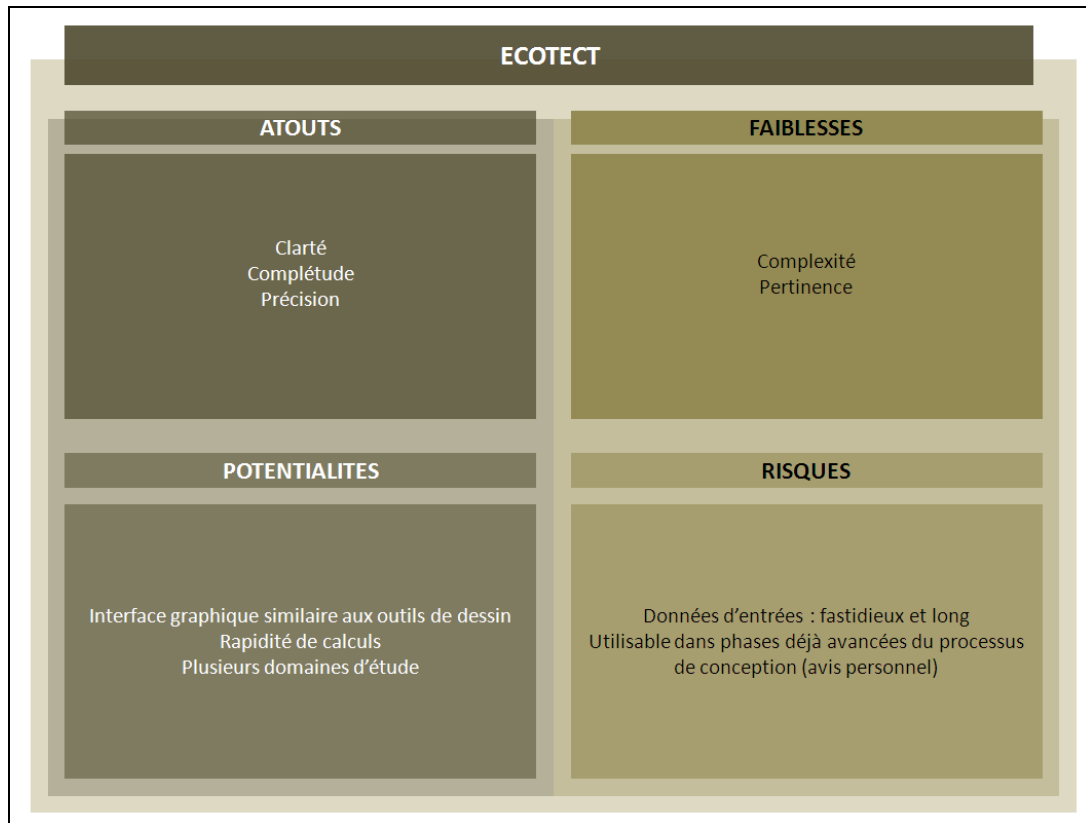


Figure 39 : Récapitulatif des atouts – faiblesses – potentialités - risques de l'outil Ecotect

DIAL-Europe

Présentation

L'outil DIAL-Europe est un logiciel s'articulant à partir d'une approche unique : l'approche énergétique (cf. figure 40).

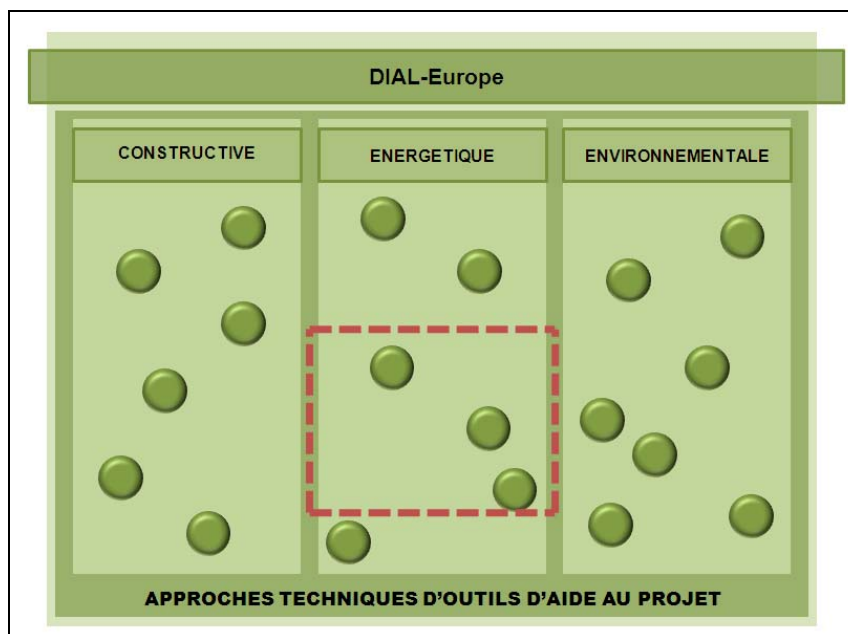


Figure 40 : Type d'approche de l'outil DIAL-Europe
Remarque : (la position en abscisse et ordonnée n'a aucune signification)

DIAL-Europe a été créé par Bernard Paule (Estia). Il permet d'optimiser la lumière naturelle dans les bâtiments. Cet outil calcule dès les phases initiales du processus de conception, les facteurs de lumière du jour sur le plan de travail. Il estime l'autonomie en éclairage naturel. Il évalue les risques de surchauffes. Il pré-dimensionne l'éclairage artificiel d'un local. Le tout est articulé autour de projets référents auxquels l'utilisateur peut faire appel.

Résultats

DIAL-Europe est un outil d'aide à la conception réellement pertinent et utilisable dès les toutes premières phases du processus de conception. Il bénéficie d'une interface ludique, claire, simple et très intuitive basée sur l'utilisation de données graphiques et linguistiques (cf. figure 41).

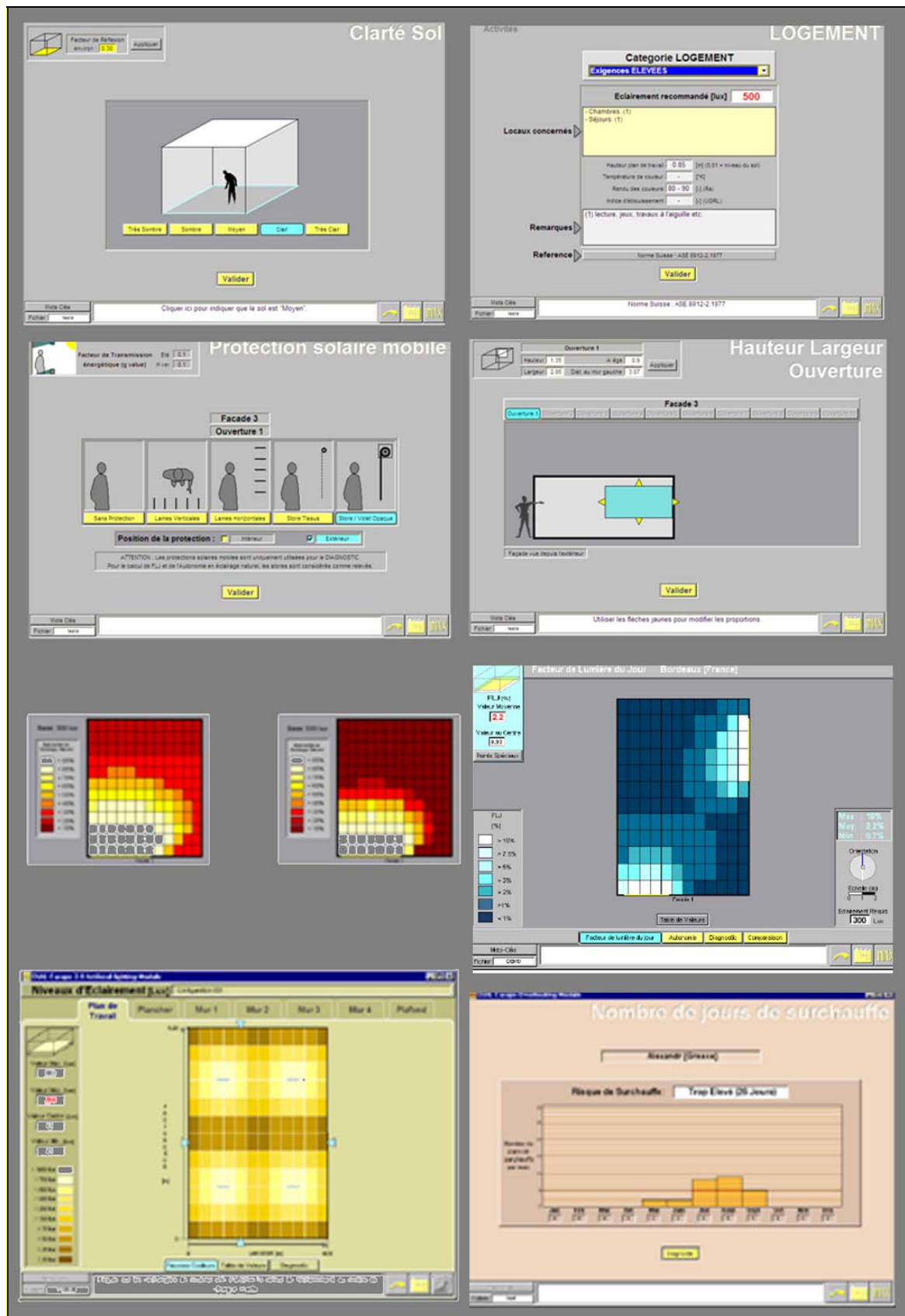


Figure 41 : Impressions écran de l'outil Dial-Europe

Il est facile d'accès, d'utilisation et de compréhension. Les résultats graphiques sont clairs et intelligibles. Les connaissances auxquelles l'outil fait appel sont explicitées et simplifiées afin d'être accessibles à tous. L'exécution : intégration des paramètres d'entrées et calculs des divers résultats, est rapide. Elle n'empiète pas sur le temps de conception déjà trop court en architecture.

Nous regrettons qu'il ne soit pas possible de comparer différentes variantes de solutions simultanément.

Les avantages relevés dans cet outil nous permettent de penser que DIAL-Europe est une référence dans le domaine des outils d'aide à la conception.

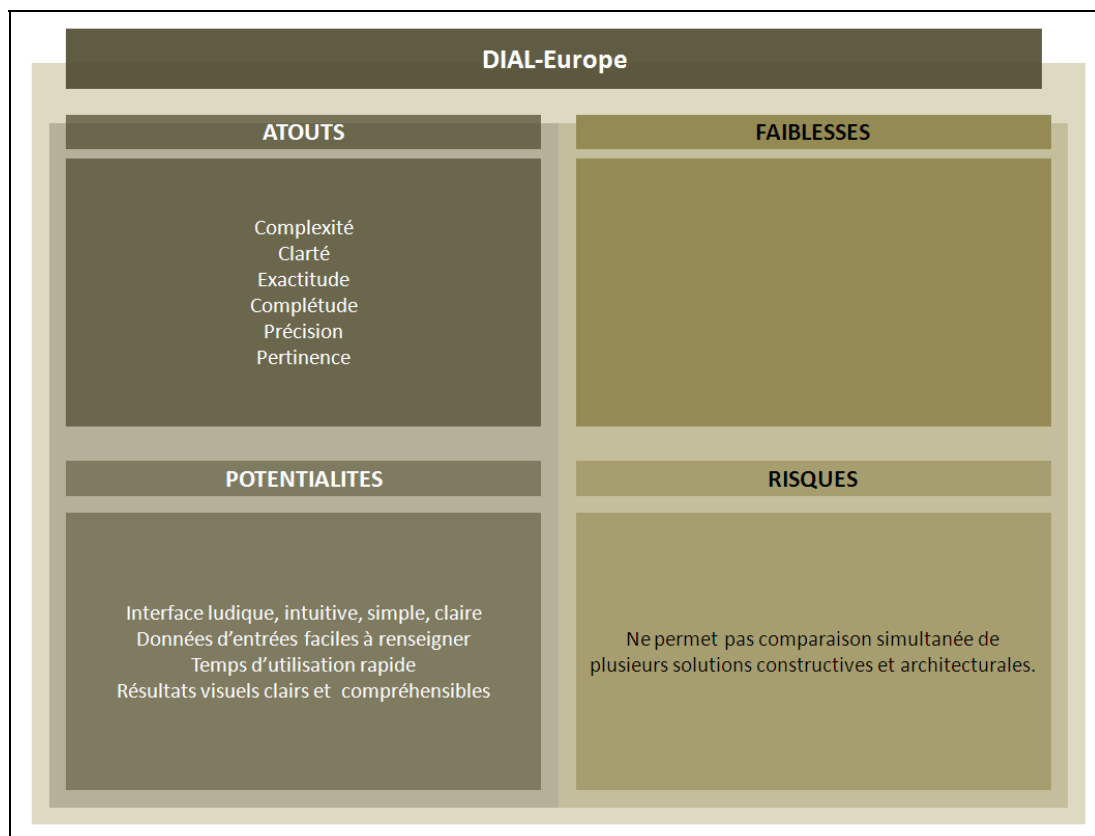


Figure 42 : Récapitulatif des atouts – faiblesses – potentialités – risques de l'outil DIAL-Europe

4.4.3. Conclusion et limites de cette étude

L'analyse de ces 5 outils nous a permis de dégager des orientations et pistes concernant l'importance de l'interface graphique pour de futurs outils d'aide à la conception simplifiés.

Afin de rester dans une logique de continuité avec notre analyse, nous détaillons les orientations mises en avant pour chacun des critères étudiés dans le tableau ci-dessous (cf. figure 43).

RESULTAT de l'ANALYSE des INTERFACES d'OUTILS EXISTANTS	
COMPLEXITE	Interface graphique claire Mise en œuvre facile : fonction mode de raisonnement des concepteurs (dispositifs) Eviter multitude de « fenêtres »
CLARTE	Icône associé à un mot pour faciliter compréhension Outil épuré : absence de boutons inutiles et redondants Interface ludique Hiérarchisation des données et résultats
EXACTITUDE	Mentionner clairement données manquantes Détailler calculs mis en place (manuel) Respecter règles linguistiques
COMPLETUDE	Vision globale des critères pris en compte concernant les matériaux Base de données fiable et exhaustive Rapidité de calcul
PRECISION	Définition des termes employés pour une meilleure compréhension Précision dans les dessins iconographiques employés
PERTINENCE	Cibler les formes d'expression de résultats en fonction de l'utilisateur Possibilité de comparer différentes solutions Permettre une vue globale du projet
RESPECT / NORMES	Etre en adéquation avec les règles implicites et explicites pour la construction de bâtiments

Figure 43 : Tableau récapitulatif des résultats pour chacun des critères analysés

L'importance de l'interface graphique d'un outil est capitale afin que les concepteurs adhèrent et cernent les apports de ce dernier. Il est donc indispensable, dans l'élaboration de futurs outils simplifiés, de ne pas négliger cette dimension. Simplifier l'interface

graphique, proposer un outil épuré et clair participera à sa bonne compréhension et par conséquent à son utilisation et à l'adhésion de futurs utilisateurs.

Cette étude reste subjective car centrée sur notre propre point de vue. Afin d'être entièrement validée, il aurait été souhaitable de mettre en place une enquête auprès d'utilisateurs afin de confirmer nos hypothèses, remarques et observations.

Conclusion de la partie 1

Nous concluons en récapitulant différentes pistes pour le développement d'outils sur la qualité environnementale des matériaux. Ces pistes découlent de l'état de l'art que nous avons synthétisé sous la forme de trois champs d'études (1. Etat des connaissances et savoir-faire relatifs au choix des matériaux, 2. Processus de projet en architecture, 3. Transposition des savoirs : les outils d'aide à la conception) et des divers travaux menés.

Nous reprenons dans cette proposition les avantages des outils existants tout en améliorant leurs limites évoquées précédemment. Nous proposons les pistes suivantes :

- Un objectif : aiguiller efficacement les concepteurs dès l'esquisse

Il nous semble primordial de viser la phase de l'esquisse pour l'élaboration de futurs outils afin que les choix des concepteurs gagnent en efficacité. Cela permettrait de rester sur des solutions plus faciles à optimiser aux phases ultérieures du processus de projet.

Plus nous avançons dans le processus de conception, plus la quantité d'informations à notre disposition est grande. Nous avons ainsi des données pour simuler la performance. Cependant, au fur et à mesure que nous cheminons dans ce processus nous nous éloignons des décisions importantes (Jaffal et al., 2009).

La plus-value potentielle des outils d'aide à la conception se situe donc en phase esquisse, au moment où nous avons peu d'informations en notre possession mais au cours de laquelle certaines décisions sont prises.

- Evolution de la nature des conditions d'entrées demandées

Comme remarqué précédemment, nous restons à ce jour sur des savoirs et outils qui amènent à sanctionner ou valider une proposition architecturale relativement aboutie.

Les données à renseigner pour faire fonctionner les outils sont des quantités précises de poids ou de volumes de matériaux. Cela exige d'aborder une phase déjà détaillée de la conception des projets. Pour des raisons de coût des études de conception, il s'agit bien souvent de phases trop avancées pour revenir sur le parti architectural arrêté en phase d'esquisse.

Dans cette logique à aiguiller plus efficacement le choix des concepteurs, il semblerait intéressant de constituer des outils avec lesquels l'on puisse choisir des types de dispositifs architecturaux : fondations, structures, cloisons, enveloppe, ouvertures, toitures pour l'enveloppe du projet (modélisation 3D simplifiée). L'idée serait alors de comparer les impacts de différents choix dès le démarrage de l'esquisse, c'est-à-dire sans obliger à entrer dans le moindre détail constructif. La conception des projets se baserait ainsi sur des choix plus faciles à optimiser aux phases ultérieures du processus de projet.

- Aider à dégager une vision globale du projet

En phase de conception, les maîtres d'œuvre abordent la question des matériaux en combinant à la fois leurs aspects constructifs, environnementaux, esthétiques, économiques, énergétiques et normatifs.

Pour ne pas complexifier davantage les démarches des concepteurs et simplifier les échanges entre eux, il est intéressant de réduire le nombre de finalités architecturales et environnementales attenantes aux matériaux et dispositifs de construction.

Cette réduction de finalités doit en même temps permettre de cerner l'ensemble des critères propres à la qualité environnementale des matériaux retenus.

- Faciliter la compréhension et l'apprentissage des non experts

Outre la structuration des critères qui représentent la qualité environnementale de matériaux choisis, il est important de faciliter la compréhension et l'apprentissage des non-experts.

Dans cette logique, il serait intéressant de décomposer les différentes connaissances et savoirs. Cette décomposition permettrait d'aider les concepteurs dans leur apprentissage de l'impact environnemental des matériaux.

- Rassembler les données concernant les matériaux et plus particulièrement les données environnementales

Nous soulignons une question essentielle des outils sur la qualité environnementale des matériaux : la production d'une base de données homogène et fiable.

Certaines données sont évaluées à partir de protocoles réglementés. D'autres découlent d'essais expérimentaux. Un grand nombre de ces études est obligatoirement réalisé par un tiers (expert). A l'inverse, nous avons accès à des données auto-déclaratives (FDES) qui

paraissent, malgré un protocole défini, moins fiables que dans le cas d'analyse par une personne extérieure. Enfin, certaines familles de matériaux sont très peu étudiées. En opposition, les matériaux en vogue sont étudiés sous toutes leurs coutures.

Il est donc difficile de recueillir l'ensemble des données relatives à la multitude de matériaux présents sur le marché. Il est également délicat de se tenir à jour des diverses évolutions.

- Proposer une interface graphique simple, claire, lisible

L'interface graphique se doit d'avoir certaines qualités. Elle participe pleinement à l'adhésion du concepteur envers l'outil d'aide à la conception envisagé. Il est nécessaire de proposer un visuel clair, lisible, épuré, indiquant les différents points abordés ainsi que la signification de chaque élément présent dans l'outil.

Problématique et postulats de départ : hypothèses de travail

L'étude des différents champs attenants à notre thématique de recherche nous a permis de mettre en place une orientation scientifique de notre état de l'art. De la sorte, nous avons progressivement avancé des éléments pour la mise en place de notre problématique de recherche.

Dans ce contexte, la problématique de notre travail porte sur

l'évaluation du caractère opérationnel des outils d'aide à la conception existants au regard du processus de conception architecturale, ainsi que l'intérêt d'innovations que nous proposerions.

Pour résumer, nous dressons un argumentaire qui justifie la mise au jour de connaissances nouvelles et / ou de savoir-faire innovants destinés aux acteurs du processus de conception architecturale, urbaine et paysagère.

Nous avons caractérisé globalement les connaissances et outils actuellement existants sur la qualité environnementale des matériaux à travers trois questionnements pragmatiques.

Nos hypothèses de travail sont :

1. A quelle(s) phase(s) du processus de conception les connaissances et outils actuels sur les matériaux se destinent-ils ?

La majorité des connaissances et outils actuels permettent de constater des caractéristiques environnementales des matériaux retenus à une phase où il est généralement trop tard pour revenir sur les choix initiaux de programmation, puis du parti conceptuel et de sa traduction en phase esquisse.

2. Quels champs d'études sur la qualité environnementale des matériaux sont, à ce jour, les plus opérationnels en situation de projet ?

Les connaissances et outils actuels sur la qualité environnementale des matériaux sont principalement axés sur l’empreinte énergétique ou le bilan carbone. Ces champs d’études sont importants du point de vue de l’écologie, mais paraissent souvent anecdotiques aux yeux des concepteurs de projets architecturaux lorsqu’ils en arrivent à choisir des matériaux et leurs procédés de mise en œuvre.

3. Quels niveaux d’expertises nécessitent les connaissances et outils actuels ?

Les connaissances et outils actuels sur la qualité environnementale des matériaux exigent, dans la majorité des cas, des niveaux d’expertises particulièrement pointus. Les professionnels de la qualité environnementale des villes et des bâtiments semblent, pour le moment, relativement dépourvus ; seules quelques personnes spécialisées spécifiquement sur les matériaux proposent leur expertise.

La mise au jour d’outils d’aide à la conception simplifiée qui informent globalement sur différents champs d’études explicites et relatifs à la qualité environnementale des matériaux utilisables par un public non initié est une évolution importante dans le domaine de l’architecture. Il est essentiel de les rendre accessibles aux multiples acteurs des projets, en proposant une aide, dès les premières phases de conception.

PARTIE 2 : « QUESTIONNER, RECOLTER, ANALYSER » : l'enquête

« L'entretien est rencontre. S'entretenir avec quelqu'un est, davantage encore que questionner, une expérience, un événement singulier, que l'on peut maîtriser, coder, standardiser, professionnaliser, gérer, refroidir à souhait, mais qui comporte toujours un certain nombre d'inconnues (et donc de risques) inhérentes au fait qu'il s'agit d'un processus interlocutoire, et non pas simplement d'un prélèvement d'information. »

Blanchet A. et Gotman A.,
« L'enquête et ses méthodes : l'entretien »

Résumé :

Nous présentons le protocole d'enquête mis en place afin de valider ou d'invalider nos hypothèses de départ. La méthode de travail retenue consiste en des entretiens semi-directifs auprès de concepteurs et de personnes expertes dans un domaine lié à l'architecture.

Introduction de la partie 2

« L'entretien de recherche est conçu pour apporter une information de la part de l'enquêté, suite à l'initiative de l'enquêteur au bénéfice de la recherche » (Blanchet et Gotman, 2001)

Dans la perspective d'évaluer le caractère opérationnel des outils d'aide à la conception dans le processus de conception concernant les questions relatives au choix des matériaux, notre travail consiste tout d'abord à comprendre les pratiques des concepteurs ainsi que le rôle des outils d'aide au projet.

La question du choix des matériaux dans le projet architectural est importante. Ils sont ce que l'on voit du projet. Ils participent à ce que l'utilisateur ressent et perçoit du bâtiment. Ce sujet étant jusqu'à présent peu étudié du point de vue des concepteurs, un grand nombre d'interrogations se pose à nous. Nous souhaitons donc comprendre à travers cette étude, comment les concepteurs intègrent, dans leur projet architectural et urbain, le choix des matériaux (thématique 1 de notre enquête).

Les démarches environnementales s'accompagnent de plus en plus d'approches et de méthodes d'aide à la conception. Nous pouvons citer pêle-mêle et sans regard exhaustif, les propositions d'outils d'aide à la décision multicritères (méthodes d'agrégation, méthode Electre, méthode de décision coopérative), d'outils de simulation des phénomènes physiques (Radiance, TRNSYS, ...), d'outils pour faciliter les échanges de données entre acteurs, d'estimation de coût global, etc. Ces savoir-faire techniques s'avèrent peu exploités dans les projets architecturaux. Ils restent souvent du ressort de l'enseignement supérieur, de la recherche et d'activité d'expertise (assistance à maîtrise d'ouvrage / d'œuvre et bureaux d'étude). Nous souhaitons comprendre à travers cette enquête pourquoi les concepteurs n'utilisent pas davantage les outils d'aide à la conception ainsi que le rôle de ces outils dans le processus de projet (thématique 2 de notre enquête).

Cette partie a pour objectif de présenter l'enquête n°1 mise en place dans notre travail de recherche.

Nous présentons dans le chapitre 5, les principales méthodes d'enquêtes existantes afin de cerner leurs avantages et limites. Ainsi, nous réalisons un choix réfléchi quant à la

méthode retenue pour répondre aux objectifs de notre enquête. Nous détaillons ensuite l'enquête mise en place afin de vérifier nos hypothèses de départ.

Nous exposons dans le chapitre 6, les résultats obtenus pour chacune des thématiques étudiées. Ces résultats sont par la suite, mis en regard avec les trois hypothèses de travail / postulats de notre recherche.

Enfin, nous concluons cette partie en rappelant l'intérêt de cette enquête. Nous énumérons différentes réflexions qui ressortent de nos entretiens.

5. Les méthodes d'enquêtes

5.1. Introduction : positionnement de notre travail de recherche

La mise en place d'une orientation scientifique de notre état de l'art nous a permis de dégager trois questionnements qui sont à la base de notre problématique de recherche. Nous avons caractérisé globalement les connaissances et outils existants sur la qualité environnementale des matériaux, à travers différentes interrogations pragmatiques au regard de la réalisation des projets architecturaux et urbains. Ainsi, nous avons dressé un argumentaire qui justifie notre mise au jour de connaissances nouvelles et/ou de savoir-faire innovants destinés aux acteurs du processus de conception architecturale.

Pour chacun des postulats, nous avons identifié une tendance générale qui est le résultat de l'état de l'art mis en place (cf. conclusion de la partie 1).

Cette enquête a pour principal objectif de valider ou d'invalider nos postulats de départ, à savoir :

- la majorité des connaissances et outils actuels traitant de la question des matériaux sont utilisés à une phase trop tardive dans le processus de conception pour revenir sur les choix initiaux.
- les champs d'études concernant la problématique des matériaux et procédés de mise en œuvre sont importants du point de vue de l'écologie, mais semblent dérisoires pour une majorité de concepteurs de projets architecturaux et urbains.
- les connaissances et outils actuels sur la qualité environnementale des matériaux demandent très souvent des niveaux d'expertise particulièrement pointus.

Nous nous basons donc sur ces hypothèses, découlant de nos questionnements, pour mettre en place notre enquête.

5.2. Les méthodes d'enquêtes : réflexion sur la stratégie du protocole d'enquête à mener « de l'entretien au questionnaire fermé »

Nous développons dans ce paragraphe, les différentes méthodes d'enquêtes existantes ainsi que le protocole mis en place pour répondre à nos objectifs de recherche.

L'objectif principal d'une enquête est d'expliquer et de comprendre un fait. Elle permet à l'enquêteur de s'imprégner du milieu étudié en croisant divers discours qui illustrent les pratiques et les visions réelles des hypothèses étudiées.

Il est fondamental, afin de réaliser une enquête satisfaisante, de définir un champ d'étude précis qui induira des questionnements clairs, un panel de personnes à solliciter (échantillon / témoins) ainsi que des sources documentaires à explorer.

Les méthodes d'enquêtes existantes sont nombreuses et variées. En ce qui nous concerne, elles dépendent principalement de l'objectif général de notre recherche. Il n'existe pas de méthode unique pour recueillir de l'information. Cependant au vu de notre réflexion sur la stratégie du protocole d'enquête à mener, nous développons uniquement dans ce chapitre les différents types d'entretiens et de questionnaires possibles.

5.2.1. L'enquête par entretien

Dans le travail de recherche, l'enquête par entretien peut avoir différents objectifs :

- précéder une enquête par questionnaire en explorant la thématique étudiée ;
- analyser un fait pour devenir par la suite la source d'information principale ;
- alimenter une enquête déjà réalisée en restituant les données obtenues dans leur contexte.

et s'applique selon différents axes de recherche (Blanchet et Gotman, 2001) :

- enquête sur les représentations : ce type d'enquête interroge sur « *les modes de pensées qui supposent la production d'un discours à domination modale* ». Dans ce cas, nous nous intéressons à la conception et aux raisonnements de l'enquêté.
- enquête sur les pratiques : ce type d'enquête cherche à obtenir des informations sur ce qui est éprouvé / ressenti par l'enquêté. Nous recherchons des descriptions de faits. Le discours obtenu est donc à dominante référentielle.
- enquête sur les pratiques et les représentations : ce type d'enquête, à la limite entre les enquêtes sur les représentations et celles sur les pratiques mentionnées ci-dessus, s'intéresse autant à la conception et aux modes de raisonnement de l'enquêté qu'aux descriptions des pratiques utilisées. Nous obtenons à partir de cette méthode des discours à la fois modaux et référentiels.

Dans ce contexte, les types d'entretiens réalisés peuvent être de deux ordres : les entretiens libres et les entretiens semi-directifs ou guidés.

Les entretiens libres

Les entretiens libres s'articulent autour d'un thème principal afin de favoriser l'exploration de la pensée. L'enquêté laisse libre cours à ses idées à partir du moment où elles sont en lien avec la thématique étudiée. La méthode consiste à poser une question la plus générale possible sur un thème, puis laisser l'enquêté parler sur ce sujet. Dans le cas où la personne interrogée reste dépourvue de commentaire, l'enquêteur peut relancer le sujet en reformulant la question initiale. Il est important de laisser libre cours au discours de l'enquêté et d'éviter de lui couper la parole.

Le principal axe de recherche se situe au niveau des enquêtes sur les pratiques et les représentations.

Les entretiens semi-directifs ou guidés

Les entretiens semi-directifs ont la particularité de s'organiser autour de zones d'exploration fixées à l'avance afin de guider l'enquêté et d'approfondir différents thèmes sur des points précis. Ce type d'enquête impose, afin de n'omettre aucune information sur la thématique étudiée, de mettre en place une grille d'entretien qui restitue point par point les différents sujets à aborder concernant la thématique initiale. Cette méthode peut se rapprocher davantage de la discussion que les entretiens libres. Toutefois, il est essentiel et fondamental de ne pas influencer les propos recueillis par son propre point de vue concernant le sujet d'étude.

Le principal axe de recherche se situe au niveau des enquêtes sur les pratiques.

5.2.2. L'enquête par questionnaire

Ce type d'enquête formule des questionnements qui visent à recueillir des réponses précises sur la thématique étudiée. L'enquête par questionnaire exige que l'on sache précisément quelles questions poser, comment les poser, et que chaque question s'intéresse à un point précis du champ d'étude enquêté.

Il existe deux types de questions : les questions ouvertes qui permettent une réponse libre à donner à partir de son propre vocabulaire et les questions fermées qui imposent de choisir entre différentes réponses proposées par l'enquêteur.

Les questions ouvertes

Les questions ouvertes ont pour but de recueillir des réponses verbales de type phrases ou discours. Elles se doivent de laisser l'enquêté répondre avec ses propres mots sans influencer une réponse. L'enquêteur n'impose aucune catégorie, mot, terme, expression à formuler dans les réponses attendues.

Les questions fermées

Les questions fermées évaluent les réponses obtenues au travers de mots, notes, échelles de valeur, appréciations, proposés par l'enquêté. Le type de réponse peut être de différents ordres : réponses oui/non ; choix de réponse entre plusieurs réponses possibles mentionnées (questions à réponse unique), choix de plusieurs réponses mentionnées (questions à choix multiples), questions d'opinions : que pensent-ils ?, échelles unidimensionnelles : sous forme de choix d'une réponse sur une échelle graduée ou des échelles bipolaires : satisfait/mécontent/faux/vrai, classement ou préférences, choix forcés.

Dans ce type d'enquête, ordre et contenu des réponses sont établis de manière précise et un objectif de représentativité de l'échantillon établi doit être respecté afin d'obtenir des données significatives.

5.2.3. Conclusion

L'intérêt de cette première enquête est de recueillir des discours qui qualifient la pratique des concepteurs concernant les questions relatives au choix des matériaux ainsi que le rôle des outils d'aide à la conception dans le processus de projet architectural. Nous nous situons dans l'axe de recherche sur les pratiques. Par conséquent, nous nous tournons vers les enquêtes réalisées à partir d'entretiens semi-directifs. Elles nous permettent de comprendre des comportements.

Une fois le prototype d'outil d'aide à la conception mis en place, nous évaluerons les innovations proposées en matière d'outils d'aide à la conception en réalisant une enquête à partir d'un questionnaire composé principalement de questions fermées.

5.3. L'enquête mise en place : méthode de travail à partir d'entretiens semi-directifs

Cette enquête a pour objectif, nous le rappelons, de valider ou d'invalidier nos questionnements de départ. Nous avons donc choisi de mettre en place une enquête par entretien semi-directif afin d'obtenir un discours linéaire sur notre thématique de recherche et d'aborder ainsi la réalité de la situation sans influencer le propos des personnes interrogées.

5.3.1. Thème de recherche et échantillon

Thème de recherche

Notre thème de recherche principal concerne l'intégration des matériaux et des outils d'aide au projet dans le processus de conception architecturale. Au vu des lectures et des discussions réalisées autour de ce sujet, il est apparu que notre sujet de recherche est composé de deux thématiques distinctes :

- L'intégration des matériaux et procédés de mise en œuvre dans le processus architectural et urbain. (thématique 1)
- Le rôle et la pratique des outils d'aide à la conception dans le processus de projet architectural et urbain par les acteurs du bâtiment. (thématique 2)

Ces deux thématiques n'interrogent pas le même profil de personnes. C'est pourquoi, nous avons choisi d'interviewer, respectivement pour chacune des thématiques, des concepteurs et des personnes expertes dans un domaine particulier lié à l'architecture.

Echantillon

L'échantillon retenu se veut le plus représentatif possible mais reste restreint au vu du temps imparti. Il est composé de 22 personnes. Douze concepteurs : 6 intégrant une démarche environnementale et 6 autres travaillant selon une démarche traditionnelle / classique, sont interrogés sur la thématique n°1. Dix personnes expertes dans un domaine particulier lié à l'architecture (bureaux d'étude, AMO Assistant à Maîtrise d'Ouvrage ou d'œuvre, médecin spécialiste : bâti et santé) sont interviewées sur la thématique n°2. Une personne ayant le double profil ainsi qu'une expérience dans chacune des professions a été comptabilisée dans les deux thématiques.

Ce découpage, en fonction des thématiques étudiées, nous permet de cibler les questions en relation avec le profil de l'enquêté, d'éviter les redondances et d'obtenir ainsi des entretiens riches des expériences de chacun.

5.3.2. La grille d'entretien

Nous avons mis en place une grille d'entretien afin de décomposer l'objectif général en différentes questions limitées à un objectif spécifique (cf. Annexe 6 : "*Grille d'entretien détaillé de l'enquête n°1*").

La grille d'entretien ainsi créée est réalisée autour des deux thématiques que nous abordons dans nos questionnements.

Elle se compose de la manière suivante (cf. figure 44) :

- un tronc commun aux deux thématiques qui traite du parcours professionnel de l'enquêté, ainsi que de son point de vue concernant d'une part la démarche environnementale dans le projet architectural, et d'autre part l'intérêt de notre démarche à savoir la proposition d'innovations concernant des outils d'aide à la conception renseignant sur les questions relatives aux choix des matériaux et procédés de mise en œuvre.
- la thématique n°1 s'interroge sur la pratique des concepteurs dans le processus architectural à travers la question des matériaux et procédés de mise en œuvre.
- la thématique n°2 questionne le rôle d'outils d'aide à la conception dans le processus de conception architecturale.

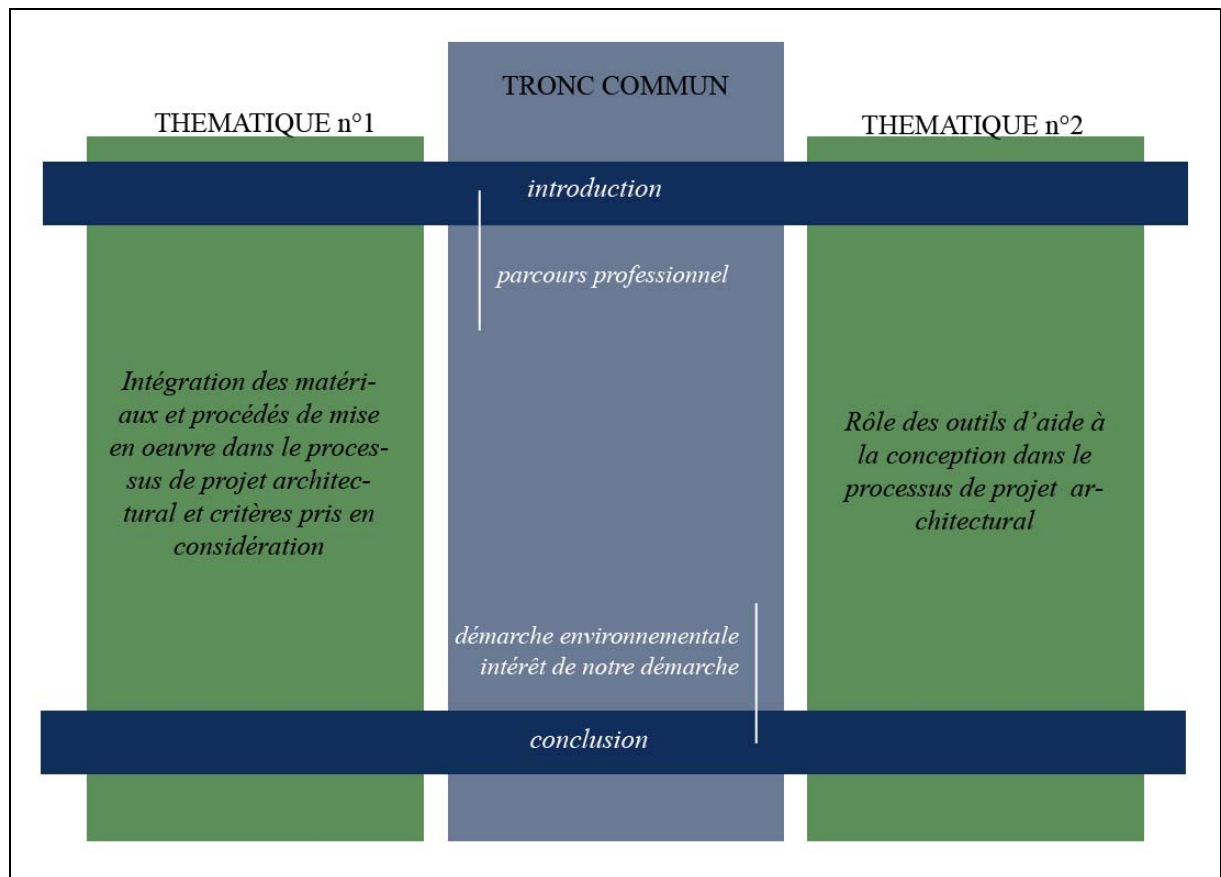


Figure 44 : Principe de la grille d'entretien

Pour chacune des thématiques de la grille, différents points sont abordés afin de n'omettre aucune donnée concernant nos questionnements. Nous avons élaboré une grille d'entretiens sous forme d'un tableau récapitulatif qui nous a servi de trame lors des différents entretiens (cf. Annexe 7 : "*Grille d'entretien de l'enquête n°1*"). L'intérêt de la grille d'entretien est de nous permettre d'analyser les discours à partir de bases identiques.

Thématique n°1

La thématique n°1 s'intéresse aux diverses pratiques des concepteurs concernant les questions relatives au choix des matériaux dans le projet architectural. Nous nous interrogeons sur divers points que nous avons organisés en deux parties : les approches des concepteurs (pratiques) et les critères pris en considération concernant les matériaux.

La sous-thématique intitulée "Pratiques et matériaux" dans notre grille d'entretien questionne divers points :

- l'approche mise en place : intégration des questions de choix de matériaux dans le processus de projet, phases d'intégration, types de raisonnement...
- les acteurs concernés par ces questions à travers la communication, les échanges, le transfert de données....

La sous-thématique « Critères des matériaux » s'intéresse quant à elle aux types de critères pris en compte lors du choix des matériaux dans le processus de projet. Divers questionnements sont ressortis :

- Y a-t-il un critère primordial notamment l'aspect financier par rapport à l'aspect esthétique ?
- L'accès aux diverses données sur les matériaux à travers la compréhension des données, leur exhaustivité, leur fiabilité,...

Thématique n°2

La thématique n°2 s'intéresse au rôle des outils d'aide à la conception dans le processus de conception. Nous nous interrogeons sur différents points que nous avons organisés en deux parties :

- les pratiques concernant les outils d'aide à la conception qui questionnent les modes de travail des personnes interviewées : fréquence, temps d'utilisation nécessaire, niveau d'expertise,....
- la relation entre l'outil d'aide à la conception et le projet architectural : les phases d'intégration des outils, la compréhension des résultats obtenus, les critères pris en compte concernant les matériaux, l'impact sur l'orientation des décisions,

5.3.3. Déroulement d'un entretien : de la prise de contact à l'analyse des discours

La prise de contact s'est faite par courriel afin d'avoir le consentement de chaque enquêté. Un premier contact téléphonique nous a, par la suite, permis de nous présenter et de détailler notre démarche ainsi que les thématiques abordées au cours de l'entretien. Enfin, selon la situation géographique de la personne interrogée, l'entretien s'est déroulé soit au cours d'un rendez-vous dans les locaux professionnels de l'enquêté, soit dans un lieu public défini, soit par téléphone.

Conduite des entretiens

Le nombre limité d'entretiens nous a permis de consacrer du temps à chaque personne participante. Chaque entretien dépendait des dispositions de l'enquêté. Globalement, la durée d'un entretien varie entre une et deux heures. Ils sont entièrement enregistrés et retranscrits avec précision. Une description rigoureuse de la situation d'entretien, la connaissance de données objectives concernant les interviewés ainsi qu'une transcription exacte des discours nous a permis de travailler les propos recueillis de manière approfondie et de les analyser comme des cas.

Analyse des discours

L'analyse des discours consiste à confronter nos hypothèses de départ aux faits. Pour cela, nous sélectionnons dans les propos recueillis les données qui pourront être confrontées à nos questionnements.

Comme l'explique Alain Blanchet (2001), il existe quatre principaux types d'analyse :

- l'analyse par entretien qui consiste à analyser chaque entretien à travers sa singularité, sa particularité,
- l'analyse thématique qui consiste à découper le discours recueilli par thèmes préalablement établis dans la grille d'entretien (grille d'analyse). Le mode de coupe est donc identique pour chaque entretien,
- l'analyse proportionnelle du discours (APD) qui consiste à découper et coder les discours recueillis en définissant préalablement une unité sémantique d'analyse sans proposer pour autant des catégories,
- l'analyse des relations par opposition (ARO) qui consiste à analyser les discours en se basant sur une double hypothèse « *l'existence entre les éléments d'un système pratique et les éléments d'un système symbolique* ». (Blanchet, 2001).

Dans le cas de notre enquête, nous avons étudié les discours à travers l'analyse thématique. Nous avons pu travailler, de manière identique, chaque entretien en nous appuyant sur les thèmes élaborés dans notre grille.

Nous avons pu dégager des tendances que nous avons retranscrites sous forme de graphiques (cf. Annexe 8 : "*Résultats de l'enquête n°1 sous forme de graphiques*") et de schémas récapitulatifs. Au vu de l'échantillon restreint mis en place, nous n'avons pas jugé utile de les faire figurer dans ce manuscrit. Nous avons préféré les résumer en quelques phrases.

5.4. Conclusion

L'enquête par entretien semi-directif nous permet de nous imprégner des pratiques de concepteurs concernant les questions relatives aux choix des matériaux dans le processus de projet ainsi que des pratiques des personnes expertes concernant le rôle des outils d'aide à la conception dans le projet architectural. Nous pouvons, grâce à l'analyse thématique des discours recueillis, faire ressortir différentes tendances générales que nous présentons dans le chapitre suivant. L'ensemble des propos recueillis a été argumenté et illustré à partir d'exemples concrets tirés des expériences professionnelles de chacun. Ceci nous a permis de comprendre de manière claire les faits énoncés.

L'analyse des discours nous a permis de croiser les thématiques étudiées avec les champs d'études de notre état de l'art que nous avons ainsi complété et approfondi (cf. figure 45).

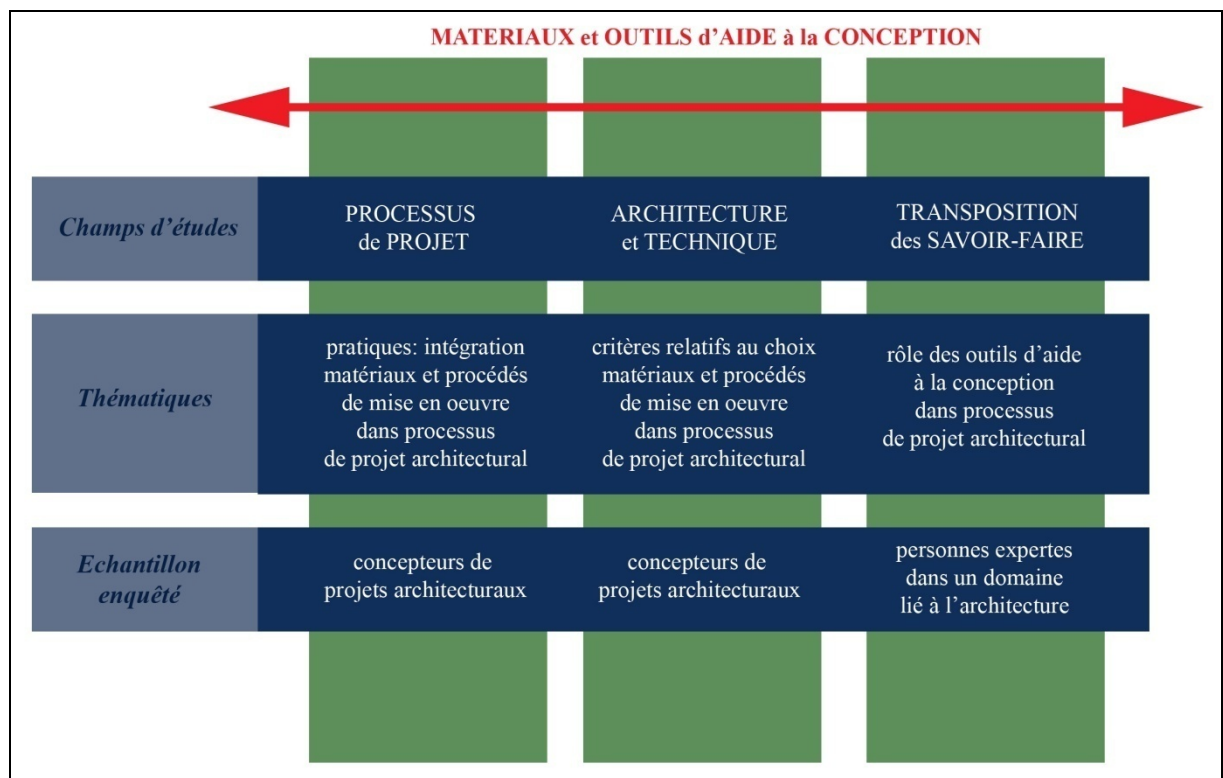


Figure 45 : Relation entre les champs d'études de notre travail de recherche et les thématiques de l'enquête

6. Les trois postulats énoncés au regard des enquêtes menées

6.1. Introduction

Ce chapitre présente les résultats obtenus après analyse des discours recueillis lors des entretiens. Nous avons choisi de présenter les différents sujets abordés selon l'ordre établi dans notre grille d'entretien, ceci pour chacune des thématiques. Nous concluons en mettant en regard les points généraux qui ressortent de l'enquête avec nos postulats de recherche.

6.2. Analyse des résultats de l'enquête auprès de concepteurs en architecture : Thématique n°1 - Intégration des matériaux dans le processus de conception architecturale et urbaine et critères pris en considération concernant les matériaux et procédés de mise en œuvre

6.2.1. Intégration des questions relatives au choix des matériaux et procédés de mise en œuvre

6.2.1.1. *Intégration des matériaux et procédés de mise en œuvre dans le processus de projet architectural : pratiques*

Les matériaux et procédés de mise en œuvre sont intégrés dans le processus de projet selon différentes démarches qui dépendent dans la majorité des cas du projet : mise en place d'indicateurs, matériaux comme base du projet, contexte, site, etc...

Le point commun entre l'ensemble de ces approches est qu'une large majorité des personnes interrogées s'accorde à dire que cette approche est globale et simultanée. C'est pourquoi, il leur a été difficile d'expliquer la démarche utilisée de manière précise. Ils concilient des données objectives (le site, le programme, la réglementation, etc...), avec des données plus subjectives (valeurs propres, mode de pensée, etc...). Cette question dépend d'une foule de paramètres : contexte, site, échelle, usage mais également d'une part d'intuition et de rationalité qui rend difficile la « standardisation » de cette intégration. Il nous est donc difficile de généraliser.

Cependant, certains points ont été mis en avant par l'ensemble de l'échantillon consulté. Ces points concernent les phases d'intégration et le poids des questions relatives au choix des matériaux dans le processus de projet architectural et urbain (cf. sous-chapitre 6.2.1.3.).

6.2.1.2. Approche des concepteurs concernant les matériaux et le processus de conception

Comme annoncé précédemment, il est délicat de standardiser le processus de conception. Il en est de même concernant l'intégration des matériaux et procédés de mise en œuvre car ces choix font appel à des informations à la fois objectives et subjectives (Exemple : la sensibilité des personnes les amène à pondérer différemment les critères pris en considération).

Néanmoins, il ressort de l'enquête menée que l'approche majoritaire est une approche globale de l'ensemble des critères pris en considération dans le choix des matériaux et système constructif. (10 concepteurs sur 12 ont une approche globale)

Pour illustrer cette approche, nous nous appuyons sur un exemple tiré des enquêtes menées : « *une approche globale articulée autour d'un système d'indicateurs précis* ».

Ce système est formé de quatre thématiques majeures qui sont des paramètres de conception fondamentaux dans une approche architecturale et qui conditionnent la qualité du projet.

Ces thématiques sont les suivantes :

- **implantation** : « *le site et l'environnement proche d'un bâtiment vont influencer sur le type de construction. L'architecte soucieux d'une insertion réussie cherchera en effet à exploiter le potentiel du site, à contourner ses contraintes défavorables et à accorder les ambiances dans et hors le bâtiment au microclimat du lieu.* »⁷ (cf. Annexe 9 : "Analyse de l'entretien n°108v1&211")
- **morphologie** : « *le modèle conceptuel de l'architecte s'appuie souvent sur un processus de synthèse de la forme, qui lui permet de passer rapidement d'une appréciation du site à une idée de la forme globale d'un bâtiment, intégrant les contraintes du programme dans ses esquisses* ».⁸
- **matérialité** : cette thématique inclut les matériaux et systèmes constructifs dans toutes leurs dimensions et pas seulement leur dimension technique.
- **spatialité** : « *la distribution des espaces intérieurs assure une fonction liée de façon évidente aux usagers et aux rituels du bâtiment. Mais la perception de*

⁷ Entretien 108v1&211

⁸ Ibid

ces espaces présente également une très forte composante environnementale (énergétique, confort, santé,...) »⁹.

L'approche mise en place consiste à prendre en compte ces quatre problématiques architecturales dès le départ (approche simultanée) car elles entretiennent une relation de dialogue avec leurs divers enjeux, puis de les croiser avec les problématiques environnementales et énergétiques.

6.2.1.3. Phases d'intégration dans le processus de conception architectural et poids des questions relatives au choix des matériaux

Les concepteurs en architecture interviennent pour leur majorité, dans les phases de conception et de réalisation du processus de projet, avec une activité importante et primordiale dans la phase de conception.

Un grand nombre de concepteurs différencie les matériaux d'enveloppe et structure des matériaux de second œuvre. Ils expliquent que les questions relatives à ces deux types de matériaux n'interviennent pas tout à fait au même moment. Les choix relatifs aux matériaux d'enveloppe et structure sont réalisés dès le départ du projet : phase esquisse, car ils impactent et participent fortement aux choix structurels ainsi qu'à l'écriture architecturale. Les matériaux de second œuvre arrivent souvent dans un second temps, en phase d'avant projet sommaire (APS), après que les choix structurels et morphologiques aient été retenus.

Pour l'ensemble des personnes interrogées, les questions relatives au choix des matériaux et procédés de mise en œuvre sont principalement prises en compte dès les premières phases du processus, à savoir l'esquisse. Cependant, il est à noter que ces questions, étudiées dans les phases amont du processus, sont remises en question dans les phases d'avant-projet sommaire (APS) et d'avant-projet détaillé (APD), au moment de l'intégration dans l'équipe de maîtrise d'œuvre, de bureaux d'étude (BE) qui vérifient et valident les choix retenus.

Les questions de choix des matériaux sont donc présentes tout au long du processus de conception avec une importance primordiale en phase esquisse. Il nous semble important de souligner que concepteurs, bureaux d'études et assistants à maîtrise d'ouvrage / d'œuvre s'accordent à dire que dans le cas où ces questions relatives aux matériaux sont prises en compte par une équipe de maîtrise d'œuvre pluridisciplinaire dès les premières phases du processus de conception, la qualité du projet n'en est que meilleure. Dans les

⁹ Entretien 108v1&211

faits, nous observons que les équipes de maîtrise d'œuvre ne sont potentiellement "complètes", que dans le cas de concours, de projet de grande envergure et de projet intégrant une démarche environnementale.

6.2.1.4. Acteurs mis en avant concernant les questions de matériaux

Au vu des discours recueillis, les personnes mises en avant par les concepteurs concernant les questions relatives au choix de matériaux et de procédés de mise en œuvre sont les maîtres d'ouvrages et les bureaux d'études.

Les maîtres d'ouvrage, premiers cités lors des entretiens, interviennent essentiellement dans les domaines concernant l'aspect, la matérialité des matériaux, les dispositifs choisis et le coût de ces différents choix. Ces personnes étant les « clients », ils ont le pouvoir de prendre les décisions définitives. Le concepteur propose. Le maître d'ouvrage décide et opte au final pour la solution retenue.

Les bureaux d'études quant à eux, sont spécialisés dans un domaine précis et interviennent sur demande du maître d'œuvre et en fonction du type de projet. Pour les projets de taille modeste, leur présence n'est pas toujours avérée. Par contre, pour les projets de taille importante, le maître d'œuvre fait toujours appel à eux. Ainsi, en bénéficiant de compétences élargies, le projet est susceptible d'être mieux maîtrisé.

Pour la majorité de leurs travaux, les outils utilisés par les BE leur imposent d'intervenir au cours des phases avant-projet sommaire (APS) et avant-projet détaillé (APD), lorsque les niveaux de définition du projet sont suffisamment précis pour répondre aux données d'entrées exigées par les outils d'aide à la conception. La collaboration "concepteurs – bureaux d'études" se fait généralement au cours des phases avancées du processus de conception (à l'exception de projets particuliers où le concepteur peut faire appel au bureau d'étude concerné dès la phase esquisse ainsi que dans le cas de concours). Ce fait rend difficile les retours en arrière sur les choix pris initialement. Par conséquent, les solutions proposées ne peuvent pas modifier de manière excessive le projet.

Il est à noter que les assistants à la maîtrise d'ouvrage / d'œuvre ainsi qu'une majorité de concepteurs et de bureaux d'études voient un bénéfice certain à travailler ensemble dès les premières phases du processus. Il est important afin d'être efficace que toute la chaîne des acteurs soit réunie pour obtenir une meilleure qualité du projet.

6.2.1.5. Echanges et communication entre les concepteurs et les bureaux d'études

Dans une grande partie des discours étudiés, le concepteur "débroussaille" seul le projet. S'il ressort de ce travail des problèmes évidents concernant certains points précis, le

concepteur échange avec le bureau d'études spécialisé dès la phase esquisse (situation en voie de développement). Dans la majorité des projets réalisés, le bureau d'études n'intervient qu'à partir des phases APS et APD pour valider les décisions prises, comme annoncé précédemment. Le problème qui ressort est qu'il n'est plus possible de revenir sur les choix initiaux. Dans le cas où ces questions sont traitées relativement tôt, certains concepteurs sont déçus que les bureaux d'études n'aient pas plus de « force de proposition ». Il est évident, ceci plus particulièrement pour les concepteurs inscrits dans une démarche environnementale, que travailler avec un bureau d'études performant en terme de solutions en adéquation aux démarches architecturales, est un vrai atout. Ils peuvent aider à la conception du projet en s'impliquant dans la proposition de solutions innovantes, solutions en lien avec le concept choisi par le concepteur. Il est toutefois à souligner que pour une majorité des concepteurs, ces échanges restent à améliorer.

Les discours obtenus font ressortir le bénéfice à établir un dialogue entre concepteurs et bureau d'études dans les phases amont du processus de projet afin de ne pas avoir la crainte de voir le projet se "faire dévorer" par la technique. L'inverse est contre-productif étant donné qu'il est demandé de revenir sur des choix initiaux. C'est à ce moment que le contrôle du projet peut être "perdu" par le concepteur. De plus, les propos recueillis soulignent que les compétences techniques, physiques, acoustiques, thermiques, du concepteur facilitent le dialogue avec l'ingénierie. Les échanges sont alors efficaces et constructifs.

6.2.1.6. Raisonnement de concepteurs à partir de dispositifs plutôt que de matériaux

Par matériau, nous entendons : *matière première que l'homme façonne pour en faire des objets*. Par dispositif nous entendons : *mise en œuvre d'un ou plusieurs matériaux*. Un dispositif résulte donc de la rencontre et de l'agencement entre un ou plusieurs matériaux.

Il est incontestable pour l'ensemble des personnes interrogées que le matériau doit être pris dans son tout. C'est un objet global. La mise en œuvre du matériau et le matériau sont donc indissociables. Lorsqu'un choix de matériau est retenu, il ne peut se faire sans réfléchir aux dispositifs qui l'accompagnent.

Les concepteurs de projets architecturaux et urbains raisonnent donc en terme de dispositifs. Un problème de sémantique est à relever. Pour l'ensemble des concepteurs interviewés l'utilisation du mot matériau(x) signifie à la fois un dispositif : assemblage de matériaux mais également un matériau : matière première : la brique, le bois, le béton, le métal... .

6.2.1.7. Conclusion

Pour conclure, nous pouvons résumer les pratiques des concepteurs concernant l'intégration des matériaux et procédés de mise en œuvre de la manière suivante.

Les questions relatives au choix des matériaux et procédés de mise en œuvre interviennent tout au long du processus de projet. Elles sont abordées sous des angles variés selon l'étape dans laquelle nous nous situons (cf. figure 46). Toutefois, les questions décisives sont intégrées dès les premières phases du processus de conception en deux temps. Les concepteurs différencient les matériaux d'enveloppe des matériaux du second œuvre. Les matériaux d'enveloppe sont pris en considération dès le départ car ils participent à la structure et à l'écriture architecturale. Les matériaux de second œuvre sont étudiés dans un second temps.

L'ensemble des concepteurs valide le fait que les principaux choix concernant les matériaux et systèmes constructifs sont réalisés pendant la phase esquisse (cf. figure 46).

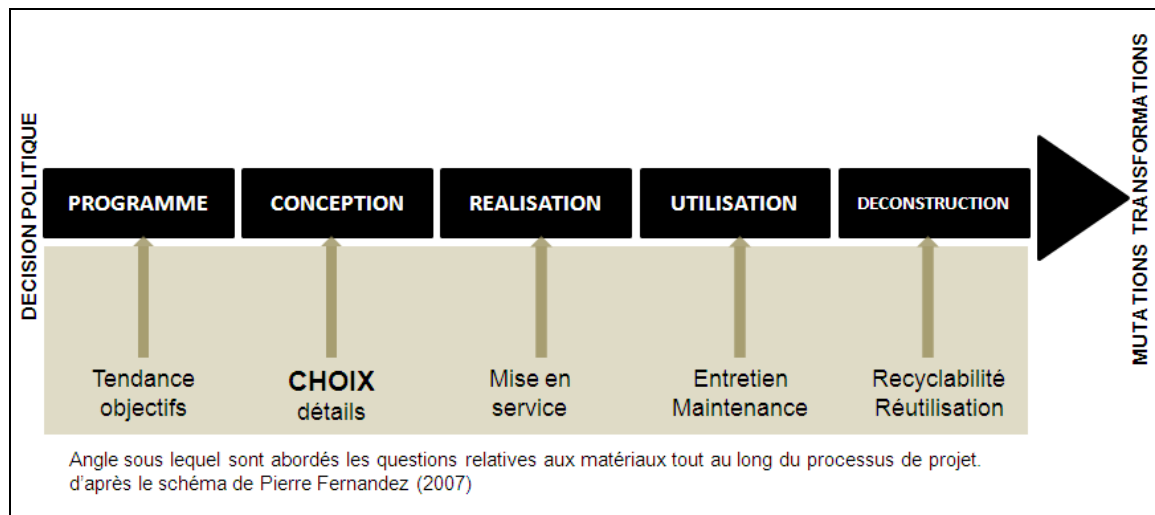


Figure 46 : Intégration des questions relatives au choix des matériaux dans le processus de projet architectural, d'après le schéma de FERNANDEZ P. (2007)

Pendant la phase de programmation, les programmistes traitent les matériaux en émettant des objectifs, des tendances. Le choix des matériaux ainsi que les détails de mise en œuvre sont réalisés pendant la phase de conception : phase la plus significative concernant l'importance des questions relatives au choix des matériaux. C'est à ce moment que les décisions sont prises. Pendant la phase de réalisation, la question des matériaux et procédés est regardée sous l'angle de la mise en œuvre à travers le suivi de chantier. Enfin, pendant la phase d'utilisation, les matériaux sont étudiés à travers leur entretien et leur maintenance. Nous pensons par ailleurs qu'il serait judicieux d'y ajouter une dernière phase, la phase de la déconstruction dans laquelle les questions relatives aux matériaux et

dispositifs sont importantes. Nous pensons à leur recyclabilité, leur réutilisation, le traitement des divers déchets (cf. figure 47).

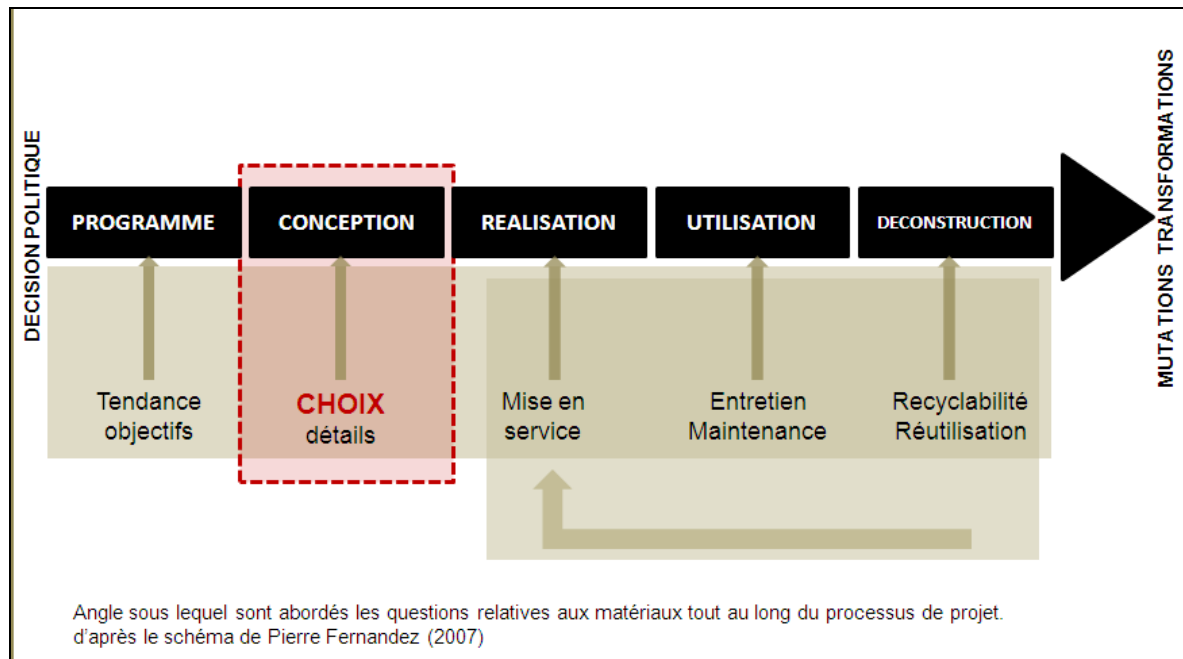


Figure 47 : Intégration des questions relatives au choix des matériaux dans le processus architectural après enquête, d'après le schéma de FERNANDEZ (2007)

6.2.2. Critères pris en considération dans les questions relatives au choix des matériaux et procédés de mise en œuvre

6.2.2.1. *Multitude de critères pris en compte*

L'ensemble des concepteurs interrogés s'accorde à dire qu'une multitude de critères est prise en compte dans le choix des matériaux et procédés de mise en œuvre.

Ces critères sont de différents ordres et sont liés :

- à l'esthétique, la matérialité : sensualité, sensorialité d'un matériau, poétique du dialogue avec le lieu, avec la matière, apparence, toucher..... (critères non quantifiables),
- à la technicité : solidité, pérennité, durabilité, performances acoustiques, thermiques, hygrométrie.....,

- à l'impact sur l'environnement : consommations des ressources naturelles, énergie grise, CO2, déchets, recyclabilité....,
- à l'usage : fonctionnalité, adaptabilité, morphologie, évolutivité....,
- à l'aspect socio-économique : coût global, rapidité de mise en œuvre, santé, entretien / maintenance, valorisation de filières locales....,
- à la réglementation : normes, sécurité incendie, ...,
- etc.

Il est évident, pour les 12 concepteurs interviewés, que les solutions retenues dépendent d'un système de pondération qui est mis en place, par le concepteur lui-même, en fonction du projet, du site, du climat, du contexte, du goût du client, etc. Dans la majorité des cas, l'ensemble de ces critères serait pris en considération, suite à quoi une solution peut alors être retenue.

6.2.2.2. Le critère esthétique au regard du critère économique

Les critères esthétique (l'image – la matérialité) et/ou économique sont-ils des critères déterminants dans les solutions retenues ?

Il est ressorti de cette enquête que ces deux critères sont importants et sont pris en considération dès les premières phases du processus de conception. En effet, il est évident que les budgets n'étant pas extensibles, il était nécessaire de cerner la question économique le plus tôt possible. De même au sujet de l'esthétique, l'aspect et l'écriture architecturale ont une grande importance. Néanmoins il apparaît, au cours de ces discussions, que l'un ne prend pas le pas sur l'autre. Il est question de dosage et de stratégie pour 10 concepteurs sur 12 (les deux autres concepteurs ont comme critère déterminant le coût).

Pour exemple, certains choix dans le projet se font en pondérant fortement le critère esthétique parce que le dispositif se trouve dans un espace de représentation où l'image est importante. Inversement, l'aspect économique est pondéré dans le cas d'espace réservé aux locaux d'archives : espaces dans lesquels peu de personnes vont, etc.

6.2.2.3. Critère unique et/ou primordial ?

Il est évident pour une majorité de concepteurs interviewés, qu'aucun critère ne peut être mis en avant. Ceci à l'exception d'un concepteur qui met en avant le critère lié à la santé. En effet, son argumentaire est le suivant : la finalité du bâti étant d'abriter un Homme et une personne passant environ 80% de son temps dans des espaces construits, il est

primordial de remettre l'utilisateur au cœur du projet architectural et que celui-ci ne soit pas nocif pour eux.

6.2.2.4. Accès aux données relatives aux matériaux

Les données permettant de renseigner les critères mentionnés ci-dessus sont plus ou moins accessibles en fonction des critères recherchés :

- deux concepteurs considèrent que l'accès aux données est facile,
- deux concepteurs considèrent que l'accès aux données est difficile,
- huit concepteurs expliquent que la facilité d'accès aux données dépend des critères considérés.

En simplifiant, les données concernant l'aspect physique et technique des matériaux, sont relativement accessibles. Elles font partie de la « carte d'identité » de ces matériaux. Néanmoins, certains matériaux tels que la paille ou autres, n'ont ni PV, ni Avis Technique, ni Avis Feu. Au contraire, les données environnementales sont plus difficiles d'accès à l'exception des Fiches de Déclaration Environnementales et Sanitaires FDES de plus en plus diffusées. Ceci est en partie dû au fait que ces données sont en voie de développement. Toutefois, les FDES sont des documents peu compréhensibles pour des personnes non expertes dans le domaine de l'environnement. Elles ne sont pas conçues pour être facilement utilisables par les concepteurs.

Il ressort de nos entretiens, que les concepteurs mettent en place au sein des agences d'architecture, des matériauthèques ou bibliothèques ou bases de données dans lesquelles ces renseignements sont archivés. Les projets réalisés sont intégrés à ces bases et deviennent des référents pour les projets suivants (Onze concepteurs sur douze ont mis en place ce système au sein de leur agence).

6.2.2.5. Précision et fiabilité des données relatives aux matériaux

Le problème rencontré concerne la précision et la fiabilité de ces données.

A ce sujet, nous observons deux discours :

- certaines personnes interrogées affirment que cela dépend à la fois des critères considérés et des sources qui les transmettent. Il y a un manque certain de

confiance envers les commerciaux et les données auto déclaratives (exemple : FDES). Il est donc nécessaire de s'informer et de croiser les différentes informations disponibles (8 concepteurs sur 12),

- d'autres considèrent que les données renseignées sont fiables mais qu'il est nécessaire de s'intéresser aux données non renseignées car le produit est toujours mis en avant sous son angle le plus avantageux. Il faut donc avoir un regard critique pour cerner les avantages et faiblesses des matériaux (3 concepteurs sur 12).

6.2.2.6. Conclusion

L'approche concernant l'intégration des matériaux et procédés de mise en œuvre est une approche globale qui prend en compte un grand nombre de critères pondérés en fonction du projet, du site, de la morphologie, etc. Il est donc impossible de dégager un critère primordial commun à tous les projets.

L'entrée se fait par une porte qui est différente selon le projet et le concepteur. Néanmoins, l'ensemble des critères est étudié afin de pouvoir faire un choix (cf. figure 48).

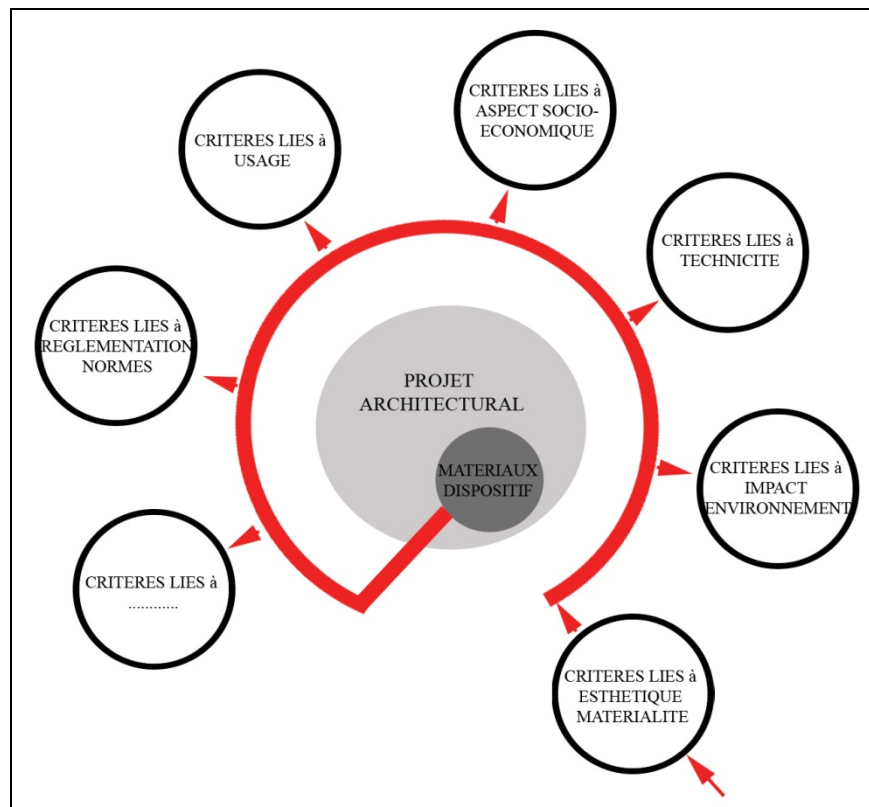


Figure 48 : Critères pris en compte concernant les questions relatives au choix des matériaux et procédés de mise en œuvre dans le processus de conception architectural et urbain, d'après le schéma de FERNANDEZ P. (2007)

Dans l'échantillon mis en place, nous avons choisi d'interroger 6 concepteurs dits « traditionnels » (n'intégrant pas une démarche environnementale) et 6 concepteurs travaillant dans une démarche de développement durable, ceci afin d'observer les particularités de ces deux "familles" de concepteurs.

Il ressort que les principales caractéristiques des concepteurs étant dans une démarche de développement durable sont les suivantes :

- ces concepteurs ont pour certains d'entre eux une double culture : architecturale et technique,
- ils travaillent en équipe pluridisciplinaire, dès les premières phases du processus de conception, et soulignent l'importance de l'intercompréhension entre acteurs,
- leurs préoccupations environnementales vont au-delà des préoccupations professionnelles : principes de vie, valeurs,
- ils ont une réflexion poussée et précise sur la méthode de travail mise en place dans le cadre de leurs activités professionnelles.

En comparaison, nous pouvons caractériser les pratiques des concepteurs n'intégrant pas de démarche environnementale dans leur pratique professionnelle par les points suivants :

- la plupart des enquêtés n'a pas la double culture : architecture et ingénierie,
- ils travaillent en équipe pluridisciplinaire lorsqu'ils en éprouvent le besoin (question spécifique sur le projet architectural et urbain). Le projet se situe alors en phase APS, APD. Les réponses à des concours sont l'exception à cette pratique. Dans ce cas, ils font appel aux BE dès la phase esquisse,
- ils considèrent que la pratique environnementale ne doit pas être une priorité. Elle fait partie de l'architecture et ne doit pas être mise en avant par rapport aux autres domaines considérés (techniques, économiques, esthétiques...).

Le développement durable amène l'émergence de nouvelles professions ainsi que le repositionnement des différents acteurs traditionnels (Cristo/Pacte et Uwe, 2006). Ce fait

ressort également dans les discours obtenus lors de nos différents entretiens. Là où les concepteurs traditionnels travaillent le plus souvent dans une démarche de conception "auto-centrée" pour reprendre l'expression des équipes de recherche Cristo/Pacte et Uwe (2006) (chaque critère est étudié par rapport au bâtiment envisagé) ; les concepteurs travaillant dans une démarche de développement durable ont un mode de conception « décentré » ou « externalisé » vers l'environnement. Ceci signifie qu'ils s'intéressent en parallèle à l'impact de leur choix sur l'environnement (ressources...) mais également en fonction du critère social (valorisation de filières locales, main d'œuvre locales...) etc. points indirectement liés à l'édifice.

6.3. Thématique n°2 : Analyse des résultats de l'enquête auprès d'experts techniques- Rôle des outils d'aide à la conception dans le processus de conception architecturale

6.3.1. Pratique des outils d'aide à la conception

Intérêt des outils d'aide à la conception dans le projet architectural

L'enquête menée fait ressortir différents intérêts dans l'utilisation des outils d'aide à la conception. D'après les discours analysés, les deux principaux sont :

- la comparaison de résultats permettant de valider ou de proposer une solution meilleure,
- la validation, la vérification, le dimensionnement et l'optimisation des solutions envisagées ou retenues.

Il ressort également dans l'analyse des pratiques des personnes interviewées, que ces outils, en plus de leur gain de temps et de leur utilité, justifient une démarche auprès du reste de l'équipe de maîtrise d'œuvre.

Ce type d'outil permet également un travail dynamique d'optimisation et d'intégration de plusieurs paramètres. Il est ainsi possible de mesurer la performance, de quantifier des phénomènes qui, par la suite, aident le concepteur à préférer telle ou telle alternative possible.

Facilité dans les échanges entre les concepteurs et les bureaux d'études

Pour une majorité des enquêtés (8 personnes expertes sur 10), il est certain que les outils d'aide à la conception facilitent les échanges au sein de l'équipe de travail car « *ce qui est dit a moins de valeur que ce qui sort de l'ordinateur* »¹⁰. Les gens considèrent les faits, issus de calculs de mesure, d'observation..., comme prédominants. Par conséquent, « *les résultats des outils d'aide à la conception prennent un autre statut que celui de la parole, étant donné qu'ils prennent le statut d'un fait* »¹¹. Ils sont au regard du reste de l'équipe de maîtrise d'œuvre, maître d'ouvrage compris, d'une puissance redoutable. Ils justifient les préconisations faites.

Néanmoins il est nécessaire, pour certains outils, de "modifier" l'aspect du rendu (résultats) pour qu'ils soient accessibles et compréhensibles par tous, le piège à éviter étant :

- soit de ne pas comprendre les résultats obtenus dans le cadre d'utilisation d'outils complexes qui n'ont pas de résultats simples à interpréter,
- soit de bénéficier d'outils complexes dont les rendus sont très conviviaux mais où le danger serait de prendre les résultats tels quels, sans tenir compte des différents paramètres d'entrées, ni mesurer l'incertitude du calcul, ni la fiabilité de certaines données.

Une des difficultés majeures énoncées par les personnes interrogées est qu'il est actuellement difficile d'avoir un langage commun au sein d'une équipe. Chaque acteur (concepteur, acousticien, thermicien, etc.) travaille avec des outils différents qui n'ont pas de compatibilité entre eux. La mise en place d'un format IFC¹² devrait permettre de résoudre ce type de difficultés.

Enfin, dans la majorité des cas énoncés, le travail nécessaire avec ce type d'outil est long et fastidieux notamment concernant la modélisation des projets (incompatibilité avec les documents transmis par le concepteur) ainsi que les paramètres des données d'entrées qui doivent être réfléchis et précis afin d'obtenir des résultats fiables.

¹⁰ Entretien 108v201

¹¹ Entretien 108v209

¹² Le format IFC (Industry Foundation Classes) est format de fichier informatique. Il est utilisé par l'industrie du bâtiment. Son objectif est d'échanger et de partager un ensemble d'informations entre différents logiciels dont les logiciels d'architecture.

Temps d'utilisation nécessaire pour un projet architectural par les outils d'aide à la conception

Le temps d'utilisation dépend principalement du projet (taille – complexité) et du niveau d'expérience de l'utilisateur (neuf bureaux d'étude - assistants à maîtrise d'ouvrage / d'œuvre sur dix). Les « nouveaux » utilisateurs de ces outils ont besoin de réaliser beaucoup plus de calculs et de manière plus régulière (c'est-à-dire sur chaque projet). Ils utilisent les outils d'aide à la conception quasiment en permanence.

Au contraire, une personne expérimentée peut avancer des préconisations rapidement et ceci sur des projets complexes. Elle utilise ces outils essentiellement dans le cadre de cas spécifiques ou lors de doutes sur les solutions envisagées.

L'unique personne dont le temps d'utilisation ne dépend pas du projet explique que, dans le cadre de son travail, ce temps dépend du niveau d'exigence attendu.

Qualité graphique et qualité de compréhension de l'outil

Il est évident, pour une majorité des personnes interrogées (8 personnes expertes sur 10), que la qualité graphique permet une qualité de la compréhension de l'outil ainsi qu'une facilité de prise en main de ce dernier.

La qualité esthétique de l'outil, en plus d'aider à sa compréhension et son utilisation, sert également à convaincre le reste de l'équipe de maîtrise d'œuvre ainsi que le maître d'ouvrage. Dans le cadre d'une interface non conviviale, le risque est que même le spécialiste ne s'approprie pas l'outil. Nous pouvons affirmer que l'interface participe pleinement à l'attrait des utilisateurs et à l'adhésion du contenu véhiculé par l'outil.

6.3.2. Relation entre le projet architectural et l'outil d'aide à la conception

6.3.2.1. Niveau de connaissances nécessaire pour l'utilisation et la compréhension des outils d'aide à la conception

Le type d'outil sur lequel notre enquête porte est relativement complexe. Ces outils sont conçus pour des personnes spécialisées dans un domaine. Dans le langage courant, les personnes expertes parlent d'outils d'aide à la conception. En réalité, il s'agit d'outil d'évaluation ou de simulation. Pour comprendre tout le sens de ces outils, il paraît évident qu'une personne non formée et non spécialisée aura des difficultés à entrer des paramètres corrects, à comprendre la méthode dont va découler les résultats et par la suite, à faire une lecture exacte et une analyse juste des résultats obtenus. (Jusqu'à 3 – 4 ans de formation

avant d'être opérationnel sur certains outils du type TRNSYS pour le noyau complexe et environ 6 mois pour le noyau de base¹³).

Les bureaux d'études et assistants à maîtrise d'ouvrage / d'œuvre interrogés sont formels : ces outils ne sont pas destinés à des personnes non expertes dans le domaine traité. Il est nécessaire d'être spécialisé dans la ou les discipline(s) traitée(s) par l'outil afin d'en saisir tout le sens.

Certains BE s'inquiètent de la mise en place d'outils vulgarisés à la portée de tous. La raison est la suivante. Ces outils sont souvent bridés au niveau des données d'entrées (ce qui signifie que des hypothèses sont formulées et qu'elles ne sont pas modifiables). Par conséquent, ces outils sont moins compétitifs, moins précis et énoncent des résultats peu fiables voire faux, selon leurs discours.

Leur inquiétude vient également du fait que l'utilisation d'outils d'aide à la conception par les architectes risque de modifier leur intervention dans le projet. Les concepteurs pourront dégager des pistes et des solutions dès les phases amont du processus de conception, sans intervention systématique des bureaux d'études. Ils auront alors le rôle de vérifier et valider les solutions retenues. Ils n'auront plus la place de "conseiller technique" qu'ils occupent actuellement.

Dans tous les cas, il est nécessaire d'être vigilant et d'utiliser les outils d'aide à la conception et les outils d'évaluation dans leur bon contexte.

6.3.2.2. Intérêt de travailler dans les phases amont du processus de conception architecturale

Les phases d'intervention de ces outils se situent parfois en phase avant-projet sommaire, et souvent en phase avant-projet détaillé. Il ressort des entretiens que, dans le cas où les bureaux d'étude sont intégrés dans le processus de conception tôt (dès la phase esquisse), leur rôle n'en a été que meilleur.

En phase esquisse, les bureaux d'étude interviennent en tant que conseiller. Lors de cas spécifiques, ils s'appuient sur des outils. En phase avant-projet sommaire et avant-projet détaillé, des calculs peuvent être réalisés. Le projet est suffisamment avancé pour répondre aux données d'entrées exigées dans les outils. Les préconisations pouvant impacter sur le projet étant faites pendant l'esquisse, les outils n'ont ici qu'un rôle de

¹³ Entretien 108v2221

vérification, de validation et de dimensionnement qui n'engendre pas de modification lourde du projet.

La totalité des personnes interrogées valide le fait que le projet est bien meilleur si l'ensemble des acteurs est intégré dans les phases amont du processus de projet. La raison est qu'il est de plus en plus difficile de revenir sur les choix initiaux au fur et à mesure que le processus avance ; ceci sans pour autant utiliser des outils d'aide à la conception qui obligent à verrouiller le projet.

6.3.2.3. Exploitation, compréhension, précision et discussion des résultats obtenus

Pour la majorité des personnes interrogées (neuf personnes expertes sur dix), la prudence est de rigueur concernant l'exploitation et de la compréhension des résultats transmis par l'outil.

Tout d'abord, il est nécessaire d'avoir une idée du résultat que nous devons obtenir. Il est important de cerner de manière claire la problématique, soit les paramètres et données d'entrées, afin d'être le plus fiable et le plus proche possible de la réalité. Le but est d'utiliser l'outil à bon escient.

Il est fondamental de chercher uniquement les informations dont on a besoin lors de l'analyse des résultats car ce type d'outils énonce un grand nombre de données. Il est essentiel de trouver l'information pertinente, de savoir la lire et de l'analyser correctement. Pour cela, il est nécessaire de la relier aux données d'entrées ainsi qu'au contexte.

Il est également nécessaire de connaître les ordres de grandeur des résultats attendus. En intégrant des données précises nous obtenons des résultats fiables. Les données d'entrées sont donc d'une importance primordiale. Il est aisé d'obtenir les résultats souhaités « *on leur fait dire ce que l'on veut [...] et parfois ce sont de grosses bêtises* »¹⁴. C'est pourquoi la maîtrise et la compréhension de l'outil sont capitales. Par conséquent, il est important d'analyser les résultats, en les exploitant avec une grande vigilance ainsi qu'en prenant en compte un seuil de tolérance.

¹⁴ Entretien 108v209

6.3.2.4. Conclusion : facilité de retour sur les choix initiaux

Il est certain pour l'ensemble des BE et AMO, qu'une intervention dans les phases amont du projet (à travers des conseils dans un premier temps, puis de calculs, de simulation, de vérification, de validation etc. dans un second temps) évitera de revenir sur les choix initiaux dans les phases avancées du processus de conception pouvant entraîner des modifications lourdes.

Le second avantage qui ressort des discours analysés est qu'en intervenant ensemble dès les premières phases du processus, les solutions proposées sont intégrées à la conception architecturale. Des modifications tardives qui peuvent entacher l'essence même du projet sont évitées. Les projets n'en sont alors que meilleurs.

Concernant le rôle des outils d'aide au projet dans le processus de projet architectural, il ressort de l'enquête menée que les outils d'évaluation sont complexes pour être utilisés par un concepteur s'il n'est pas spécialisé dans le domaine concerné. Ces outils sont destinés à des personnes expertes dans un champ disciplinaire précis.

Autre problème, de par la précision des données d'entrées nécessaires, ces outils sont destinés aux phases avancées du processus de projet. Lors d'une utilisation en phase esquisse, ils obligent le concepteur à verrouiller le projet ou à revoir le concept de manière lourde.

Parallèlement, les outils d'aide à la conception sont souvent dénigrés par les bureaux d'études qui ont un regard suspicieux sur les indicateurs qui ne mesurent pas la performance mais indiquent juste une tendance plus ou moins grossière. C'est d'ailleurs une des différences que nous observons lors de l'analyse de ces entretiens. En phase amont, les concepteurs se contentent d'indicateurs, là où les bureaux d'études raisonnent paradoxalement en résultats précis et mesures exactes au moment où les choix de conception gagnent à ne pas être trop figés. Une nuance est tout de même observée : durant les phases avancées du processus de conception, les indicateurs ne suffisent plus aux concepteurs.

Nous pouvons confirmer que l'intérêt des outils d'aide à la conception (premier genre) est qu'ils ne mesurent pas de la performance mais qu'ils donnent des indicateurs permettant de dégager des tendances et par conséquent d'orienter le concepteur vers des solutions les plus viables possibles au regard du projet, du programme et du contexte, dès les phases amont. Ils s'adressent donc plus spécifiquement aux concepteurs. Les outils d'évaluation (second genre) vérifient et valident les solutions retenues. Ils s'adressent aux personnes expertes dans un domaine lié à l'architecture.

Ces deux types d'outils ont des fonctions différentes, ne s'adressent pas au même public mais sont complémentaires. Il nous semble donc primordial de les utiliser dans le sens de leur complémentarité et non de leur concurrence.

Enfin, soulignons que pour l'ensemble des personnes interrogées, un travail d'équipe dès le départ du projet est utile et efficace. Nous avons d'ailleurs relevé que cette méthode de travail en équipe pluridisciplinaire est fréquemment mise en place par les concepteurs intégrant une démarche environnementale.

6.4. Les trois postulats au regard des résultats obtenus

Pour chacun des postulats, nous avons identifié une tendance générale qui découlait de notre état de l'art. Suite à ce premier travail, ainsi qu'aux résultats obtenus au cours de notre enquête, nous avons complété chaque questionnaire de départ, par une amélioration souhaitable et des pistes pour notre recherche.

6.4.1. A quelle(s) phase(s) du processus de conception les connaissances et outils actuels sur les matériaux se destinent-ils ?

Tendance générale : Les connaissances et outils actuels se basent avant tout sur les quantités précises de matériaux mis en œuvre. Les outils d'aide au projet sont utilisés par les ingénieurs dans les phases avancées du processus de conception car les données d'entrées nécessaires sont précises et ciblées. Cela exige, en situation de projet, d'être dans une phase avancée du processus de conception pour pouvoir caractériser la proposition architecturale. Autrement dit, la majorité des connaissances et les outils actuels permettent de constater les caractéristiques environnementales des matériaux retenus, à une phase où il est généralement trop tard pour revenir sur les choix initiaux.

Amélioration souhaitable : Nous restons à ce jour, sur des savoirs et outils qui amènent à sanctionner ou valider une proposition architecturale relativement aboutie. Il semblerait profitable, pour la qualité des projets, d'aiguiller les choix des concepteurs dès les phases les plus amont du processus de conception. Cela amènerait à prendre, si nous le souhaitons, des orientations plus efficaces dès le démarrage de la phase de conception et rester ainsi sur des choix faciles à optimiser aux phases ultérieures.

Pistes pour notre recherche : Les architectes intègrent les questions relatives au choix des matériaux et procédés de mise en œuvre dès les premières phases de la conception à savoir la phase esquisse. Pour cela, ils ne peuvent raisonner en terme de matériaux (quantité de matières) mais raisonnent en terme de dispositifs, c'est-à-dire la mise en œuvre d'un ou plusieurs matériaux. Il serait intéressant de ne plus attendre des volumes ou poids précis

de matériaux retenus dans un projet mais plutôt de raisonner en terme de dispositifs architecturaux types prédéfinis. Ces choix, si nous nous en tenons à désigner globalement des types de dispositifs, se discutent souvent en phase esquisse. Enfin, la totalité des personnes interrogées dans le cadre de notre enquête voit un réel intérêt à travailler ensemble dès les premières phases de conception (voire en phase de programmation) afin d'être efficaces. Il serait donc judicieux de proposer un outil répondant aux attentes de chaque acteur du bâtiment.

6.4.2. Quels champs d'études sur la qualité environnementale des matériaux sont, à ce jour, les plus opérationnels en situation de projet ?

Tendance générale : Les connaissances et outils actuels sur la qualité environnementale des matériaux sont principalement axés sur l'empreinte énergétique ou sur le bilan carbone. Ces champs d'études sont importants du point de vue de l'écologie, mais paraissent souvent anecdotiques aux yeux des concepteurs de projets architecturaux lorsqu'ils en arrivent à choisir des matériaux et leurs procédés de mises en œuvre. La qualité environnementale des matériaux ne se résume pas exclusivement à l'empreinte énergétique ou au bilan carbone. D'autres critères tels que la pollution, l'impact sur la santé, le transport, etc. sont à prendre en considération.

Amélioration souhaitable : il semblerait essentiel de disposer de connaissances et d'outils qui permettent de dégager un regard critique transversal sur les champs d'études attendus par les concepteurs de projets architecturaux. Lorsqu'il est question de matériaux, le concepteur a une vue globale du sujet : technicité, environnement, usage, esthétique, économie, etc. Aujourd'hui très peu d'outils renseignent sur les matériaux. Une des limites ou manques de ces outils est qu'ils traitent souvent un seul domaine intervenant dans le choix des matériaux.

Pistes pour notre recherche : Il serait intéressant d'identifier un nombre réduit de finalités attendues par les concepteurs lorsqu'ils sont amenés à choisir des matériaux. Nous pensons par exemple à un outil s'organisant autour d'une vision globale en répondant aux attentes des différents acteurs du bâtiment.

6.4.3. Quels niveaux d'expertise nécessitent les connaissances et outils actuels ?

Tendance générale : Les connaissances et outils actuels sur la qualité environnementale des matériaux exigent dans la majorité des cas, des niveaux d'expertise particulièrement pointus. Les professionnels de la qualité environnementale des villes et des bâtiments semblent pour le moment, relativement dépourvus. Seules quelques personnes spécialisées spécifiquement sur les matériaux proposent leur expertise. Ceci se vérifie, à la fois

concernant la manipulation de l'outil : données d'entrées, mais également l'analyse, la compréhension, la lecture et l'exploitation des résultats. De plus, il ressort de l'enquête menée que très peu d'architectes utilisent des outils d'aide au projet, qu'ils soient de premier ou de second genre. La raison avancée est le manque de temps. Lorsqu'un problème ou une difficulté est rencontré, le concepteur fait actuellement appel à une personne spécialisée dans le domaine.

Amélioration souhaitable : Comme ce fut le cas au cours des dernières années en ce qui concerne les expertises sur la maîtrise de consommations énergétiques ou bien encore la lumière naturelle, il semblerait important de proposer un outil simple d'accès (pour un non-expert en matériaux) qui favorise les échanges entre acteurs du processus de conception. Il a été également observé que la qualité graphique de l'interface influence la qualité de la compréhension de l'outil autant dans la prise en main de ce dernier que dans le rendu des résultats (qui permettront de faciliter les échanges entre acteurs du bâtiment).

Pistes pour notre recherche : Un outil simple d'accès qui favorise les échanges entre acteurs du processus de conception pourrait peut-être se baser sur un nombre réduit de notions compréhensibles par le plus grand nombre de personnes, notions accompagnées de définition didactiques destinées aux concepteurs qui voudraient s'informer plus amplement. Toutes ces observations nous amènent à avancer la nécessité de créer un outil intégré au temps de conception afin d'être efficace et utilisé par les architectes. Ceci implique une rapidité d'utilisation notamment dans le renseignement des données d'entrées tout en proposant des orientations, des pistes de réflexion pour ne pas revenir, dans les phases avancées du processus de conception, sur les choix initialement retenus.

6.5. Conclusion : les limites de notre enquête

Les postulats dégagés suite à notre état de l'art ont été vérifiés et complétés par l'enquête menée dans le cadre de notre recherche. Différents points sont à relever concernant les limites de notre enquête. Ils concernent principalement trois sujets : l'échantillon, la thématique des critères concernant les matériaux et l'analyse des discours.

Le choix du nombre de personnes enquêtées est une des limites de cette enquête. Interroger deux profils de personnes sur des thématiques dissociées mais néanmoins complémentaires a réduit de moitié l'échantillon prévu. Sur un total de 21 personnes interrogées, seulement 12 ont expliqué les pratiques relatives au choix des matériaux et procédés de mise en œuvre dans le processus de projet architectural et 10 ont discuté du rôle des outils d'aide au projet dans le processus de conception architectural et urbain.

La partie « critères pris en considération » a été abordée par les deux profils de personnes enquêtées. Nous nous concentrons, dans le cadre de notre travail de recherche, sur les réponses apportées par les divers concepteurs. Les personnes expertes ayant témoigné sur ce sujet, se sont focalisées sur leur domaine d'étude (thermique, acoustique, santé, ...). Leurs déclarations nous ont néanmoins permis d'approfondir les différents critères soulevés par les concepteurs de projets architecturaux et urbains.

Enfin, l'analyse des discours a été délicate. Certains concepteurs ont eu des difficultés à expliciter leur démarche concernant l'intégration des matériaux dans le processus de projet.

Conclusion partie 2

L'intérêt principal de notre enquête était de comprendre d'une part les pratiques des concepteurs concernant la question du choix des matériaux dans le processus de projet et d'autre part le rôle des outils d'aide au projet.

Nous avançons trois hypothèses qui ont été vérifiées par les entretiens menés. Pour rappel, nos postulats de départ sont les suivants :

- La majorité des connaissances et outils actuels traitant de la question des matériaux sont utilisés à une phase trop tardive dans le processus de conception pour revenir sur les choix initiaux.
- Les champs d'études concernant la problématique des matériaux et procédés de mise en œuvre sont importants du point de vue de l'écologie, mais semblent dérisoires pour une majorité de concepteurs de projets architecturaux et urbains.
- Les connaissances et outils actuels sur la qualité environnementale des matériaux demandent très souvent des niveaux d'expertise particulièrement pointus.

L'enquête réalisée fait ressortir la complexité de l'approche des matériaux dans le processus de projet. Il est important de souligner que cette question est omniprésente dès les premières phases de conception. C'est d'ailleurs à ce moment que les principaux choix s'opèrent. L'utilité des outils d'aide à la conception est donc réelle dans ses phases.

Le schéma du paradoxe de la construction (figure 17) met en avant la plus value potentielle maximale des outils d'aide à la conception au moment où le poids des choix de conception est fondamental (phase esquisse). Pourtant, c'est à ce moment que le concepteur a le moins d'informations disponibles. Afin d'aider le concepteur et d'être efficace, il est donc important de viser cette phase.

Au contraire, les outils d'évaluation trouvent leur intérêt dans les phases avancées du processus de projet, au moment où les données disponibles sont suffisamment précises. Ces outils ont l'avantage de procéder à des calculs lourds, de quantifier des phénomènes, de dimensionner des éléments, de proposer des ajustements. Ils ne peuvent pas modifier de manière lourde les choix initiaux car ils sont intégrés dans des phases trop avancées du projet, ce qui induirait de lourdes modifications.

Bien que réalisée à partir d'un échantillon réduit (21 personnes interrogées), cette enquête nous a également permis d'ouvrir notre réflexion sur différents points tels que :

- l'importance de l'interface graphique de l'outil proposé,
- les différents critères pris en compte lors des questions relatives au choix des matériaux,
- l'importance de travailler en équipe pluridisciplinaire dès les premières phases du processus de conception,
- l'importance de proposer un outil ayant une vision globale de la question des matériaux sans pour autant proposer une solution « optimale ». Il s'agit là de laisser aux concepteurs le choix de faire les pondérations nécessaires en vue d'obtenir la solution répondant le mieux aux différentes contraintes (art du compromis),
- le fait qu'il pouvait être perçu comme un outil de concurrence et non de complémentarité.

PARTIE 3 : « PROPOSER, DEVELOPPER, AIDER » : *MaTerre'iO*, un outil d'aide à la conception prototype mis à l'épreuve

« L'intérêt des outils d'aide à la conception, c'est de faciliter l'accomplissement d'une action complexe »

Inconnu

Résumé :

Nous exposons différentes propositions pour de futurs outils d'aide à la conception. Nous approfondissons 2 critères d'ingénierie environnementale : la pollution physique et l'empreinte énergétique. Nous illustrons notre travail par le prototype d'outil d'aide à la conception : *MaTerre'iO* que nous avons développé. Nous mettons *MaTerre'iO* à l'épreuve de concepteurs en architecture afin de valider ou d'invalidier nos diverses propositions.

Introduction de la partie 3

Nos travaux présentés précédemment nous ont amenés à réfléchir à des améliorations concernant la mise en place de futurs outils d'aide à la conception. Le principal objectif de ces pistes de réflexion est d'être en adéquation avec les modes de raisonnement et les pratiques des concepteurs en architecture, afin d'offrir une aide efficace et judicieuse à intégrer dans le processus de conception. Le développement d'un outil d'aide à la conception renseignant sur l'impact des matériaux et procédés de mise en œuvre va nous permettre d'illustrer et d'enrichir nos propos.

Dans le chapitre 7, nous explicitons les différentes innovations pour de futurs outils d'aide à la conception ainsi que leur intérêt.

Dans le chapitre 8, nous approfondissons deux critères de la grille d'analyse multicritères mise en place. Ces critères liés au domaine de l'ingénierie environnementale sont l'empreinte énergétique et la pollution physique. L'objectif principal de ce travail est de démontrer les principes de fonctionnement de notre grille. Il nous a également permis de cerner les manques de données concernant différentes caractéristiques relatives aux matériaux ainsi que la difficulté d'analyser certains de leurs critères.

Dans le chapitre 9, nous présentons notre prototype d'outil d'aide à la conception nommé *MaTerre'iO*. Il a pour objectif d'illustrer les propositions faites pour de futurs outils. Nous nous basons sur l'analyse d'un cas d'étude : la maison Galopin (G.G.R architectes).

Dans le chapitre 10, nous exposons les résultats de l'enquête n°2 menée auprès de concepteurs en architecture. L'objectif de cette enquête est de valider ou d'invalider les propositions faites pour de futurs outils d'aide à la conception.

Enfin, nous concluons la partie 3 en mettant en regard les propositions faites pour de futurs outils d'aide à la conception avec les tendances recueillies lors de l'enquête n°2.

7. Innovations proposées pour de futurs outils d'aide à la conception

7.1. Introduction

Les diverses études menées dans le cadre de nos recherches : études des potentialités des outils existants, analyse d'interfaces graphiques, enquête auprès de concepteurs et de personnes expertes dans un domaine lié à l'architecture, hypothèses de travail (tendance générale, amélioration souhaitable et pistes pour notre recherche), nous ont permis de dégager différentes orientations pour le développement d'outils innovants concernant la qualité environnementale des matériaux et procédés de mise en œuvre.

Nous proposons cinq principales innovations. Elles ont pour objectif d'améliorer l'utilisation, la cohérence et la pertinence des outils d'aide à la conception existants. Le but est de les rendre utiles, opportuns et accessibles aux concepteurs de projets architecturaux et urbains.

7.2. Les différentes innovations proposées

Les différentes innovations proposées répondent à un objectif commun et essentiel : aiguiller efficacement les concepteurs dès la phase de l'esquisse.

La question des matériaux et procédés de mise en œuvre intervient tout au long du processus de projet mais de manière variée (cf. chapitre 3). Nos entretiens avec des concepteurs en architecture ont clairement validé que les choix les plus essentiels sont pris en considération dès les toutes premières phases du processus de projet (pendant la phase esquisse), quels que soient le projet, le site et la méthode de travail utilisée par les concepteurs.

Il est primordial de viser cette phase du processus de conception pour l'élaboration de futurs outils. Les choix des concepteurs gagneront ainsi en efficacité. Cela permettra de rester sur des choix plus faciles à optimiser aux phases ultérieures du processus de projet (cf. figure 49).

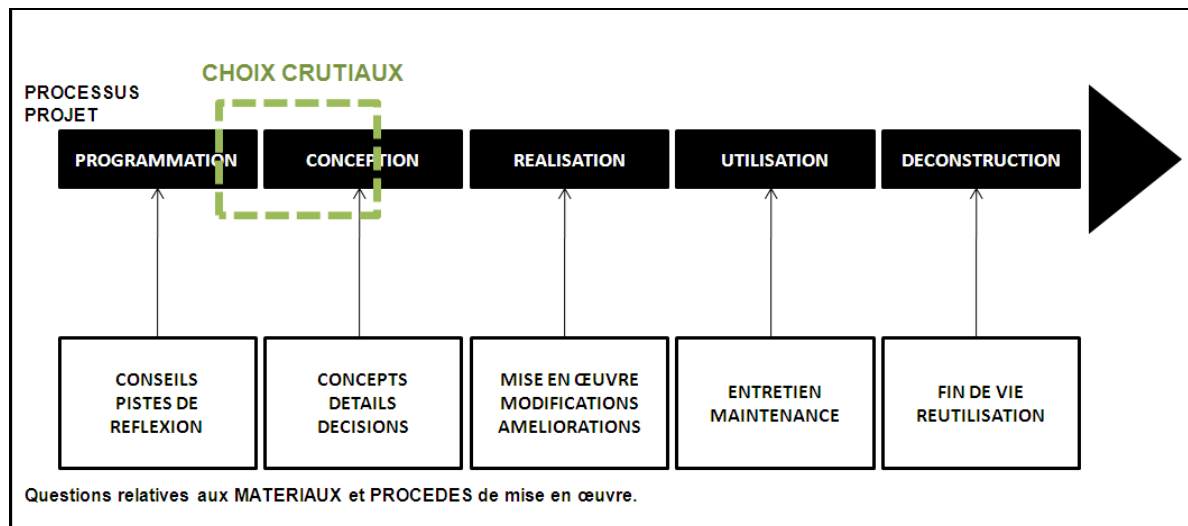


Figure 49 : Intégration des questions relatives au choix des matériaux et procédés de mise en œuvre tout au long du processus de projet, d'après le schéma de Fernandez (2007).

Revenir sur ses choix en phase avancée du processus de conception est non seulement une perte évidente d'efficacité mais a également un coût non négligeable puisque cela impacte sur d'autres domaines du projet architectural et urbain.

7.2.1. Evolution de la nature des conditions d'entrées demandées : des données d'entrées adaptées à la phase d'esquisse et en nombre limité (volumétrie, orientation, lieu (ville) dispositifs)

Comme annoncé précédemment, nous restons à ce jour sur des savoirs et outils qui amènent à sanctionner ou valider une proposition architecturale relativement aboutie. Les données à renseigner sont des quantités précises de matériaux. Il est donc fondamental de se situer dans des phases avancées du processus de conception afin d'avoir les renseignements nécessaires au fonctionnement de tels outils (données d'entrées).

Toujours dans cette logique d'aiguiller efficacement les concepteurs, il est essentiel de proposer des données d'entrée en adéquation avec le raisonnement des concepteurs en architecture. Nous proposons des données d'entrée qui s'intéressent aux dispositifs retenus et non aux différents matériaux (fastidieux à énumérer et différant des modes de pensée du concepteur). Il suffit de désigner grossièrement des types de dispositifs architecturaux (fondation, structures, cloisons, enveloppe, ouvertures et toiture), afin d'être en adéquation avec le mode de raisonnement des concepteurs à cette phase du processus de conception. Nous permettons ainsi la comparaison de différentes solutions dès la phase de l'esquisse, avant même l'introduction de détails constructifs. Il est alors plus simple pour le concepteur d'optimiser les choix retenus dans les phases avancées du processus de conception. Il est à souligner que cette tendance est actuellement en cours de

développement pour certains outils de quantification de l'impact d'un bâtiment comme nous avons pu le voir dans le logiciel Elodie qui tente de suivre cette logique.

Nous proposons également de limiter au maximum les données d'entrée. Nous devons nous concentrer sur les renseignements nécessaires au fonctionnement de l'outil et ne pas alourdir le temps de conception (déjà restreint) en complexifiant l'utilisation de l'outil par l'intégration de paramètres complexes et non adaptés à cette phase du processus de conception (esquisse).

7.2.2. Aider à dégager une vision globale du projet : vue d'ensemble des critères étudiés tout en réduisant le nombre de finalités proposées dans l'outil

L'intérêt de proposer une vision la plus globale possible sur les critères relatifs aux matériaux et procédés de mise en œuvre est d'être en adéquation avec le mode de pensée des concepteurs en architecture. Ces derniers raisonnent à partir d'un ensemble de connaissances issues de disciplines diverses. Ils traitent simultanément des données sociologiques, culturelles, techniques, constructives, économiques, esthétiques, environnementales, normatives. En phase de conception, l'articulation de l'ensemble de ces savoirs peut être délicate. C'est là tout le travail du concepteur en architecture qui a pour mission de gérer l'ensemble des concepts, contraintes, données, savoirs relatifs au projet et donc au matériau pour rester sur notre thématique de recherche.

Il nous semble intéressant de proposer un nombre réduit de finalités attenantes aux matériaux tout en essayant de rester dans l'objectif de proposer une vision la plus globale possible. L'intérêt de cette réduction de finalité se situe à deux niveaux :

- ne pas complexifier davantage les démarches des concepteurs en architecture,
- rester sur des notions simples en lien avec la phase de conception. Nous entendons par là : éviter de proposer des finalités trop pointues d'un point de vue technique ou environnemental.

Cette simplification de critères doit tout de même permettre de cerner l'ensemble des critères propres à la qualité des matériaux afin que les concepteurs en architecture y trouvent un réel intérêt.

7.2.3. Faciliter la compréhension et l'apprentissage des non experts : résultats exprimés selon trois approches distinctes

Les connaissances de l'ingénierie environnementale et les savoirs relatifs au choix des matériaux sont complexes et nombreux. Ils englobent un grand nombre de disciplines variées dont il est délicat de maîtriser l'ensemble des données. Par conséquent, il est fréquent de retrouver au sein des équipes de conception, des personnes expertes dans chacun des domaines liés à l'architecture : un ingénieur thermique, un ingénieur acoustique, un plasticien, un économiste, un sociologue, un assistant à maîtrise d'œuvre et/ou d'ouvrage (domaine lié à l'approche environnementale). Il nous paraît essentiel de proposer des solutions afin de faciliter la compréhension et l'apprentissage des non-experts sur l'ensemble de ces savoirs en permettant des échanges plus aisés entre les différents acteurs de l'équipe de conception.

Pour cela, nous proposons une décomposition des critères retenus en degrés de compréhension en lien avec le niveau d'expertise de l'utilisateur (cf. chapitre 2). Il est également important de cibler la forme des résultats en fonction des modes de pensée des futurs utilisateurs. Par exemple, les bureaux d'études souhaitent des résultats chiffrés et précis. A l'inverse, les concepteurs se sentent plus concernés lorsque les résultats sont exprimés de manière visuelle : graphique, radars,.... Il est important de tenir compte de ces observations, afin d'être en adéquation avec les attentes des acteurs du bâtiment.

7.2.4. Rassembler les données sur les impacts environnementaux des matériaux : base de données matériaux exhaustive et fiable

Nous revenons dans ce paragraphe sur une question essentielle des outils d'aide à la conception renseignant sur la qualité environnementale des matériaux : la production d'une base de données homogène et fiable.

Cette question est délicate. Il est complexe et difficile d'avoir accès à l'ensemble des données relatives à la totalité des matériaux existants. Ce travail de recueil est d'autant plus laborieux que de nombreux matériaux apparaissent sur le marché chaque jour. Cette multitude rend difficile la tâche du concepteur en architecture de connaître un maximum de caractéristiques relatives aux matériaux dans des champs disciplinaires variés.

Afin de cerner réellement les différentes données et de pouvoir les comparer, il est important de connaître les méthodes d'analyse qui ont été suivies pour l'étude des différents matériaux. Ces méthodes peuvent être diverses, ce qui amplifie le phénomène de flou et de manque de données compréhensibles dans lequel peut se trouver un concepteur en architecture.

Proposer une base de données fiable et exhaustive est donc une réelle innovation en comparaison aux outils existants qui possèdent des bases de données souvent très peu fournies. Nous avons donc rassemblé des données concernant un grand nombre de

matériaux, ceci pour un ensemble de critères non négligeable en comparaison aux sources sur lesquelles nous nous sommes appuyées (cf. chapitre2).

7.2.5. Proposer une interface simple, claire et lisible : jeu de couleurs, choix graphiques, typologie, choix des mots

Le rôle de l'interface dans l'appréhension et la compréhension de l'outil est important. Ce point n'est pas une innovation en soi. Au vu de son importance, il nous a semblé nécessaire de le mentionner au même titre que nos différentes propositions.

L'interface de l'outil contribue de manière significative au discernement et à l'appropriation de l'outil par les divers utilisateurs. La qualité de l'interface participe, avec le contenu et les modèles mathématiques utilisés, à la qualité de l'outil proposé. Elle en est même le garant puisqu'elle est le lien entre l'utilisateur et l'outil (cf. figure 50).

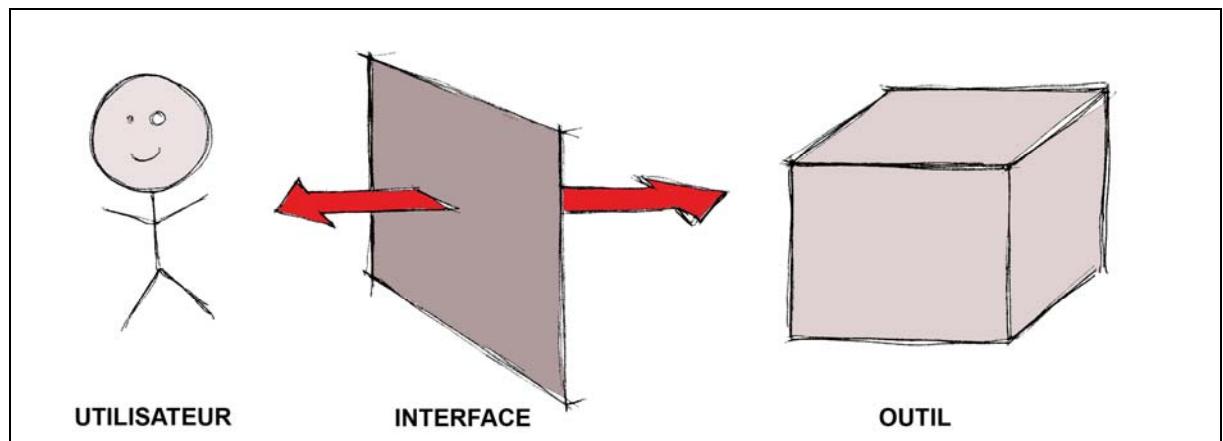


Figure 50 : Interface graphique : liaison entre l'utilisateur et l'outil

Il est indispensable de proposer une interface simple, claire et ludique. Nous devons cibler le public concerné, comprendre et analyser sa pratique professionnelle et être en adéquation avec son mode de travail.

Le concepteur en architecture est un professionnel pour lequel le visuel est important. Soigner l'esthétique et le graphisme de l'interface de l'outil est primordial. Il est également indispensable de prendre en compte la multitude de contraintes à gérer et donc de proposer une interface efficace ne venant pas alourdir cette frénésie de données.

7.3. Conclusion

Notre travail investit les démarches de conception à travers la question des choix de matériaux et de procédés de mise en œuvre. Cette question s'avère de plus en plus évoquée dans les démarches environnementales des maîtres d'œuvre. Elle fait partie néanmoins de celles les plus difficiles à maîtriser dans les démarches de conception (en comparaison aux questions d'efficacité énergétique ou de confort par exemple) tant les savoir-faire actuels s'articulent difficilement avec les modes d'actions des acteurs du processus de conception.

Nous avons souhaité, à travers ces propositions pour de futurs outils d'aide à la conception, faire avancer les démarches opérationnelles en architecture en rapprochant les pratiques permises par les outils d'aide à la conception et les modes de raisonnement et les activités des concepteurs en architecture.

Les différentes propositions énoncées ont toutes pour lignes de conduite de :

- renseigner les concepteurs dans les premières phases du processus de conception,
- ne pas alourdir le travail du concepteur en architecture mais bien d'être une aide constructive concernant les questions relatives au choix des matériaux et procédés de mise en œuvre,
- ne pas proposer une solution unique considérée comme la solution optimale. Nous préférons informer le concepteur sur l'ensemble des critères considérés et lui laisser le choix de la solution répondant le mieux aux diverses exigences du projet.

8. Approfondissement des critères d'ingénierie environnementale : la pollution physique et l'empreinte énergétique

8.1. Introduction

Dans l'optique de proposer une vision globale des matériaux et procédés de mise en œuvre dans le domaine de l'architecture, nous avons soumis une grille d'analyse multicritères composé de 7 critères principaux que nous rappelons :

- Empreinte énergétique,
- Pollution physique,
- Matérialité,
- Coût global,
- Technicité
- Usage,
- Réglementations.

La mise en place de ces critères a été possible suite à un état de l'art exhaustif et au recueil d'une multitude de connaissances, de savoirs et de données que nous avons essayé de classer et d'organiser pour en faire la grille que nous proposons actuellement. Il est illusoire de prétendre connaître de manière précise l'ensemble des domaines et disciplines s'organisant autour de ces différents critères. Seuls des spécialistes dans chacun de ces domaines pourraient expliciter les différents indices illustrant ces thématiques (critères).

Nous avons approfondi deux critères de la grille d'analyse mise en place afin d'illustrer nos propos et de cerner les limites de notre travail. Nous avons choisi pour diverses raisons, de nous concentrer sur le critère d'empreinte énergétique et sur le critère de pollution physique. Les raisons sont les suivantes :

- être en adéquation avec notre thématique de recherche : la transposition en architecture des savoirs relatifs aux matériaux à travers les connaissances d'ingénierie environnementale,

- en fonction de la maîtrise actuelle des différents critères proposés. Pour exemple, les domaines de l'éclairage naturel et de la thermique sont mieux connus par les concepteurs en architecture. Les questions environnementales liées aux matériaux sont aujourd'hui moins maîtrisées par cette profession.
- selon les travaux en cours au sein du Laboratoire de Recherche en Architecture. Nous pensons notamment aux travaux de recherche de Nathalie Tornay qui traitent des dimensions sensibles des matériaux dans le domaine de l'architecture (Tornay, 2010) et aux travaux de recherche de Marc Mequignon sur l'impact de la durée de vie du bâtiment sur le développement durable en fonction des solutions techniques (Mequignon, 2010).

Les critères d'empreinte énergétique et de pollution physique reposent sur les indices proposés dans les Fiches de Déclarations Environnementales et Sanitaires FDES. Ce choix a été fait car les FDES sont actuellement les données les plus accessibles en terme de qualité environnementale des matériaux. Elles sont précises et réglementées. Elles englobent un nombre important d'indices et concernent l'ensemble du cycle de vie du matériau considéré (production, transport, mise en œuvre, vie en œuvre et fin de vie). Ces fiches sont auto-déclaratives. Il est toutefois indispensable au fournisseur de suivre et d'explicitier la méthode d'évaluation choisie pour l'analyse de chacun des indices. Les données non renseignées doivent également être clairement mentionnées. Nous remarquons toutefois que des ambiguïtés peuvent apparaître à la lecture des FDES (notamment l'indice énergies primaires totales qui prend en compte l'énergie procédés et l'énergie matière ; ce qui ne tombe pas forcément sous le sens (Floissac, 2009)).

8.2. Le critère "empreinte énergétique"

L'empreinte énergétique concerne l'impact laissé sur l'ensemble des ressources. Nous prenons en compte les impacts sur l'environnement, sur l'Homme ainsi que l'impact des déchets résultants de l'utilisation des matériaux.

Nous proposons de décliner le critère "empreinte énergétique" en 2 indicateurs et 5 indices qui sont les suivants (cf. figure 51) :

EMPREINTE ENERGETIQUE	Consommations	2	Epuisement ressources	1
			Eau	1
	Profil énergétique	1	Energies récupérées	1
			Energies renouvelables	2
			Energies non renouvelables	3

Figure 51 : Déclinaison des indicateurs et indices du critère d'empreinte énergétique

8.2.1. Indicateur "Consommations"

L'indicateur "consommations" recense les différentes matières consommées tout au long du cycle de vie du matériau considéré. Nous prenons donc en compte l'épuisement des ressources et la consommation d'eau.

Indice "épuisement des ressources" exprimé en kg antimoine équivalent

L'indice "épuisement des ressources" est présent dans la partie environnementale des FDES. Il prend en compte l'ensemble des ressources énergétiques et non énergétiques à l'exception de l'eau qui est décliné dans un indice séparé.

Cet indice pondère chaque matériau par un coefficient qui coïncide avec un indice de rareté. Pour cela, la "ressource référente" est l'antimoine qui a une valeur de 1 par convention. C'est un élément chimique de la famille des pnictogènes. Son symbole est Sb et son numéro atomique est 51. L'antimoine est considéré comme une ressource rare.

Indice consommations d'eau

L'indice "consommation d'eau" est présent dans la partie environnementale des FDES. Il recense et comptabilise la totalité de l'eau consommée sur l'ensemble du cycle de vie. Cet indice prend en compte toutes les sources d'eau confondues.

8.2.2. Indicateur "Profil énergétique"

L'indicateur "profil énergétique" recense l'ensemble des sources d'énergie utilisée dans le cycle de vie du produit. Nous pouvons l'assimiler à l'indice "énergie primaire totale" qui est présent dans la partie environnementale des FDES auquel nous ajoutons l'indice "énergie récupérée". Cet indice représente la somme des consommations de ressources énergétiques : les ressources énergétiques renouvelables et les ressources énergétiques non renouvelables, elles-mêmes composées de l'énergie procédé (apport nécessaire pour la mise en œuvre) ainsi que l'énergie matière.

Indice énergie récupérée

L'indice "énergie récupérée" présent dans les FDES, prend en compte l'énergie que l'on peut récupérer lors de la fabrication du matériau, en vue d'être réutilisée.

Indice énergies renouvelables

L'indice "énergie renouvelable", présent dans la partie environnementale des FDES, comptabilise les énergies qui sont créées à partir d'une ressource considérée comme renouvelable. Sont prises en compte les ressources qui sont cultivées ou renouvelées ou régénérées à une vitesse supérieure à celle de son épuisement.

Indice énergies non renouvelables

L'indice "énergie non renouvelable" est présent dans la partie environnementale des FDES. Il comptabilise les énergies qui sont créées à partir d'une ressource considérée comme non renouvelable. Les ressources existantes en différents points en quantité fixe et qui ne pourront pas être renouvelées à l'échelle de temps humaine sont prises en compte dans cet indice.

8.3. Le critère de "pollution physique"

La pollution physique est la mise en contact de substances avec l'environnement à un degré qui les rend nuisibles pour la santé humaine, la santé d'autres organismes vivants, l'environnement et / ou le climat.

Nous proposons de décliner le critère "pollution physique" en 3 indicateurs et 17 indices qui sont les suivants (cf. figure 52). Les différents indices retenus découlent de l'étude des FDES et des ouvrages des Docteurs Déoux et Déoux (2004).

APPROCHE GLOBALE	APPROCHE DETAILLEE	Pondérations	APPROCHE EXPERTE	Pondérations
POLLUTION PHYSIQUE	Impact Environnement	3	Changement climatique	1
			Acidification atmosphérique	1
			Pollution air	1
			Pollution eau et sol	1
			Destruction couche ozone	1
			Formation oz photochimique	1
	Impact humain	3	Humidité microorganismes	1
			Emissions fibres et particules	1
			Emissions COV	1
			Emissions radioactives	1
			Risque cancer	véto
	Impact socio-économique des déchets	1	Valorisés (total)	1
			Éliminés dangereux	5
			Éliminés DIB	2
			Éliminés inertes	2
			Éliminés radioactifs	4

Figure 52 : Déclinaison des indicateurs et indices du critère de pollution physique

8.3.1. Indicateur "Impact Environnement"

L'indicateur "environnement" recense l'ensemble des atteintes que le matériau peut avoir sur l'environnement, c'est-à-dire le milieu dans lequel vit l'Homme. Nous prenons donc en compte les impacts sur l'air, l'eau, le sol, les ressources naturelles, la faune, la flore, les écosystèmes, la biosphère... .

Indice "changement climatique"

Le changement climatique est une modification des paramètres pris en compte dans le climat de la Terre. Ces changements : augmentation de la température moyenne terrestre, sécheresse, salinisation, désertification, peuvent être la conséquence de processus

intrinsèques à la planète, d'influences extérieures telle que les variations de l'activité solaire et / ou d'activité humaine dont la construction de bâtiments et infrastructures.

Dans le cas de notre travail, le changement climatique quantifie la quantité de l'ensemble des émissions de gaz à effet de serre dans l'atmosphère induite par le matériau considéré, ceci sur l'ensemble de son cycle de vie.

Cet indice est exprimé en kg équivalent CO₂ qui est la référence d'agrégation des autres gaz qui n'ont pas le même effet. Pour exemple, 1kg de CH₄ (méthane) participe 21 fois plus à l'effet de serre qu'1kg de CO₂. De même, 1kg de N₂O (protoxyde d'azote, 310 fois plus qu'1 kg de CO₂) (INIES, 2005).

Indice "acidification atmosphérique"

L'indice "acidification atmosphérique" est présent dans la partie environnementale des FDES. Il prend en compte l'augmentation de la quantité de substances acides dans l'atmosphère. Certains composés tels que le dioxyde de soufre (SO₂) ou les oxydes d'azote (NO_x) etc, se transforment en acides et apparaissent dans les précipitations. Ces pluies acides se retrouvent à la fois dans les eaux de ruissellement et de surfaces. Elles ont des effets extrêmement nocifs sur l'environnement : faune et flore. Elles sont parfois à l'origine du dépérissement de certaines forêts.

Cet indice est exprimé en kg équivalent SO₂. La référence retenue est la contribution à l'acidification du SO₂ dioxyde de soufre, auquel nous donnons une valeur de 1 au coefficient d'agrégation.

Indice "pollution de l'air"

L'indice "pollution de l'air", présent dans la partie environnementale des FDES, apprécie les impacts toxiques et écotoxiques des émissions du matériau considéré dans l'air. Il évalue essentiellement la quantité de métaux et de composés organiques émis tout au long du cycle de vie du produit.

Cet indice est exprimé en m³ d'air nécessaire à la dilution des émissions du matériau considéré. Il se base sur des valeurs limites mises en place dans la réglementation des ICPE (Installations Classées pour la Protection de l'Environnement¹⁵).

¹⁵ Les Installations Classées pour la Protection de l'Environnement (ICPE) sont des installations qui peuvent présenter des dangers ou inconvénients pour la commodité du voisinage, la santé, la sécurité et la salubrité publiques,

Indice "pollution de l'eau "

L'indice "pollution de l'eau", présent dans la partie environnementale des FDES, estime les impacts toxiques et écotoxiques des émissions du matériau considéré dans l'eau et les sols. Il évalue essentiellement la quantité de métaux et composés organiques émis tout au long du cycle de vie du produit.

Cet indice est exprimé en m³ d'eau nécessaire à la dilution des émissions du matériau considéré. Comme pour l'indice de pollution de l'air, il se base sur des valeurs limites mises en place dans la réglementation des ICPE.

Indice "destruction de la couche d'ozone stratosphérique"

L'indice "destruction de la couche d'ozone stratosphérique" est présent dans la partie environnementale des FDES. L'ozone est une molécule présente de manière très concentrée dans la stratosphère. Cette couche nous protège des rayons ultraviolets UV-B qui sont dangereux en les filtrant. Certains produits peuvent participer à la destruction de cette couche.

L'indice présenté évalue la contribution du matériau considéré dans cette dégradation de l'ozone stratosphérique. Chaque composé susceptible de détruire l'ozone stratosphérique est agrégé en fonction de sa nocivité. La molécule de référence est le trichlorofluorométhane CCl₃F également appelé fréon 11, CFC 11 ou R11. Cet indice s'exprime donc en kg équivalent CFC 11.

Indice "formation de l'ozone photochimique"

L'indice "formation de l'ozone photochimique" est présent dans la partie environnementale des FDES. Il évalue la formation d'ozone stratosphérique due à l'émission de composés dans l'air par le matériau considéré sur l'ensemble de son cycle de vie. L'ozone est un gaz dangereux pour l'Homme dans les basses couches de l'atmosphère. C'est un irritant respiratoire puissant (alors qu'il a un rôle protecteur dans les hautes couches de l'atmosphère comme présenté dans l'indice "destruction de la couche d'ozone stratosphérique").

l'agriculture, la protection de la nature et de l'environnement ou la conservation des sites et des monuments (art. L511.1 du Code de l'Environnement).

La molécule de référence est l'éthylène C₂H₂ qui produit de l'ozone lorsqu'il entre en contact avec l'oxygène (transformation chimique sous l'effet du rayonnement solaire et d'une température élevée). Cet indice s'exprime donc en kg équivalent C₂H₂.

8.3.2. Indicateur "Impact humain et Santé"

L'indicateur "impact humain et santé" recense les impacts nocifs que le matériau peut avoir sur l'Homme.

Les principales informations relatives à l'impact des matériaux sur la santé se trouvent dans les FDES, les différents travaux du CSTB, la norme NF environnement, les écolabels dont le label européen, et le marquage CE. Pour l'étude de cet indicateur nous nous sommes principalement basés sur les FDES découlant de la directive européenne des produits de construction ainsi que sur les différents rapports produits par le CSTB et les travaux des Docteurs Déoux et Déoux (2004).

Indice "humidité et micro-organismes"

L'indice "humidité et micro-organismes" est présent dans la partie sanitaire des FDES sous le nom de "comportement face à la croissance fongique et bactérienne". Nous avons préféré retenir le terme mis en avant par les Docteurs Déoux et Déoux (2004) car il nous paraît plus parlant pour des personnes non spécialisées dans ce domaine. Cet indice s'intéresse à la sensibilité des matériaux de construction aux micro-organismes. Ces derniers apparaissent dans des bâtiments humides où la température est élevée. Cette sensibilité augmente principalement en fonction de la composition du produit de construction et de sa capacité de rétention d'eau.

Cet indice est évalué par rapport à l'apparition de moisissures et de bactéries lors d'essais proposés par le CSTB.

Indice "émissions de fibres et de particules"

L'indice "émissions de fibres et de particules", présent dans la partie sanitaire des FDES, prend en compte les particules qui contiennent de la silice cristalline qui, par inhalation répétée peuvent provoquer des fibroses et des cancers, ainsi que les fibres qui sont des particules allongées pouvant être pathogènes (matériaux fibreux ayant des particularités thermiques (isolant) et phoniques).

Indice "émissions de COV Composés Organiques Volatiles"

L'indice "émissions de COV Composés Organiques Volatiles" est présent dans la partie sanitaire des FDES. Cet indice comptabilise l'ensemble des émissions de COV produit par le matériau de construction. Les COV participent à la dégradation de l'air intérieur et sont nocifs pour l'Homme. Les familles de matériaux premièrement incriminées sont les revêtements de sols et murs, les éléments de cloisonnage et plafonnages, les peintures et vernis, les produits de protection du bois, les colles, enduits et mastics, les produits de ragréage des sols et les matériaux d'isolation et de maçonnerie (Déoux et Déoux, 2004).

Indice "émissions radioactives"

L'indice "émissions radioactives", présent dans la partie sanitaire des FDES, comptabilise les émissions de la radioactivité naturelle des produits de construction.

Indice "risque cancer"

L'indice "risque cancer" est présent dans la partie sanitaire des FDES et classe les produits de construction en fonction de leur risque cancérogène. Il est actuellement délicat de valider la corrélation entre les matériaux de construction et les cancers (le facteur temps étant nécessaire). Toutefois, certains matériaux tel que l'amiante sont connus pour leur toxicité.

8.3.3. Indicateurs "Impact socio-économiques des déchets"

L'indicateur "impact socio-économiques des déchets" s'intéresse à l'ensemble des déchets générés par le matériau considéré.

Indice "déchets valorisés"

L'indice "déchets valorisés" est présent dans la partie environnementale des FDES. Il prend en compte l'ensemble des déchets générés tout au long du cycle de vie du matériau considéré et qui sont récupérés, recyclés ou valorisés. Par exemple, le recyclage qui est une économie de matières est pris en compte dans la comptabilisation des "déchets valorisés".

Indice "déchets éliminés dangereux"

L'indice "déchets éliminés dangereux" présent dans la partie environnementale des FDES, calcule l'ensemble des déchets qui sont éliminés et dangereux (déchets classés conformément à la classification européenne). Les déchets radioactifs ne sont pas comptabilisés dans cet indice.

Indice "déchets éliminés (DIB)"

L'indice "déchets éliminés" est présent dans la partie environnementale des FDES. Il calcule l'ensemble des déchets qui sont éliminés (conformément à la classification européenne).

Indice "déchets inertes"

L'indice "déchets inertes" présent dans la partie environnementale des FDES, calcule l'ensemble des déchets qui sont éliminés et classés inertes par la classification européenne. Ces déchets ne subissent aucune modification physique, chimique ou biologique significative. Ils ne se décomposent pas. Ils ne brûlent pas. Ils ne produisent aucune réaction physique ou chimique. Ils ne sont pas biodégradables. Ils ne détériorent pas d'autres matières avec lesquelles ils entrent en contact, et ne peuvent donc pas entraîner une pollution de l'environnement ou nuire à la santé humaine. (Source : Directive 1999/31/CE du conseil du 26 avril 1999 - JOCE du 16 juillet 1999.).

Indice "déchets radioactifs"

L'indice "déchets radioactifs" est présent dans la partie environnementale des FDES. Il calcule l'ensemble des déchets qui sont éliminés et classés radioactifs par la classification européenne.

Toute substance radioactive dont l'activité est telle que son rejet et sa dispersion dans l'environnement ne sont pas autorisés, et pour laquelle aucun usage n'est envisagé, est considérée comme déchet radioactif¹⁶.

¹⁶ http://www.actu-environnement.com/ae/dictionnaire_environnement/definition/dechet_radioactif.php4

8.4. Conclusion

Du point de vue de la pratique architecturale mais également de l'enseignement, il nous semble intéressant de décliner les différents savoirs d'ingénierie environnementale relatifs aux matériaux en 3 degrés de compréhension. Ces connaissances sont complexes et peuvent paraître dérisoires pour un concepteur en architecture si elles lui sont transmises de manière brute (approche experte). L'intérêt de notre travail est de "traduire", pour les concepteurs en architecture, ces savoirs techniques. Dans cette optique, nous proposons différentes approches selon le niveau de connaissances de l'utilisateur ainsi que selon le degré de précision souhaité.

L'approfondissement de deux critères d'ingénierie environnementale « la pollution physique et l'empreinte énergétique » nous a également permis de relever différents points :

- les données relatives à l'environnement sont très spécialisées, relativement accessibles et souvent incomplètes,
- les données relatives à l'impact sanitaire des matériaux (impact sur la santé humaine) sont encore faibles et peu mises en avant (à ce jour, les fabricants semblent se focaliser sur les émissions de COV). Soulignons toutefois, que cette question est d'actualité étant donné que les concepteurs en architecture et les usagers sont de plus en plus préoccupés par l'impact sur la santé de leur environnement construit. Cette prise de conscience peut faire accélérer les processus d'analyses relatives aux indices impactant sur la santé humaine.

9. *MaTerre'iO* un prototype d'outil d'aide à la conception

9.1. Introduction

MaTerre'iO a été pensé afin de répondre à une exigence fondamentale : aiguiller les concepteurs dès la phase de l'esquisse. Son utilisation et son efficacité prennent tout leur sens dans les phases amont du processus de conception. Il apporte des connaissances et des savoirs nécessaires, afin de réaliser des choix éclairés, au moment où le concepteur en architecture doit se positionner. Il permet ainsi d'être une aide efficace, un soutien, sans pour autant prendre le pas sur la créativité nécessaire dans la conception d'un projet architectural et urbain.

MaTerre'iO illustre les innovations proposées et l'approfondissement des critères étudiés précédemment. Nous présentons dans ce chapitre les principes de ce prototype d'outil. Nous mettons en pratique *MaTerre'iO* à travers une étude de cas : la maison Galopin (G.G.R architectes).

9.2. Développement de l'interface graphique du prototype d'outil d'aide à la conception *MaTerre'iO*

Ne maîtrisant aucune notion de développement informatique et jugeant utile d'illustrer nos propos par une maquette d'outil d'aide à la conception permettant de visualiser nos propositions, nous nous sommes tournés vers le développement de type web qui a pour intérêt d'être relativement facile d'utilisation et de pouvoir accéder au prototype *MaTerre'iO* depuis Internet.

9.2.1. Développement de la maquette : Interface *MaTerre'iO*

La conception de la maquette *MaTerre'iO* est basée sur une architecture logicielle modulaire découpée par fonction :

- une IHM Interface Homme Machine gérée au travers de pages html et une mise en forme commune des pages HTML Hypertext Markup Language¹⁷ en CSS Cascading Style Sheets¹⁸,
- une gestion dynamique des graphes implémentée en langage PHP Hypertext PreProcessor¹⁹,
- la gestion des données pouvant être exploitées à partir de différentes sources, bases de données ou fichiers textes. Actuellement les données de *MaTerre'iO* sont stockées sur fichier texte.

Les technologies utilisées dans la mise en place de cette maquette nous ont permis d'intégrer un projet référence statique : la Maison Galopin des architectes Gouwy, Grima et Rames. Il est possible de naviguer dans la maquette sans pouvoir modifier les diverses données ou y intégrer un autre projet.

9.2.2. Intérêt d'accéder à *MaTerre'iO* depuis Internet

Nous accédons à l'outil *MaTerre'iO* depuis Internet. L'omniprésence du web au sein des mentalités et sociétés confère une facilité d'accès conséquente. Aucune installation particulière n'est nécessaire pour l'utilisateur final. L'ensemble des langages utilisés est interprété directement sur le site hébergeur du prototype (www.toile-libre.com). L'outil est praticable par plusieurs utilisateurs en même temps. C'est un espace qui pourra devenir un lieu de communication et de partage.

Ce choix s'est également fait dans l'optique de réaliser une enquête auprès d'un large panel de concepteurs en architecture (accessibilité de l'outil depuis Internet). A ce jour, le manque de disponibilités des concepteurs visés et le peu de temps dont nous bénéficions ne nous ont pas permis de réaliser cette enquête à l'échelle souhaitée.

¹⁷ HTML est le langage normalisé pour créer des pages Web

¹⁸ CSS est un langage informatique qui sert à décrire la présentation des documents HTML et XML. C'est un support à l'html.

¹⁹ PHP est un langage de scripts libres principalement utilisé dans la production de pages Web dynamiques.

9.3. Illustrations des innovations proposées par le prototype d'outil *MaTerre'iO*

MaTerre'iO nous permet d'illustrer les différentes innovations proposées. Ces dernières ayant été détaillées précédemment, nous présentons uniquement les actions mises en place dans l'outil.

9.3.1. Innovation n°1 : Evolution de la nature des conditions d'entrées

Nous proposons de limiter nos données d'entrées dans l'outil *MaTerre'iO* à (cf. figure 53) :

- la volumétrie 3D simplifiée du projet étudié ainsi que son orientation. Nous avons choisi l'outil de modélisation Sketchup pour deux principales raisons. Il est possible de modéliser rapidement et efficacement une forme architecturale. Il est aujourd'hui de plus en plus utilisé au sein des agences,
- la ville la plus proche du site sur lequel sera implanté le futur projet. Cette donnée est importante afin de prendre en compte les conditions climatiques du lieu sur lequel sera implanté le futur projet,
- le renseignement des dispositifs retenus pour chaque face du bâtiment : enveloppe, toiture, fondation, ouverture, les dispositifs choisis. Pour cela, il serait intéressant de cerner les dispositifs les plus utilisés, de cerner ceux « en vogue », et de proposer à l'utilisateur de pouvoir ajouter, si besoin, une ou des combinaisons de matériaux en ayant un accès à la base de données de l'outil (*onglet dispositif – bouton ajout de dispositif*).

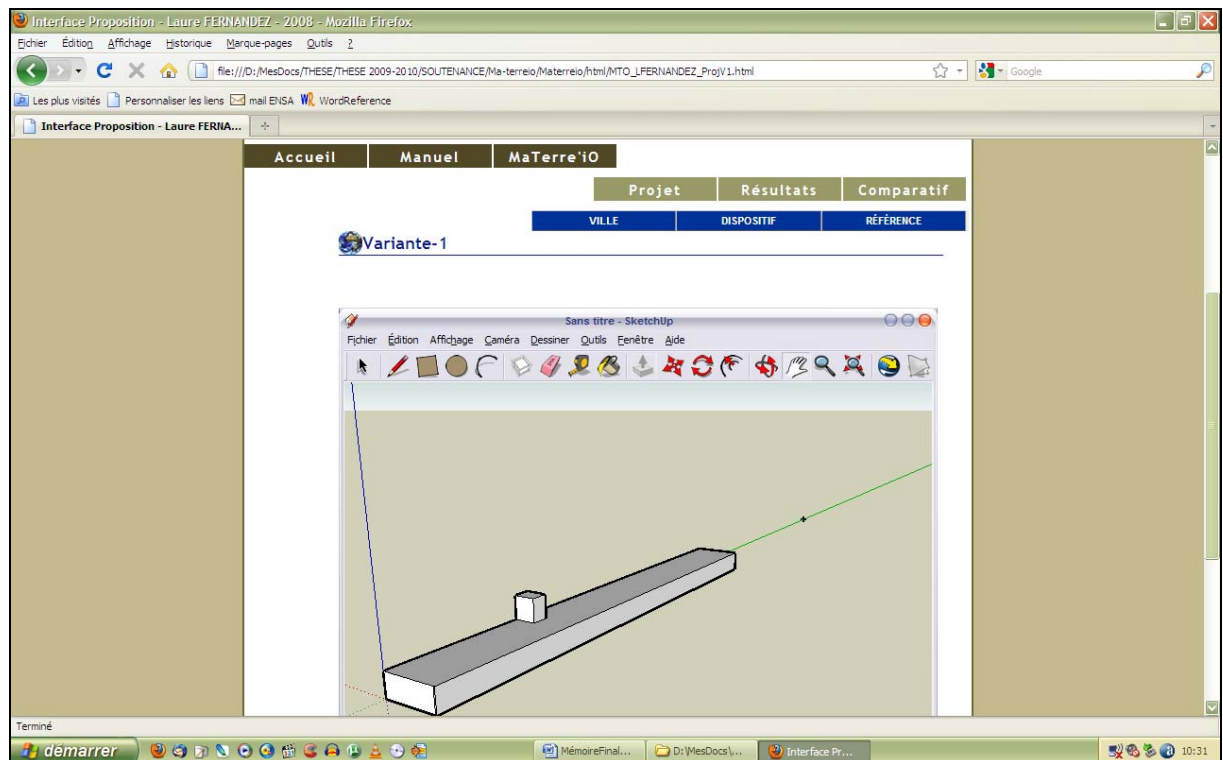


Figure 53 : Impression écran du prototype d'outil d'aide à la conception *MaTerre'io* : les données d'entrée de l'outil

9.3.2. Innovation n°2 : Proposer une vision globale

Nous proposons dans *MaTerre'io* une vision globale de la question des matériaux et procédés de mise en œuvre autour des 7 critères retenus dans notre grille d'analyse multicritères (cf. figure 54 et chapitre 2). Nous structurons à travers cette grille un ensemble de données non organisées. Le but est de faciliter l'intégration des divers questionnements liés aux matériaux dans le processus de conception.

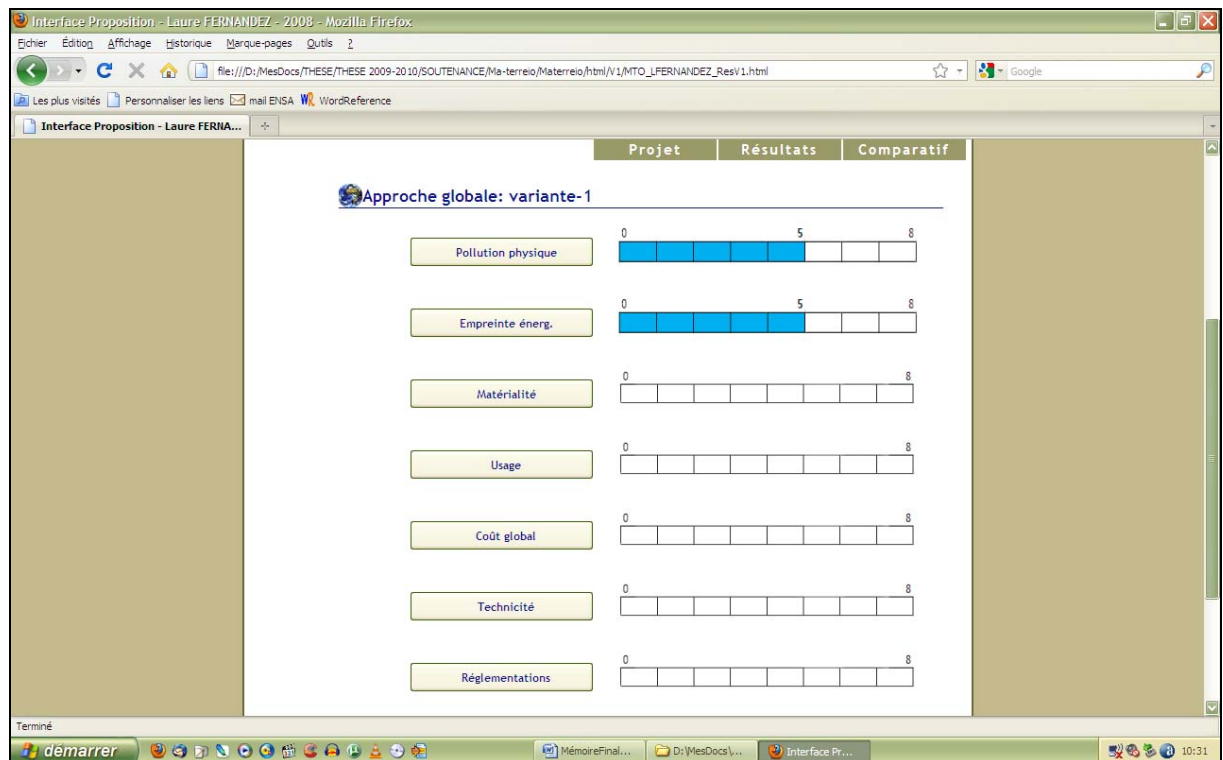


Figure 54 : Impression écran du prototype d’outil d’aide à la conception *MaTerre’iO* : approche globale

9.3.3. Innovation n°3 : Décomposition des connaissances : 3 degrés de compréhension

Nous proposons un premier degré : approche globale pour les concepteurs en architecture. Un deuxième degré : approche détaillée, approfondit de manière simple les critères présentés dans l’approche globale. Ce degré de compréhension est proposé pour les concepteurs en architecture s’intéressant de manière plus approfondie à un ou plusieurs critères proposés (cf. figure 55).

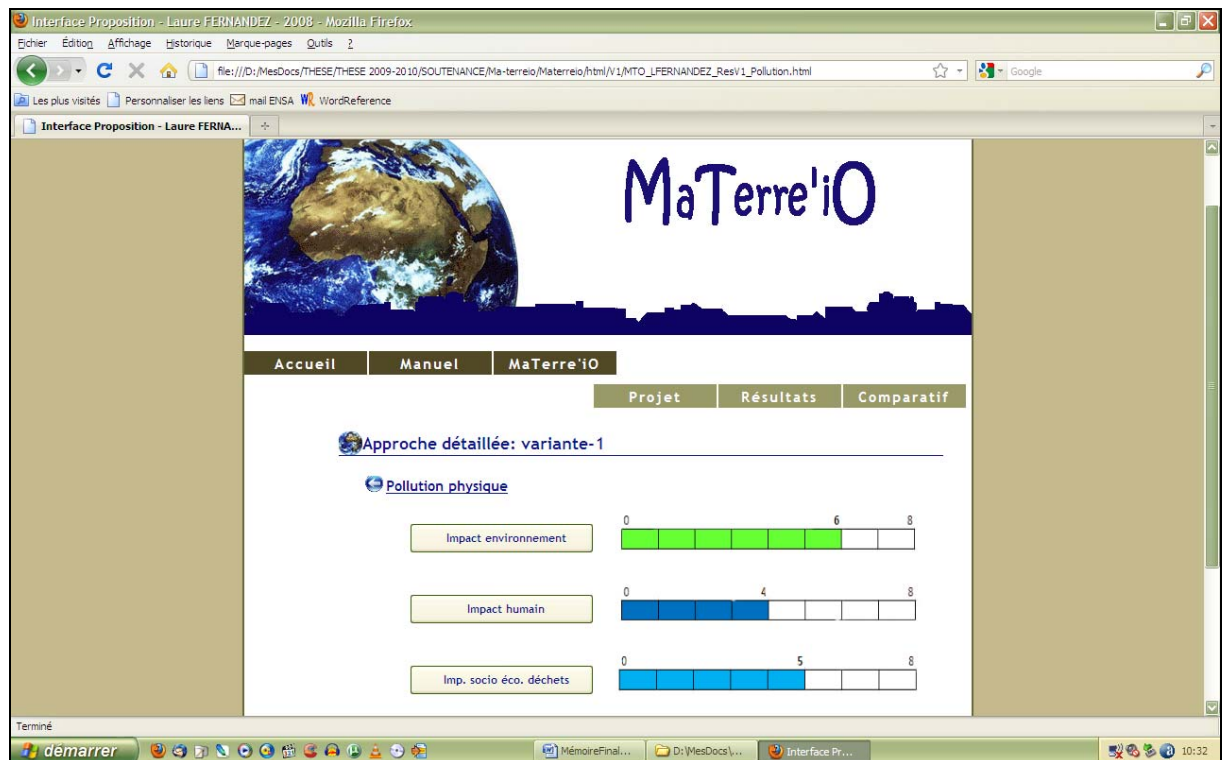


Figure 55 : Impression écran du prototype d'outil d'aide à la conception *MaTerre'io* : approche détaillée – second degré

Enfin le troisième degré concerne l'approche experte. Elle exprime de manière détaillée et précise les indices concernés par les questions relatives au choix des matériaux (cf. figure 56). Elle vise un public spécialisé dans le domaine (BE, AMO,...).

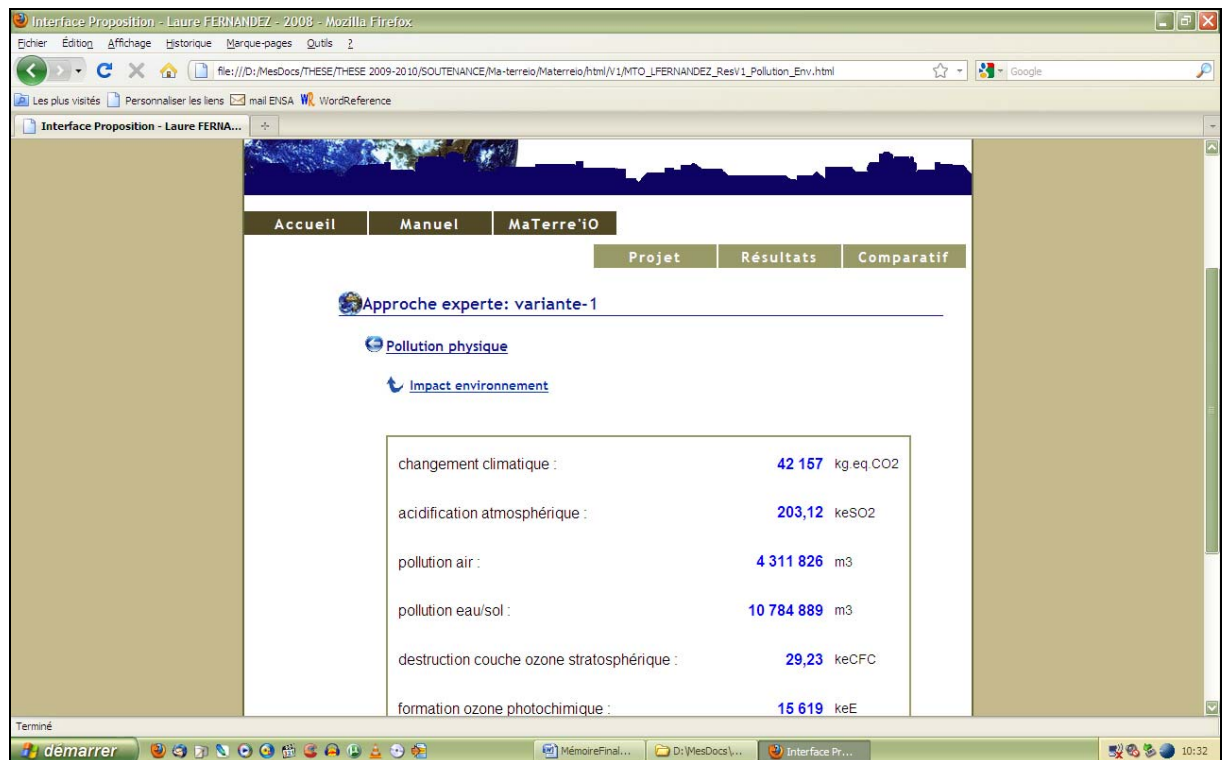


Figure 56 : Impression écran du prototype d'outil d'aide à la conception MaTerre'IO : approche experte – troisième degré

Outre le fait de cibler un public différent, ces trois approches permettent également de renseigner le concepteur sur son choix à différentes phases du processus de conception. L'approche globale et détaillée sont des aides pour les phases amont du processus de conception (esquisse, avant-projet sommaire). L'approche experte est un soutien dans des phases un peu plus avancées (avant-projet sommaire, avant-projet détaillé).

Nous pensons qu'il est également indispensable de cibler la forme des résultats en fonction du degré de compréhension et de l'approche concernée. Nous proposons pour les approches : globale et détaillée, d'indiquer les résultats sous la forme de notation, de tendances.

Nous avons choisi une notation entre 0 et 8 : 0 étant très mauvais et 8 étant très bon (cf. figure 57).

	0	1	2	3	4	5	6	7	8
	TMv		Mv	Moy		B		TB	
	TMv : Très Mauvais; Mv : Mauvais; Moy: Moyen; B: Bien; TB: Très Bien								

Figure 57 : Système de notation des approches globale et détaillée : tendance exprimée entre 0 et 8

Les résultats de l'approche experte sont indiqués sous forme de résultats chiffrés et de radars (comparatif) afin d'être en adéquation avec les attentes des personnes spécialisées qui, ayant des acquis non négligeables sur ces questions, ne se contenteront pas de résultats sous la forme de tendance (cf. figure 58).

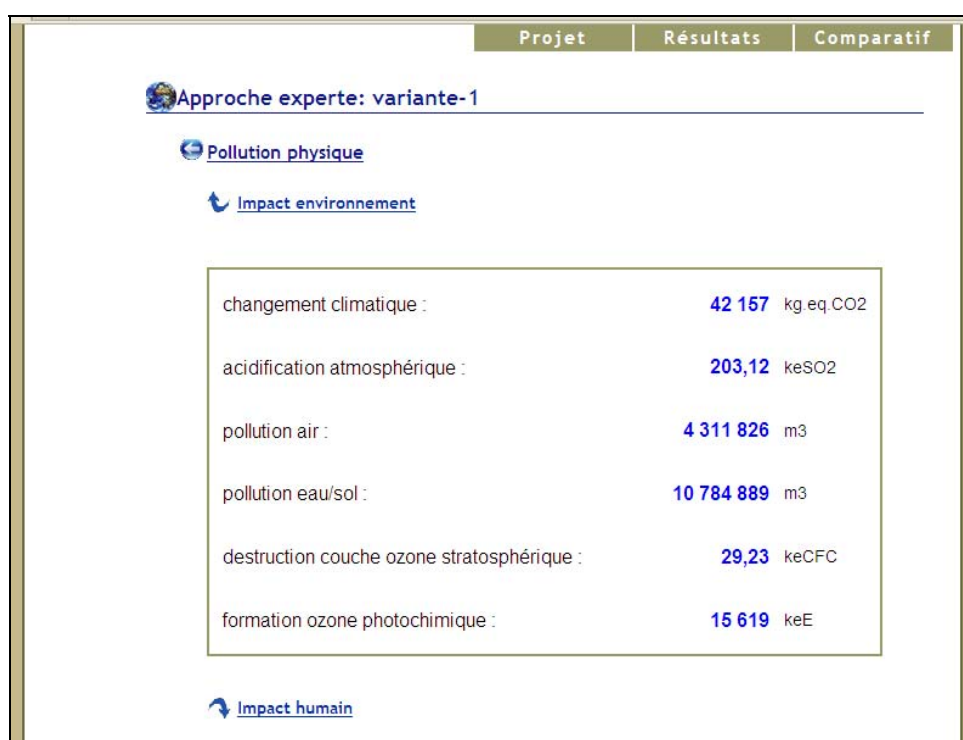


Figure 58 : Système de notation de l'approche experte : résultats chiffrés

9.3.4. Innovation n°4 : Rassembler les diverses données sur les matériaux

Dans le cadre de notre prototype d'outil, nous nous sommes appuyés sur la base de données mise en place au sein du LRA (cf. chapitre 2). Cette base s'articule autour d'informations provenant de diverses sources qui ont été comparées. Son utilisation dans

le prototype d'outil *MaTerre'iO* se situe au niveau des renseignements des différents indices mis en place.

Alors que cette base de données est relativement exhaustive en comparaison des diverses sources que nous avons étudiées, nous manquons encore de données concernant un nombre significatif de matériaux dont les plus marquants concernent les familles de matériaux : menuiseries, bardage, éléments structurels (liste non exhaustive). Nous manquons également de données relatives à l'impact sanitaire (impact humain).

9.3.5. Innovation n°5 : Interface simple, claire et lisible

Dans le développement de l'outil *MaTerre'iO*, nous nous sommes attachés à être le plus sommaire et clair possible. Les choix des icônes et du graphisme de notre interface se veulent simples. Nous avons tenté de limiter le nombre de boutons iconographiques et de mettre en place un jeu de couleurs en fonction de l'usage des différents boutons.

Pour exemple, les boutons en marron concernent les données générales relatives à l'outil (accueil – manuel et accès direct à l'outil *MaTerre'iO*). Les onglets en beige concernent le fonctionnement de l'outil. L'onglet "projet" permet de modéliser le projet étudié et de renseigner les différentes données d'entrées (boutons bleu). L'onglet "résultat" permet d'accéder aux différents résultats de l'approche globale pour les différentes variantes renseignées (maximum 3 variantes). L'onglet "comparatif" permet de comparer les différentes variantes intégrées dans l'outil (cf. figure 59).



Figure 59 : Légende des choix iconographiques dans le prototype d'outil *MaTerre'io*

9.4. Mise en place des bornes pour l'ensemble des indices étudiés dans *MaTerre'io*

Afin de proposer des tendances pour l'ensemble des indicateurs et critères de notre grille d'analyse, nous avons mis en place des bornes nous permettant de situer les dispositifs constructifs du bâtiment sur nos échelles de notations (de très bon à très mauvais). Pour cela, nous avons situé le résultat obtenu dans l'approche experte, entre ces bornes. Nous avons ainsi obtenu une note (++, +, 0, -, --) que nous avons pu retranscrire une fois pondérée et additionnée aux autres indices.

La difficulté rencontrée dans l'élaboration de ce travail est l'accès aux données nous permettant de définir les bornes pour chaque indice.

Les critères environnementaux : méthode

Les bornes relatives aux indices liés à l'aspect environnemental et énergétique des matériaux ont été définies à partir de la base de données sur laquelle nous avons travaillé à l'exception de l'indice épuisement des ressources.

Nous avons pris l'ensemble des matériaux intégrés à la base. Nous avons relevé la valeur minimale et la valeur maximale que nous avons placées à l'extrémité des bornes. Nous avons fait une moyenne de l'ensemble des matériaux pour chaque indice environnemental

concerné. Nous avons placé ce résultat au centre des bornes. Nous avons ensuite divisé en 2 l'écart entre la valeur minimum et la moyenne ainsi qu'entre la valeur maximum et la moyenne afin d'obtenir une échelle de valeur en 5 points : très bon, bon, moyen, mauvais, très mauvais. Il est à souligner que dans le cas de résultat négatif (concernant les valeurs minimales), nous avons choisi de mettre notre borne minimale à 0.

Après étude de plusieurs cas, nous avons relevé un manque de cohérence concernant les bornes *Mauvaise (Mv)* et *Très Mauvaise (TMv)*. Ces bornes proposaient un écart trop important pour être significatives. Nous avons donc choisi de multiplier par 2 la valeur moyenne afin d'obtenir la valeur maximale.

Dans un souci de clarté, nous présentons les bornes mises en place sous la forme d'un tableau récapitulatif par indice (cf. figure 60).

INDICE	Unité	VALEUR MINI.		MOYENNE		VALEUR MAXI.
		++	+	0	-	--
Energie récupérée		> 0	0			
Energie renouvelable	MJ	0	80	160	240	320
Energie non renouvelable	MJ	0	262	524	786	1048
Consommation eau	L	0	144	287	428	574
Déchets valorisés	kg	0	8	16	24	32
Déchets dangereux	kg	0	0,1	0,2	0,3	0,4
Déchets éliminés	kg	0	14	28	42	56
Déchets inertes	kg	0	22	44	66	88
Déchets radioactifs	kg	0	0,0015	0,003	0,0045	0,006
Changement climatique	keCO2	0	14	28	42	56
Acidification atmosph.	keSO2	0	0,1	0,2	0,3	0,4
Pollution air	m ³	0	1674	3348	5022	6696
Pollution eau	m ³	0	615	1230	1845	2460
Destruc. ozone stratosph.	keCFC	0	0,013	0,026	0,039	0,052
Formation ozone photo.	keE	0	0,7	1,3	2	2,6

Figure 60 : Proposition de bornes à partir de la base de données

Indice "épuiement des ressources"

L'indicateur de chaque matériau est égal à la somme pondérée des quantités de ressources consommées par le produit pendant l'ensemble de son cycle de vie, pondérée par le coefficient de rareté dont la ressource référence est l'antimoine. Dans le cas où la valeur est supérieure à 1, nous consommons une ressource très rare. Elle est notre valeur la pire. Dans le cas où la valeur est inférieure à 0,001, nous consommons une ressource considérée comme non épuisable à échelle humaine. Elle est donc notre valeur considérée comme très bonne (cf. figure 61).

INDICE	Unité	VALEUR MINI.		MOYENNE		VALEUR MAXI.
Épuisement des ressources	kea	0	0,001	0,01	0,1	1

Figure 61 : Proposition de bornes pour l'indice "épuisement des ressources"

Les critères sanitaires : méthode

Les indicateurs sanitaires présentés dans notre grille n'ont pas pu être calculés à partir de cette méthode. Les raisons sont les suivantes :

- les résultats relatifs à ces indices (humidité et micro-organismes, émissions de fibres et particules, émissions de COV, émissions radioactives et risque cancer) sont exprimés sous une forme qualitative (caractérisation, conseils, présence ou pas dans le cycle de vie du matériau considéré, classification) et non sous la forme de résultats chiffrés,
- l'impact sanitaire des différents matériaux présents dans la base de données du LRA n'a pas été introduit à ce jour.

Nous nous sommes appuyés sur les rapports d'essai du CSTB et les travaux des Docteurs Déoux et Déoux (2004) afin de mettre en place des bornes de valeurs pour chacun des indices.

Indice "humidité et micro-organismes"

Actuellement aucune norme européenne d'essais harmonisés n'a été mise en place concernant la croissance fongique sur les matériaux de construction. Le CSTB a donc développé une méthode basée sur différentes normes (CSTB, 2003).

- la norme NF P EN ISO 846 qui concerne l'action des micro-organismes sur les matériaux plastiques
- la norme NF V 18-112 qui détermine la teneur en ergostérol : produit du métabolisme des moisissures.

De ce travail découle un classement proposé par le CSTB selon l'aptitude à favoriser ou non les croissances fongique et bactérienne (cf. figure 62).

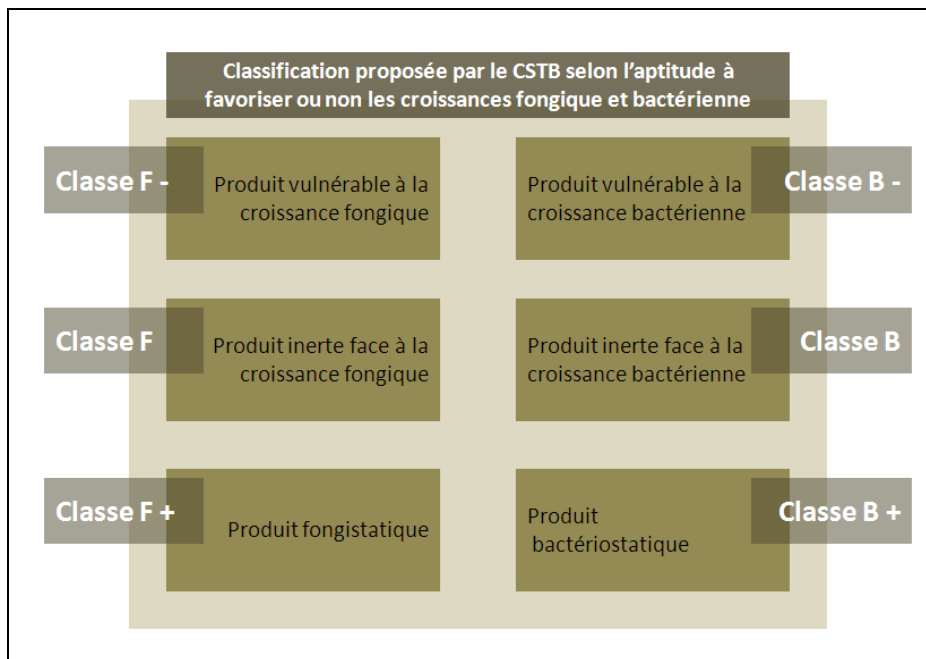


Figure 62 : Classification proposée par le CSTB selon l'aptitude à favoriser ou non les croissances fongique et bactérienne (Déoux et Déoux, 2004)

Le CSTB indique dans son rapport qu'un matériau est considéré comme :

- peu vulnérable dans le cas où la valeur de biomasse sur le produit propre est plus de 10 fois inférieure à celle du même produit encrassé ($rE/P >$ ou $=$ à 10 : le ratio éprouvette encrassé par rapport à l'éprouvette propre doit être supérieur ou égal à 10),
- vulnérable dans le cas où la valeur de biomasse sur le produit propre est jusqu'à 10 fois inférieure à celle du même produit encrassé (rE/P compris entre 1 et 10 : le ratio éprouvette encrassée par rapport à l'éprouvette propre doit être compris entre 1 et 10),
- très vulnérable dans le cas où la valeur de biomasse sur le produit propre est supérieure ou égale à celle du même produit encrassé ($rE/P <$ ou $=$ 1 : le ratio éprouvette encrassée par rapport à l'éprouvette propre doit être inférieur ou égal à 1).

Nous avons établi nos valeurs limites en fonction de ces résultats (cf. figure 63). La classe F+ et B+ est la valeur la plus favorable car le produit est considéré comme fongistatique²⁰ et bactériostatique. La valeur la plus défavorable est la classe F – (3) et B – (3) qui représente les produits très vulnérables à la croissance fongistatique et bactérienne.

INDICE	VALEUR MINI.		MOYENNE		VALEUR MAXI.
Humidité et microorganismes	B+ F+	B F	B(1)- F(1)-	F(2)-	F(3)-
	fongistatique	inerte	peu vulnérable	vulnérable	très vulnérable

Figure 63 : Proposition de bornes pour l'indice "humidité et microorganismes"

Indice "émissions de COV Composés Organiques Volatiles"

Différentes normes indiquent les méthodes de mesures de ces émissions nocives pour la santé de l'être humain (Déoux et Déoux, 2004). Ces normes sont les suivantes :

- normes NF ENV 13419-1, 2, 3 concernant les méthodes de mesures de COV,
- normes ISO/DIS 16000-6-2 et NF ISO 16000-3 pour les méthodes de mesures liées aux émissions de formaldéhydes,
- le protocole européen ECA-IAQ rapport n°18 qui donne les valeurs limites des émissions des produits de construction solides et liquides.

Le CSTB propose donc une classification selon les émissions de COV et aldéhydes (cf. figure 64).

²⁰ Définition fongistatique : qui stoppe la croissance des champignons pathogènes

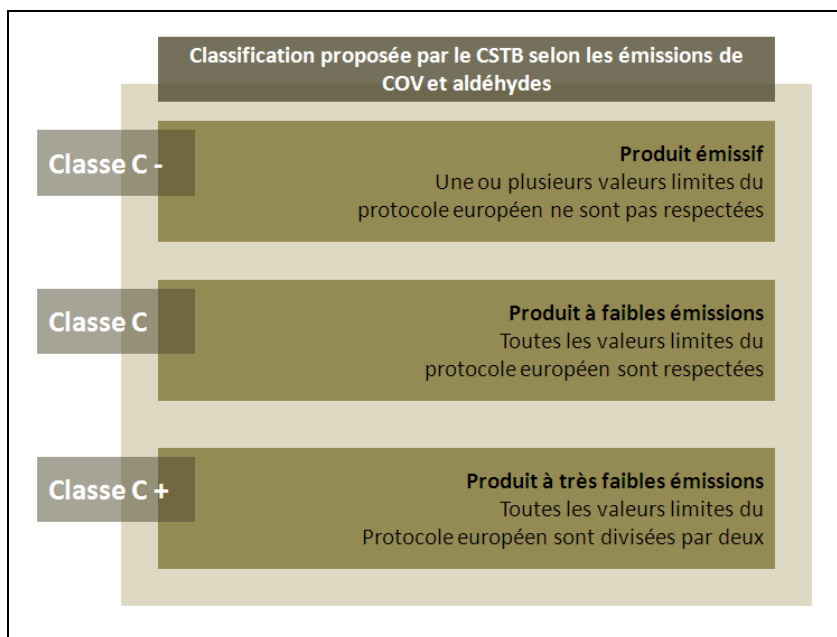


Figure 64 : Classification proposée par le CSTB selon les émissions de COV et aldéhydes (Déoux et Déoux, 2004)

Comme précédemment, nous avons établi nos bornes en fonction des données mises en place par le CSTB.

La classe C+ est la classe la plus favorable (valeur comprise entre 0 et 1600 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) alors que la classe C- est considérée comme la plus défavorable (valeur supérieure à 6600 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Les valeurs moyennes concernent les émissions de COV comprises entre 3200 et 5000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (cf. figure 65).

INDICE	VALEUR MINI.		MOYENNE		VALEUR MAXI.
Emissions COV		C+	C	C-	
	Produit sans émissions	Produit à très faibles émissions	Produit à faibles émissions	Produit émissif	très vulnérable

Figure 65 : Proposition de bornes pour l'indice "émissions de COV"

Indice "émissions radioactives"

La réglementation des émissions radioactives s'organise autour de :

- la directive 90/143 EURATOM du 21 février 1990 concernant les expositions internes : concentration radon < 200Bq/m³ dans les constructions neuves et < 400Bq/m³ dans les constructions existantes,
- la directive 96/29 EURATOM du 13 mai 1996 concernant les expositions externes,
- le rapport 112 de la Commission européenne de protection radiologique.

Comme le mentionnent les Docteurs Déoux et Déoux (2004), ce rapport fournit des critères dans le but d'une harmonisation des contrôles permettant la circulation des matériaux de construction au sein de l'Union Européenne. Les contrôles des matériaux sont basés sur une dose de rayonnement gamma comprise entre 0,3 et 1 milli Sievert par an (mSv/an). L'index I (indice de concentration d'activité : dose annuelle délivrée par le produit de construction) est la somme des mesures des concentrations d'activité C des différents radioéléments (radium 226, thorium 232 et potassium 40) d'un matériau. Les recommandations de la Commission Européenne classent les matériaux en 2 familles selon le niveau de dose (cf. figure 66).

Corrélations de l'index I et du niveau de dose Suivant l'utilisation des matériaux dans le bâtiment		
Niveau de dose	0,3mSv/an	1mSv/an
Matériaux employés en grande quantité	I < ou = 0,5	I < ou = 1
Matériaux superficiels et autres	I < ou = 2	I < ou = 6

Figure 66 : Corrélations de l'index I (indice de concentration d'activité) et du niveau de dose (Déoux et Déoux, 2004)

Le CSTB propose une classification simple en fonction du niveau des émissions radioactives qui découle des préconisations de la Commission Européenne. Les classes proposées sont les suivantes (cf. figure 67).

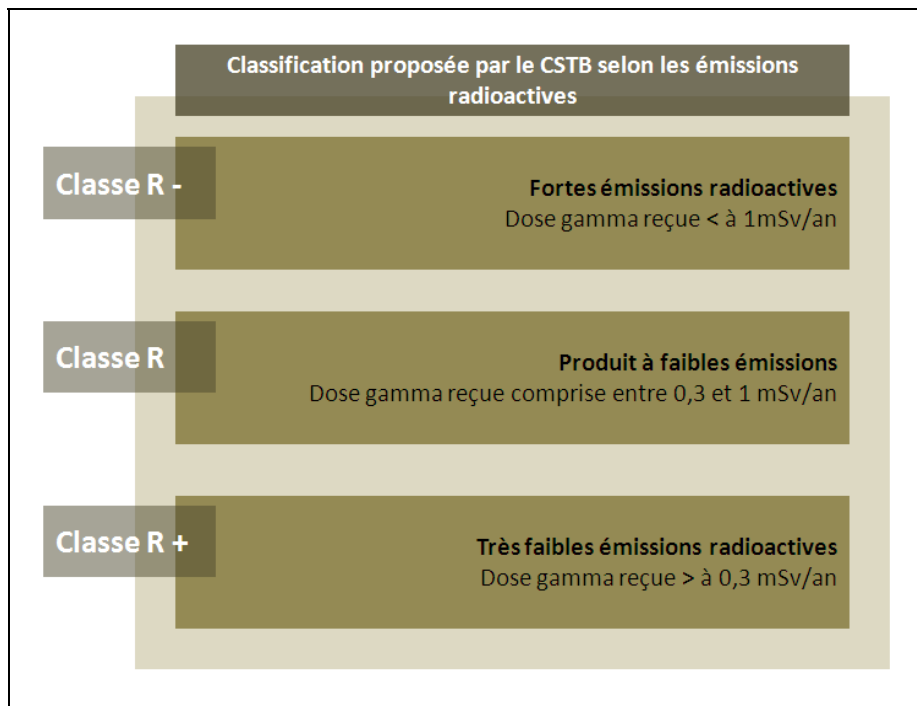


Figure 67 : Classification proposée par le CSTB selon les émissions radioactives (Déoux et Déoux, 2004)

Nous avons choisi pour les valeurs des bornes relatives aux émissions radioactives de nous concentrer sur le niveau de dose le plus faible (0,3mSv/an) afin de proposer des notations plus sévères au vu de la dangerosité de cet indice. La valeur la plus défavorable sera 0,4 mSv / an. La valeur la plus favorable sera égale à 0 (cf. figure 68).

INDICE	Unité	VALEUR MINI.		MOYENNE		VALEUR MAXI.
Emissions radioactives	mSv/an	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4
						Niveau de dose sévère

Figure 68 : Proposition de bornes pour l'indice "émissions radioactives"

Indice "risque cancer"

La mise en place des valeurs de nos bornes concernant le risque cancer s'appuie sur les travaux du CIRC Centre International de Recherche sur le Cancer, ainsi que sur les valeurs limites proposées par l'Union Européenne qui classe les matériaux de construction en fonction du risque potentiel ou probable de provoquer chez l'Homme des cancers (cf. figure 69).

Classification des cancérrogènes			
CIRC		UNION EUROPEENNE	
SUBSTANCES	GROUPE	SUBSTANCES	GROUPE
Cancérogène pour l'homme	1	Que l'on sait cancérrogène pour l'homme	1
Probablement cancérrogène pour l'homme	2A	Devant être assimilées à des substances cancérrogènes pour l'homme	2
Cancérogène possible pour l'homme	2B	Préoccupations pour l'homme en raison d'effets cancérrogènes possibles mais pour lesquels les informations disponibles ne permettent pas une évaluation satisfaisante	3
Ne peut être classé quant à sa cancérogénicité pour l'homme	3		
Probablement pas cancérrogène pour l'homme	4		

Figure 69 : Classification des cancérrogènes (Déoux et Déoux, 2004)

La dangerosité de cet indice étant significative, nous avons choisi de mettre en place les bornes suivantes : le groupe "probablement non cancérrogène" se situe au niveau de la valeur moyenne. La valeur ++ concerne les matériaux ne contenant pas de substances cancérrogènes. Les valeurs – et - - concernent respectivement les matériaux contenant des substances cancérrogènes possibles, probablement cancérrogènes et cancérrogènes. (cf. figure 70).

INDICE	VALEUR MINI.		MOYENNE		VALEUR MAXI.
Risque cancer			4	3 2B	2 2A

Figure 70 : Proposition de bornes pour l'indice "risque cancer"

Indice "émissions de fibres et particules"

La mise en place des valeurs de nos bornes concernant l'émission de fibres et particules s'appuie sur les données auxquelles nous avons accès. Les FDES renseignent cet indice en informant du risque ou pas d'inhaler des fibres et particules pendant sa mise en œuvre ou pendant sa vie en œuvre.

Nous proposons donc comme bornes, le classement suivant (cf. figure 71) :

INDICE	VALEUR MINI.		MOYENNE		VALEUR MAXI.
Emissions fibres et particules	Pas de fibres et particules	Faibles émissions pendant mise en œuvre	Fortes émissions pendant mise en œuvre	Faibles émissions pendant vie en œuvre	Fortes émissions pendant vie en œuvre

Figure 71 : Proposition de bornes pour l'indice "risque cancer"

9.5. Les différents calculs mis en place au sein du prototype d'outil d'aide à la conception *MaTerre'iO*

Les liaisons entre les trois degrés de compréhension mis en place dans *MaTerre'iO* nous amènent à proposer des pondérations pour chaque indice et indicateur. Nous avons également appliqué un modèle mathématique nous permettant de calculer les différents résultats fournis par le prototype d'outil.

9.5.1. Les pondérations relatives aux différents critères de notre grille d'analyse multicritères

Il est nécessaire de pondérer les différents indices et indicateurs proposés par l'outil en fonction de l'impact plus ou moins nocif qu'ils ont sur l'environnement et l'Homme.

Les pondérations retenues pour chaque indice découlent de nos diverses lectures sur leur nuisance et / ou dangerosité. Ces pondérations sont subjectives étant donné qu'elles ont été choisies à partir de notre unique point de vue. Il aurait fallu proposer ces choix auprès d'un panel de personnes expertes afin de valider les pondérations retenues et d'obtenir des résultats scientifiques.

Afin de contrecarrer ce point, nous pourrions permettre à l'utilisateur de l'outil de modifier les pondérations au gré des contraintes du projet, du contexte, du site. Ce choix pourrait se faire sous la forme d'un système d'aide à la décision : questionnaire simple et

rapide qui permettrait de modifier les pondérations en fonction du contexte (suggestion non intégrée actuellement dans notre prototype d'outil *MaTerre'io*).

Dans le cas présent, les pondérations proposées sont choisies pour un contexte précis (France) et seront données par défaut dans notre outil. Dans un souci de clarté et de rapidité de lecture, les pondérations retenues sont présentées sous la forme de tableau (cf. figure 72).

APPROCHE GLOBALE	APPROCHE DETAILLEE	Pondérations	APPROCHE EXPERTE	Pondérations
POLLUTION PHYSIQUE	Impact Environnement	3	Changement climatique	1
			Acidification atmosphérique	1
			Pollution air	1
			Pollution eau et sol	1
			Destruction couche ozone	1
			Formation oz photochimique	1
	Impact humain	3	Humidité microorganismes	1
			Emissions fibres et particules	1
			Emissions COV	1
			Emissions radioactives	1
	Impact socio-économique des déchets	1	Risque cancer	véto
			Valorisés (total)	1
			Éliminés dangereux	5
Éliminés DIB			2	
Éliminés inertes			2	
EMPREINTE ENERGETIQUE	Consommations	2	Épuisement ressources	1
			Eau	1
	Profil énergétique	1	Energies récupérées	1
			Energies renouvelables	2
			Energies non renouvelables	3

Figure 72 : Proposition de pondérations pour les indicateurs et indices des critères pollution physique et empreinte énergétique

Les principales remarques à retenir de ces pondérations sont les suivantes :

- au vu des conséquences importantes de l'impact de la construction sur l'Homme et l'environnement, nous avons conféré à ces indicateurs les pondérations de 3 en rapport à l'impact des déchets,

- l'indice "risque cancer" a la possibilité de mettre un veto dans le cas d'utilisation de matériaux avérés cancérigènes pour l'Homme, la santé des occupants étant primordiale,
- les déchets radioactifs ont une pondération de 4 et les déchets dangereux de 5 au vu de leur risque pour l'environnement et l'homme. La différence de pondérations entre ces deux indices s'explique par le fait suivant : le stockage des déchets radioactifs est très réglementé. Il nous paraît moindre concernant le stockage des déchets dangereux,
- les pondérations relatives aux énergies sont graduelles selon qu'elles soient récupérées (cas le plus favorable), renouvelables ou non renouvelables (cas le plus défavorable).

9.5.2. Calcul des indices

Une des propositions faites pour la mise en place de futurs outils d'aide à la conception est de raisonner en terme de dispositif et non de matériaux, comme nous l'avons expliqué précédemment. Les données auxquelles nous avons accès, notamment dans les FDES, concernent chaque matériau et non un ensemble de matériaux, (ceci pour un m² de surface).

Notre outil raisonnant en dispositif, il est nécessaire d'additionner l'ensemble des résultats de chaque matériau composant le dispositif pour chaque indice proposé. Ce résultat est ensuite multiplié par la surface totale de ce dispositif. Il renseigne l'approche experte de *MaTerre'io*.

$$I_x D_y = f_{(x,y)} = \sum_{x,y=1}^n I_x(M) \cdot S D_y$$

I_x = indice x ; D_y = dispositif y ; M = matériaux ; S = surface

Nous additionnons l'ensemble des indices pour chaque dispositif afin d'obtenir un résultat relatif au bâtiment complet.

$$I_x B = \sum_{y=1}^n I_x (D_y)$$

I_x = indice x ; B = bâtiment ; D_y = dispositif y

Afin de proposer des tendances (approche détaillée et approche globale de l'outil *MaTerre'io*), nous classons chaque matériau composant le dispositif dans les bornes mises en place. L'addition des résultats, divisée par le nombre de matériaux du dispositif, nous permet de classer le dispositif dans les bornes de notation (cf. figure 73).

Les tendances, exprimées sous forme de notation, sont relatives à 1 m² de dispositif global.

A	B		C		D		E		F		G		H		I		J		K		L		M		N				
	LIBELLE		Energie primaire		Reçupérée		Reouvelable		Non renouvelable		Epuisement ressources		Conso eau		Dangereux		DIB		Inertes		Radioactifs		Chgt climatique						
6	VARIANTE 1 : cas réel																												
7	dispositif 1																												
8		61,600		8,800	TB	52,800	0,019	23,200	TB	0,788	0,004	24,200	0,208															5,130	
9		470		24	TB	447	0,1530	154	TB	98,2000	0,0271	0,1000	25,0000	0,005630														24,40	
10		revêtement mince attaché en pierre naturelle		21,170	TB	15,000	0,056	82,870	TB	0,620	0,013	0,870	238,540	0,001														15,670	
11		parpaing de ciment		TMV	TB																								
12		parpaing de ciment		TMV	TB																								
13		panneau de laine de roche Afalene 70 100 mm		0,000	TB	8,630	0,040	14,500	TB	0,503	0,522	3,270	0,591	0,000														5,340	
14		panneau de laine de roche Afalene 70 100 mm		0,000	TB	8,630	0,040	14,500	TB	0,503	0,522	3,270	0,591	0,000														5,340	
15		ossature métallique pour cloison en plaques de plâtre		0,000	TB	2,000	0,005	25,000	TB	-0,097	-0,017	0,397	-0,073	0,000														0,960	
16		ossature métallique pour cloison en plaques de plâtre		0,000	TB	2,000	0,005	25,000	TB	-0,097	-0,017	0,397	-0,073	0,000														0,960	
17		plaque de plâtre BA 13 isolava		0,000	TB	1,555	0,018	18,600	TB	0,015	0,035	10,350	0,087	0,000														2,400	
18		plaque de plâtre BA 13 isolava		0,000	TB	1,555	0,018	18,600	TB	0,015	0,035	10,350	0,087	0,000														2,400	
19		Resultat		21,170	TB	59,685	0,291	318,170	TB	100,030	0,584	39,187	262,353	0,008														53,890	
20		Resultat		3,928	TB	9,948	0,048	53,028	TB	16,672	0,097	6,531	43,725	0,001														8,982	
21		Resultat		3,928	TB	9,948	0,048	53,028	TB	16,672	0,097	6,531	43,725	0,001														8,982	
22		Resultat		Moy	TB	5	Moy	3	TB	5	Moy	3	4	Moy	TB	5	Moy	3	TB	5	Moy	3	4	Moy	TB	5	Moy	3	4
23		Resultat		5	TB	5	3	5	TB	5	3	5	4	5	TB	5	3	5	TB	5	3	4	5	4	5	TB	5	3	4
24		Resultat		5	TB	5	3	5	TB	5	3	5	4	5	TB	5	3	5	TB	5	3	4	5	4	5	TB	5	3	4
25		dispositif 2																											
26		revêtement mince attaché en pierre naturelle		21,170	TB	15,000	0,058	82,870	TB	0,620	0,013	0,870	238,540	0,001														15,670	
27		revêtement mince attaché en pierre naturelle		21,170	TB	15,000	0,058	82,870	TB	0,620	0,013	0,870	238,540	0,001														15,670	
28		parpaing de ciment		TMV	TB																								
29		parpaing de ciment		TMV	TB																								
30		Resultat		21,170	TB	38,500	0,211	236,870	TB	98,820	0,040	0,970	261,540	0,007														40,070	
31		Resultat		10,665	TB	19,250	0,105	118,435	TB	49,470	0,020	0,485	130,770	0,004														20,035	
32		Resultat		10,665	TB	19,250	0,105	118,435	TB	49,470	0,020	0,485	130,770	0,004														20,035	
33		Resultat		5	TB	5	MV	2	TB	5	1	5	5	MV	TB	5	1	5	TB	5	1	5	5	1	5	MV	TB	5	2
34		Resultat		5	TB	5	MV	2	TB	5	1	5	5	MV	TB	5	1	5	TB	5	1	5	5	1	5	MV	TB	5	2

Figure 73 : Exemple de calcul de tendance pour 2 dispositifs de la variante 1

Nous pouvons ainsi proposer des radars pour la variante étudiée. Ces radars prennent en considération les différents indices environnementaux (cf. figure 74). Ils ne regroupent pas les indices sanitaires car nous n'avons aujourd'hui que très peu (voir pas) de données.

Les radars sont visualisables par l'utilisateur dans l'onglet comparatif - approche experte.

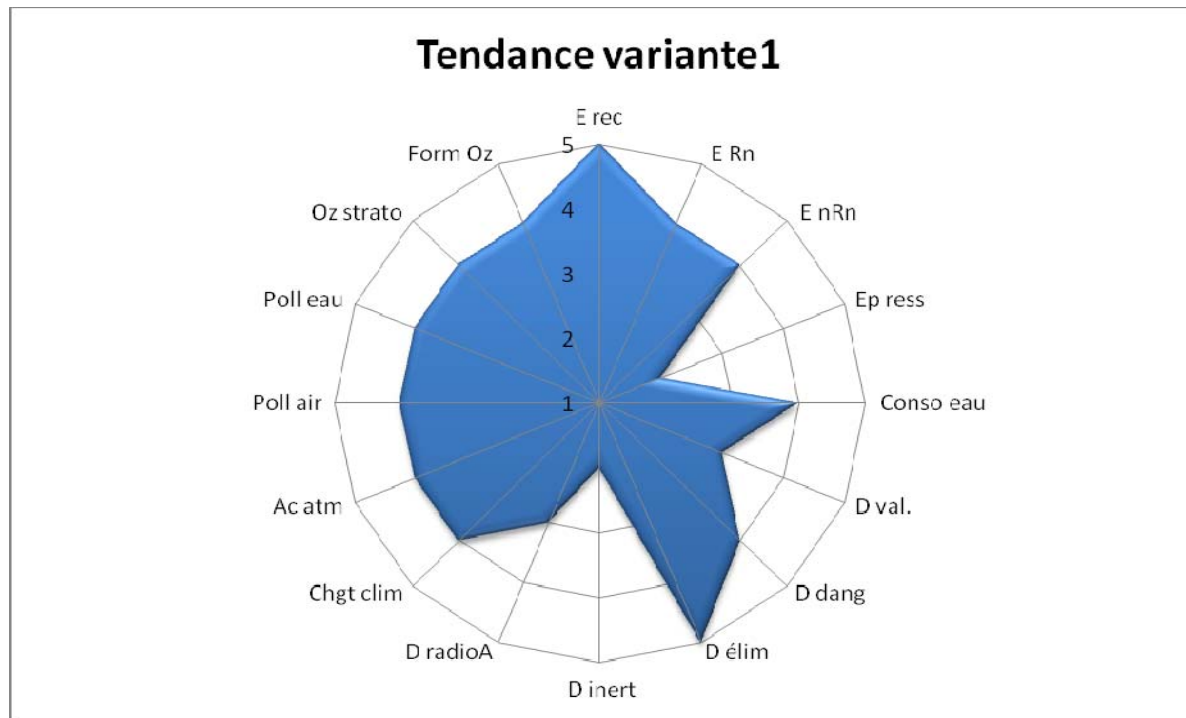


Figure 74 : Exemple des radars obtenus dans l'outil *MaTerre'iO* (résultat pour un ensemble de dispositif)

Les résultats ainsi obtenus pour chaque indice, sont pondérés et additionnés. Ils renseignent l'approche détaillée de notre prototype d'outil. L'opération est renouvelée pour obtenir le résultat de l'approche globale (cf. figure 75).

APPROCHE GLOBALE		APP. DETAILLEE	APP. EXPERTE		APPROCHE GLOBALE		APP. DETAILLEE	APP. EXPERTE		
POLLUTION PHYSIQUE	3,89	i. environnemental	4,00 chgt clim	4	EMPREINTE ENERGETIQUE	3,72	Consommations	3,50 ep. Ress	2	
	Moy / B		B ac atm	4		Moy / B		Moy / B conso eau	5	
	5		6 poll air	4		5		5 territoire		
			poll eau	4						
			Oz photo	4						
			form oz	4						
	3,62							profil énergétique	4,17 E rec	5
	Moy / B	i. socio eco déchets	3,57 d. val	4				B E Rn	4	
	5		Moy / B d. dang	4				6 E nRn	4	
			5 d. élim	5						
			d. inert	2						
			d. radioA	3						
		i. humain								
		3,25 humidité microO	2							
		Moy fibres part.	3							
		4 COV	4							
		em. radioA	4							
		risq cancer	4							

Figure 75 : Exemple de calcul pour les tendances présentées dans l'approche détaillée et globale.

9.6. Illustration à travers une étude de cas : la Maison Galopin (Maison Séniergues) – G.G.R architectes

L'intégration d'un cas d'étude dans notre prototype d'outil a pour intérêt d'illustrer et de tester *MaTerre'io*.

Notre choix s'est tourné vers la Maison Galopin ou Maison Séniergues des architectes Laurent Gouwy, Alain Grima et Jean-Luc Rames.

Ce projet architectural répond à plusieurs de nos attentes :

1. Il est considéré, dans la littérature notamment (Gauzin-Müller, 2006), comme une référence d'architecture d'intégration dans le site (un des aspects de l'approche environnementale de la construction).
2. Il a été conçu par une agence d'architectes toulousaine reconnue et adepte d'une démarche environnementale pragmatique. Nous nous sommes entretenus avec un de ses fondateurs : Jean-Luc Rames. Il nous a transmis toutes les informations nécessaires (plans, coupes, façades, détails constructifs, images, ...) dont nous avons besoin pour l'étude de ce projet.

9.6.1. Maison Galopin : cas d'étude

Présentation générale du cas d'étude

Le projet présenté est une maison individuelle à Sènièrgues dans le Lot (Midi-Pyrénées). Située sur le causse de Gramat, elle est semi-enterrée et implantée en fond de parcelle (40 hectares) afin de se protéger de l'autoroute en contrebas, des vents et de ne pas créer de rupture avec le paysage. Ce projet est une architecture moderne et contemporaine. D'aspect linéaire, elle se fonde dans le paysage environnant et reste simple en réponse aux attentes des maîtres d'ouvrages (cf. figure 76).



Figure 76 : Photographie de la maison Galopin (G.G.R architectes)

Les matériaux principaux sont la pierre locale et le verre. La façade principale est orientée au sud.

La maison s'articule de la manière suivante : une entrée indépendante desservant le garage et le bureau d'un côté et le séjour traversant avec cuisine ouverte de l'autre côté. Deux chambres et une salle de bains se situent dans la continuité. La terrasse principale au sud bénéficie d'un apport solaire considérable. Une cour au nord offre un espace extérieur protégé des vents (cf. figure 77). La surface hors œuvre nette est de 156 m². La surface hors-œuvre brute est de 201 m².

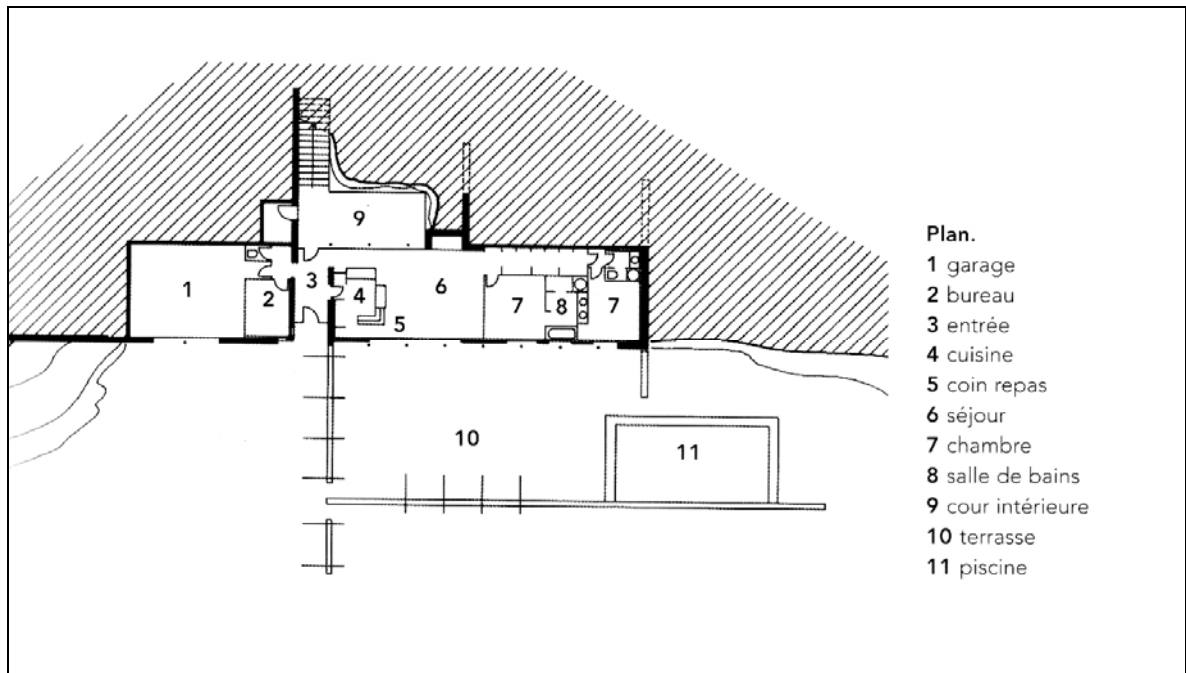


Figure 77 : Plan de la maison Galopin (Gauzin-Müller, 2006)

Les matériaux mis en œuvre dans la Maison Galopin

Après étude de la maison, nous avons distingué 5 dispositifs caractérisant l'enveloppe extérieure du projet. Dans un souci de clarté, nous les présentons sous la forme d'un tableau (cf. figure 78).

Nous détaillons pour chaque dispositif :

- les différents matériaux composant le dispositif ainsi que leur épaisseur (en cm),
- la surface totale de ce dispositif sur l'ensemble de la maison (en m²),
- une illustration du dispositif mis en œuvre (photos G.G.R architectures).

Les trois premiers dispositifs concernent les matériaux utilisés pour les façades de la maison. Le quatrième concerne le plancher. Le cinquième décrit la toiture.

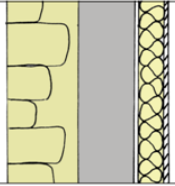

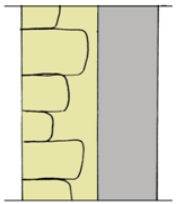

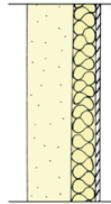

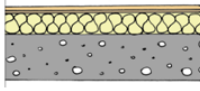

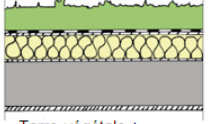

DISPOSITIF 1 FACADE	DISPOSITIF 2 FACADE	DISPOSITIF 3 FACADE	DISPOSITIF 4 PLANCHER	DISPOSITIF 5 TOITURE
 <ul style="list-style-type: none"> - Pierre du pays (25cm) - Parpaing creux (20cm) - Lame d'air - Isolation laine roche (10 cm) - Plaque plâtre (1,3cm) <p>39,5m²</p> 	 <ul style="list-style-type: none"> - Pierre du pays (25cm) - Parpaing creux (20cm) <p>65,3m²</p> 	 <ul style="list-style-type: none"> - Bloc béton teinté dans masse (19cm) - Isolation laine roche (10 cm) - Plaque plâtre (1,3cm) <p>29,2m²</p> 	 <ul style="list-style-type: none"> - Terre cuite ou carrelage - Chauffage sol - Isolation polyuréthane (10 cm) - Dalle brute (20cm) <p>220,8m²</p> 	 <ul style="list-style-type: none"> - Terre végétale + cailloux (10cm) - Protection anti racine - Etanchéité - Isolation polyuréthane (10 cm) - Plancher hourdis a entrevous (20 cm) - Enduit plâtre (1,3cm) <p>220,8m²</p> 

Figure 78 : Présentation des différents dispositifs mis en place dans la Maison Galopin

Afin d'intégrer ce cas d'étude dans *MaTerre'iO*, nous avons mis en parallèle les matériaux utilisés et ceux présents dans notre base de données. Il est difficile de disposer du matériau réellement utilisé. Nous avons choisi celui s'en rapprochant le plus.

Ce cas d'étude sera la variante 1 de notre outil. Nous la présentons à partir d'une "fiche d'identité" qui expose :

- les différents matériaux retenus dans la base de données de l'outil ceci pour chaque dispositif,
- les résultats obtenus dans l'approche globale,
- les résultats de l'approche détaillée,
- les résultats de l'approche experte sous la forme d'un radar ainsi que les résultats chiffrés.

1. Caractéristique : cas réel de la Maison Galopin

2. Dispositifs mis en place :

Dispositif 1	Enduit minéral
	Revêtement mince attaché en pierre naturelle
	Parpaing de ciment
	Panneau de laine de roche Alfalene 70 100 mm
	Ossature métallique pour cloison en plaques de plâtre
	Plaque de plâtre BA 13 isolava
Dispositif 2	Revêtement mince attaché en pierre naturelle
	Parpaing de ciment
Dispositif 3	Mur en maçonnerie de blocs de béton
	Panneau de laine de roche Alfalene 70 100 mm
	Ossature métallique pour cloison en plaques de plâtre
Dispositif 4	Revêtement d'étanchéité bicouche bitume polymère sous toiture végétalisée
	Panneaux rigides isolant polyuréthane
	Dalle alvéolée en béton précontraint
	Enduit minéral
Dispositif 5	Menuiserie pin
Dispositif 6	Terre cuite
	Panneau de laine de roche alfalene 70 100 mm
	Dalle alvéolée en béton précontraint

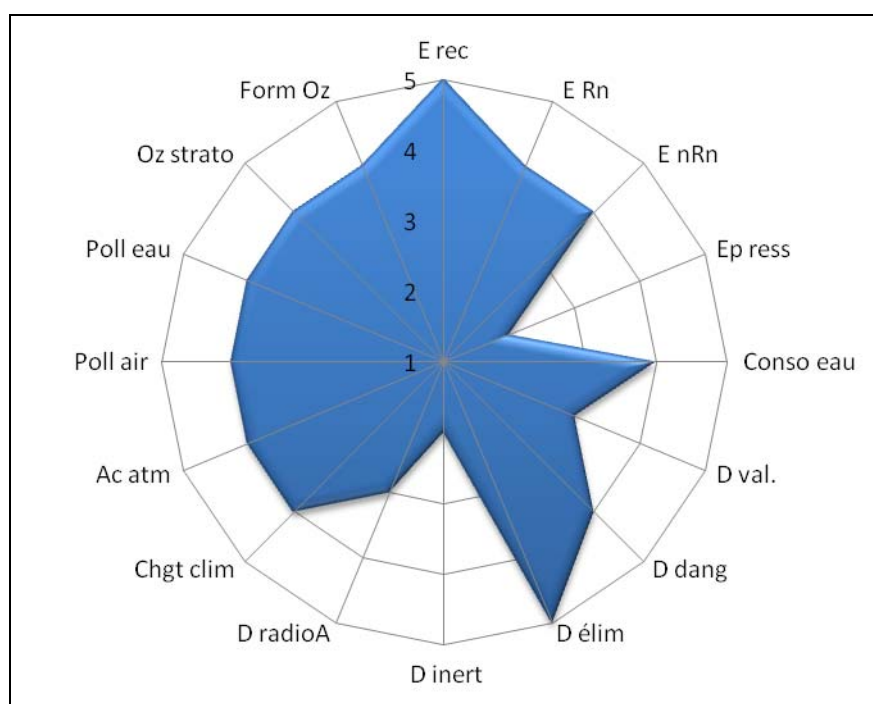
3. Résultats de l'approche globale :

	0					5					8
POLLUTION PHYSIQUE											
	0					5					8
EMPREINTE ENERGETIQUE											

4. Résultats de l'approche détaillée :

	0										6					8	
I. ENVIRONNEMENTAL																	
	0										5					8	
I. DECHETS																	
	0										4					8	
I. HUMAIN																	
	0										4					8	
CONSOMMATIONS																	
	0															6	8
PROFIL ENERGETIQUE																	

5. Résultats de l'approche experte – radars :



6. Résultats de l'approche experte – chiffres non pondérés :

		Dispo1	Dispo2	Dispo3	Dispo4	Dispo5	Dispo6	Global
INDICE	Unité	39,5 m ²	65,3 m ²	29,2 m ²	220 m ²	40 m ²	220 m ²	614 m ²
E. rec.	MJ	836,2	1382,4	0	0	0	0	2218,6
E. Ren.	MJ	2357	2514	799,6	15501	14520	10962	46655
E. nRen.	MJ	31682	39492	8830,08	446138	33200	145992	705335
Ep. Ress.	kea	11,48	13,74	3,46	190,32	9,920	58,58	287,52
Conso eau	l	12567	15467	4120,1	141284	7520	46398	227357
D. val.	kg	3951,1	6452	30,32	2001,5	936	1652,6	15024
D. dang.	kg	23,06	2,59	16,13	47,45	21,76	117,43	228,44
D. élim.	kg	1547,8	63,34	434,604	9942,02	472	808,54	13268
D. inert.	kg	10362	17078	6908,8	67481	680	78890	181401
D. radioA	kg	0,321	0,465	0,059	3,72	0,159	0,970	5,702
Chgt clim.	keqCO2	2128,6	2616,5	720,94	21760	940	13991	42157
Ac atm	keSO2	13,85	17,73	3,845	98,88	9,240	61,55	203,12
Poll air	m ³	333573	480830	71963	1647800	149000	1628660	4311826
Poll. Eau	m ³	852,7	1013,4	304,5	10764329	2880	15509	10784889
Destruc. oz	keCFC	0	0	0	0	29,228	0	29,228
Form. Oz.	keE	1,669	2,478	0,249	15607	0,916	6,169	15619

9.6.2. Les différentes variantes permettant une comparaison de solutions constructives à partir de *MaTerre'iO*

En phase esquisse, le concepteur en architecture oriente sa réflexion vers différentes solutions constructives qui participent à l'écriture architecturale mise en place dans le projet. Différentes propositions sont envisagées par le concepteur qui devra, au fur et à mesure de l'avancée dans le processus de conception, retenir une solution répondant à l'ensemble des contraintes du projet.

L'intérêt de *MaTerre'iO* est de comparer différentes solutions afin de permettre au concepteur de réaliser une sélection de solutions pour arriver, au final à déterminer la solution optimale pour le projet analysé.

Nous avons étudié 7 autres variantes possibles pour notre cas d'étude (variante 1). Chacune de ces variantes présente une ou plusieurs caractéristiques (le plus souvent un matériau dominant) et propose un dispositif pour l'ensemble des façades, un dispositif pour le plancher, un dispositif pour la toiture et un dispositif pour les menuiseries. Dans un souci de simplification et par manque de données pour réaliser 3 dispositifs différents pour les façades (ceci pour les 7 variantes étudiées), nous avons limité à un dispositif unique pour l'enveloppe du bâtiment.

Nous présentons les 7 variantes mises en place à partir de leur "fiche d'identité".

1. Caractéristique : Maison Galopin – dominante bois

2. Dispositifs mis en place :

Dispositif 1	Bardage en contreplaqué d’okumé
	Ossature bois poteau-poutre
	Plume de canard batiplum mur
	Plaque de plâtre BA 13 isolava
Dispositif 2	Revêtement d’étanchéité bicouche bitume polymère sous toiture végétalisée
	Panneaux rigides isolant polyuréthane
	Dalle alvéolée en béton précontraint
	Enduit minéral
Dispositif 3	Revêtement sol linoléum
	Panneau laine de roche
	Béton de chaux chanvre sol
Dispositif 4	Menuiseries pin

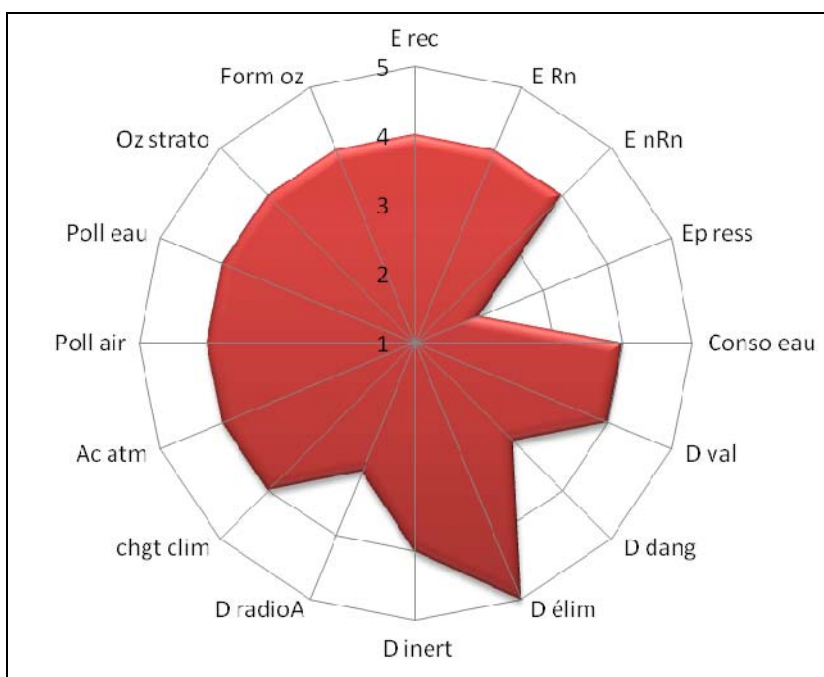
3. Résultats de l’approche globale :

	0				5				8
POLLUTION PHYSIQUE									
	0				5				8
EMPREINTE ENERGETIQUE									

4. Résultats de l’approche détaillée :

	0					6			8
I. ENVIRONNEMENTAL									
	0					5			8
I. DECHETS									
	0				4				8
I. HUMAIN									
	0				4				8
CONSOMMATIONS									
	0					6			8
PROFIL ENERGETIQUE									

5. Résultats de l'approche experte – radars :



6. Résultats de l'approche experte – chiffres :

		Dispo1	Dispo2	Dispo3	Dispo4	Global
INDICE	Unité	134 m ²	220 m ²	220 m ²	40 m ²	614 m ²
E. rec.	MJ	0	0	0	0	0
E. Ren.	MJ	49158	1667238	17259	14520	96438
E. nRen.	MJ	48668	667708	97130	33200	625136
Ep. Ress.	kea	10,164	214,01	281,99	9,920	492,40
Conso eau	l	15296	195228	41734	7520	205834
D. val.	kg	6322,14	200681	224,4	936	9484
D. dang.	kg	53,15	32,89	271,7	21,76	394,06
D. élim.	kg	4886,98	93476	2343	472	17644
D. inert.	kg	102,41	11279	525,8	680	68789
D. radioA	kg	0,388	6,74	0,822	0,159	5,096
Chgt clim.	keqCO2	-1206	-82077,6	-5494,5	940	15999
Ac atm	keSO2	12,459	263,56	64,35	9,240	182,93
Poll air	m ³	260831	7108750	491254	149000	2548885
Poll. Eau	m ³	7330,47	17019,2	3234,04	2880	10777773
Destruc. oz	keCFC	0	0	0	29,228	29,228
Form. Oz.	keE	72,119	64,691	3,053	0,916	15683

1. Caractéristique : Maison Galopin – version traditionnelle béton et charpente

2. Dispositifs mis en place :

Dispositif 1	Enduit minéral
	Mur béton
	Panneau laine de verre
	Plaque de plâtre BA 13
	Ossature métallique pour cloison en plaques de plâtre
Dispositif 2	Charpente bois traditionnel
	Rouleau de laine de verre 100mm
	Tuile de terre cuite
	Plaque de plâtre
Dispositif 3	Terre cuite
	Panneaux rigides PUR ep 80mm
	Dalle béton
Dispositif 4	Menuiseries PVC

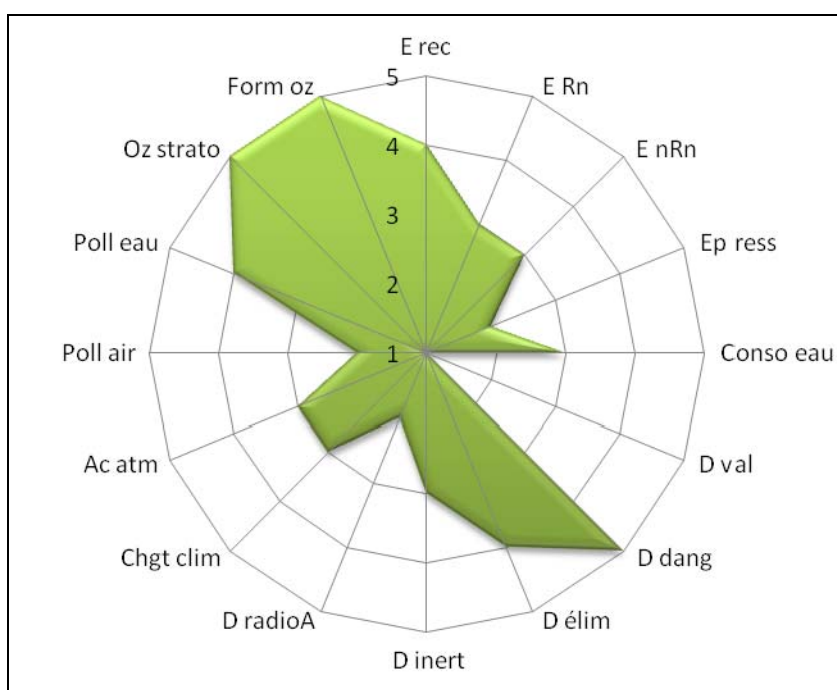
3. Résultats de l'approche globale :

	0					5				8
POLLUTION PHYSIQUE										
	0					3				8
EMPREINTE ENERGETIQUE										

4. Résultats de l'approche détaillée :

	0					5				8
I. ENVIRONNEMENTAL										
	0					4				8
I. DECHETS										
	0					4				8
I. HUMAIN										
	0					3				8
CONSOMMATIONS										
	0					4				8
PROFIL ENERGETIQUE										

5. Résultats de l'approche experte – radars :



6. Résultats de l'approche experte – chiffres :

		Dispo1	Dispo2	Dispo3	Dispo4	Global
INDICE	Unité	134 m ²	220 m ²	220 m ²	40 m ²	614 m ²
E. rec.	MJ	0	0	0	0	0
E. Ren.	MJ	5829,6	1667147	8008	2016	1683001
E. nRen.	MJ	83642	677014	187550	55600	1003807
Ep. Ress.	kea	97,827	214,56	183,348	18,240	513,98
Conso eau	l	45057	200112	96998	49200	391367
D. val.	kg	20226	200486	33010	456	254179
D. dang.	kg	8,936	38,70	35,721	2,68	86,04
D. élim.	kg	5237,6	93722	1072,3	88,800	100121
D. inert.	kg	28307,3	11280	58423	1224	99235
D. radioA	kg	0,596	6,862	0,932	0,40	8,790
Chgt clim.	keqCO2	7667,5	-81996,2	14290	2548	-57490
Ac atm	keSO2	30,166	261,8	63,250	17,04	372,3
Poll air	m ³	344112	7122390	1429340	378800	9274642
Poll. Eau	m ³	268846	17047	571208	2084	859186
Destruc. oz	keCFC	0	0	0	0	0
Form. Oz.	keE	3,12	64,04	7,601	2,108	76,87

1. Caractéristique : Maison Galopin – monomur

2. Dispositifs mis en place :

Dispositif 1	Monomur terre cuite rectifié pour pose à joint mince (30 cm)
	Enduit minéral
	Enduit de plâtre
Dispositif 2	Couverture acier inoxydable
	Poutre lamellé collé 8 m de portée
	Panneau laine de verre
	Plaque de plâtre BA 13
Dispositif 3	Terre cuite
	Panneaux rigides PUR ep 80mm
	Dalle béton
Dispositif 4	Menuiseries alu

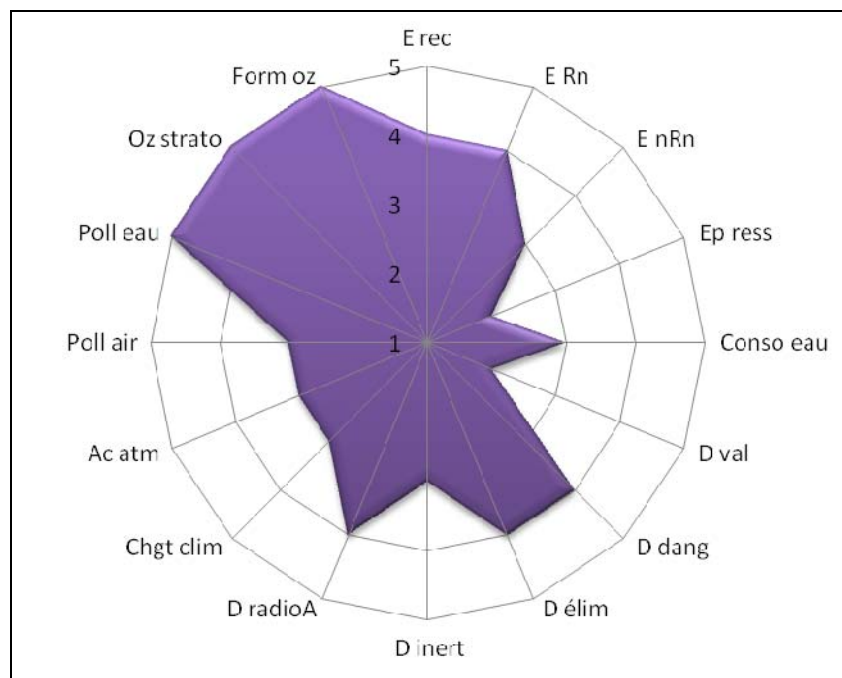
3. Résultats de l’approche globale :

	0				5				8
POLLUTION PHYSIQUE									
	0				4				8
EMPREINTE ENERGETIQUE									

4. Résultats de l’approche détaillée :

	0					6			8
I. ENVIRONNEMENTAL									
	0					5			8
I. DECHETS									
	0					4			8
I. HUMAIN									
	0					3			8
CONSOMMATIONS									
	0					5			8
PROFIL ENERGETIQUE									

5. Résultats de l'approche experte – radars :



6. Résultats de l'approche experte – chiffres :

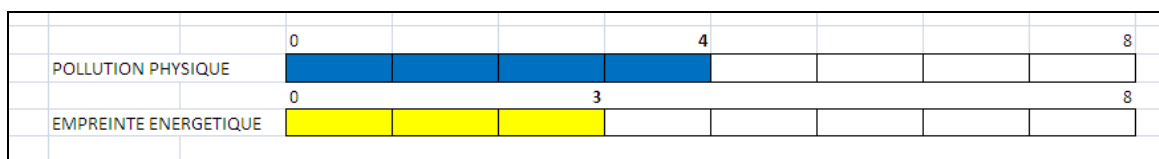
		Dispo1	Dispo2	Dispo3	Dispo4	Global
INDICE	Unité	134 m ²	220 m ²	220 m ²	40 m ²	614 m ²
E. rec.	MJ	0	0	0	0	0
E. Ren.	MJ	10660	863083	8008	2133	883885
E. nRen.	MJ	93371	425766	187550	41408	748095
Ep. Ress.	kea	37	159	183	26	405
Conso eau	l	65070	490831	96998	5566	658465
D. val.	kg	324	27468	33011	3547	64349
D. dang.	kg	2	54	36	78	170
D. élim.	kg	4870	33849	1072	158	39950
D. inert.	kg	32028	161	58423	3264	93876
D. radioA	kg	0	0	1	2	3
Chgt clim.	keqCO ₂	12817	-10595	14291	5102	21615
Ac atm	keSO ₂	48	239	63	21	372
Poll air	m ³	434897	3428920	1429340	336067	5629224
Poll. Eau	m ³	2372	6131	571208	454	580166
Destruc. oz	keCFC	0	0	0	0	0
Form. Oz.	keE	1	62	8	3	73

1. Caractéristique : Maison Galopin – fibres ciment

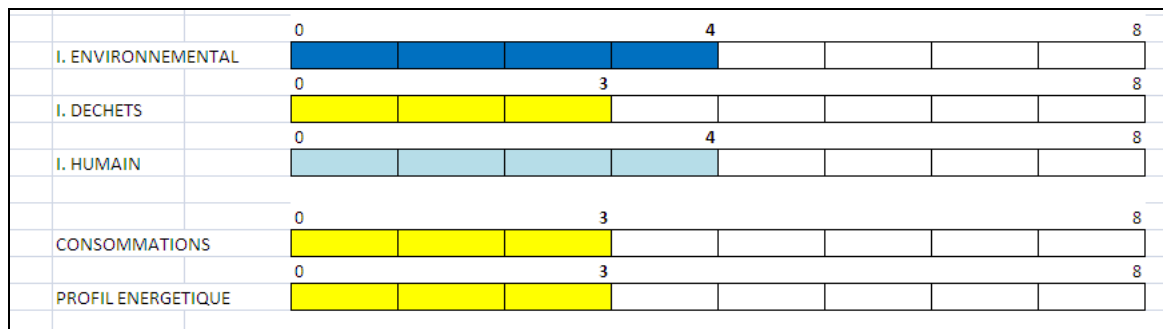
2. Dispositifs mis en place :

Dispositif 1	Bardage panneau fibres ciment urbanis – eternit
	Panneau laine de verre
	Plaque de plâtre BA 13 isolava
	Ossature bois poteau - poutre
Dispositif 2	Plaque ondulée fibres ciment teinte naturelle
	Poutre lamellé collé
	Panneau laine de verre
	Plaque de plâtre
Dispositif 3	Terre cuite
	Panneaux rigides PUR ep 80mm
	Dalle béton
Dispositif 4	Menuiseries alu

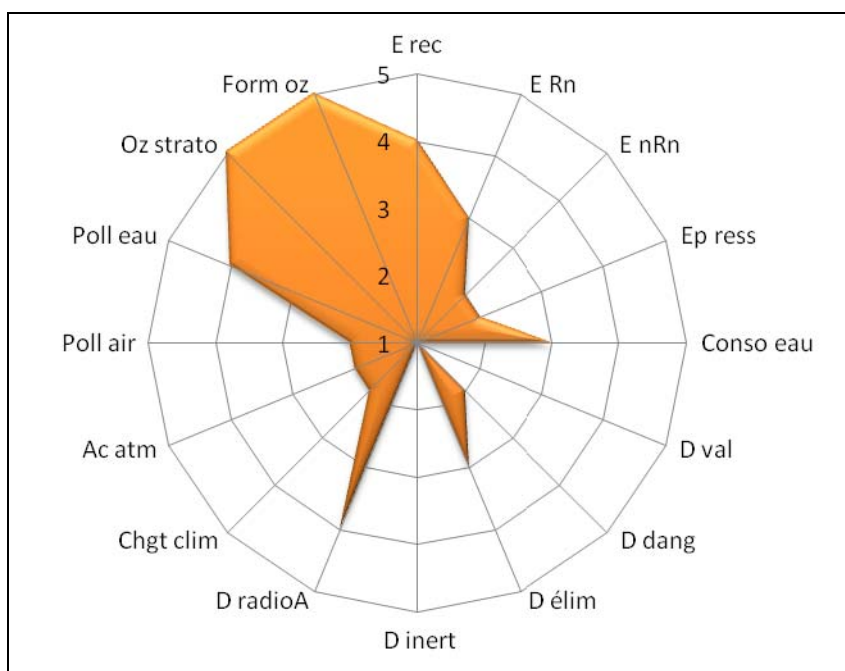
3. Résultats de l'approche globale :



4. Résultats de l'approche détaillée :



5. Résultats de l'approche experte – radars :



6. Résultats de l'approche experte – chiffres :

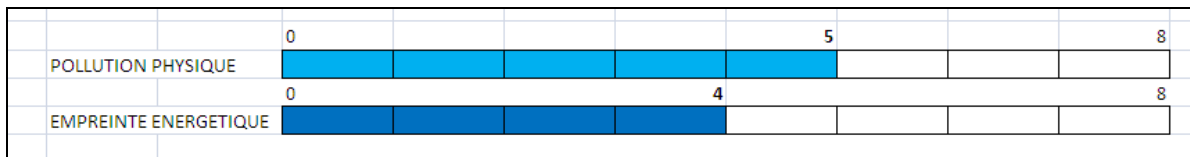
		Dispo1	Dispo2	Dispo3	Dispo4	Global
INDICE	Unité	134 m ²	220 m ²	220 m ²	40 m ²	614 m ²
E. rec.	MJ	0	0	0	0	0
E. Ren.	MJ	463172	1267355	8008	14520	1753055
E. nRen.	MJ	3263664	3348026	187550	33200	6832440
Ep. Ress.	kea	1403	125	183	10	1721
Conso eau	l	2701058	1254231	96998	7520	4059807
D. val.	kg	36943	30635	33011	936	101525
D. dang.	kg	1506	383	36	22	1947
D. élim.	kg	214235	34604	1072	472	250383
D. inert.	kg	18934	407160	58423	680	485197
D. radioA	kg	40	28	1	0	68
Chgt clim.	keqCO ₂	258840	258663	14291	940	532733
Ac atm	keSO ₂	1186	1366	63	9	2624
Poll air	m ³	21472964	17753120	1429340	149000	40808424
Poll. Eau	m ³	49320	13909377	571208	2880	14532785
Destruc. oz	keCFC	0	0	0	29	29
Form. Oz.	keE	95	178	8	1	281

1. Caractéristique : Maison Galopin – traditionnel + toit terrasse + isolation écologique

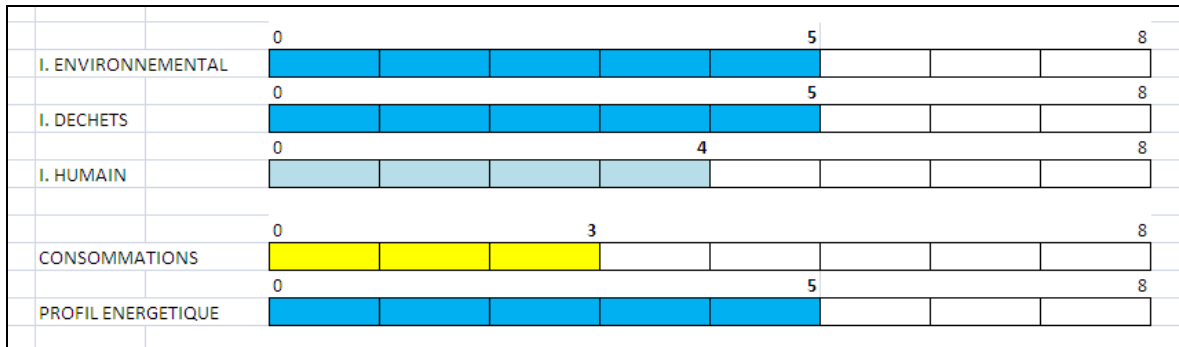
2. Dispositifs mis en place :

Dispositif 1	Mur béton
	Métisse – fibres textiles recyclées
	Plaque de plâtre BA 13
	Ossature métallique pour cloison en plaques de plâtre
Dispositif 2	Revêtement d’étanchéité bicouche bitume polymère sous toiture végétalisée
	Panneau laine de roche alphatoit 80mm
	Dalle alvéolée béton précontraint
	Enduit minéral
Dispositif 3	Terre cuite
	Panneaux rigides PUR ep 80mm
	Dalle béton
Dispositif 4	Menuiserie PVC

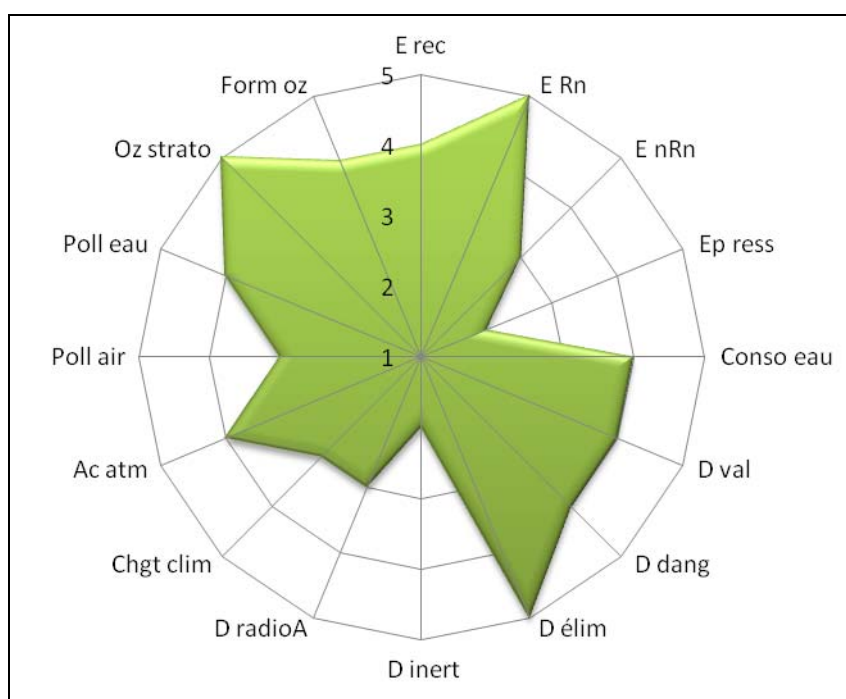
3. Résultats de l’approche globale :



4. Résultats de l’approche détaillée :



5. Résultats de l'approche experte – radars :



6. Résultats de l'approche experte – chiffres :

		Dispo1	Dispo2	Dispo3	Dispo4	Global
INDICE	Unité	134 m ²	220 m ²	220 m ²	40 m ²	614 m ²
E. rec.	MJ	0	0	0	0	0
E. Ren.	MJ	2850,8	15785	8008	2016	28662
E. nRen.	MJ	79823	439098	187550	55600	762071
Ep. Ress.	kea	93,05	192,85	183	18,240	487,49
Conso eau	l	41124	122276	96998	49200	309598
D. val.	kg	21670	2108,2	33011	456	57245
D. dang.	kg	8,045	318,05	36	2,68	364,50
D. élim.	kg	1996,15	11295,02	1072	88,800	14452
D. inert.	kg	28276	67739	58423	1224	155663
D. radioA	kg	0,518	3,810	1	0,40	5,660
Chgt clim.	keqCO2	7100,6	22607	14291	2548	46546
Ac atm	keSO2	22,749	110,30	63	17,04	213,34
Poll air	m ³	282673	1741300	1429340	378800	3832113
Poll. Eau	m ³	268416	10756764	571208	2084	11598473
Destruc. oz	keCFC	0	0	0	0	0
Form. Oz.	keE	2,507	15607	8	2,108	15619

1. Caractéristique : Maison Galopin – bloc terre cuite + toit traditionnel + isolation écologique

2. Dispositifs mis en place :

Dispositif 1	Enduit minéral
	Bloc béton cellulaire
	Enduit intérieur gypse
Dispositif 2	Charpente bois traditionnel
	Plume de canard batiplum 80mm
	Tuile de terre cuite
	Panneau particule bois
Dispositif 3	Revêtement sol linoléum
	Panneau laine de roche alfalène 70 100mm
	Béton de chaux chanvre sol
Dispositif 4	Menuiseries pin

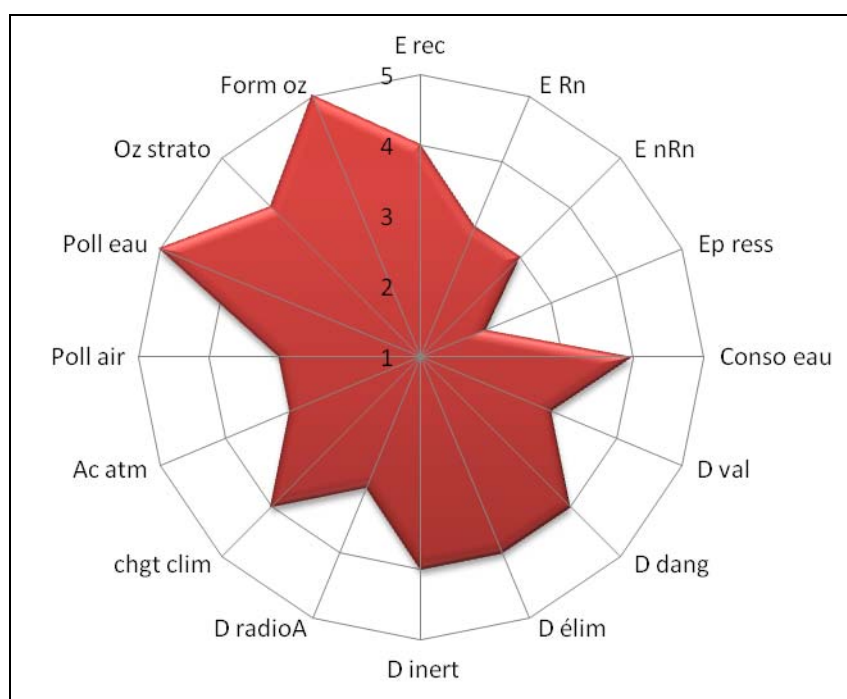
3. Résultats de l'approche globale :

	0				4					8
POLLUTION PHYSIQUE										
	0				4					8
EMPREINTE ENERGETIQUE										

4. Résultats de l'approche détaillée :

	0					5				8
I. ENVIRONNEMENTAL										
	0					4				8
I. DECHETS										
	0					4				8
I. HUMAIN										
	0					4				8
CONSOMMATIONS										
	0					4				8
PROFIL ENERGETIQUE										

5. Résultats de l'approche experte – radars :



6. Résultats de l'approche experte – chiffres :

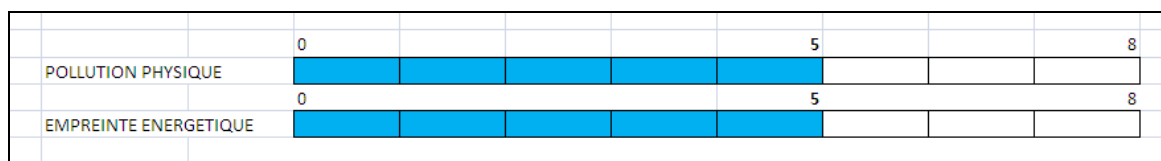
		Dispo1	Dispo2	Dispo3	Dispo4	Global
INDICE	Unité	134 m ²	220 m ²	220 m ²	40 m ²	614 m ²
E. rec.	MJ	0	0	0	0	0
E. Ren.	MJ	13614	3429932	33585	29040	3506171
E. nRen.	MJ	268897	2040548	233706	99600	2642752
Ep. Ress.	kea	28,006	217,75	272,184	9,920	527,86
Conso eau	l	51080	194909	33840	7520	291349
D. val.	kg	1713,6	201098	198,66	936	203947
D. dang.	kg	36,24	198,75	766,7	108,8	1110,5
D. élim.	kg	14525	187062	3066,8	944	205598
D. inert.	kg	29935	22572	777,04	1360	54245
D. radioA	kg	0,940	27,288	2,945	0,637	31,810
Chgt clim.	keqCO2	7789,4	-85047	-6805,7	940	-83123
Ac atm	keSO2	15,95	270,46	52,42	9,240	348,09
Poll air	m ³	433088	7471640	348254	149000	8401982
Poll. Eau	m ³	10246	18670	2952	2880	34749
Destruc. oz	keCFC	0	0	0	29,22	29,22
Form. Oz.	keE	0,754	69,49	2,583	0,916	73,751

1. Caractéristique : Maison Galopin – béton chaux / chanvre

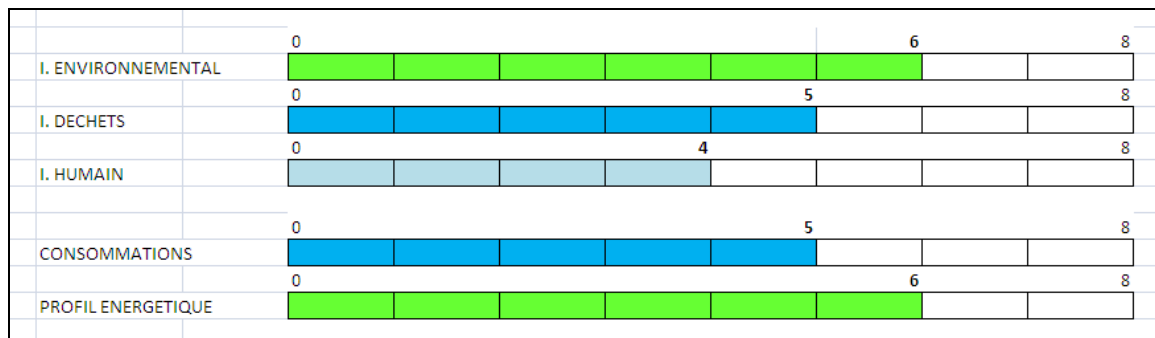
2. Dispositifs mis en place :

Dispositif 1	Enduit minéral
	Mur béton
	Plume de canard batiplum mur
	Plaque de plâtre BA 13
Dispositif 2	Revêtement d'étanchéité bicouche bitume polymère sous toiture végétalisée
	Plume de canard batiplum toiture
	Dalle alvéolée en béton précontraint
	Enduit minéral
Dispositif 3	Revêtement sol linoléum
	Panneau laine de roche
	Béton de chaux chanvre sol
Dispositif 4	Menuiseries pin

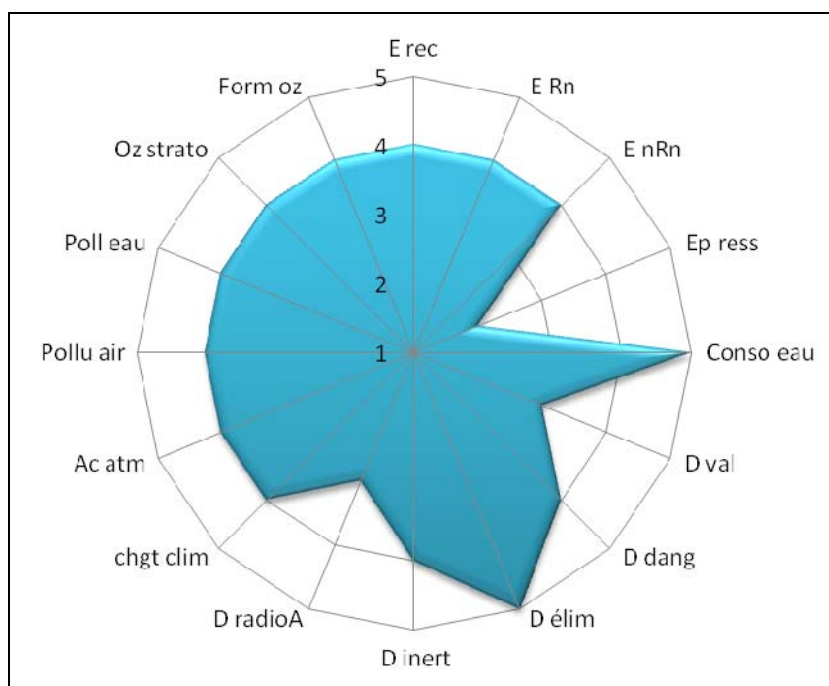
3. Résultats de l'approche globale :



4. Résultats de l'approche détaillée :



5. Résultats de l'approche experte – radars :



6. Résultats de l'approche experte – chiffres :

		Dispo1	Dispo2	Dispo3	Dispo4	Global
INDICE	Unité	134m ²	220 m ²	220 m ²	40 m ²	614 m ²
E. rec.	MJ	0	0		0	0
E. Ren.	MJ	49158	14885		14520	95822
E. nRen.	MJ	48668	409156		33200	588154
Ep. Ress.	kea	10,164	175,82		9,920	477,9
Conso eau	l	15296	120472		7520	185022
D. val.	kg	6322	2236,9		936	9719
D. dang.	kg	53,15	29,944		21,76	376,557
D. élim.	kg	4886	9827,62		472	17529
D. inert.	kg	102,41	67440		680	68748
D. radioA	kg	0,388	3,646		0,159	5,015
Chgt clim.	keqCO ₂	-1206	20334		940	14574
Ac atm	keSO ₂	12459	88,57		9,240	174,6
Poll air	m ³	260831	1535820		149000	2436905
Poll. Eau	m ³	7330,47	10756573		2880	10770017
Destruc. oz	keCFC	0	0		29,228	29,22
Form. Oz.	keE	72,119	70,943		0,916	147,03

9.6.3. Commentaires et analyses des comparaisons de variantes testées avec *MaTerre'iO*

Approche globale : commentaires

Critère de pollution physique :

Au niveau de l'approche globale de *MaTerre'iO*, la comparaison des différentes solutions constructives montre que cinq des huit variantes étudiées sont équivalentes (moyen / bien) du point de vue du critère de la pollution physique (cf. figure 79). Les variantes 3, 5 et 7 sont inférieures aux autres cas. L'utilisation de béton traditionnel et cellulaire ainsi que les fibres ciment influencent négativement ce critère.

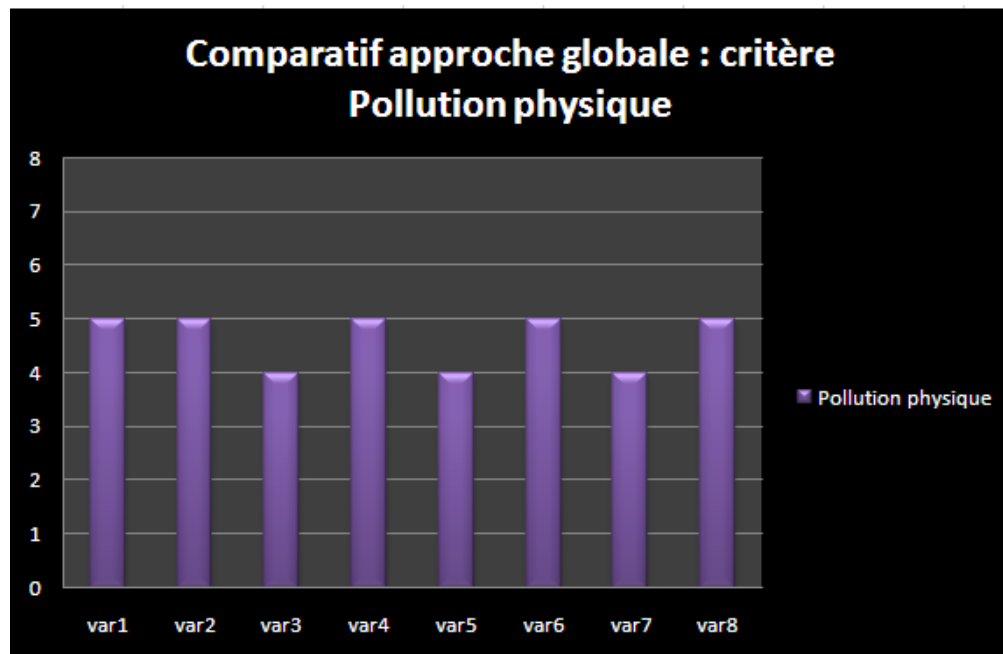


Figure 79 : Comparatif du critère de pollution physique pour les différentes variantes testées dans *MaTerre'iO*.

Critère d'empreinte énergétique :

Concernant le critère d'empreinte énergétique, la comparaison des différentes solutions constructives montre des différences plus importantes que le critère de pollution physique. Les variantes : 1, 2 et 8 sont les meilleures concernant ce critère (moyen / bien) ; les variantes : 4, 6 et 7 sont moyennes ; et les variantes : 3 et 5 sont les moins bonnes (cf. figure 80).

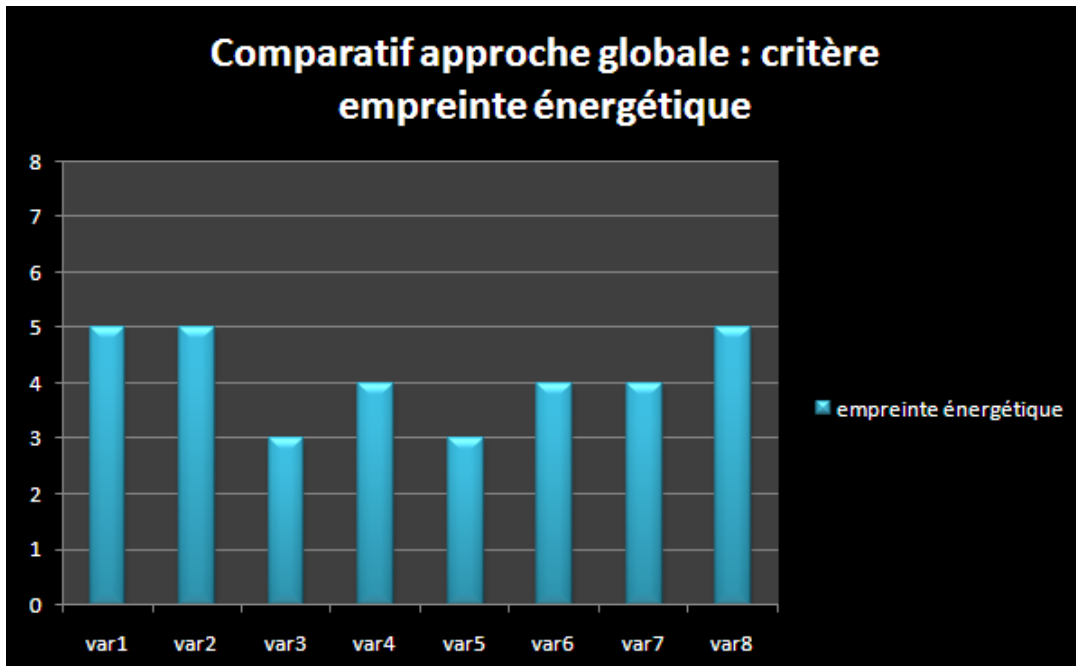


Figure 80 : Comparatif du critère d'empreinte énergétique pour les différentes variantes testées dans *MaTerre'iO*.

Les versions bois, béton chaux-chanvre et le cas réel de la Maison Galopin obtiennent des résultats supérieurs à la version béton traditionnel et la version utilisant des matériaux à base de fibres et ciment.

Approche globale : analyse

La comparaison des tendances obtenues pour chaque solution constructive testée nous permet de faire une présélection des 8 variantes étudiées. Nous retenons pour la suite de notre étude, les variantes : 1, 2 et 8 car elles sont les mieux notées dans les 2 critères analysés. Nous conservons également les variantes : 4 et 6 qui ont la note de pollution physique équivalente aux trois solutions retenues et une note moyenne pour le critère d'empreinte énergétique. Nous éliminons la variante 5 "fibres ciment", la variante 3 "béton traditionnel" et la variante 7 "béton cellulaire" car elles ont, au moins une note pire dans notre étude comparative. La toiture traditionnelle et l'isolation de la variante 3 et 7 viennent alourdir les résultats environnementaux. Le matériau fibres ciment utilisé dans le cas de notre variante 5 a un impact environnemental général mauvais.

L'intérêt de l'approche globale est de cerner de manière large l'ensemble des domaines intervenant dans le choix des matériaux. Dans le cadre de notre travail, nous n'avons approfondis que deux des sept critères proposés pour illustrer l'approche globale de *MaTerre'iO*.

Dans les 2 critères d'ingénierie environnementale analysés, les variantes se différencient par des écarts minimes. Ils permettent néanmoins au concepteur soucieux de la qualité environnementale de son projet de cibler quelques variantes envisagées. Cette approche lui permet d'orienter vers une présélection de solutions constructives en fonction de ses critères d'appréciation. Il est toutefois important d'observer les tendances de chaque variante en fonction des 7 critères de l'approche globale afin de faire le choix de pondérer un ou plusieurs critères selon les contraintes, le site, le projet, etc.

Approche détaillée : commentaires

Les indicateurs du critère de pollution physique

La comparaison des différentes solutions constructives fait ressortir que (cf. figure 81) :

- les variantes : 1, 2, 4 et 8 sont équivalentes (bien) du point de vue de l'indicateur d'impact sur l'environnement, les variantes 3, 6 et 7 sont moyennes, la variante 5 est pire,
- les variantes 1, 2, 4, 6 et 8 sont équivalentes (moyen / bien) du point de vue de l'indicateur d'impact sur les déchets, les variantes 3 et 7 sont moyennes, la variante 5 est pire,
- l'ensemble des variantes sont égales concernant l'impact humain. Comme précisé précédemment, nous expliquons ce point car très peu de matériaux présentent les données nécessaires afin de cerner leur impact sanitaire. Il nous est donc impossible actuellement de l'évaluer de manière significative. Nous ne prenons donc pas en compte cet indicateur dans notre analyse de cas. Nous les avons noté de manière identique pour ne pas défavoriser l'une ou l'autre des solutions testées.

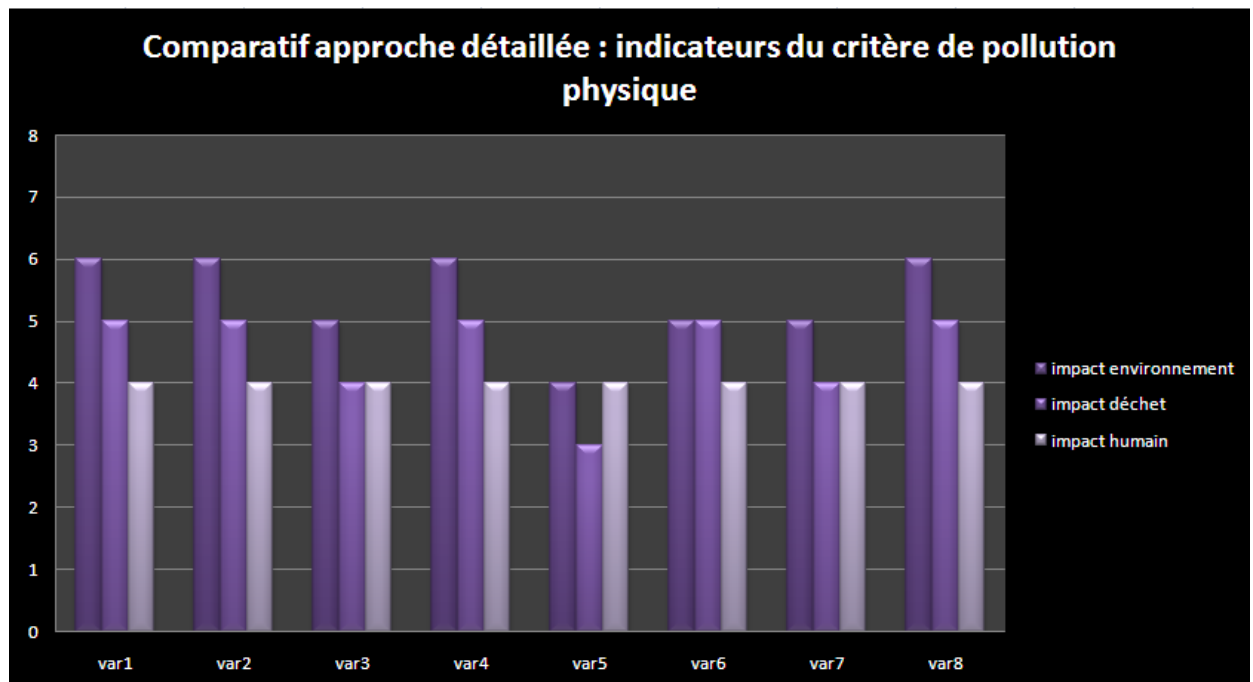


Figure 81 : Comparatif des indicateurs du critère de pollution physique (approche détaillée)

Les indicateurs de l'empreinte énergétique

La comparaison des différentes solutions constructives fait ressortir que (cf. figure 82) :

- la variante 8 est considérée comme moyen/bien du point de vue de l'indicateur des consommations, les variantes 1, 2 et 7 sont équivalentes (moyen) et les variantes 3, 4, 5 et 6 sont les pires,
- les variantes 1, 2 et 8 sont équivalentes (bien) du point de vue de l'indicateur du profil énergétique, les variantes 4 et 6 sont équivalentes (moyen / bien), les variantes 3 et 7 sont moyennes, la variante 5 est la pire.

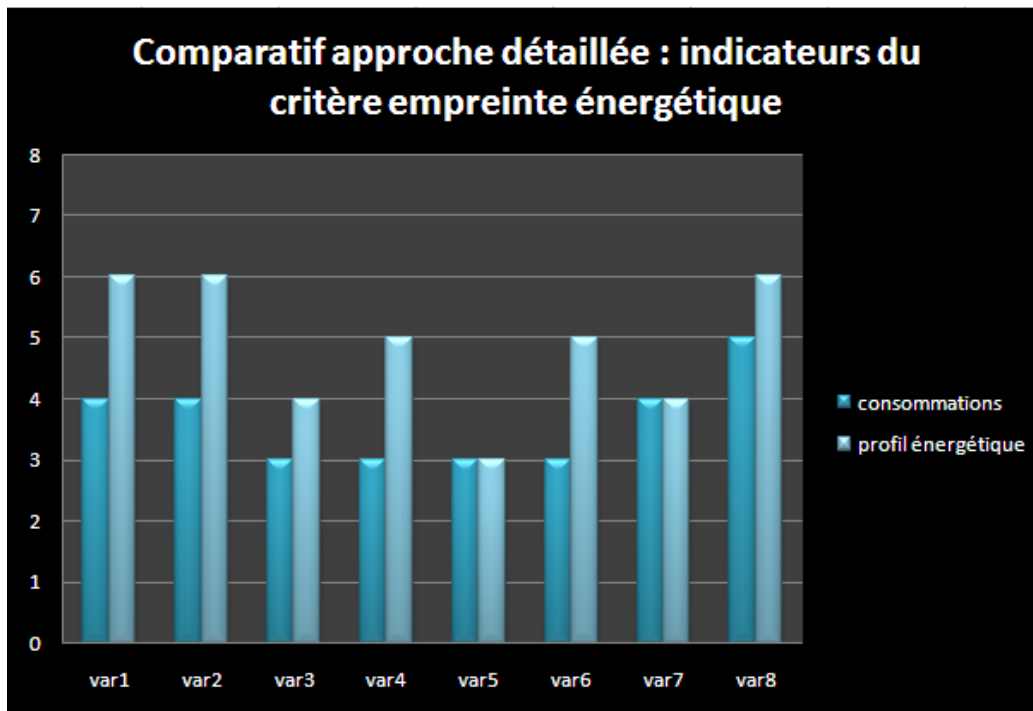


Figure 82 : Comparatif des indicateurs du critère d’empreinte énergétique (approche détaillée)

Nous remarquons que les variantes 2 et 8 qui utilisent respectivement du bois et du béton de chaux et du chanvre, sont malgré un indice d’épuisement des ressources moyen, bien notées car elles consomment peu d’eau.

Approche détaillée : analyse

La comparaison des tendances obtenues pour chaque solution constructive testée nous permet de faire une seconde présélection concernant les 3 variantes retenues dans l’approche globale (variante 1, variante 2 et variante 8). Les variantes 4 et 6 sont globalement moins bonnes lorsque nous les comparons dans les différents indicateurs de l’approche détaillée. La variante qui est la mieux notée est donc le cas 8 en béton chaux-chanvre. Viennent ensuite les variantes 1 et 2 ; puis les variantes 4, 6, 7 et 3 ; et enfin la variante 5.

L’approche détaillée permet d’affiner la présélection réalisée dans l’approche globale. Elle élimine diverses solutions retenues dans la première étape de *MaTerre’iO*. Elle montre les différences entre des solutions considérées comme équivalentes. Pour exemple, les variantes : 1, 2, 4, 6 et 8 sont équivalentes concernant les indicateurs de pollution physique (impact environnemental, impact des déchets et impact humain). Dans les indicateurs d’empreinte énergétique (épuisement des ressources et consommation d’eau), seules les variantes 1, 2 et 8 sont semblables.

Approche experte : commentaires

Dans le cas où deux solutions seraient équivalentes au niveau de l'approche détaillée, il serait nécessaire d'affiner notre sélection en s'intéressant à chaque indice indépendamment.

La comparaison sous la forme de tendances (radars) ne nous permet pas de faire un choix entre les différentes solutions retenues à ce stade (cf. figure 83). Il est donc nécessaire de comparer des résultats chiffrés et pondérés afin de réaliser un choix.

Afin de démontrer le travail permis par l'approche experte et de valider les présélections réalisées dans les approches précédentes proposées dans *MaTerre'io* : approche globale et approche détaillée, nous proposons une comparaison des 8 variantes étudiées afin de les classer de manière précise.

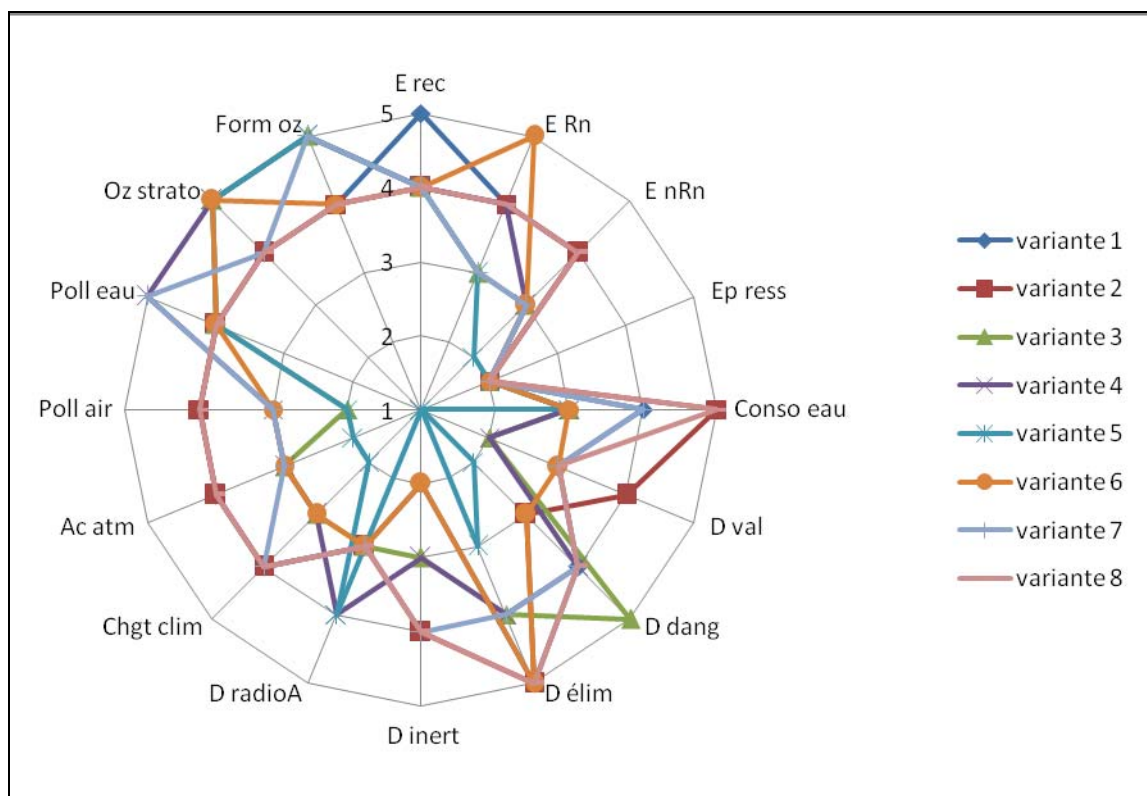


Figure 83 : Comparaison des 8 variantes indice par indice.

Comme nous le montre la figure 83, les variantes étudiées n'atteignent pas le niveau très bien TB concernant les indices suivants :

- pollution de l'air,
- acidification atmosphérique,
- changement climatique,
- déchets radioactifs,
- déchets inertes,
- épuisement des ressources,
- énergie non renouvelable.

Elles sont globalement équivalentes concernant les indices :

- pollution de l'eau,
- destruction de l'ozone stratosphérique,
- formation de l'ozone photochimique,
- énergie récupérée.

Elles diffèrent au niveau des indices :

- énergie renouvelable,
- consommation de l'eau,
- déchets valorisés,
- déchets dangereux,
- déchets éliminés,
- déchets inertes.

Si nous comparons les résultats chiffrés de chacune des variantes (cf. figure 84) et que nous les classons les unes par rapport aux autres (cf. figure 85), nous observons les tendances suivantes :

		VAR 1	VAR 2	VAR 3	VAR 4	VAR 5	VAR 6	VAR 7	VAR 8
INDICE	Unité								
E. rec.	MJ	2218,6	0	0	0	0	0	0	0
E. Ren.	MJ	93310	191944	3366003	1771587	3481336	63233	3506171	88708
E. nRen.	MJ	2116006	1817726	3011422	2274475	20591943	2161541	2642752	1481321
Ep. Ress.	keea	287,52	492,4	513,98	404	1721	487,49	527,866	477,9
Conso eau	l	227357	205834	391367	662431	4059807	309998	291349	185022
D. val.	kg	15024	9484	254179	64599	101525	57245	203947	9719
D. dang.	kg	1142,2	1378,54	430	838,37	10015	2231,06	1110	1087
D. elim.	kg	26536	33668	200242	93154	497365	28377	205598	33675
D. inert.	kg	295322	137304	198470	187804	975661	352260	54245	59936
D. radio.A	kg	22,806	20,44	35,161	12,7	280	22,78	31,8	17,31
Chgt clim.	keqCO2	42157	15999	-57490	22523	532733	46546	-83,123	14574
Ac atm	keSO2	203,12	182,93	372,3	373	2624	213,34	348	174,6
Poll air	m³	4311826	2548885	9274642	5676459	40808424	3832113	8401982	2436905
Poll. eau	m³	10784889	10777773	859186	581300	14532785	11598473	34749	10770017
Destruc. oz	keCFC	29,22	29,22	0	0	29	0	29,22	29,22
Form. Oz.	keE	15619	15683	76,87	73	281	15619	73,75	147,03

Figure 84 : Résultats de chaque variante indice par indice

Nous classons les variantes de la meilleure à la pire en les classant de 1 à 8 : 1 étant la meilleure place et 8 la pire. L'addition des points permet de classer les cas du meilleur (nombre de point le plus petit) au plus mauvais (nombre de point le plus grand).

		VAR 1	VAR 2	VAR 3	VAR 4	VAR 5	VAR 6	VAR 7	VAR 8
INDICE	Unité								
E. rec.	MJ	1	2	2	2	2	2	2	2
E. Ren.	MJ	3	4	6	5	7	1	8	2
E. nRen.	MJ	3	2	6	5	8	4	7	1
Ep. Ress.	keea	1	5	6	2	8	4	7	3
Conso eau	l	3	2	6	7	8	5	4	1
D. val.	kg	3	1	8	5	6	4	7	2
D. dang.	kg	5	6	1	2	8	7	4	3
D. elim.	kg	2	4	1	6	8	3	7	5
D. inert.	kg	6	3	5	4	8	7	1	2
D. radio.A	kg	5	3	7	1	8	4	6	2
Chgt clim.	keqCO2	6	4	2	5	8	7	1	3
Ac atm	keSO2	3	2	6	7	8	4	5	1
Poll air	m³	4	2	7	5	8	3	6	1
Poll. eau	m³	6	5	3	2	8	7	1	4
Destruc. oz	keCFC	2	2	1	1	2	1	2	2
Form. Oz.	keE	5	6	2	1	4	5	1	3
POINTS		58	53	69	60	109	68	69	37
ORDRE CLASSEMENT		3	2	6	4	7	5	6	1

Figure 85 : Classement des différentes variantes

Le classement obtenu confirme les propos obtenus dans les approches : globale et détaillée. La variante 8 est la meilleure. La variante 2, la variante 1 et la variante 4 sont respectivement aux places 2, 3 et 4. Elles sont relativement proches. Les variantes 6, 7 et 3 se situent aux places 5 et 6. La variante 5 est la moins bonne.

Approche experte : analyse

Le cas réel de la Maison Galopin est globalement moyen concernant les aspects environnementaux des matériaux. L'utilisation de béton de chaux et chanvre ou de bois à la place du béton et ciment traditionnel aurait apporté un plus concernant l'impact environnemental global des matériaux. Toutefois, l'indice d'épuisement des ressources aurait été vu à la baisse. Actuellement, le cas réel de la Maison Galopin en comparaison des différentes variantes est le mieux noté.

L'approche experte a pour intérêt de comparer de manière précise, ceci indice par indice, l'impact réel de quelques solutions déjà présélectionnées.

L'appréhension des résultats sous la forme de tendances n'est plus pertinente à ce stade d'évaluation d'une solution constructive. Elle ne nous permet pas de faire un choix, contrairement aux résultats précis que nous apportent les chiffres.

Plaçons-nous maintenant dans le cas où le projet est soumis à des conditions climatiques plus rudes ou dans le cas de certaines exigences de label (Passivhaus, Minergie,...). Outre le fait que la maison Galopin actuellement conçue, différerait nécessairement dans sa forme, son orientation, son organisation au vu du climat considéré, son isolation serait renforcée. Nous avons étudié les 3 variantes les mieux notées dans notre première étude (variante 1 cas réel, variante 2 dominante bois, variante 8 béton chaux-chanvre) afin d'observer si l'épaisseur de l'isolant joue un rôle important dans l'impact environnemental des dispositifs mis en place dans le projet. Pour cela, nous avons choisi de mettre une isolation de 30 cm pour les murs verticaux et de 45 pour les toitures et dalles (épaisseur d'isolants mis en place dans des projets ayant obtenu le label Passivhaus).

Lorsque nous comparons les variantes étudiées précédemment avec les variantes dont l'isolation est renforcée, nous remarquons que les tendances sont sensiblement identiques (cf. figure 86).

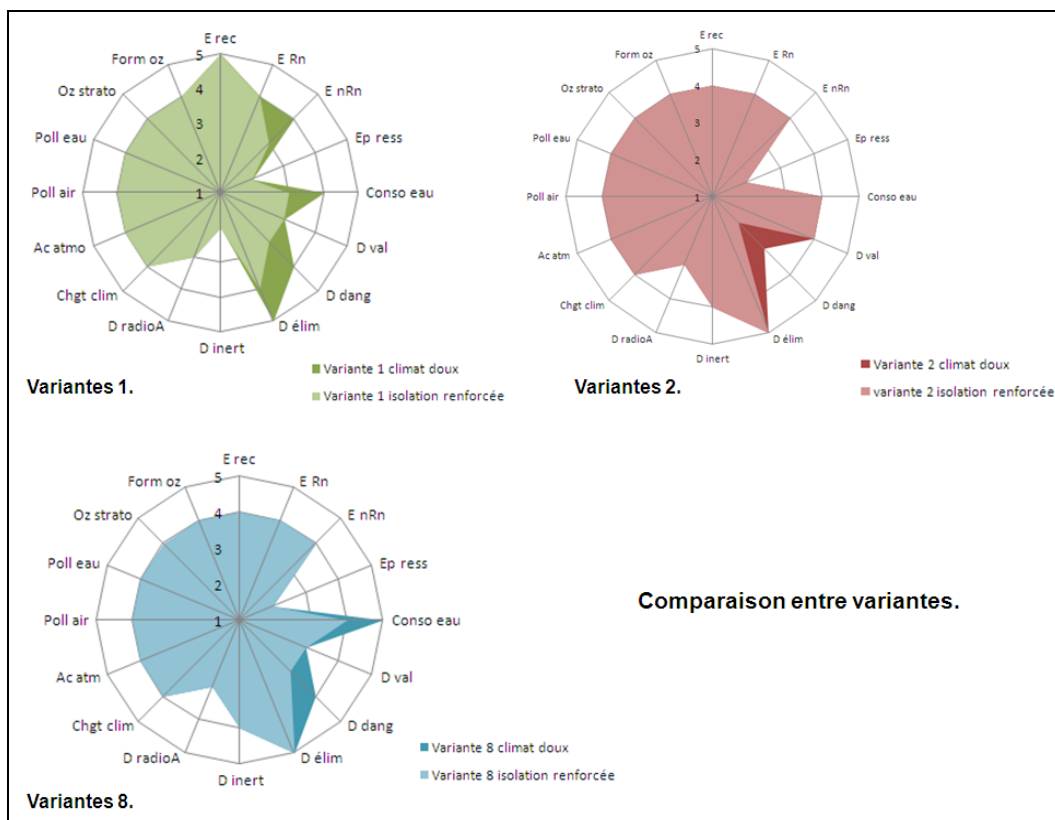


Figure 86 : Comparaison des variantes 1, 2 et 8 (différence : épaisseur de l'isolant)

Les approches : globale et détaillée illustrent également ces observations. Elles montrent des tendances proches quelle que soit l'épaisseur de l'isolant retenue (cf. figure 87).

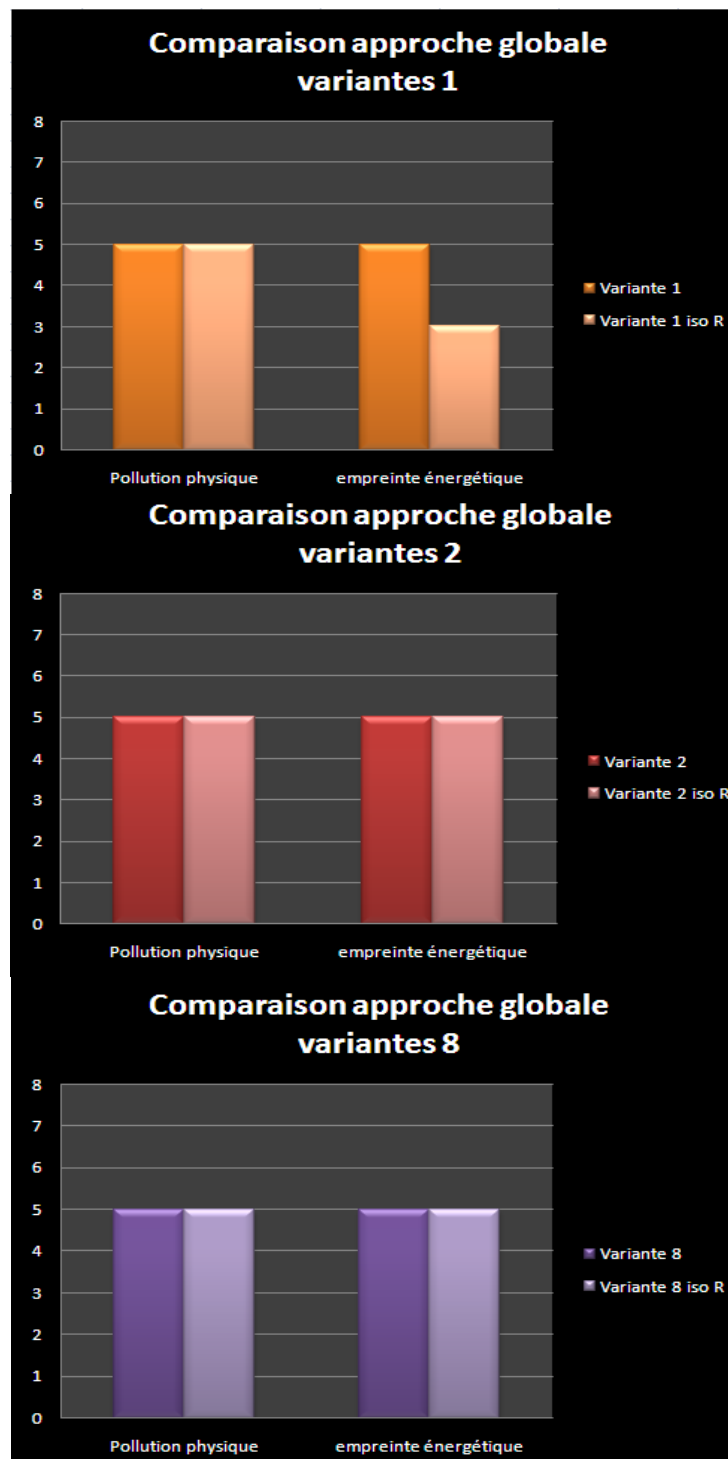


Figure 87 : Approche globale - comparaison des variantes : 1, 1 isolation renforcée, 2, 2 isolation renforcée, 8 et 8 isolant renforcée

Nous remarquons toutefois que la variante 1 qui utilise uniquement des isolants de laine de roche et du polyuréthane voit ces tendances plus fortement à la baisse que les variantes

2 et 8 qui utilisent des isolants à base de plume de canard, de laine de roche et de polyuréthane.

L'approche experte montre une consommation d'eau, de déchets dangereux, de déchets éliminés et d'énergies plus importante pour la variante 1 ayant une isolation renforcée. Nous retrouvons ces facteurs dans les indicateurs de l'empreinte énergétique et dans l'indicateur impact des déchets dont la note est inférieure à la variante 1 initiale (cf. figure 88). Ces observations se vérifient également concernant les variantes 2 et 8 qui ont un impact concernant les déchets dangereux plus importants dans le cas d'une isolation renforcée. La consommation d'eau est également plus importante pour la variante 8. Les indicateurs de l'approche détaillée illustrent ces tendances, en comparaison aux premières variantes étudiées (cf. figure 88).

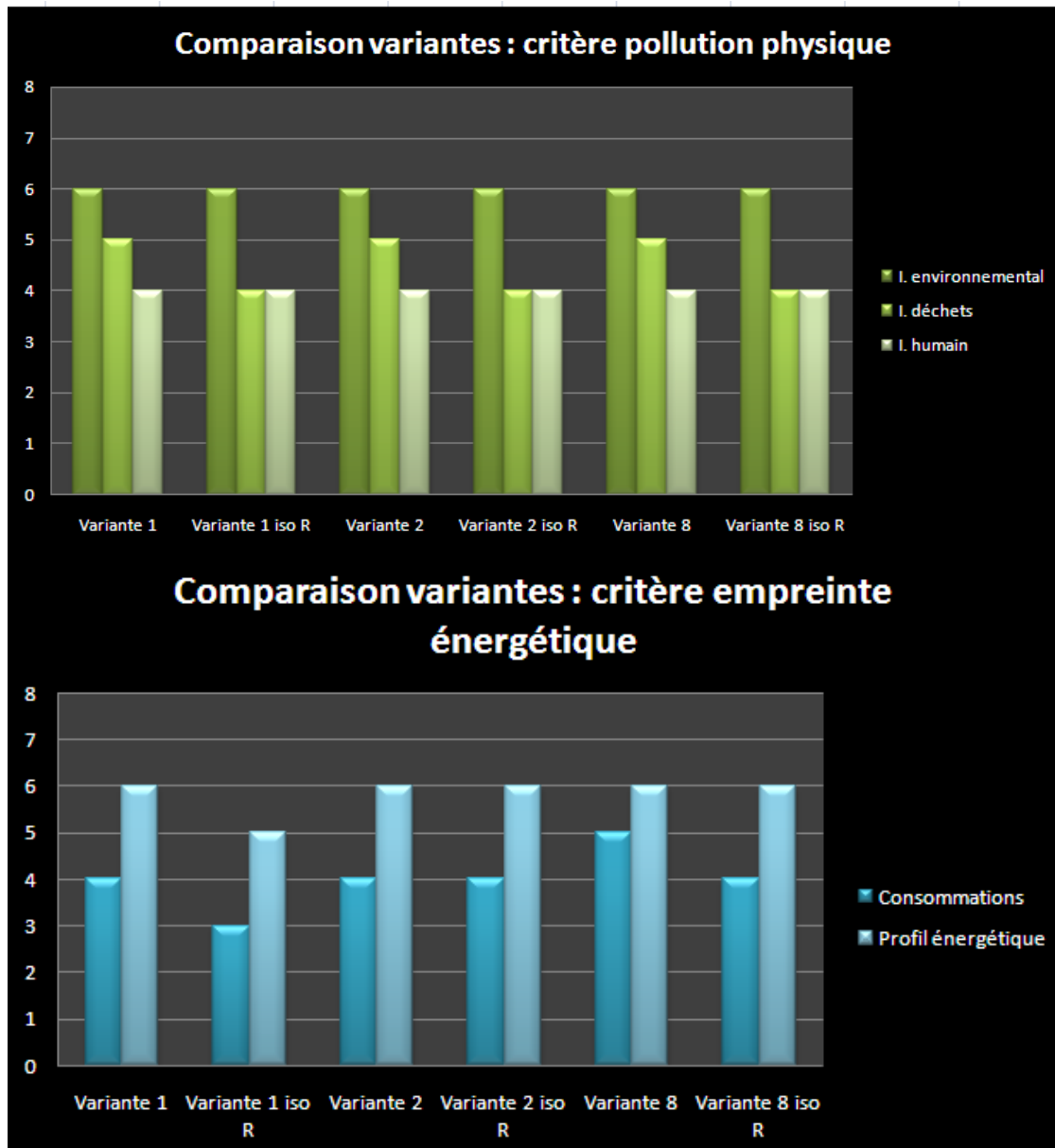


Figure 88 : Approche détaillée - comparaison des variantes 1, 1 isolation renforcée, 2, 2 isolation renforcée, 8 et 8 isolant renforcée

Nous tenons à souligner que la comparaison de variantes est réellement efficace dans le cas de notre outil actuel (2 critères développés sur 7) si nous confrontons des solutions équivalentes du point de vue thermique, acoustique, etc. Dans le cas où nous comparons des variantes ayant, par exemple une épaisseur d'isolant différente, la variante ayant une isolation renforcée sera moins bien notée dans les critères "empreinte énergétique" et "pollution physique". Par ailleurs, elle sera mieux notée dans le critère "usage" qui prend en compte le confort thermique d'été et d'hiver (critère non développé dans le cadre de notre travail) et/ou le critère "réglementation".

Il est donc indispensable à terme, d'observer chaque solution dans son ensemble (7 critères de la grille d'analyse multicritères proposée). Le concepteur pourra, au vu des résultats obtenus, choisir de privilégier tel ou tel critère au détriment de tel autre ceci en ayant conscience des choix opérés. Dans le cas où l'ensemble des critères lui paraissent primordial, la solution atteignant un équilibre dans les 7 critères de l'approche globale sera retenue.

9.7. Conclusion

Nous avons conscience que *MaTerre'iO* est un prototype d'outil grandement perfectible. Nous avons tenté dans ce travail, de proposer une organisation de l'ensemble des savoirs complexes de l'ingénierie environnementale afin de les proposer à des personnes non spécialistes de ce domaine. Nous présentons une méthode traduisant en connaissances simplifiées des connaissances complexes afin de les rendre accessibles à des personnes non expertes dans le domaine de l'ingénierie environnementale.

L'intégration de différentes variantes constructives dans *MaTerre'iO* nous permet d'illustrer l'intérêt d'un tel outil.

Au moment où l'architecte s'intéresse aux questions relatives au choix des matériaux pour un projet considéré, cet outil lui permet de présélectionner des solutions parmi l'ensemble des cas envisagés. Il peut ainsi retenir certaines variantes dès les premières phases du processus de conception. Par la suite, il peut approfondir son étude afin de cerner la solution qui lui paraît répondre le mieux aux exigences et contraintes du projet architectural étudié. Il est bien entendu évident que le choix de privilégier tel ou tel critère au détriment de tel autre est laissé au jugement du concepteur.

Nous relevons différentes limites à l'illustration de *MaTerre'iO* présentée précédemment :

- il a été délicat de proposer un grand nombre de solutions constructives différentes car nous avons encore peu de données accessibles. Les principaux matériaux renseignés sont les divers isolants commercialisés,
- certaines variantes sont proches dans les résultats obtenus car elles utilisent parfois des dispositifs équivalents (toiture identique par exemple),

- les données sur l'impact sanitaire des matériaux sont quasiment inexistantes actuellement,
- les bornes mises en place sont à vérifier au fur et à mesure de l'accès aux diverses données transmises. En effet, nous nous basons actuellement sur les valeurs recueillies dans la base créée au LRA,
- l'indice géographique n'est pas pris en compte dans ces critères car les données accessibles concernent le territoire français. Il nous est donc impossible actuellement de quantifier l'impact de la "pollution physique" et de l'"empreinte énergétique" dans des situations géographiques variées. Une solution serait de modifier les pondérations des indices en fonction de la situation du pays. Pour exemple, dans le cas d'un territoire ayant un accès réduit à l'eau, il serait possible de pondérer fortement l'indice "consommation d'eau". Les différences climatiques entre nos régions pouvant notamment avoir un impact sur la problématique de l'isolation seront traitées à travers les critères d'usage et réglementaire (cf. chapitre 4 : grille d'analyse multicritères),
- enfin, il est indispensable dans le cadre de l'approche globale, d'approfondir les 5 autres critères de la grille proposée afin de cerner toute l'utilité de cette approche concernant les matériaux en architecture.

Comme annoncé précédemment, *MaTerre'iO* ne permet pas de définir une solution optimale pour un projet architectural. Seuls deux des sept critères sont actuellement approfondis. Afin de choisir la meilleure solution pour le projet étudié, il faudrait l'évaluer à partir de l'ensemble des 7 critères présents dans l'outil.

Dans le cadre de notre travail, nous évaluons l'aspect environnemental (pollution, consommation, ...) du projet. Les aspects thermiques (confort d'été et d'hiver,...), acoustiques, esthétiques, économiques (coût construction, coût maintenance,...), réglementaires (réglementation thermique, normes handicapés,...), etc. ne sont pas pris en compte car ils dépendent des 5 autres critères composants notre grille d'analyse.

10. Enquête n°2 Innovations proposées et illustrées par le prototype d'outil - MaTerre'iO mis à l'épreuve des concepteurs

10.1. Introduction

L'objectif de cette enquête est de valider ou d'invalider les différentes propositions que nous avons avancées pour de futurs outils d'aide à la conception à travers le prototype d'outil *MaTerre'iO*. Ces propositions nous le rappelons, découlent de l'étude de différentes interfaces graphiques d'outils existants ainsi que des attentes et pratiques relevées lors de nos entretiens auprès de concepteurs en architecture et de personnes expertes dans un domaine lié à celui de l'architecture.

10.2. Protocole d'enquête

Afin de recueillir un nombre significatif d'opinions concernant nos diverses propositions pour de futurs outils d'aide à la conception, nous avons choisi de mettre en place une enquête à partir d'un questionnaire. L'intérêt de cette méthode est de bénéficier d'un instrument de mesure identique pour l'ensemble des sujets interrogés. A partir d'une situation analogue, nous pourrions réaliser des comparaisons et cerner les jugements et les appréciations de concepteurs en architecture concernant les propositions faites dans notre travail (Berthier, 2000).

10.2.1. L'enquête à partir d'un questionnaire

Intérêt du questionnaire

Un questionnaire s'articule autour de différentes questions ayant pour similarité d'avoir un vocabulaire simple, d'éviter les mots à plusieurs sens, d'utiliser des formules grammaticales claires et d'être d'un niveau conceptuel adapté. Ces questions peuvent être de différents ordres :

- les questions ouvertes : ce type de question amène la personne à donner une réponse libre c'est-à-dire avec son propre vocabulaire.
- les questions fermées : ce type de question conduit à choisir des réponses proposées et brèves :

- ✓ oui ou non,
 - ✓ choix d'une réponse entre plusieurs réponses possibles (questions à réponse unique),
 - ✓ choix de plusieurs réponses entre plusieurs réponses (questions à choix multiples).
- les questions d'opinions : ce type de question s'intéresse à ce que pensent les personnes interrogées. Les réponses des questions d'opinions se basent sur :
- ✓ des échelles unidimensionnelles sous la forme de choix d'une réponse sur une échelle graduée,
 - ✓ des échelles bipolaires telles que : satisfait / mécontent, vrai / faux, plaisant / déplaisant, compliqué / simple,
 - ✓ des classements ou préférences tels que donner un ordre à différents critères proposés,
 - ✓ des choix forcés.

Questionnaire proposé

Nous avons essentiellement articulé notre questionnaire à partir de questions d'opinions afin de recueillir l'appréciation et les points de vue des personnes interviewées.

Pour cela, nous avons organisé le questionnaire en différentes parties (cf. Annexe 10 : "*Questionnaire de l'enquête n°2*") :

1. recueil des renseignements concernant la profession de l'enquêté ainsi que l'utilisation d'outils d'aide au projet (aide à la conception ou à la décision) dans son activité professionnelle,
2. questionnements relatifs au logiciel *MaTerre'iO* : vision globale de l'outil,
3. questionnements relatifs à l'interface de l'outil,
4. questionnements relatifs aux données d'entrées de l'outil,
5. questionnements relatifs aux résultats proposés par l'outil,
6. recueil d'un avis général sur l'outil.

Les parties 1 et 6 sont composées de questions fermées nous permettant de cibler de manière précise la situation professionnelle de l'enquêté et de questions ouvertes afin de laisser la liberté à l'enquêté de s'exprimer.

Les parties 2, 3, 4 et 5 sont essentiellement composées de questions d'opinions dont la réponse est à mentionner sur une échelle graduée unidimensionnelle. La majorité des questions s'articule autour de la proposition d'échelle de valeur suivante (cf. figure 89).

<input type="checkbox"/> pas du tout <input type="checkbox"/> très peu <input type="checkbox"/> peu <input type="checkbox"/> moyennement <input type="checkbox"/> relativement bien <input type="checkbox"/> bien <input type="checkbox"/> tout à fait
Eventuels commentaires :
.....
.....
.....

Figure 89 : Echelle de valeur proposée pour les questions d'opinions (extrait du questionnaire)

10.2.2. Echantillon retenu et méthode requise

L'enquête mise en place ayant pour principal objectif de valider ou non les différentes innovations proposées pour de futurs outils, nous avons ciblé notre échantillon sur un large panel de concepteurs en architecture. Nous avons donc choisi de questionner l'ensemble des concepteurs ayant participé à la formation « Architecture et Ingénierie en qualité environnementale et développement durable » dispensée à l'ENSA de Toulouse, soit environ 130 personnes. Ces concepteurs ont un certain niveau de connaissances concernant l'approche environnementale en architecture et différents outils d'aide au projet leur sont présentés au cours de la formation. Il nous semble intéressant de recueillir leur point de vue.

Nous avons mis en place un document intitulé « *Cas d'étude* » qui présente l'objectif de l'outil, les différents principes du logiciel, son fonctionnement (type manuel) ainsi que les modalités afin de pouvoir naviguer sur le prototype accessible depuis Internet (cf. Annexe 11 : "*Cas d'étude de l'enquête n°2*"). Ce document est à lire avant de naviguer dans la maquette *MaTerre'iO* et de pouvoir par la suite répondre à l'ensemble des questions proposées dans notre questionnaire.

La lecture des documents (*Cas d'étude*) et la navigation dans l'outil demandent du temps. L'ensemble des personnes enquêtées n'a pas participé à cette enquête par manque de disponibilité et par difficulté de temps pour les relancer un à un.

Une alternative a été de nous tourner vers les personnes actuellement en formation au sein de l'ENSA de Toulouse. La démarche a été différente. Dans un premier temps, le logiciel leur a été présenté très brièvement (peu de disponibilité car cette formation est très dense). Dans un second temps, nous avons proposé aux personnes ayant assisté à cette présentation de répondre au questionnaire mis en place.

Les limites de cette démarche sont :

- un échantillon très restreint, seulement 16 personnes,
- la présentation de l'outil a été très rapide et brève, le temps à disposition étant court et limité,
- les personnes enquêtées n'ont pas eu la possibilité de naviguer dans l'outil.

Ces complications rendent les résultats difficilement exploitables et non généralisables. Il nous semble toutefois intéressant de faire ressortir certains points que nous allons détailler ultérieurement.

10.3. Points de vue de 16 concepteurs en architecture

Les questionnaires actuellement récoltés présentent les points de vue de 16 maîtres d'œuvres. Nous n'avons pas eu de retour de maîtres d'ouvrages, bureaux d'études et AMO. Seulement deux concepteurs en architecture sur les 16 questionnés utilisent des outils d'aide à la conception dans le cadre de leur activité professionnelle. Ces outils concernent les études thermiques et d'ensoleillement. Elles se font, la plupart du temps sur demande du maître d'ouvrage.

N'ayant recueilli que peu d'opinions sur les propositions formulées à travers notre outil *MaTerre'iO*, nous ne présenterons pas dans ce document les graphiques de résultats obtenus (cf. Annexe 12 : "*Résultats enquête n°2*"). Nous préférons indiquer les tendances qui se dégagent concernant l'ensemble des questions posées, sans pour autant considérer qu'elles ont une valeur scientifique indéniable, le nombre des résultats recueillis étant trop limité.

10.3.1. Questions relatives au logiciel *MaTerre'iO*

Q1. Le logiciel paraît assez facile d'accès dans sa découverte et sa mise en œuvre pour 15 concepteurs sur 16. La crainte soulevée par certains, concerne le temps nécessaire pour modéliser la volumétrie avec le logiciel *Sketchup*.

Q2. Le logiciel paraît répondre aux attentes des concepteurs en architecture au démarrage de l'esquisse pour 10 personnes sur 16. Les 6 autres maîtres d'œuvres ne sont pas en accord avec ce fait. Au cours de cette phase, leur pratique professionnelle montre qu'ils n'utilisent pas d'outil informatique. Leur travail se fait uniquement « à la main » et à l'intuition.

Q3. Le logiciel peut rendre les choix de conception relatifs au choix des matériaux plus fiables dès la phase esquisse pour 12 concepteurs sur 16. Quatre maîtres d'œuvres émettent des doutes sur l'intérêt de tels outils.

Q4. Le logiciel peut faciliter les échanges entre maîtres d'œuvres et bureaux d'études pour une majorité de concepteurs. Toutefois, cinq d'entre eux pensent que cet outil servira plutôt les discussions entre maîtres d'œuvres et maîtres d'ouvrages.

10.3.2. Questions relatives à l'interface du logiciel *MaTerre'iO*

Q5. L'interface proposée pour le prototype d'outil *MaTerre'iO* paraît relativement claire pour une majorité de concepteurs. La ressemblance de l'interface aux sites Internet auxquels nous avons accès "rassure" les maîtres d'œuvres par ce côté "déjà vu".

Q6. Cependant, l'interface n'est pas considérée comme conviviale par les concepteurs qui la qualifiaient plutôt de simple ou succincte ; d'ailleurs un peu trop pour certains. (8 maîtres d'œuvres considèrent l'interface comme *peu à moyennement* conviviale, 6 *relativement* conviviale et 2 *conviviale*)

10.3.3. Questions relatives aux données d'entrées du logiciel *MaTerre'iO*

Q7. Pour 10 concepteurs sur 16, les données d'entrées proposées sont moyennement à peu adaptées à la manière dont ils travaillent pour deux raisons :

- soit l'esquisse se fait exclusivement à la main,
- soit ils n'utilisent pas le logiciel *Sketchup*.

Dans les deux cas, renseigner la volumétrie du bâtiment sur *Sketchup* est une charge de travail supplémentaire.

Q8. Cependant, les données d'entrées à renseigner sont, pour une majorité de concepteurs, relativement pertinentes au regard de leur manière de concevoir si ce n'est le regret exprimé pour certains de ne pas prendre en compte le site environnant.

Q9. Les données sont relativement faciles à renseigner pour 10 maîtres d'œuvres sur 16. Les autres concepteurs réexpliquent leur crainte face à la modélisation en 3 dimensions du projet.

10.3.4. Questions relatives aux résultats du logiciel *MaTerre'iO*

Q10 et 11. Les critères retenus pour l'approche globale de notre outil, soit 7 critères sont relativement bien à bien adaptés pour 12 concepteurs. Les 4 autres maîtres d'œuvres soulignent différents manques dans cette proposition : le social, le facteur temps nécessaire à l'étude et à la réalisation, le site.

Q12. Aucun concepteur ne considère avoir l'expertise nécessaire pour identifier des manques concernant les deux critères approfondis : pollution physique et empreinte énergétique.

Q13. La définition des critères paraît nécessaire pour une majorité de maîtres d'œuvres afin de rappeler ce qui sous-tend chaque domaine proposé.

Q14. L'expression des résultats sous la forme de 3 degrés de compréhension semble être pertinente pour une majorité de concepteurs qui y voient un réel intérêt à la fois en fonction de l'activité professionnelle de l'utilisateur (concepteurs, BE, AMO) mais également dans leur pratique en fonction de la phase dans laquelle il se trouve (esquisse, APS, APD).

Q15. L'expression des résultats dans l'approche globale et détaillée sous la forme de tendance paraît relativement pertinente pour une majorité de concepteurs notamment pendant la phase esquisse. L'approche experte semble plus en adéquation avec la phase APS pour certains maîtres d'œuvres.

Q16. Les données manquantes sont moyennement lisibles sur le logiciel car certains concepteurs n'ont pas visualisé le système de couleur mis en place (bleu dans le cas où nous avons accès à l'ensemble des données, rouge dans le cas de données manquantes).

Q17. Les concepteurs n'ayant pas utilisé eux-mêmes l'outil, ils ne soulèvent pas d'informations superflues à partir d'une seule présentation du logiciel.

10.3.5. Avis général concernant l'outil

Q18, Q19 et Q20. De manière globale, le logiciel semble répondre moyennement aux attentes des concepteurs en architecture concernant les questions relatives au choix des matériaux. Certains expliquent leur "sentiment mitigé" par le fait que l'outil peut être très intéressant pour certains types de projets (notamment lors de concours) et beaucoup moins pour d'autres.

Alors que certains soulignent l'intérêt, le gain de temps, l'efficacité et l'importance d'outils d'aide à la conception, d'autres n'y voient qu'une perte de temps et d'énergie. Les avis sont donc partagés sur l'utilité des outils de manière générale avec une tendance positive d'une majorité de maîtres d'œuvres questionnés.

10.4. Conclusion

10.4.1. Tendances recueillies en regard des différentes propositions

Les résultats recueillis ne nous permettent pas de généraliser des faits relatifs aux propositions faites concernant de futurs outils d'aide à la conception en architecture. Le nombre étant limité, nous ne pouvons pas valider ou invalider nos innovations que nous rappelons :

- évolution des données d'entrées à adapter à la phase esquisse :
- aider à dégager une vision globale du projet- vue d'ensemble des critères tout en réduisant le nombre de finalités proposées dans l'outil :
- faciliter la compréhension et l'apprentissage des non-experts :
- rassembler les données sur les impacts environnementaux des matériaux
- proposer une interface simple, claire et lisible.

Nous relevons toutefois certains points qui nous paraissent intéressants concernant notre prototype d'outil. Le logiciel paraît répondre aux attentes des concepteurs concernant les matériaux. Il semble relativement simple à utiliser et peut faciliter les échanges au sein d'une équipe de conception. Afin d'être employé par les concepteurs en architecture, notre outil ne doit pas empiéter sur le temps de conception et de créativité déjà trop court. L'interface est simple et succincte. Il serait intéressant de la rendre plus vivante afin d'être plus conviviale. Les données d'entrées sont relativement pertinentes et faciles d'accès pour les personnes travaillant dès l'esquisse à partir de logiciel informatique. Le concepteur travaillant à la main y voit une charge supplémentaire plutôt qu'une aide à la conception. Les 3 degrés de compréhension proposés pour l'expression des résultats semblent satisfaisants pour une majorité de concepteurs qui y voient un réel intérêt à la fois concernant les différents niveaux de connaissances de l'utilisateur mais également en fonction de la phase dans laquelle le projet se situe. Enfin une dernière remarque générale à une majorité de concepteurs, est à considérer dans notre travail : l'absence de prise en compte de l'environnement immédiat, qui est selon les personnes enquêtées une limite de l'outil proposé.

10.4.2. Limites de l'enquête n°2

Plusieurs limites de l'enquête n°2 mise en place sont à relever :

- L'échelle d'évaluation de possibilités de réponses proposée fonctionne à partir d'un choix impair de réponses. Nous pensons qu'il aurait été préférable de proposer une échelle paire afin de forcer les personnes interrogées à faire un choix entre une tendance positive ou négative. Ils étaient alors dans l'impossibilité de répondre par une valeur neutre : la valeur du milieu, et étaient contraints de prendre parti (faire un choix).
- L'enquête présentée a été actuellement menée auprès de 16 concepteurs en architecture. Elle n'a que la valeur d'une première étape. Elle n'est pas significative, l'échantillon étant trop restreint. Les principales difficultés rencontrées étant le temps relativement court dont nous disposions dans le cadre de notre travail et le manque de disponibilité des personnes enquêtées, il aurait fallu réduire le temps que chaque individu consacre à l'enquête menée. Nous pensons qu'il aurait été plus judicieux de présenter l'outil à partir d'une vidéo (Cf. Green Building Studio, Ecotect,...) dans laquelle nous présenterions à la fois l'intérêt et les principes de l'outil ainsi qu'une navigation dans le prototype *MaTerre'iO*. Suite à cette présentation, les personnes répondraient au questionnaire mis en place. La vidéo serait un gain de temps (pas de documents à lire, documents qui peuvent être longs). L'inconvénient se situerait au niveau de la manipulation du prototype. Nous pensons que dans le cas d'une présentation par vidéo, les personnes ne navigueront pas dans l'outil pour le tester.
- Il serait intéressant de comparer les réponses données par les concepteurs en architecture n'utilisant pas d'outils d'aide au projet avec les résultats obtenus auprès de concepteurs utilisant des outils. Nous pourrions ainsi cerner à la fois si nos propositions sont intéressantes pour des personnes ayant l'habitude de travailler avec des logiciels d'aide à la conception, tout en vérifiant que nous répondons aux attentes de l'ensemble des acteurs de la conception.
- Enfin, *MaTerre'iO* étant une maquette d'outil, il n'est pas possible de le tester en y intégrant un projet propre à chacun. Il est envisageable que les enquêtés auraient été plus enthousiastes, impliqués et concernés à l'idée d'analyser un projet sur lequel ils auraient travaillé. Ceci étant, il nous est impossible de présenter aujourd'hui un outil test car nous n'en avons pas les capacités notamment informatiques pour sa réalisation. Il faudrait que ce dernier soit développé par un informaticien une fois le cahier des charges établi de manière précise.

Conclusion de la partie 3

Au fur et à mesure que le projet architectural se conçoit, il devient de plus en plus difficile et onéreux de le modifier. Comme présenté précédemment, il est logique de proposer des aides dès la phase esquisse, le principal intérêt étant d'éviter des erreurs de conception pouvant compromettre la qualité future du bâtiment.

Le projet architectural est transformé de nombreuses fois en phase amont (seuls certains choix de conception seront arrêtés à l'issue de cette étape). Il est donc inutile et inintéressant de proposer des outils de calcul de performances ou d'évaluation complexe à ce stade du projet. Les données nécessaires à leur fonctionnement sont trop pointues et précises. Nous nous sommes donc interrogés sur les données relatives aux matériaux dont disposent les concepteurs en architecture afin de proposer des innovations améliorant l'aspect fonctionnel des outils d'aide à la conception. L'objectif principal de ces innovations est d'être en adéquation avec les modes de raisonnement et les pratiques professionnelles des concepteurs en architecture (chapitre 7).

A travers nos travaux de simplification de connaissances spécialisées sur l'ingénierie environnementale des matériaux, nous avons cerné le manque de certaines données notamment sanitaires, ainsi que la difficulté à comprendre et appréhender les limites des diverses méthodes d'analyse des indices (chapitre 8).

Le développement de l'interface graphique *MaTerre'iO*, malgré le fait d'être un outil statique, nous a permis d'illustrer nos propos, de cerner les limites de nos propositions et de pouvoir confronter nos travaux avec les attentes et avis de 16 concepteurs en architecture (chapitre 9 et 10).

11. CONCLUSION GENERALE

11.1. Résumé et conclusion

Notre travail s'inscrit dans une démarche d'enrichissement et d'amélioration des connaissances d'ingénierie environnementale liée au choix des matériaux dans le processus de conception architectural. Nous cherchons à établir un lien, une interface entre le domaine de l'architecture et celui de l'ingénierie à travers la mise en place d'instruments récents : les outils d'aide à la conception.

La première partie de ce document précise notre problématique et nos hypothèses de travail en s'appuyant sur :

- un état de l'art nous permettant de classer et d'organiser les diverses connaissances et savoirs relatifs aux matériaux,
- la compréhension du processus de projet et plus particulièrement du processus conception architecturale,
- l'analyse d'interfaces d'outils existants.

Nous émettons différentes pistes pour le développement de futurs outils d'aide à la conception ayant comme objectif principal d'aider le concepteur en architecture dans les phases amont du processus en traduisant des savoirs complexes en connaissances simplifiées.

La deuxième partie de notre manuscrit analyse au travers d'une enquête, les pratiques des concepteurs en architecture concernant les questions relatives au choix des matériaux et le rôle des outils d'aide au projet dans la prise de décision. L'objectif est d'évaluer le caractère opérationnel de ces outils afin d'appuyer nos pistes de réflexions et de dégager des propositions pour de futurs outils d'aide à la conception.

La troisième partie de ce document présente l'apport de nos recherches à travers :

- la mise en place de propositions pour de futurs outils d'aide à la conception,
- la transposition dans le domaine de l'architecture des connaissances d'ingénierie environnementale,
- l'illustration de nos recherches à travers le prototype *MaTerre'iO* qui est mis à l'épreuve des concepteurs dans le cadre de l'enquête n°2.

11.2. Contribution de notre travail dans les domaines de l'ingénierie et de l'architecture

Principales retombées du projet de recherche

Notre recherche vise à alimenter par la mise au jour de savoirs et de méthodes innovantes, les pratiques opérationnelles en architecture. Nous insistons sur l'évolution importante que constitue la mise au jour d'outils d'aide à la conception qui informent globalement sur différents champs d'études explicités et relatifs à la qualité environnementale des matériaux.

Le caractère didactique de *MaTerre'iO* et de futurs outils d'aide à la conception est essentiel afin d'être accessible aux multiples acteurs des projets architecturaux. Ils sont susceptibles d'aider les concepteurs en architecture dès les premières phases de conception de bâtiments, en permettant la comparaison simple et rapide de différentes solutions architecturales. Ils permettent d'allier les qualités des professions de conception et d'ingénierie en proposant des solutions réellement intéressantes à la fois d'un point de vue technique mais également esthétique (Guillaud et al., 2007).

Les résultats en lien avec les approches et méthodes d'aide à la conception participent à faire évoluer le regard critique des spécialistes de l'Environnement sur l'intérêt de ces approches et méthodes. De la sorte, la principale retombée de notre travail est de contribuer à édifier une passerelle innovante entre les disciplines de l'ingénierie environnementale et les attentes de la conception architecturale. Nous imaginons ainsi faciliter la montée en puissance des échanges d'informations et, tout particulièrement, l'emprunt par les concepteurs, d'outils de plus en plus adaptés à leurs besoins (outils simples et rapides, destinés à des non-spécialistes de l'environnement, permettant de dégager un regard global du projet...).

Nous imaginons par ailleurs que notre démarche est susceptible de rendre plus efficace les ingénieurs impliqués dans la qualité globale des projets architecturaux.

Enfin, en amont des pratiques opérationnelles de l'architecture, notre contribution constitue une réflexion rare et factuelle sur le développement de logiciels d'architecture et d'ingénierie. Elle vise, également, des retombées pour l'enseignement. Les savoirs acquis et retranscrits dans le prototype *MaTerre'iO* ont pour objectif d'être transmissibles.

Limites de notre travail

L'élaboration de l'interface graphique *MaTerre'iO* constitue la principale illustration de notre travail. Nous comprenons toutefois que cet outil dans sa version actuelle est grandement perfectible. *MaTerre'iO* est statique et propose une interface ne permettant pas d'intégrer de nouveaux projets architecturaux. Il se limite à l'étude environnementale du bâtiment concerné (les autres critères n'ayant pas été approfondis).

La grille d'analyse multicritères proposée se veut la plus globale possible. Nous avons proposé la structure qui nous semble la plus juste et la plus complète au vu de notre état de l'art. Elle reste toutefois critiquable. Nous ne sommes pas à l'abri d'oublis ou de modifications d'indicateurs et indices entre les différents critères retenus en particulier lorsque nous étudierons les 5 critères restants. Nous avons également eu des difficultés à passer de résultats chiffrés à des tendances réalistes.

11.3. Perspectives et prolongements envisagés

Les conclusions du présent document ont pour vocation d'éclairer plusieurs perspectives complémentaires à ce travail de recherche.

La connaissance de l'ensemble des critères relatifs aux connaissances et savoirs des matériaux et procédés de mise en œuvre constructifs contribue à l'amélioration des prises de décision lorsque nous nous intéressons à l'enveloppe, la peau du bâtiment en apportant une aide ponctuelle au concepteur en architecture. Les résultats de notre travail présentent diverses propositions pour un futur outil d'aide à la conception traduisant en connaissances simplifiées, des savoirs complexes relatifs au choix des matériaux.

De nombreux approfondissements et prolongements sont envisageables dans notre travail qui ne constitue qu'une modeste contribution face à l'envergure de ce projet.

Tout d'abord, il est nécessaire d'approfondir les 5 autres critères composant la grille d'analyse multicritères mise en place dans notre travail : matérialité, coût, usage, technicité et réglementations / normes. Les différents domaines d'études de ces critères

étant transdisciplinaires²¹, il sera nécessaire de porter une réflexion concernant la manière de les aborder et de traduire les différents savoirs en connaissances simples.

Deuxièmement, il est important de tester *MaTerre'iO* à travers l'étude de plusieurs cas réels afin de valider les bornes mises en place pour le passage de résultats chiffrés à des tendances. Pour cela, il est nécessaire d'analyser à la fois des projets référencés comme intégrant une démarche environnementale et des projets n'intégrant pas cette approche. Nous pourrions ainsi évaluer si notre outil valorise correctement les projets respectueux de l'environnement.

Troisièmement, il serait intéressant de valider notre prototype auprès d'un échantillon significatif de concepteurs. Nous pourrions ainsi avoir un réel retour sur les propositions faites en terme de futurs outils d'aide à la conception renseignant de manière globale sur les matériaux dans le projet architectural.

Quatrièmement, une fois *MaTerre'iO* validé et approfondi de manière détaillée, il sera nécessaire de le développer afin de le rendre fonctionnel pour l'ensemble des acteurs du processus de conception.

Enfin, il est nécessaire d'améliorer la base de données matériaux en y intégrant les données sanitaires auxquelles nous avons accès ainsi que des images et projets référents pouvant être une aide pour les futurs utilisateurs. Il est également important de réactualiser régulièrement la base en intégrant les nouveaux matériaux présents sur le marché ainsi que toutes données nouvelles.

Nous savons que les démarches environnementales peuvent paraître dérisoires pour les concepteurs en architecture. Ces derniers, tout en comprenant l'intérêt et l'importance de ce domaine d'étude, ont des difficultés à le prendre en compte dans leur projet architectural. Certains indices leur semblent anodins (exemple : le bilan carbone). Nous pensons que ce désintérêt vient de la complexité des savoirs et du manque de relation existant entre l'architecture et l'ingénierie environnementale.

Nous avons tenté dans ce travail de rattacher au domaine de l'architecture, les connaissances d'ingénierie environnementale en proposant des solutions simples pour la compréhension de savoirs techniques parfois complexes, et de contribuer de la sorte à l'émergence de la recherche appliquée à l'architecture.

²¹ Transdisciplinaire : se dit d'un modèle ou d'une activité qui dépasse l'usage d'une seule discipline et possède un champ de validité plus large, recouvrant plusieurs disciplines. (Lexique de terme relié à l'approche systémique)

LISTE DES REFERENCES CITEES DANS LA PARTIE 1

ADOLPHE Luc, 1991, *L'aide à la décision technique dans la conception architecturale : application à l'énergétique du bâtiment*, Thèse de doctorat en énergétique de l'Ecole des Mines de Paris.

ASENSIO Nacho rédacteur, 2005, *Architecture bois*, Edition L'Inédite, Paris, 288 pages.

BATHIAS Claude et BAÏLON Jean-Paul, 1980, *La fatigue des matériaux et des structures*, Collection Université de Compiègne, Edition les Presses de l'Université de Montréal, Maloine S.A. Editeur, Paris, 547 pages.

BERTHIER Nicole, 2000, *Les techniques d'enquêtes. Méthode et exercices corrigés*, Edition Armand Colin, Paris, 254 pages.

BLANCHET Alain et GOTMAN Anne, 2001, *L'enquête et ses méthodes : l'entretien*, Edition Nathan, Tours, 127 pages.

BONNEAUD Frédéric, PAULE Bernard et ADOLPHE Luc, 2004 May 12 - 14, *Efficiencie des outils d'aide à la conception, proposition d'une grille d'analyse multicritères*, EURAU'04, European symposium on research in architecture and urban planning, Marseille, France.

BORNAREL Alain, 2003, *Qualité environnementale des bâtiments – manuel à l'usage de la maîtrise d'ouvrage et des acteurs du bâtiment*, Ademe editions, Angers, 294 pages.

CHELA F., HUSAUNNDEE A., INARD C., RIEDERER P., 2009, *A new methodology for the design of low energy buildings*, Energy and Building (41), pp. 982-990.

CHUPIN Jean-Pierre, 2002, « *La Mariée mise à nu...* », à propos de l'enseignabilité des modèles de la conception, in *Cognition et création*, Edition Mardaga, Belgique, pp. 65-95.

CORDIER Jean-Pierre, à paraître, *Architecture économique architecture durable*.

COUASNET Yves, 2005, *Mémento, Propriétés et caractéristiques des matériaux de construction*, Editions le Moniteur, Paris, 248 pages.

COURGEY Samuel et OLIVA Jean-Pierre, 2006, *La conception bioclimatique, des maisons confortables et économes en neuf et en réhabilitation*, Edition Terre vivante, Mens, 239 pages.

CRISTO/PACTE et UWE, 2006, *Expertises, compétences et gestion de projets de constructions durables*, Rapport de recherche Plan Urbanisme Construction et Architecture, version non finalisée.

DEOUX Pierre et DEOUX Suzanne, 2004, *Le guide de l'habitat sain, les effets sur la santé de chaque élément du bâtiment, l'implantation, les matériaux, l'isolation, la ventilation, le chauffage, la décoration*, Medieco editions, Andorre, 2004 (première édition 2002), 407 pages.

DEPECKER Patrick, 1985, *Constitution et modes de transfert d'un savoir scientifique dans le champ de l'architecture. Le cas de la thermique*, Thèse de doctorat en Sciences pour l'Ingénieur, INSA de Lyon, 402 pages.

EVRARD Arnaud, 2003, *Bétons de chanvre, synthèse des propriétés physiques*.

FERNANDEZ Laure, BONNEAUD Frédéric et LORENTE Sylvie, *Environmental quality of materials : software tools of pertaining to architectural quality*, 25th Conférence on Passive and Low Energy Architecture, Dublin, 22nd - 24 th October 2008, paper 590.

FERNANDEZ Pierre, 2002, *Approches méthodologiques et modes opératoires dans le processus de conception architecturale*, in *Cognition et création*, Edition Mardaga, Belgique, pp. 97-117.

FERNANDEZ Pierre, 2007, *De l'architecture bioclimatique au développement urbain durable*, Habilitation à Diriger des Recherches, Institut National Polytechnique de Toulouse, 86 pages.

FLOISSAC Luc, 2009, *Bilans environnementaux de bâtiments*, Editions Weka, 19 pages, transmis par l'auteur.

GAUZIN-MÜLLER Dominique, 2001, *L'architecture écologique, 29 exemples européens, enjeux et perspectives, urbanisme et développement durable, architecture et qualité environnementale, démarche HQE*, Edition Le Moniteur, Paris, 287 pages.

GAUZIN-MÜLLER Dominique, 2006, *25 maisons écologiques*, Edition Le Moniteur, Paris, 159 pages.

GAUZIN-MÜLLER Dominique, 2006, *25 maisons écologiques*, Edition Le Moniteur, Paris, 160 pages.

GAUZIN-MÜLLER Dominique, 2009, *L'architecture écologique du Vorarlberg un modèle social, économique et culturel*, Edition le Moniteur, France, 405 pages.

GRUBER Astrid et GRUBER Herbert, 2003, *Construire en paille aujourd'hui*, Edition Terre vivante, Mens, 128 pages.

GUILLAUD Hubert, de CHAZELLES Claire-Anne et KLEIN Alain sous la direction de, 2007, *Les construction en terre massive, pisé et bauge : échanges transdisciplinaires sur les constructions en terre crue*, Editions de l'Espérou, Montpellier, 328 pages.

HEGGER Manfred, AUCH-SCHWELK Volker, FUCHS Matthias et ROSENKRANZ Thorsten, 2009, *Construire – Atlas des matériaux*, Titre original Construction Materials

Manual, Editions Presses polytechniques et universitaires romandes, Traduction française d'une publication de Edition detail, Lausanne, Suisse, 280 pages.

HOUBEN Hugo et GUILLAUD Hubert, 2006, *Traité de construction en Terre*, 3^{ème} édition, Edition Parenthèses, Paris, 355 pages.

INIES Comité technique de la base, 2005, *Mieux comprendre la partie environnemental des déclarations environnementales et sanitaires des produits de construction selon la norme NF P 01-010*, Paris, version 1, 6 pages.

JAFFAL I., INARD C. GHIAUS C., 2009, *Fast method to predict building heating demand based on the design of experiments*, Energy and Building (41), pp. 669-677.

KULA Daniel, TERNAUX Elodie et HIRSINGER Quentin, 2009, *Matériology. L'essentiel sur les matériaux et les technologies à l'usage des créateurs*, Editions Birkhäuser Frame, Bâle, 336 pages.

KUR Friedrich, 1998, *L'habitat écologique. Quels matériaux choisir ?*; Titre original Bauen und Wohnen mit Naturbaustoffen, Edition Terre vivante, Mens, 192 pages.

LEGRAND Christian et CHENE Françoise, 2003, *Développement durable et haute qualité environnementale*, Dossier d'experts techniques, Editions Techni.Cités, Voiron, 199 pages.

MEQUIGNON Marc, 2010, *Comment la prise en comptes de la durée de vie du bâtiment modifie-t-elle le choix des solutions technique en vue de l'optimisation du développement durable ?*, Thèse de doctorat en cours, LMDC-INSA et LRA-ENSA, Université de Toulouse.

OLIVA Jean-Pierre, BESSE-PLATIERE Antoine et AUBERT Claude, 2002, *Maisons écologiques d'aujourd'hui*, Editions Terre vivante, Mens, 155 pages.

PEUPORTIER Bruno, 2003, *Eco-conception des bâtiments. Bâtir en préservant l'environnement*, Thèse de doctorat, Les Presses de l'Ecole des Mines, Paris, 276 pages.

PROST Robert, 1992, *Conception architecturale, une investigation méthodologique*, Editions l'Harmattan, Paris, 190 pages.

RIEJA OJEDA Oscar et PASNIK Mark, 2008, *Elements in architecture materialien matériaux materialen*, Edition EverGreen, 192 pages.

RUTMAN E., INARD C., BAILLY A., ALLAND F., 2005, *A global approach of indoor environment in an air-conditioned office room*, Building and Environment (40), pp. 29-37.

ROY Bernard, 1985, *Méthodologie Multicritère d'Aide à la Décision*, Edition Economica, Paris, 423 pages.

SCHÄRLIG Alain, 1999, *Décider sur plusieurs critères – Panorama de l'aide à la décision multicritère*, Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, 304 pages.

TORNAY Nathalie, 2010, *Procédures cognitives propres aux choix de matériaux lors de l'élaboration du projet architectural, urbain et paysager*, Thèse de doctorat en cours, LMDC-INSA et LRA-ENSA, Université de Toulouse.

VINCKE Philippe, 1989, *L'aide multicritère à la décision*, Editions Ellipses, 179 pages.

WESTON Richard, 2003, *Formes et matériaux pour l'architecture*, Traduit de l'anglais par Pierre Saint-Jean, Titre original : *Materials, Form and Architecture*, Edition du Seuil, Paris, 223 pages.

WINES James, 2000, *L'architecture verte*, Editions Taschen, Chine, 240 pages.

(ELODIE) www.elodie-cstb.fr

(COCON, a)

<http://www.citemaison.fr/COCON-comparaison-solutions-constructives-confort.html>

(COCON, b) <http://www.eosphere.fr/COCON-logiciel-de-COMparaison-de.html>

(EQUER) <http://www-czp.ensmp.fr/francais/logiciel/cycle/html/15log.html>

(ECOTECT) <http://usa.autodesk.com/>

BIBLIOGRAPHIE GENERALE

ADOLPHE Luc, 1991, *L'aide à la décision technique dans la conception architecturale : application à l'énergétique du bâtiment*, Thèse de doctorat en énergétique de l'Ecole des Mines de Paris.

ADOLPHE Luc, 1995, *L'intégration des connaissances techniques dans le processus de conception architecturale et urbaine*, Habilitation à diriger des recherches, Université Paul Sabatier, Toulouse, résumé transmis par l'auteur.

ADOLPHE Luc sous la direction de, 1998, *Ambiances architecturales et urbaines*, Les cahiers de la recherche architecturale n°42/43, Editions Parenthèses, France, 251 pages.

ADOLPHE Luc et MAIZIA Mindjid, 2002, *SAGACités. 2002, Vers un Système d'Aide à la Gestion des Ambiances urbaines*. Rapport final, GRECO / Ecoles d'Architecture de Toulouse et de Bordeaux.

AFNOR, Décembre 2004, *Norme NF P 01-020, Qualité environnementale des produits de construction – déclaration environnementale et sanitaire des produits de construction*.

ALBELES Marc, 1993, *Le défi écologique*, Edition l'Harmattan, Paris, 188 pages.

ASENSIO Nacho rédacteur, 2005, *Architecture bois*, Edition L'Inédite, Paris, 288 pages.

ARAUZO ZAMBRANO Leticia Maria, 2008, *Intégration des principes de la durabilité au projet d'architecture : réflexions et propositions dans le contexte du Brésil*, Thèse de doctorat de l'Université Fédérale de Rio de Janeiro, Résumé en français, 62 pages.

BAÏLON Jean-Paul et DORLOT Jean-Marie, 2000, *Des matériaux*, Presses internationales polytechniques, Canada, 736 pages avec CD-ROOM.

BATHIAS Claude et BAÏLON Jean-Paul, 1980, *La fatigue des matériaux et des structures*, Collection Université de Compiègne, Edition les Presses de l'Université de Montréal, Maloine S.A. Editeur, Paris, 547 pages.

BEAUD Stéphane et WEBER Florence, 1998, *Guide de l'enquête de terrain*, Edition La Découverte, Paris, 327 pages.

BEAUD Michel, 2002, *L'art de la thèse*, Editions La Découverte, Paris, 175 pages.

BEN MENA Sami, 2000, *Introduction aux méthodes multicritère d'aide à la décision*, Biotechnol. Agron. Soc. Environ.

<http://www.bib.fsagx.ac.be/library/base/text/v4n2/83.pdf>

BERNAGOZZI Anna, Octobre – Novembre 2001, *Designers au pays des merveilles*, in *Intramuros* n° 97, pp. 71 à 84.

BERNAGOZZI Anna, Octobre – Novembre 2003, *Matériaux, catalyseurs de créativité*, in *Intramuros* n°109, pp. 46 à 53.

BERTHIER Nicole, 2000, *Les techniques d'enquête – Méthode et exercices corrigés*, Editions Armand Colin, Paris, 254 pages.

BIAU Véronique et FREY Jean-Pierre, 2003, *Les pratiques de communication et de documentation des architectes*, in *Recherche sur le projet et les concepteurs*, Actes du séminaire Euro-conception, Paris.

BLANCHET Alain et GOTMAN Anne, 2001, *L'enquête et ses méthodes : l'entretien*, Edition Nathan, Tours, 127 pages.

BONNEAUD Frédéric, 2004, *Ventilation naturelle de l'habitat dans les villes tropicales – contribution à l'élaboration d'outils d'aide à la conception*, Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique de l'Université de Nantes, 261 pages.

BONNEAUD Frédéric, PAULE Bernard et ADOLPHE Luc, 2004 May 12-14, *Efficiencce des outils d'aide à la conception, proposition d'une grille d'analyse multicritères*, EURAU'04, European symposium on research in architecture and urban planning, Marseille, France.

BORILLO Mario et GOULETTE Jean-Pierre, 2002, *Cognition et Création – Exploration cognitives des processus de conception*, Edition Mardaga, Belgique, 399 pages.

BORILLO Mario et GOULETTE Jean-Pierre, 2002, *Langage et cognition spatiale dans le processus de conception architecturale*, in *Cognition et Création*, Edition Mardaga, Belgique, pp. 287-305.

BORNAREL Alain, 2003, *Qualité environnementale des bâtiments – manuel à l'usage de la maîtrise d'ouvrage et des acteurs du bâtiment*, Ademe Editions, Angers, 294 pages.

BOUDON Philippe et POUSIN Frédéric, 1988, *Figures de la conception architecturale – Manuel de figuration graphique*, Editions Dunod, Paris, 111 pages.

BOUDON Philippe, DESHAYES Philippe, POUSIN Frédéric et SCHATZ Françoise, 2000, *Enseigner la conception architecturale, cours d'architecturologie*, Edition revue et corrigée, Editions de la Villette, 319 pages.

BOUDON Philippe, 2004, *Conception*, Editions de la Villette, Paris, 97 pages.

BOUDON Raymond, 1969, *Les méthodes en sociologie*, Editions Presses Universitaires de France, Vendôme, 126 pages.

BOURGUET Virginie, décembre 2008, *Les matériaux de finition s'impliquent dans la qualité de l'air intérieur*, *Le moniteur des Travaux Publics et du Bâtiment – Architecture et Techniques*, 3 pages.

BREVIGLIERI PEREIRA de CASTRO Eduardo, 2005, *Méthode d'aide à la conception architecturale basée sur l'analyse multicritère et sur des données simulées des*

comportements des bâtiments, résumé thèse de doctorat, Lyon, 86 pages, http://docinsa.insa-lyon.fr/these/2005/breviglieri_pereira_de_castro/these_resume.pdf

CAMUS Christophe et DURAND Béatrice, avril-mai 2009, *L'affranchi du copyright – entretien avec Richard M. Stallman*, in *Ecologik* n°8, pp 33-34.

Centre d'Etudes Foréziennes et Ecole d'Architecture de Saint-Etienne, 2001, *L'architecture, les sciences et la culture de l'histoire au XIX^e siècle*, Publications de l'Université de Saint-Etienne, Saint-Etienne, 262 pages.

CHATELET Alain, FERNANDEZ Pierre et ANDLAUER Pierre, 2006, *La qualité environnementale dans la construction – terre de cohérence – Guide*, Editions Parc Régional du Haut Jura, France, 78 pages.

CHATELET Alain, LAVIGNE Pierre et FERNANDEZ Pierre, 1998, *Architecture climatique : une contribution au développement durable. Concepts et dispositifs*, Tome 2, Edition Edisud, Aix-en-Provence, 159 pages.

CHELA F., HUSAUNDEE A., INARD C., RIEDERER P., 2009, *A new methodology for the design of low energy buildings*, *Energy and Building* (41), pp. 982-990.

CHEMILLIER Pierre, 1977, *Les techniques du bâtiment et leur avenir*, Editions du Moniteur, France, Paris, 428 pages.

CHIMITS Catherine et TAPIE Guy, 2003, *Dynamiques professionnelles et évolution des métiers : la production d'équipements publics en France et en Espagne*, in *Recherche sur le projet et les concepteurs*, Actes du séminaire Euro-conception, Paris.

CHUPIN Jean-Pierre, 2002, « *La Mariée mise à nu...* », à propos de l'enseignabilité des modèles de la conception, in *Cognition et Création*, Edition Mardaga, Belgique, pp. 65-95

CORDIER Jean-Pierre, à paraître, *Architecture économique architecture durable*.

CORRADO Maurizio, 1999, *Architecture bio-écologique, nouvelles tendances pour la maison du bien-être*, Editions De Vecchi, Italie, 249 pages.

CORRADO Maurizio, 2004, *La maison écologique toutes les règles pour vivre dans un environnement sain, les champs électriques, les réseaux géomagnétiques, l'orientation, les matériaux non pollués, le bien-être acoustique, la qualité de l'air, le feng-shui, etc.*, Editions de Vecchi, Paris, 215 pages.

COUASNET Yves, 2005, *Mémento, Propriétés et caractéristiques des matériaux de construction*, Editions le Moniteur, Paris, 248 pages.

COURDURIER Elisabeth et TAPIE Guy, 2003, *Les professions de la maîtrise d'œuvre*, Edition La documentation française, Paris, 303 pages.

COURGEY Samuel et OLIVA Jean-Pierre, 2006, *La conception bioclimatique, des maisons confortables et économes en neuf et en réhabilitation*, Edition Terre vivante, Mens, 239 pages.

COUTROT Dominique, 1997, *Le bois et ses industries*, Que sais-je ?, Presses Universitaires de France, Paris, 127 pages.

CRISTO/PACTE et UWE, Mai 2006, « *Expertises, compétences et gestion de projets de constructions durables* », Rapport de recherche Plan Urbanisme Construction et Architecture, version non finalisée, 267 pages.

CROCI Daniel, 1999, *Regards sur une architecture environnemental, Habiter autrement*, in Les Cahiers de Cantercel, Editions De Vecchi, Italie, 249 pages.

CSTB Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, 2003, *Rapport d'essai n° SB-03-056 concernant le comportement d'un matériau isolant face à une contamination fongique*, CSTB Editions, France, 6 pages

CSTB Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, juillet 2003, *Caractéristiques environnementales et sanitaires des produits de construction. Procédure d'examen d'un dossier CESAT – documents à fournir par l'industriel demandeur*, Version 2, 15 pages.

COSTA DURAN Sergi et SANTOS QUARTINO Daniel, 2007, *Architecture Terre = Earth / Terra*, Edition l'Inédite, Paris, 287 pages.

DEHEUVELS Paul, 1990, *La recherche scientifique*, Que sais-je ?, Presses Universitaires de France, Paris, 123 pages.

DEOUX Pierre et DEOUX Suzanne, 1993, *L'écologie c'est la santé : l'impact des nuisances de l'environnement sur la santé – Connaître pour agir au quotidien*, Editions Frison-Roche, Condé-sur-Noireau, 539 pages.

DEOUX Pierre et DEOUX Suzanne, 2004, *Le guide de l'habitat sain, les effets sur la santé de chaque élément du bâtiment, l'implantation, les matériaux, l'isolation, la ventilation, le chauffage, la décoration*, Medieco Editions, Andorre, (première édition 2002), 407 pages.

DEPECKER P., BRAU J. et ROUSSEAU S., 1982, *Influence de la nature des matériaux sur le besoin en chauffage et la qualité des ambiances thermiques*, Tome 1, Rapport Conception de l'habitat et économies d'énergie, Contrat de recherche entre le Syndicat National des fabricants de ciments et chaux et le Laboratoire Equipement de l'habitat, Département Génie Civil et Urbanisme de l'INSA de Lyon, 123 pages.

DEPECKER Patrick, 1985, *Constitution et modes de transfert d'un savoir scientifique dans le champ de l'architecture – Le cas de la thermique*, Thèse de doctorat en Sciences pour l'Ingénieur, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, France, 411 pages.

DEPLAZES Andrea sous la direction de, 2008, *Construire l'architecture du matériau brut à l'édifice – un manuel*, Editions Birkäuser, Allemagne, 559 pages.

De SINGLY François, 1992, *L'enquête et ses méthodes : le questionnaire*, Edition Nathan, Paris, 127 pages.

DESOMBRE François, 2007, *J'attends une maison, pour un habitat écologique, sain, astucieux, économe, autonome...*, Editions de La Pierre Verte, France, 600 pages.

DESWARTE Sylvie et LEMOINE Bertrand, 1997, *L'architecture et les ingénieurs : deux siècles de réalisations*, Edition le Moniteur, Paris, 278 pages.

DOMMANGET Philippe, LOISEAU Olivier et MASEIRO Sylvain, 1998, *Le recyclage des matériaux*, Que sais-je ? Editions Presses Universitaires de France, Paris, 126 pages.

DULBECCO Pierre et LURO Didier, 1998, *L'essentiel sur le bois*, CTBA Centre Technique du Bois et de l'Ameublement, Paris, 184 pages.

DUNEAU Michel et JANOT Christian, 1996, *La magie des matériaux*, Editions Odile Jacob, Paris, 230 pages.

ESTEVEZ Daniel, 2001, *Dessin d'architecture et infographie, l'évolution contemporaine des pratiques graphiques*, CNRS Editions, Paris, 191 pages.

EVRARD Arnaud, 2003, *Bétons de chanvre, synthèse des propriétés physiques*.

FERNANDEZ John, 2006, *Material Architecture emergent materials for innovative buildings and ecological construction*, Architectural Press – Elsevier, Italy, 332 pages.

FERNANDEZ Laure, BONNEAUD Frédéric et LORENTE Sylvie, 2008, October 22 - 24 *Environmental quality of materials : software tools of pertaining to architectural quality*, 25th Conférence on Passive and Low Energy Architecture, Dublin, paper 590.

FERNANDEZ Laure, BONNEAUD Frédéric, LORENTE Sylvie, 2010 April 12 – 14, *A global tool for the architectural and environmental quality of materials integrated into the architectural design process*, Eco-architecture 2010, La Coruna, Spain, pp. 411 - 421.

FERNANDEZ Pierre, 1996, *Stratégie d'intégration de la composante énergétique dans la pédagogie du projet d'architecture*, Thèse de doctorat, Ecole des Mines de Paris.

FERNANDEZ Pierre, 2002, *Approches méthodologiques et modes opératoires dans le processus de conception architecturale*, in *Cognition et Création*, Edition Mardaga, Belgique, pp. 97-117.

FERNANDEZ Pierre, 2007, *De l'architecture bioclimatique au développement urbain durable*, Habilitation à Diriger des Recherches, Institut National Polytechnique de Toulouse, 86 pages.

FERNANDEZ Pierre et LAVIGNE Pierre, 2009, *Concevoir des bâtiments bioclimatiques – Fondements et méthodes*, Editions Le Moniteur, Paris, 430 pages.

FLOISSAC Luc, 2009 Juin, *Bilans environnementaux de bâtiments*, Editions Weka, 19 pages, transmis par l'auteur.

FOUIN Julien, 2000, *Maisons bio*, La Maison Rustique, Edition Flammarion, Paris, 127 pages.

FRECON Guy, 2006, *Formuler une problématique, dissertation, mémoire, thèse, rapport de stage*, Edition Dunod, Paris, 153 pages.

GAUZIN-MÜLLER Dominique, 1990, *Le bois dans la construction*, Edition Le Moniteur, Paris, 382 pages.

GAUZIN-MÜLLER Dominique, 1999, *Construire avec le bois*, Edition Le Moniteur, Paris, 326 pages.

GAUZIN-MÜLLER Dominique, 2001, *L'architecture écologique, 29 exemples européens, enjeux et perspectives, urbanisme et développement durable, architecture et qualité environnementale, démarche HQE*, Edition Le Moniteur, Paris, 287 pages.

GAUZIN-MÜLLER Dominique, 2005, *25 maisons de bois*, Edition Le Moniteur, Paris, 160 pages.

GAUZIN-MÜLLER Dominique, 2006, *25 maisons écologiques*, Edition Le Moniteur, Paris, 159 pages.

GAUZIN-MÜLLER Dominique, 2009, *Habiter écologique : quelles architecture pour une ville durable ?*, Edition Actes Sud, Paris, 400 pages.

GAUZIN-MÜLLER Dominique, 2009, *L'architecture écologique du Vorarlberg un modèle social, économique et culturel*, Edition le Moniteur, France, 405 pages.

GUILLAUD Hubert, de CHAZELLES Claire-Anne et KLEIN Alain sous la direction de, 2007, *Les construction en terre massive, pisé et bauge : échanges transdisciplinaires sur les constructions en terre crue*, Editions de l'Espérou, Montpellier, 328 pages.

GUILLAUD Hubert, 2007, *Evolution de la culture constructive et architecturale du pisé*, in *Les construction en terre massive, pisé et bauge : échanges transdisciplinaires sur les constructions en terre crue*, Editions de l'Espérou, Montpellier, pp.277 – 310.

GORDON Neil, 1994, *Structures et matériaux, l'explication mécanique des formes*, Edition pour la Science, 214 pages.

GRANGE Danielle et LEBART Ludovic, 1993, *Traitements statistiques des enquêtes*, Edition Dunod, Paris, 255 pages.

GRUBER Astrid et GRUBER Herbert, 2003, *Construire en paille aujourd'hui*, Edition Terre vivante, Mens, 128 pages.

HEGGER Manfred, DREXLER et ZEUMER, 2007, *Matérialité*, Editions Basics, 88 pages.

HEGGER Manfred, AUCH-SCHWELK Volker, FUCHS Matthias et ROSENKRANZ Thorsten, 2009, *Construire – Atlas des matériaux*, Titre original *Construction Materials Manual*, Editions Presses polytechniques et universitaires romandes, Traduction française d'une publication de Edition detail, Lausanne, Suisse, 280 pages.

HETZEL Jean, 2003, *Haute qualité environnementale du cadre bâti, enjeux et pratiques*, Edition AFNOR, Paris, 292 pages.

HOUBEN Hugo et GUILLAUD Hubert, 2006, *Traité de construction en Terre*, 3^{ème} édition, Edition Parenthèses, Paris, 355 pages.

HUOT Stéphane, 2005, *Une nouvelle approche pour la conception créative de l'interprétation du dessin à main levée au prototypage d'interactions standard*, Thèse de doctorat de l'Université de Nantes, Ecole Supérieure des Techniques Industrielles et des Mines de Nantes.

HUYGEN Jean-Marc, 2008, *La poubelle et l'architecte : vers le réemploi des matériaux*, Editions Actes Sud, Arles, 2008, 183 pages.

INARD C., DEPECKER P, ROUX J.J., 1997, *Un modèle simplifié pour la prédiction de champ de température dans les bâtiments*, Revue Générale de Thermique (36), pp. 113-123.

INIES Comité technique de la base, 2005, *Mieux comprendre la partie environnementale des déclarations environnementales et sanitaires des produits de construction selon la norme NF P 01-010*, Paris, version 1, 6 pages.

IZARD Jean-Louis, 1993, *Architectures d'été. Construire pour le confort d'été*, Editions Edisud, Aix-en-Provence, 141 pages.

JAFFAL I., INARD C. GHIAUS C., 2009, *Fast method to predict building heating demand based on the design of experiments*, Energy and Building (41), pp. 669-677.

KALTENBACH Franck, 2004, *Translucent materials: glass, plastic, metals*, Edition Birkhäuser, Bâle, 110 pages.

KUMA Kenzo, 2004, *Materials, structures, details*, Edition Birkhäuser, Bâle, 136 pages.

KULA Daniel, TERNAUX Elodie et HIRSINGER Quentin, 2009, *Matériology. L'essentiel sur les matériaux et les technologies à l'usage des créateurs*, Editions Birkhäuser Frame, Bâle, 336 pages.

KUR Friedrich, 1998, *L'habitat écologique. Quels matériaux choisir ?*; Titre original Bauen und Wohnen mit Naturbaustoffen, Edition Terre vivante, Mens, 192 pages.

LASSANCE Guilherme, 1998, *Ambiances architecturales et urbaines. Les configurations référentielles un instrument conceptuel du projet d'ambiance*, in Les cahiers de la recherche architecturale 42/43, Editions Parenthèses, Paris, 251 pages.

LAVIGNE Pierre, BRETON Paul et FERNANDEZ Pierre, 1994, *Architecture climatique, une contribution au développement durable, Tome 1 : bases physiques*, Edisud, Aix-en-Provence, 192 pages.

LECUYER Philippe et VISSCHER Chantal, 2007, *Guide pratique de l'Eco-habitat*, Editions du Fraysse, France Quercy, 896 pages.

LEFEVRE Pierre, 2002, *Architectures durables, 35 études de cas en France et en Europe : Allemagne, Angleterre, Italie, Hollande*, Edisud, Aix-en-Provence, 96 pages.

LEGRAND Christian et CHENE Françoise, 2003, *Développement durable et haute qualité environnementale*, Dossier d'experts techniques, Editions Techni.Cités, Voiron, 199 pages.

LEROY Jean-Bernard, 1997, *Les déchets et leur traitement*, Que sais-je ? Editions Presses Universitaires de France, 3^{ème} édition corrigée, Vendôme, 126 pages.

MAES Pascale, 2000, *Bâtir avec l'environnement*, Actes du colloque : 9 mars 1999, Recherche n°111, Paris, 173 pages.

MANKIBI M. El, CRON F., MICHEL P., INARD C., 2006, *Prediction of hybrid ventilation performance using two simulation tools*, Solar Energy (80), pp. 908-926.

MARTEL Jean-Marc, 1999 June 7-9, *L'aide multicritère à la décision : méthodes et applications*, CORS-SCRO Annual Conference, Windsor, Ontario, http://www.cors.ca/bulletin/v33n1_1f.pdf

MAYER H. Jürgen et BHATIA Neeraj, 2010, - *arium Weather + Architecture*, A. Daniels Faculty Publications, Germany, 320 pages.

MAYSTRE Lucien Yves, PICTET Jacques et SIMOS Jean, 1994, *Méthodes multicritères Electre. Description, conseils pratiques et cas d'application à la gestion environnementale*, Editions Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne, 323 pages.

MAZRIA Edward, 1981, *Le guide de la maison solaire*, Titre original : The passive solar energy book, Editions Parenthèses, Marseille, 355 pages

McLEOD Virginai, 2010, *50 projets d'architecture en bois. Détails de construction*, Edition Eyrolles, Paris, 224 pages.

MIGUET Francis, 2000, *Paramètres physiques des ambiances architecturales : un modèle numérique pour la simulation de la lumière naturelle dans le projet urbain*, Thèse de Doctorat de l'Ecole Polytechnique de l'Université de Nantes, Ecole d'Architecture de Nantes, 360 pages.

MIMRAM Marc, 2000, *Matières du plaisir, rugosité, raideur, assemblage, lumière, durabilité, densité*, Edition Pavillon de l'Arsena, Paris, 125 pages.

MINKE Gernot et MAHLKE Friedeman, 2005, *Building with Straw – Design and Technology of a Sustainable Architecture*, Edition Birkhäuser, Basel, 143 pages.

MINKE Gernot, 2006, *Building with Earth – Design and Technology of a Sustainable Architecture*, Edition Birkhäuser, Basel, 199 pages.

MORA L. MENDONCA K.C., WURTZ E. et INARD C., 2003, *SimSPARK : an object oriented environment to predict coupled heat and mass transfert in buildings*, Building Simulation 2003 Conference, Eindhoven, pp. 903 – 910.

MOURIQUAND Jacques, 1994, *L'enquête*, Edition du centre de formation et de perfectionnement des journalistes, Paris, 119 pages.

NUGON-BAUDON Lionelle, avec la collaboration de LHOSTE Evelyne, 1999, *Maisons toxiques : eau, air, ameublement, plantes... connaître tous les risques qui nous entourent*, Edition Flammarion, 314 pages.

OÏKOS Association, 2002, *Les clés de la maison écologique*, Edition Terre vivante – l'écologie pratique, Mens, 157 pages.

ÖKOHÄUSER Kleine, 2007, *Petites maisons écologiques*, Titre original Small Eco-house, Editions Evergreen, Espagne, 189 pages.

OLIVA Jean-Pierre, 2001, *L'isolation écologique : conception, matériaux, mise en œuvre*, Edition Terre vivante, Paris, 237 pages.

OLIVA Jean-Pierre, BESSE-PLATIERE Antoine et AUBERT Claude, 2002, *Maisons écologiques d'aujourd'hui*, Editions Terre vivante, Mens, 155 pages.

PEARSON David, 1999, *Vivre au naturel, la maison écologique*, Edition Flammarion, Paris, 302 pages.

PEUPORTIER Bruno, 2003, *Eco-conception des bâtiments. Bâtir en préservant l'environnement*, Thèse de doctorat, Les Presses de l'Ecole des Mines, Paris, 276 pages.

POLSTER Bernd, 1995, *Contribution à l'étude de l'impact environnemental des bâtiments par analyse du cycle de vie*, Thèse de Doctorat de l'Ecole des Mines de Paris.

POTIE Philippe et SIMMONET Cyrille, 1992, *Culture constructive*, Les Cahiers de la Recherche Architecturale n°29, Editions Parenthèses, 138 pages.

PROST Robert, 1992, *Conception architecturale, une investigation méthodologique*, Editions l'Harmattan, Paris, 190 pages.

RAIMBAULT Manon, 2002, *Simulation des ambiances sonores urbaines : intégration des aspects qualitatifs*, Thèse de Doctorat de l'Université de Nantes, Ecole Polytechnique de l'Université de Nantes, 316 pages.

RAINIER Hoddé sous la direction de, 2006, *Qualités architecturales, conception, significations, position*, Edition Jean Michel Place, Paris, 213 pages.

RAYNAUD Dominique, 2002, *Cinq essais sur l'architecture, études sur la conception de projets de l'Atelier Zô, Scarpa, Le Corbusier, Pei*, Edition l'Harmattan, France, 240 pages.

RICHARDSON Phyllis, 2007, *XS Vert : grandes idées, petites structures*, Edition Thames et Hudson, Paris, 223 pages.

RICHARDSON Phyllis, 2009, *XS Extrême : grandes idées, petites structures*, Edition Thames et Hudson, Paris, 223 pages.

RIEJA OJEDA Oscar et PASNIK Mark, 2008, *Elements in architecture materialien matériaux materialen*, Edition EverGreen, 192 pages.

RIVA Jacques et FRENOT Michel, 1995, *Maîtrise d'ouvrage, bâtiment, loi MOP et décrets d'application*, Editions Eyrolles, Paris, 221 pages.

ROBITU Mirela, MUSY Marjory, INARD Christian et GROLEAU Dominique, 2006 *Modeling the influence of vegetation and water pond on urban microclimate*, Solar Energy 80, pp. 435 – 447.

ROCCA Alessandro, 2007, *Architecture naturelle*, Edition Actes Sud, Arles, 213 pages.

ROULET Claude-Alain, 2008, *Santé et qualité de l'environnement intérieur dans les bâtiments*, Edition Presses Polytechniques et Universitaires Romandes – Ingénierie de l'environnement, 2ème édition mise à jour et complétée, Espagne, 362 pages.

ROUYEYRAN Jean-Claude, 1994, *Mémoires et thèses, l'art et les méthodes, préparation, rédaction, présentation*, Edition Maisonneuve et Larose, 197 pages.

ROY Bernard, 1985, *Méthodologie multicritère d'aide à la décision*, Edition economica, Paris, 423 pages.

ROY Bernard et BOUYSSOU Denis, 1993, *Aide multicritère à la décision : méthodes et cas*, Editions Economica, 696 pages.

RUTMAN E., INARD C., BAILLY A., ALLAND F., 2005, *A global approach of indoor environment in an air-conditioned office room*, Building and Environment (40), pp. 29-37.

SALOMON Thierry et BEDEL Stéphane, 2003, *La maison des [néga]watts, le guide malin de l'énergie chez soi*, Edition Terre vivante, Mens, 155 pages.

SAUTEREAU Jacques sous la direction de, 1993, *Concevoir*, Les cahiers de la recherche architecturale n°34, Editions Parenthèses, France, 214 pages.

SAUVAGE André et CHEUKHROUHO Ali sous la direction de, 2002, *Conception d'architecture. Le projet à l'épreuve de l'enseignement*, Edition l'Harmattan, France, 271 pages.

SCHÄRLIG Alain, 1999, *Décider sur plusieurs critères – Panorama de l'aide à la décision multicritère*, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne, 304 pages.

SCHITTICH Christian, 2002, *Interior spaces : space, light, materials*, Edition Detail, München, 174 pages.

SIMOS Jean, 1990, *Evaluer l'impact sur l'environnement. Une approche originale par l'analyse multicritère et la négociation*, Edition Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Suisse, 261 pages.

TANGUAY François, 1988, *Petit manuel de l'habitat bio-climatique, vers un gîte écologique 2*, Editions de Mortagne, Québec, 223 pages.

TOUSSAINT Jean-Yves et YOUNES Chris sous la direction de, 1997, *Architecte, ingénieur, des métiers et des professions*, Actes du séminaire « Métiers de l'architecte et

métiers de l'ingénieur en génie civil et urbanisme », Editions de la Villette, Cahors, 245 pages.

TORNAY Nathalie, 2010, *Procédures cognitives propres aux choix de matériaux lors de l'élaboration du projet architectural, urbain et paysager*, Thèse de doctorat en cours, LMDC-INSA et LRA-ENSA, Université de Toulouse.

TRIC Olivier, 1999, *Conception et projet en architecture*, Edition l'Harmattan, France, 313 pages.

VAN RAEMDONCK Marie, 1997, *L'homme et sa santé en relation avec son environnement et son habitat dans l'approche du développement durable : incidence de la qualité de l'air intérieur de l'habitat sur la santé respiratoire des habitants*, Master européen en architecture et développement durable, travail de maîtrise de spécialisation, Ecole Polytechnique fédérale de Lausanne, 157 pages.

VELU Jacques, 2001, *Méthodes mathématiques pour l'informatique, cours et exercices corrigés*, 3^{ème} édition, Editions Dunod, Paris, 516 pages.

VENTERE Jean-Paul, 1995, *La qualité écologique des produits, des écobilans aux écolabels*, Edition AFNOR Sang de la Terre, Paris, 182 pages.

VIDAILLET Bénédicte, d'ESTAINOT Véronique et ABECASSIS Philippe, 2005, *La décision. Une approche pluridisciplinaire des processus de choix*, Editions de Boeck, Paris, 298 pages.

VINCENT-FOURRIER Monique, 2006, *Construire sain et naturel, le guide des matériaux écologiques*, Editions Ouest-France, Rennes, 254 pages.

VINCKE Philippe, 1992, *L'aide multicritère à la décision*, Editions Ellipses, 179 pages.

VISSCHER Chantal sous la coordination de, 2007, *Guide pratique de l'Eco-Habitat*, Editions du Fraysse, France, 895 pages.

WESTON Richard, 2003, *Formes et matériaux dans l'architecture*, Traduit de l'anglais par Pierre Saint-Jean, Titre original : *Materials, Form and Architecture*, Edition du Seuil, Paris, 223 pages.

WILHIDE Elisabeth, 2002, *Matériaux pour la maison, le bois, la pierre, le verre, le métal, la brique et le carrelage, le béton et le plâtre, les matériaux synthétiques, le cuir, le linoléum*, EPA – Hachette livre pour la présente édition, Chine, 191 pages.

WINES James, 2000, *L'architecture verte*, Editions Taschen, Chine, 240 pages.

WOGENSCKY André, 1972, *Architecture active*, Edition Casterman, Belgique, 258 pages.

WRIGHT David, 1979, *Soleil, nature, architecture*, Editions Parenthèses, 246 pages.

WURTZ E., MORA L., INARD C., 2006, *An equation-based simulation environment to investigate fast building simulation*, Building and Environment (41), pp1571-1583.

ZMIROU Denis, 2000, *Quels risques pour notre santé ?*, Editions Syros, Paris, 336 pages.

ANNEXES

Annexe 1 : Quelques propositions de grille mises en place tout au long de notre travail de recherche

PREMIERE CLASSIFICATION : stage de fin d'étude (avant démarrage thèse) Avril 2007

1. Matériaux et cycle de vie
 - 1.1 Fabrication du matériau
 - 1.2 Conception du bâtiment
 - 1.3 Chantier
 - 1.4 Vie du bâtiment : durée de vie, entretien et maintenance
 - 1.5 Fin de vie : déconstruction

2. Matériaux et santé

3. Matériaux et construction
 - 3.1 Enveloppe
 - 3.2 Système constructif

4. Matériaux et confort
 - 4.1 Confort thermique
 - 4.2 Confort acoustique
 - 4.3 Confort visuel

Principes et règles destinés à rendre la construction plus compatible avec le
développement durable

A Société

- Socioculturel
 - Lieu
 - ✓ réglementation et urbanisme
 - ✓ nature & paysage
 - ✓ choix du site
 - ✓ mobilité
 - Patrimoine bâti
 - ✓ intégration architecturale
 - ✓ esthétique
 - ✓ patrimoine culturel
- Communauté
 - Appropriation
 - ✓ sécurité
 - ✓ participation
 - ✓ auto construction
 - Gestion du chantier
 - ✓ condition de travail
 - ✓ sécurité au travail
- Qualité d'usage
 - Flexibilité
 - ✓ affectation
 - ✓ flexibilité des espaces
 - ✓ flexibilité des équipements
 - Equipement
 - ✓ niveau d'équipement
 - ✓ fonctionnement
 - ✓ gestion
 - Fonctionnalité
 - accès et aménagement
 - facilité d'entretien
 - sécurité au feu
- Confort
 - Confort thermique
 - ✓ confort hivernal
 - ✓ confort estival
 - Qualité de l'air
 - ✓ Ventilation
 - ✓ Polluants internes
 - Confort visuel
 - qualité lumière
 - niveaux d'éclairage
 - Confort acoustique
 - ✓ bruits extérieurs
 - ✓ bruits entre logements

- ✓ bruits des installations

B Economie

- Coûts directs
 - Investissement
 - ✓ modes d'investissement
 - ✓ terrain
 - ✓ construction
 - ✓ équipement
 - ✓ financement
 - Coûts d'exploitation
 - ✓ coûts des consommations
 - ✓ transport
 - Maintenance
 - ✓ entretien bâtiment
 - ✓ entretien installation
 - ✓ rénovation
- Coûts indirects
 - Infrastructures
 - ✓ accès
 - ✓ énergie
 - ✓ réseaux d'eau
 - ✓ gestion des déchets
 - Coûts sociaux
 - ✓ pollution
 - ✓ santé
 - ✓ insécurité
- Efficacité
 - Eco-efficacité
 - ✓ ressources
 - ✓ infrastructures et équipements
 - Participation
 - ✓ participation des entreprises
 - ✓ participation des usagers
- Développement régional
 - Impact sur l'emploi
 - ✓ travail induit
 - ✓ innovation

C Environnement

- Ressources
 - Sol
 - ✓ emprise au sol
 - ✓ urbanisme
 - ✓ espaces verts
 - Matériaux
 - ✓ cycle de vie
 - ✓ choix des matériaux
 - ✓ matériaux locaux
 - Eaux
 - ✓ gestion de l'eau

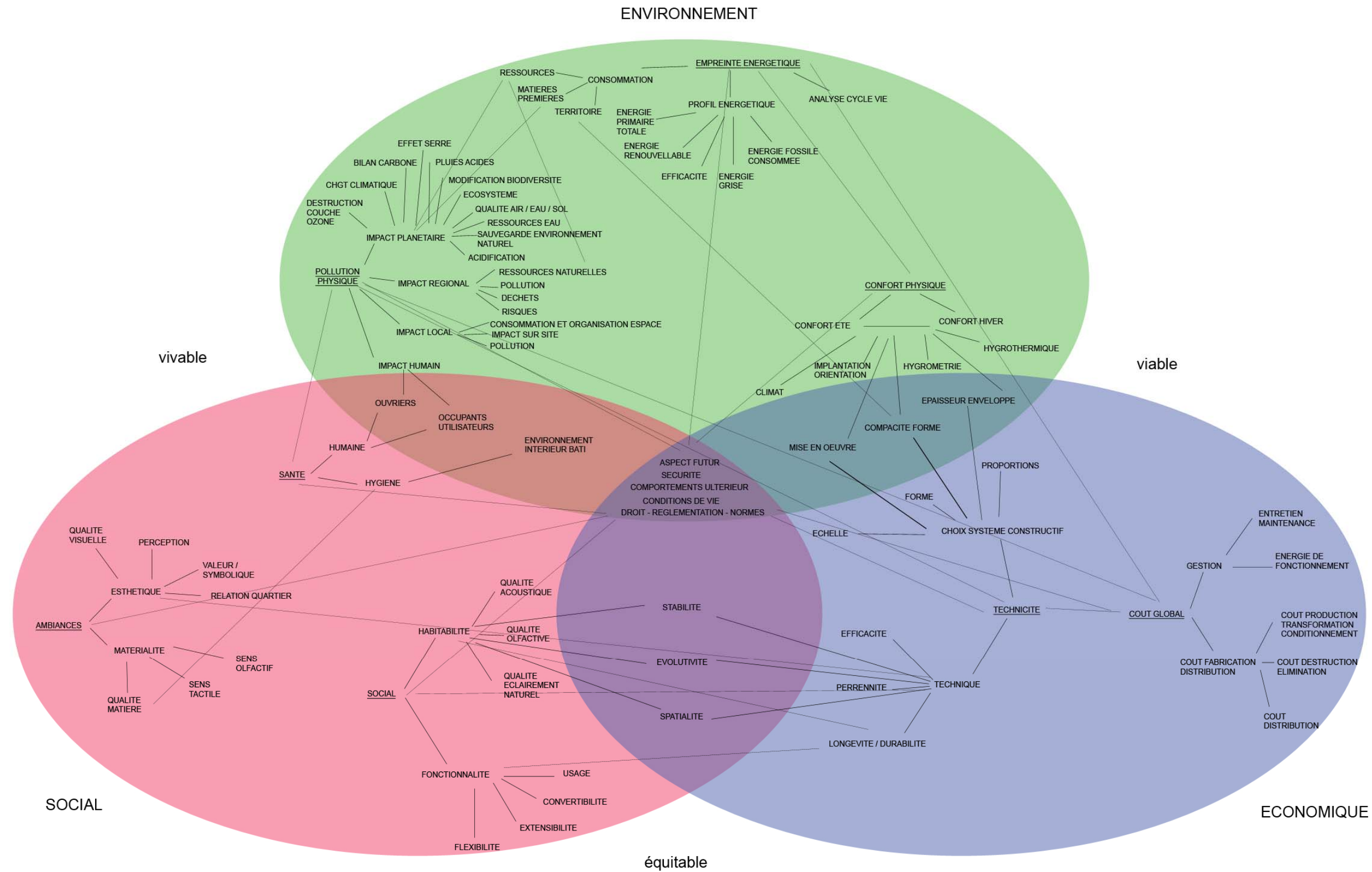
- ✓ économie de l'eau
 - ✓ récupération de l'eau de pluie
- Energies
 - Chauffage
 - ✓ concept bioclimatique
 - ✓ conservation
 - ✓ captage actif
 - ✓ installations chauffage
 - Refroidissement
 - ✓ production solaire
 - ✓ refroidissement naturel
 - ✓ climatisation
 - Electricité
- Emissions – rejets
 - Emissions dans l'air
 - ✓ effet de serre
 - ✓ acidification
 - ✓ photomag
 - Rejets dans l'eau
 - ✓ réseau d'eau
 - Rejets dans le sol
 - ✓ métaux lourds
- Déchets
 - Déchets chantier
 - ✓ gestion des déchets
 - ✓ recyclage
 - ✓ mise en décharge
 - Déchets ménagers
 - ✓ tri à la source
 - ✓ compostage

NOUVELLE PROPOSITION de GRILLE d'ANALYSE MULTICRITERES

Cette proposition s'articule autour des 3 piliers du développement durable. Il a été réalisé laborieusement par itérations au fur et à mesure des lectures.

Problèmes :

- difficulté à rendre une vue lisible et synthétique,
- manque de hiérarchisation, redondances, dépendances, ...



PROPOSITION ACTUELLE faite au regard de nos différents travaux (classement connaissances, aide à la décision multicritères, en regard avec notre problématique et nos hypothèses de travail)

APPROCHE GLOBALE premier degré : critères	APPROCHE DETAILLEE Second degré : indicateurs
POLLUTION PHYSIQUE	IMPACTS ENVIRONNEMENT
	IMPACTS HUMAIN
	IMPACTS socio-éco DECHETS
EMPREINTE ENERGETIQUE	CONSOMMATIONS
	PROFIL ENERGETIQUE
TECHNICITE	TECHNIQUE Syst.CONSTRUCTIF
	DURABILITE
USAGE	HABITABILITE ADAPTABILITE
	CONFORT THERMIQUE
MATERIALITE	ESTHETIQUE
	CULTUREL
	AMBIANCE
COÛT GLOBAL	COÛT MATERIAUX
	COÛT FONCTIONNEMENT
REGLEMENTATION NORMES	SECURITE INCENDIE
	NORME PERSONNES A MOBILITE REDUITE
	REGLEMENTATION THERMIQUE

Annexe 2 : FDES Fiches de Déclaration Environnementale et Sanitaire : partie environnementale

Contenu d'une déclaration environnementale : La norme NF P 01-010 permet de déclarer les caractéristiques environnementales et sanitaires d'un produit de construction sous forme de FDES. Cette norme considère deux types d'informations :

- les données d'inventaires du cycle de vie ICV
- les valeurs des indicateurs d'impacts du cycle de vie du produit.

Pour obtenir ces données et valeurs il est nécessaire de réaliser un bilan environnemental du produit que nous appelons analyse du cycle de vie : cela consiste à quantifier les flux de matières et d'énergie d'un produit depuis le prélèvement des ressources naturelles jusqu'au traitement des déchets ultimes.

D'après la norme de référence NF P 01-010, le cycle de vie d'un produit se divise en cinq étapes :

- la production : qui prend en compte la fabrication du produit mais aussi son extraction, sa préparation et le transport des matières premières nécessaires à sa fabrication. La fin de cette étape se situe à la sortie du produit de l'usine,
- le transport du produit : de l'usine jusqu'au chantier où il sera utilisé,
- la mise en œuvre du produit : nous entendons la mise en place du produit. Dans cette étape le transport des déchets de mise en œuvre est également pris en compte,
- la vie en œuvre : nous prenons en compte la période pendant laquelle le produit assure sa fonction au sein du bâtiment. Dans cette étape, l'entretien et la maintenance, le remplacement partiel, etc.... sont pris en compte dans le bilan environnemental.
- la fin de vie : cette étape prend en compte la dépose et le transport du produit lors d'une opération de démolition, réhabilitation ou entretien.

Les indicateurs d'impacts du cycle de vie du produit permettent d'évaluer la contribution environnementale du produit en regroupant certains flux. Pour cela, la norme NF P01-010 a retenu différents indicateurs qui sont des critères environnementaux d'aide au choix d'un produit.

Les indicateurs retenus sont les suivants :

- les consommations des ressources énergétiques : cet indicateur comprend les consommations d'énergie primaire totale, de ressources énergétiques non renouvelables et de ressources énergétiques renouvelables.
- l'épuisement des ressources : cet indicateur s'intéresse aux consommations de ressources énergétiques et non énergétiques à l'exception de l'eau en pondérant la ressource par un coefficient égal à un indice de rareté.
- les consommations d'eau : cet indicateur englobe l'ensemble des consommations d'eau utile sur la totalité du cycle de vie du produit, ceci toutes sources confondues.
- les déchets solides : cet indicateur tient compte des quatre types de déchets éliminés, soit les déchets dangereux, non dangereux, inertes et radioactifs, ainsi que des déchets valorisés.
- le changement climatique : à travers cet indicateur, la contribution du produit à l'augmentation de la teneur de l'atmosphère en gaz à effet de serre est évaluée.
- l'acidification atmosphérique : de même que l'indicateur précédent, est évaluée ici la contribution à l'acidification de l'atmosphère (dioxyde de soufre, oxydes d'azote...).
- la pollution de l'air : à travers cet indicateur, les impacts toxiques et écotoxiques des émissions dans l'air sont estimés.
- la pollution de l'eau : de même, cet indicateur apprécie les impacts toxiques et écotoxiques des émissions dans l'eau et dans le sol du produit.
- la destruction de la couche d'ozone : elle tient compte de la contribution du produit à la destruction de la couche d'ozone stratosphérique.
- la formation d'ozone photochimique : elle prend en considération la contribution des émissions dans l'air de composés susceptibles de participer à la formation d'ozone troposphérique.

Annexe 3 : Définition des caractéristiques techniques prises en compte dans la base de données matériaux

- ✓ densité : la densité est le rapport entre la masse d'un matériau et la masse du même volume d'eau à la température de 3.98°C.
- ✓ conductivité thermique λ en W/m.K : elle indique le flux de chaleur en watts qui traverse une épaisseur de 1 mètre de matériau sur une surface de 1 mètre², avec une température de 1 degré (Kelvin ou Celsius) entre les deux faces. C'est le critère habituel de la qualité isolante d'un matériau. Il est caractéristique de la nature du matériau et ne dépend pas de son épaisseur.
- ✓ chaleur spécifique ou chaleur massique C : quantité de chaleur absorbée ou fournie par une unité de masse qui s'élève ou s'abaisse de 1°C. $C=Q/\Delta T$ en Kj/kg.°C. Q étant la quantité de chaleur et ΔT l'accroissement de température, le tout pour une masse 1.
- ✓ capacité thermique R en Wh/m³.K: capacité du matériau à emmagasiner une certaine quantité de chaleur. Elle mesure la quantité de chaleur nécessaire pour élever de 1°C la température de 1 mètre³ de matériau (cette quantité se trouvant stockée dans le matériau).
- ✓ diffusivité thermique D : grandeur physique qui caractérise la capacité d'un matériau dans la pénétration et l'atténuation d'une onde thermique dans un milieu. $D = \lambda / \rho c$. λ étant la conductivité thermique, ρ étant la masse volumique et c étant la chaleur spécifique.
- ✓ effusivité thermique Ef : ce coefficient caractérise la manière dont un matériau transporte des flux thermiques. Elle mesure la rapidité avec laquelle la température superficielle d'un matériau se réchauffe. Le coefficient Ef indique combien de Kilo Joules ont pénétré dans 1m² de surface du matériau une seconde après qu'elle ait été en contact avec une autre surface de 1m² plus chaude qu'elle de 1°C. $Ef = \sqrt{de R / \lambda}$. (R étant la capacité thermique).
- ✓ coefficient de résistance à la diffusion de vapeur d'eau μ : la résistance à la diffusion de vapeur d'eau d'un matériau s'exprime par le coefficient de résistance à la diffusion. Ce dernier exprime la résistance du matériau concerné par rapport à la résistance de l'air. S'exprime en mètre.
- ✓ absorption de l'eau en g/m² : capacité à filtrer, à accumuler et à régénérer de l'eau
- ✓ porosité : rapport du volume des vides (réseau creux) sur le volume apparent du matériau.

- ✓ affaiblissement acoustique R en dB : l'indice d'affaiblissement acoustique caractérise la qualité acoustique d'un élément de construction.
- ✓ résistance à l'écrasement en Mpa : aptitude d'un matériau à résister à la rupture par compression.
- ✓ vieillissement : le processus de vieillissement d'un matériau est le résultat de processus qui affectent sa composition et ses propriétés de surfaces mais aussi les performances techniques des matériaux.

Annexe 4 : Définition des impacts environnementaux renseignés dans la base de données matériaux

- ✓ les consommations des ressources énergétiques : cet indicateur comprend les consommations d'énergie primaire totale, de ressources énergétiques non renouvelables et de ressources énergétiques renouvelables.
- ✓ l'épuisement des ressources : cet indicateur s'intéresse aux consommations de ressources énergétiques et non énergétiques à l'exception de l'eau en pondérant la ressource par un coefficient égal à un indice de rareté.
- ✓ les consommations d'eau : cet indicateur englobe l'ensemble des consommations d'eau utile sur la totalité du cycle de vie du produit, ceci toutes sources confondues.
- ✓ les déchets solides : cet indicateur tient compte des quatre types de déchets éliminés, soit les déchets dangereux, non dangereux, inertes et radioactifs, ainsi que des déchets valorisés.
- ✓ le changement climatique : à travers cet indicateur, la contribution du produit à l'augmentation de la teneur de l'atmosphère en gaz à effet de serre est évaluée.
- ✓ l'acidification atmosphérique : de même que l'indicateur précédent, est évaluée ici la contribution à l'acidification de l'atmosphère (dioxyde de soufre, oxydes d'azote...).
- ✓ la pollution de l'air : à travers cet indicateur, les impacts toxiques et écotoxiques des émissions dans l'air sont estimés.
- ✓ la pollution de l'eau : de même, cet indicateur apprécie les impacts toxiques et écotoxiques des émissions dans l'eau et dans le sol du produit.
- ✓ la destruction de la couche d'ozone : elle tient compte de la contribution du produit à la destruction de la couche d'ozone stratosphérique.
- ✓ la formation d'ozone photochimique : elle prend en considération la contribution des émissions dans l'air de composés susceptibles de participer à la formation d'ozone troposphérique.

Annexe 5 : Présentation succincte des outils retenus dans le cadre de notre recherche

ARCHINFORM : base de données internationales sur l'architecture. Elle recense des projets réalisés ou non du XX^e siècle.

Source : <http://fra.archinform.net/arch/70305.htm>

ARCHIWIZARD : logiciel permettant de simuler et d'évaluer dès la phase d'esquisse les impacts des choix architecturaux sur les performances énergétiques (thermique, éclairage apport solaire), les besoins d'éclairage artificiel, l'eau chaude sanitaire et la production d'énergie solaire ;

3D interactive et analyse en temps réel. Outil collaboratif entre architectes et ingénieurs.

Source : http://www.raycreatis.com/archiwizard_esquisse

AUDIENCE : Autoformation à Distance au contrôle d'Environnement des Constructions et des Equipements est développé par le CERMA. Il est construit autour d'un site Internet de formation comprenant 4 rubriques permettant l'entrée dans la formation : référence, dispositif, effet, théorie ; des outils de travail, des exercices, un forum.

Source : <http://audience.cerma.archi.fr/index.html>

COCON : Logiciel de Comparaison de solutions Constructives, de CONFORT et d'émissions de CO₂ développé par Luc FLOISSAC, conseiller environnemental et chercheur au LRA de l'ENSA de Toulouse. Il permet de comparer des solutions constructives en terme technique et environnemental.

Source : <http://www.citemaison.fr/COCON-comparaison-solutions-constructives-confort.html>

DIAL-Europe : cet outil permet d'optimiser la lumière naturelle dans les bâtiments dès les premières étapes de la construction. Il calcule les facteurs de lumière du jour sur le plan de travail, estime l'autonomie en éclairage naturel, évalue les risques de surchauffe, prédimensionne l'éclairage artificiel et optimise les performances du local. Il compare également le local avec des projets référents introduits dans la base de données.

Source : <http://www.estia.ch/index.php?id=98>

ECOTECT : outil de conception architecturale et d'analyse environnementale créé par le Docteur Andrew Marsh. Il permet d'évaluer à toutes les étapes de la conception l'impact sur les performances du bâtiment de facteurs majeurs tels que l'exposition, les caractéristiques thermique, les systèmes d'ombrage, l'éclairage ou la ventilation.

Source : Information presse, *Autodesk optimise la conception durable de bâtiment au profit de l'environnement ; Autodesk renforce ses capacités de conception durable par*

l'acquisition des outils d'analyse Ecotect et Green Building Studio, par Ségolène Deeloy et Thomas Daron, Paris, juillet, 2008.

ELODIE : logiciel développé par le CSTB qui permet d'évaluer la qualité environnementale d'un bâtiment dans son ensemble et les impacts de celui-ci sur l'environnement (outil d'analyse du cycle de vie). Il est relié à la base de données Inies qui recense l'ensemble des FDES. Elodie permet de faire les calculs d'énergie grise, bilan carbone, profil environnemental multicritères d'une opération pour faciliter l'aide à la décision.

Source : <http://www.elodie-cstb.fr>

EQUER : outil d'évaluation de la qualité environnementale des bâtiments. Il est utilisable par l'ensemble des professionnels du bâtiment. Approche par analyse du cycle de vie. Il permet la comparaison de variante et est une aide à la décision. Son but est d'aider les concepteurs à mieux cerner les conséquences de leurs choix. Il peut être couplé à Comfie et pleiades.

Source : <http://www-cep.ensmp.fr/francais/logiciel/cycle/html/15log.html>

GREEN BUILDING STUDIO : il participe à la conception d'un bâtiment grâce à l'analyse de son bilan en énergie, en eau et en émissions carbone. Il a pour objectif d'aider les concepteurs en architecture dans les phases amonts du processus de conception.

Source : Information presse, *Autodesk optimise la conception durable de bâtiment au profit de l'environnement ; Autodesk renforce ses capacités de conception durable par l'acquisition des outils d'analyse Ecotect et Green Building Studio*, par Ségolène Deeloy et Thomas Daron, Paris, juillet, 2008. <http://usa.autodesk.com/>

SKETCHUP : logiciel 3D pour les phases de conception du processus de projet architectural et urbain. Possibilité de modéliser les abords réels du bâtiment afin d'apprécier objectivement l'incidence d'un projet dans son environnement. Au-delà de la possibilité de modéliser le projet architectural et urbain en trois dimensions, il s'intéresse à l'ensoleillement, aux ombres portées et aux contraintes visuelles du projet considéré.

Source : <http://sketchup.google.com/intl/fr/>

TRNSYS : TRaNsfert Systems Simulation programme est développé par Solar Energy Laboratory. Logiciel de simulation dynamique de bâtiment et de système. Il analyse le comportement énergétique du bâtiment et de ses équipements (chauffage et climatisation) en fonction de l'emplacement des matériaux de construction utilisé, de l'architecture et du concept énergétique choisi. Il calcule donc les performances thermiques des bâtiments multizones et de leurs équipements. C'est un logiciel modulaire de simulation utilisé pour l'analyse et le dimensionnement d'installation HVAC, la conception de systèmes solaires passifs, l'analyse de performances thermique de bâtiment.

Annexe 6 : Grille d'entretien détaillée de l'enquête n°1

CODE DE L'INTERVIEW :
NOM PERSONNE INTERVIEWEE :
DATE :
HEURE DE DEBUT INTERVIEW :
HEURE DE FIN INTERVIEW :
LIEU :
SITUATION PARTICULIERE :

TRONC COMMUN : introduction

1. PARCOURS PROFESSIONNEL

1.1 Etudes

1.1.1 Quel a été votre cursus professionnel ?

1.1.2 Dans le cadre d'un double parcours, pourquoi ce choix ?

1.1.3 Dans le cadre d'un double parcours, qu'est-ce que cela vous a apporté ?

1.2 Expériences

1.2.1 Quelles sont vos expériences personnelles ?

1.2.2 La démarche environnementale est-elle au cœur de vos anciennes activités ?

1.2.3. Portez-vous un intérêt particulier aux matériaux ? Lequel ?
(Variante n°1)

1.2.4 Utilisez-vous des outils d'aide à la conception ? (Variante n°2)

1.3 Activités professionnelles

1.3.1 Actuellement, quelle est votre activité professionnelle ?

1.3.2 Quels sont les types de projet que vous mettez en œuvre dans votre activité professionnelle ?

1.3.3 A quelle(s) phase(s) du processus de conception agissez-vous ?

VARIANTE n°1 : LES MATERIAUX

2. PRATIQUE ET MATERIAUX

2.1 Pratique

2.1.1 Comment sont intégrées les questions de choix de matériaux et de procédés de mise en œuvre ?

2.1.2 Quelles sont les phases au cours desquelles la question des matériaux est abordée ceci tout au long du processus de projet ?

2.1.3 Quels sont les acteurs concernés ?

2.1.4 De quelle manière se transmettent les données ?

2.1.5 Les échanges sont-ils commodes ou peu confortables ?

2.1.6 Est-ce que les questions des matériaux et de leurs mises en œuvre sont raisonnées en terme de dispositifs ou de poids / volume de matériaux ?

2.2 Critères

2.2.1 Quels sont les critères pris en compte lors du choix des matériaux et de leur mise en œuvre ?

2.2.2 L'aspect esthétique : la matérialité, est un critère important dans le choix des matériaux. A quelle(s) phase(s) du processus de conception est-il pris en considération ?

2.2.3 L'aspect financier est également un critère important dans le choix des matériaux. A quelle(s) phase(s) du processus de conception est-il pris en considération ?

2.2.4 Quels sont les critères qui déterminent le choix final d'un matériau et/ou d'un procédé de mise en œuvre : esthétique (matérialité), coût ou autre ?

2.2.5 Y a-t-il des données / renseignements difficiles à obtenir ou à analyser concernant les matériaux ou les renseignements sont-ils faciles à alimenter? Lesquels ?

2.2.6 Les données concernant les matériaux sont-elles précises et fiables ?

2.2.7 Quels critères vous semblent primordiaux à connaître lorsque l'on souhaite faire un choix concernant les matériaux et leur procédé de mise en œuvre ?

VARIANTE n°2 : LES OUTILS D'AIDE A LA CONCEPTION

3. OUTILS D'AIDE A LA CONCEPTION

3.1 La pratique des outils d'aide à la conception

3.1.1 Quels sont les outils d'aide à la conception que vous utilisez ?

3.1.2 Est-ce que ces outils sont des moyens facilitant les échanges entre les différents acteurs du bâtiment ? Lesquels ?

3.1.3 Quelles sont les fréquences d'utilisation de ces outils dans votre pratique professionnelle (quotidienne / hebdomadaire / mensuelle) ?

3.1.4 Combien de temps est nécessaire pour l'étude d'un projet : du renseignement des données jusqu'à l'obtention des résultats, sur les outils utilisés ?

3.1.5 Quel est le temps nécessaire pour l'étude d'un projet ?

3.1.6 Quelle est l'influence que peut avoir la qualité graphique de l'outil sur la qualité de la compréhension et la facilité de prise en main de l'outil ?

3.1.7 Quels conseils auriez-vous à donner concernant l'utilisation des outils ?

3.1.8 Connaissez-vous des architectes qui utilisent ce type d'outil ?

3.2 Outils et projet

- 3.2.1 Quel est le niveau de connaissances nécessaire pour l'utilisation de ces outils (facilité de prise en main) ?
- 3.2.2 Quelles sont les phases d'intervention des différents outils utilisés sur l'ensemble du processus de projet ?
- 3.2.3 Serait-il intéressant que les outils soient utilisables dès les phases amont du processus de projet ?
- 3.3 Résultats
 - 3.3.1 Est-ce que les résultats obtenus sont facilement exploitables ?
 - 3.3.2 Les résultats obtenus sont-ils précis ou discutables ?
 - 3.3.3 Est-ce qu'il est aisé de revenir sur les choix initiaux lors de résultats négatifs ou peu convaincants ?
- 3.4 Les outils d'aide à la conception concernant les matériaux
 - 3.4.1 Quels sont les outils d'aide à la conception que vous utilisez concernant le choix des matériaux et procédés de mise en œuvre dans un projet ?
 - 3.4.2 Quels sont les critères pris en considération ?
 - 3.4.3 Les bases de données utilisées dans ces outils sont-elles suffisamment complètes ?
 - 3.4.4 Est-ce que ces outils sont complets et facilement utilisables ?
 - 3.4.5 Est-ce que ces outils permettent d'orienter des décisions ?

TRONC COMMUN : CONCLUSION

4. APPROCHE DURABLE

- 4.1 Démarche environnementale et pratique du projet
 - 4.1.1 La démarche environnementale est-elle une de vos préoccupations dans votre activité professionnelle ?
 - 4.1.2 Comment intégrez-vous la démarche environnementale dans votre activité professionnelle (préoccupation ponctuelle, croyance, ...) ?
 - 4.1.3 Selon vous, peut-on lier qualité architecturale et qualité environnementale ?
- 4.2 Démarche environnementale et matériaux (variante n°1)
 - 4.2.1 En quoi la démarche durable incite le concepteur à se soucier de manière plus forte de l'impact du choix des matériaux et des procédés de mise en œuvre concernant l'Environnement et l'Homme
 - 4.2.2 Quels critères sont mis en avant dans le choix des matériaux et procédés de mise en œuvre dans une approche durable ?
 - 4.2.3 Dans le cadre d'une démarche durable, à quelle(s) phase(s) le choix des matériaux et procédés de mise en œuvre est pris en considération ?

5. PRATIQUE, MATERIAUX ET OUTILS D'AIDE A LA CONCEPTION

- 5.1 Selon vous, est-ce qu'il serait intéressant d'avoir un outil d'aide à la conception renseignant sur l'impact environnemental des matériaux et de leurs procédés de mise en œuvre ?
- 5.2 Seriez-vous prêts à l'utiliser ?
- 5.3 Quels renseignements souhaiteriez-vous y trouver ?

Je vous remercie

REMARQUES :

.....

.....

.....

.....

Annexe 7 : Grille d'entretien de l'enquête n°1

CODE:.....

NOM :.....

PROFESSION :.....

N° ENTRETIEN :.....

DATE :.....

HEURE DE DEBUT INTERVIEW :.....

HEURE DE FIN INTERVIEW :.....

LIEU :.....

SITUATION PARTICULIERE :.....

CODE	THEMATIQUES	ABORDE	ORDRE	REMARQUES
1	PARCOURS PROFESSIONNEL : tronc commun introduction			
1.1	Etudes			
1.1.1	Cursus universitaire			
1.1.2	Choix d'un double parcours			
1.1.3	Apport d'un double parcours			
1.2	Expériences professionnelles			

1.2.1	Expériences professionnelles			
1.2.2	Démarche environnementale : cœur anciennes activités			
1.2.3	Intérêt particulier aux matériaux (variante n°1)			
1.2.4	Utilisation d'outils d'aide à la conception (variante n°2)			
1.3	Activités professionnelles			
1.3.1	Actuellement : activités professionnelles			
1.3.2	Types de projets			
1.3.3	Phases d'intervention dans le processus de conception			
1.3.4	Types d'intervention (et dans quelles phases)			
2	PRATIQUE ET MATERIAUX : variante n°1			
2.1	Pratiques			
2.1.1	Intégration des questions de choix de matériaux et procédés de mise en œuvre			
2.1.2	Phases dans lesquelles la question des matériaux est abordée			
2.1.3	Acteurs concernés			
2.1.4	Transmission de données			
2.1.5	Echanges commodes ou peu confortables ?			
2.1.6	Raisonnement matériaux en dispositif ou poids/ volume ?			
2.2	Critères			
2.2.1	Critères pris en compte lors de choix de matériaux et procédés de mise en œuvre			

2.2.2	Aspect esthétique : matérialité : phase de prise en considération			
2.2.3	Aspect financier : phase de prise en considération			
2.2.4	Critères déterminant choix final matériaux et procédés de m. en œuvre coût ou esthétique : matérialité ou autre ?			
2.2.5	Données / renseignements difficile à obtenir ou facile à alimenter?			
2.2.6	Précisions et fiabilité des données sur les matériaux			
2.2.7	Critères primordiaux			
3	OUTILS D'AIDE CONCEPTION : variante n°2			
3.1	Pratique des outils d'aide à la conception			
3.1.1	Outils utilisés			
3.1.2	Intérêt de ces outils			
3.1.3	Outils facilitent échanges entre acteurs ?			
3.1.4	Fréquence d'utilisation			
3.1.5	Temps nécessaire pour l'étude d'un projet			
3.1.6	Qualité graphique et qualité de la compréhension de l'interface			
3.1.7	Conseils concernant l'utilisation des outils			
3.1.8	Architectes utilisent outils ?			
3.2	Outils et projet			
3.2.1	Niveau de connaissances nécessaires			
3.2.2	Phases d'intervention			

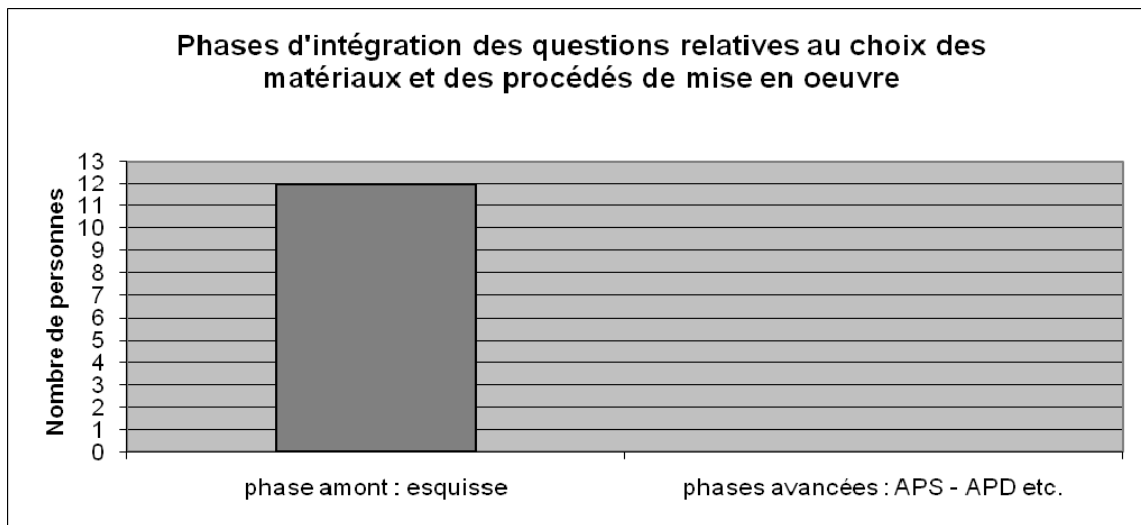
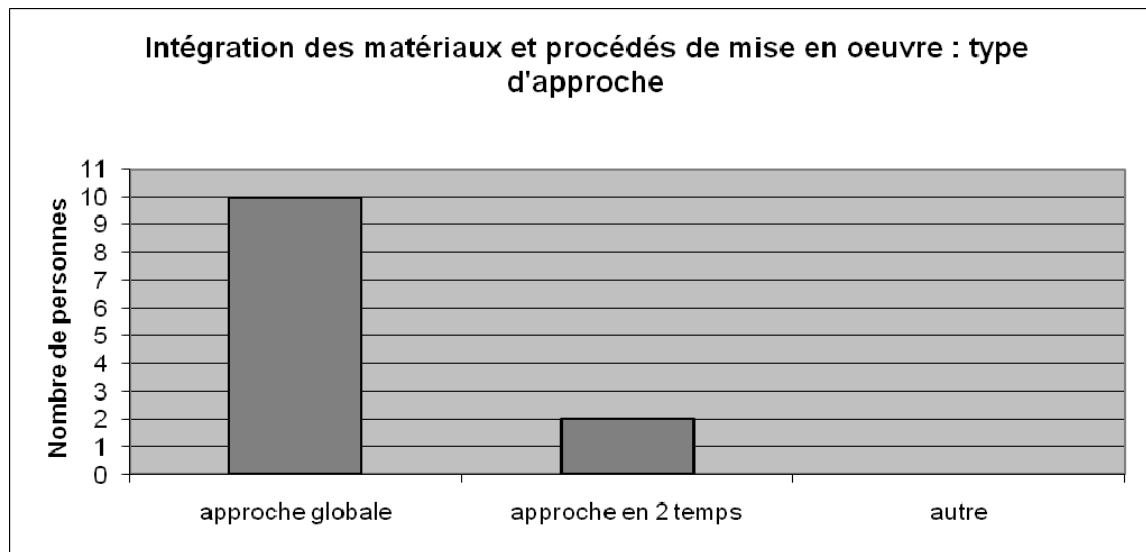
3.2.3	Intérêt d'utiliser outils dans les phases amont du processus de conception			
3.3	Résultats			
3.3.1	Exploitation et compréhension des résultats obtenus			
3.3.2	Précision et discussion des résultats obtenus			
3.3.3	Facilité de retour sur choix pris			
3.4	Outils d'aide à la conception et matériaux			
3.4.1	Outils utilisés			
3.4.2	Critères pris en considération			
3.4.3	Base de données suffisamment complète			
3.4.4	Complexité et contenu des outils			
3.4.5	Orientation des décisions			
4	APPROCHE DURABLE : tronc commun conclusion			
4.1	Démarche environnementale et pratique du projet			
4.1.1	Préoccupation dans activité professionnelle			
4.1.2	Intégration de la démarche environnementale			
4.1.3	Lien entre qualités architecturale et environnementale			
4.2	Démarche environnementale et matériaux (variante n°1)			
4.2.1	Souci de manière plus marqué de l'impact des matériaux et procédés de MeO			
4.2.2	Critères mis en avant dans approche durable concernant les matériaux			

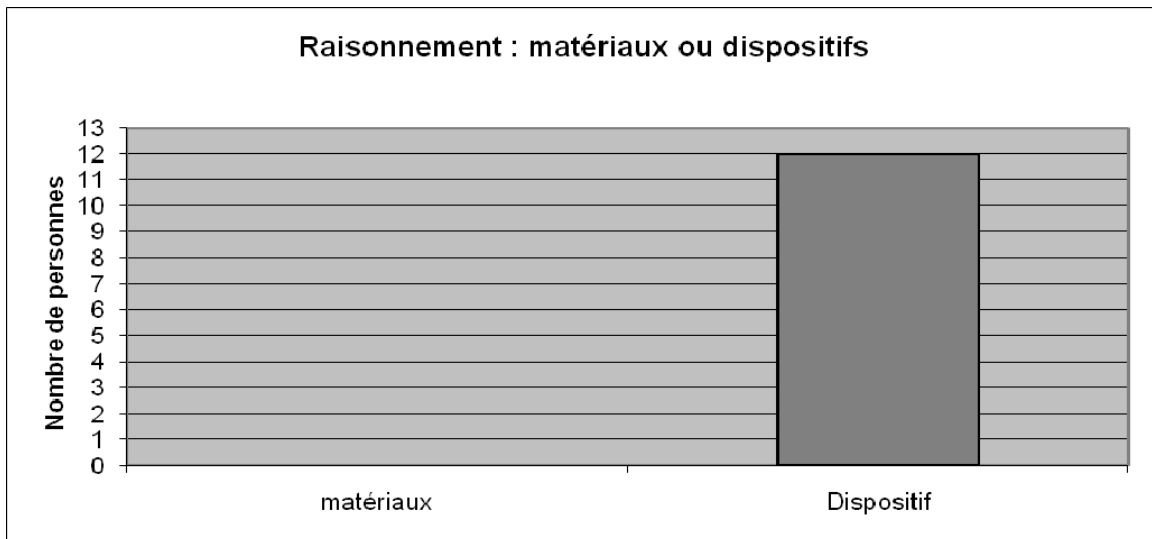
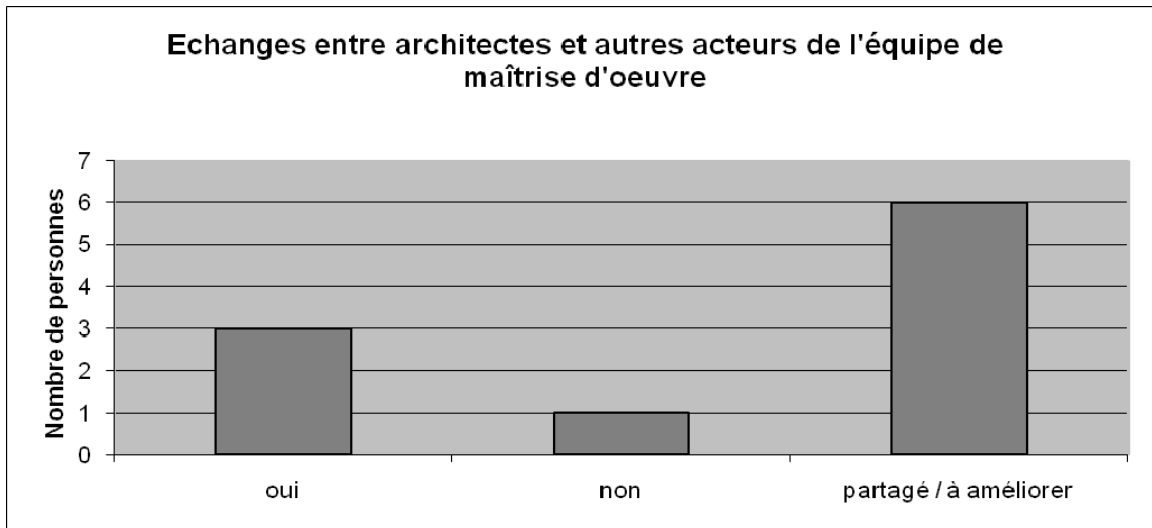
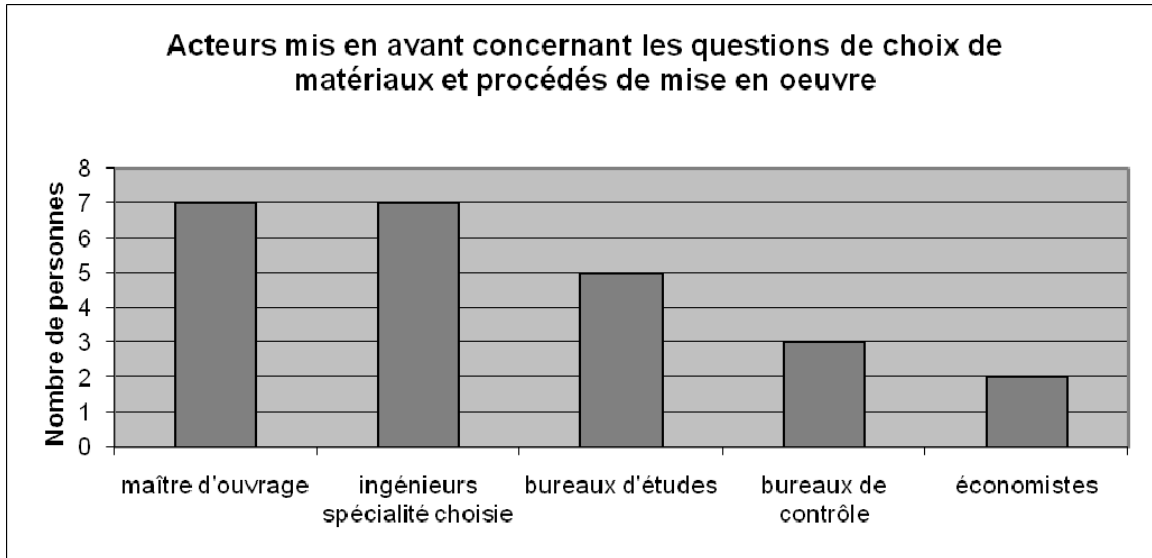
4.2.3	Phases d'intervention			
5	PRATIQUE, MATERIAUX et OUTILS AIDE CONCEPTION : tronc commun conclusion			
5.1	Intérêt d'un outil renseignant sur l'impact des matériaux et procédés			
5.2	Prêt à l'utiliser ?			
5.3	Renseignements souhaités			

REMARQUES et IMPRESSIONS:

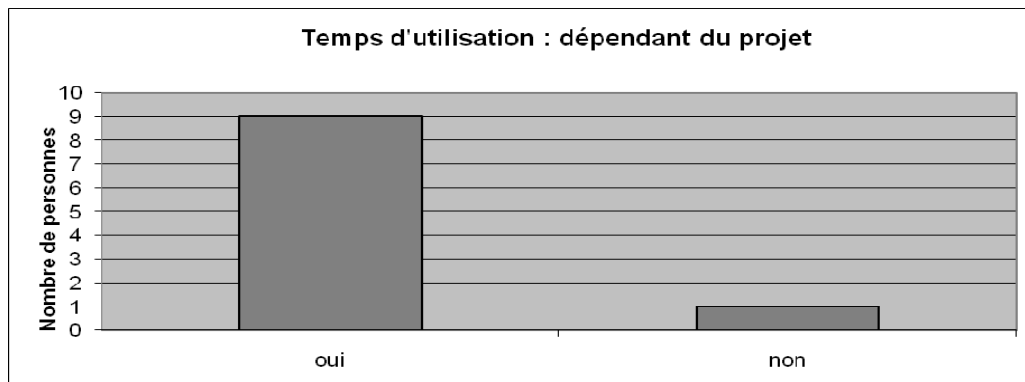
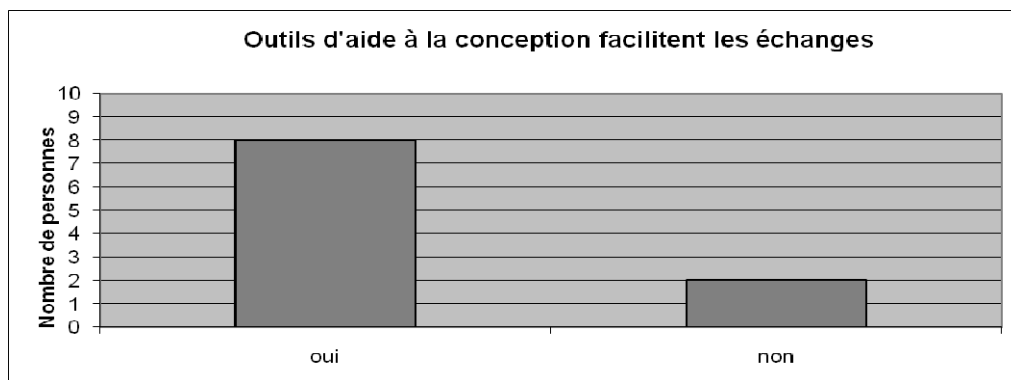
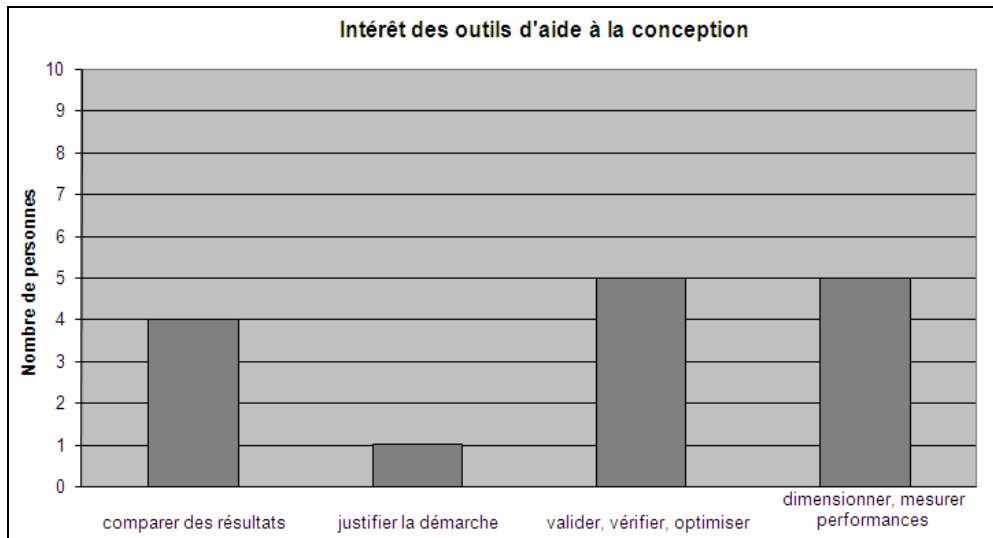
Annexe 8 : Résultats de l'enquête n°1 sous forme de graphiques

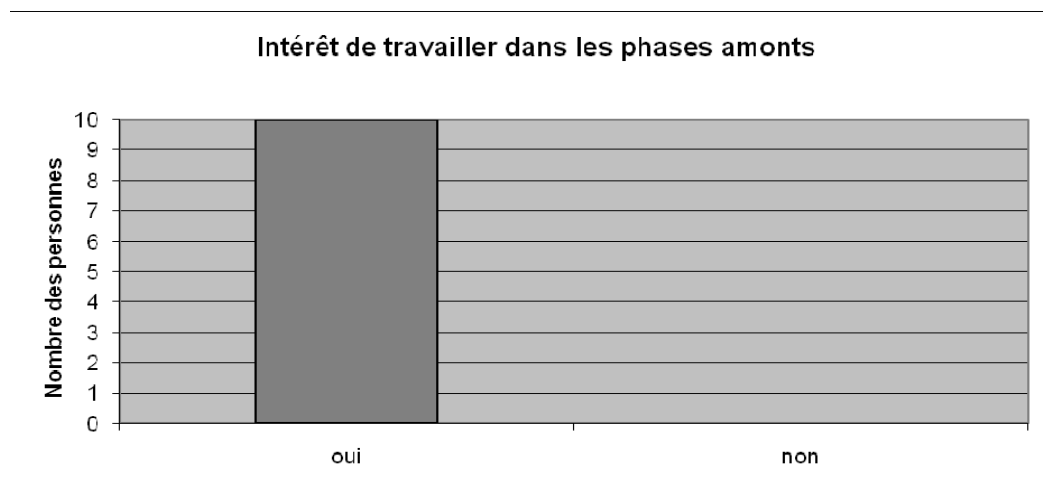
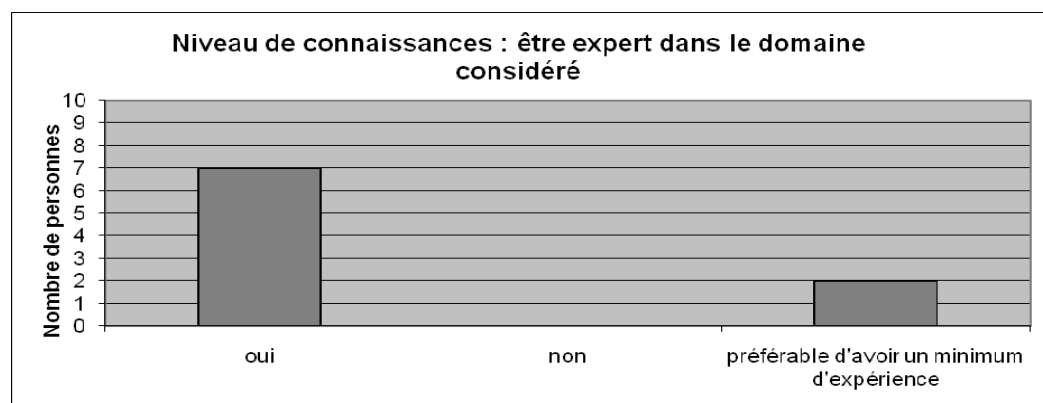
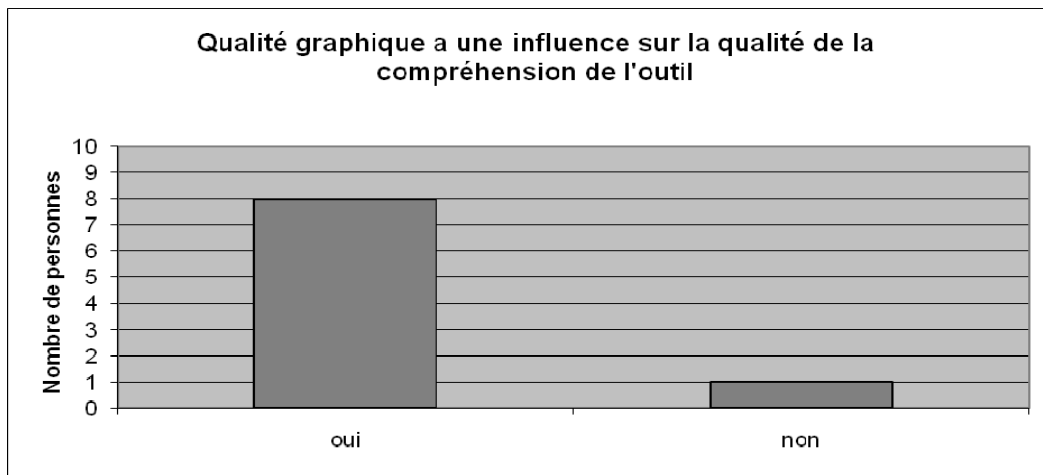
Pratiques des questions relatives au choix des matériaux et procédés de mise en oeuvre

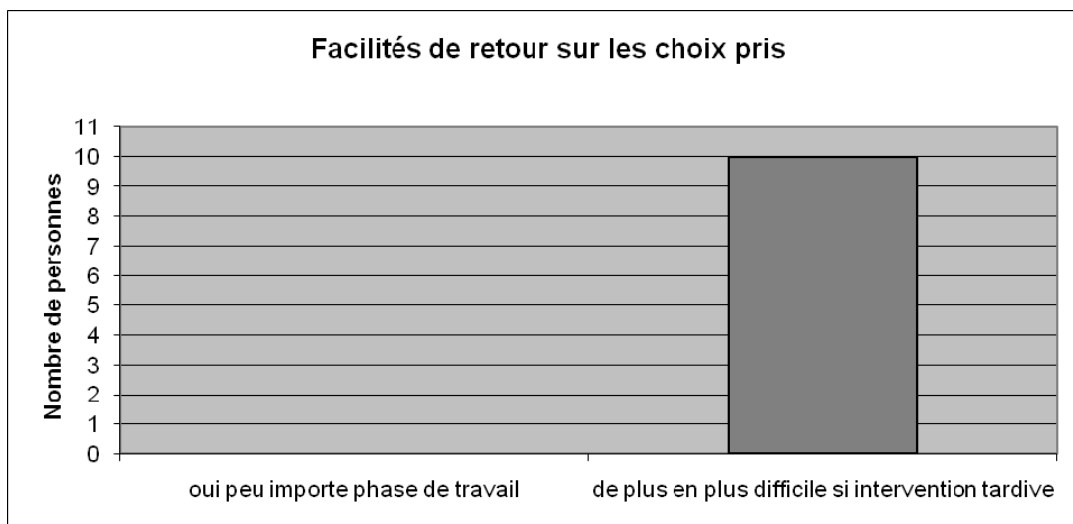
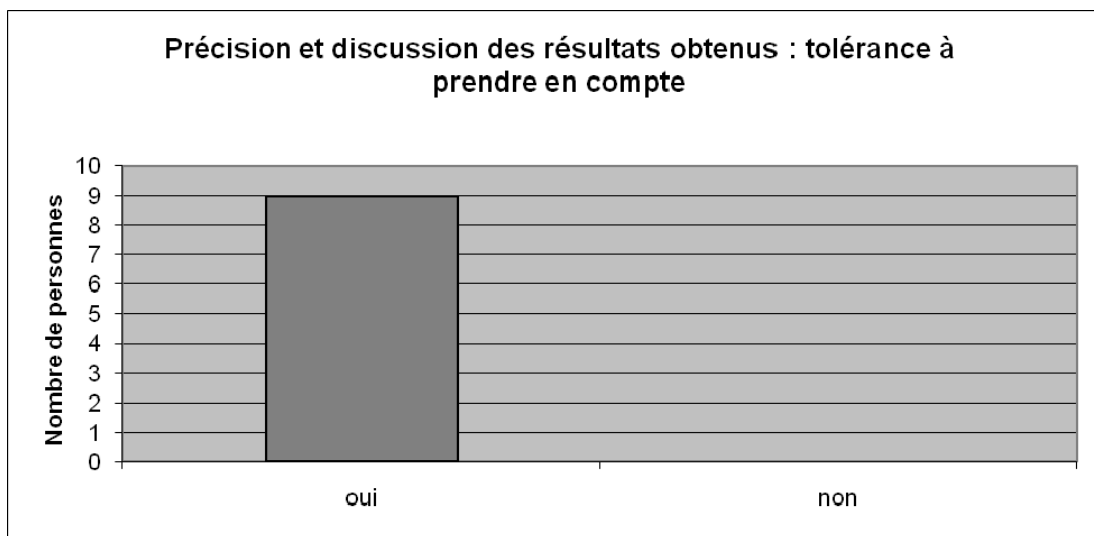
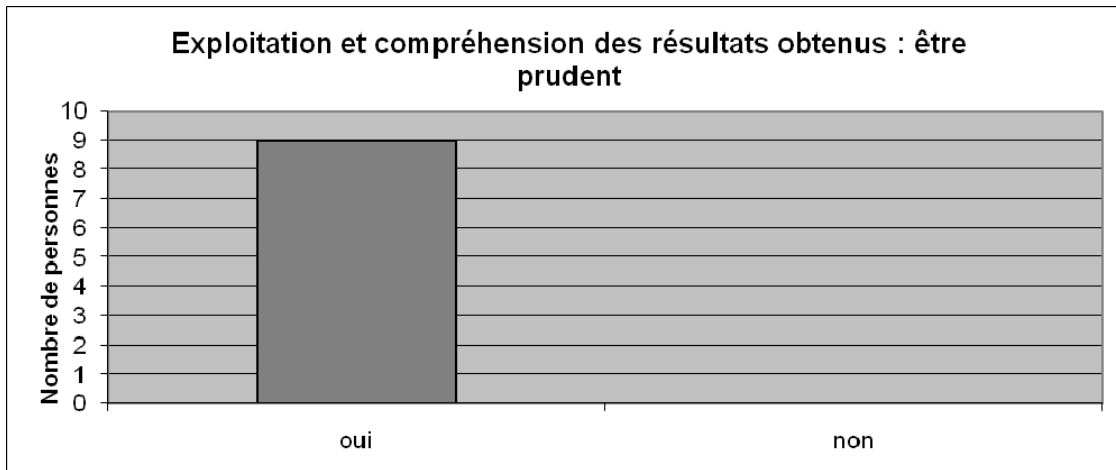




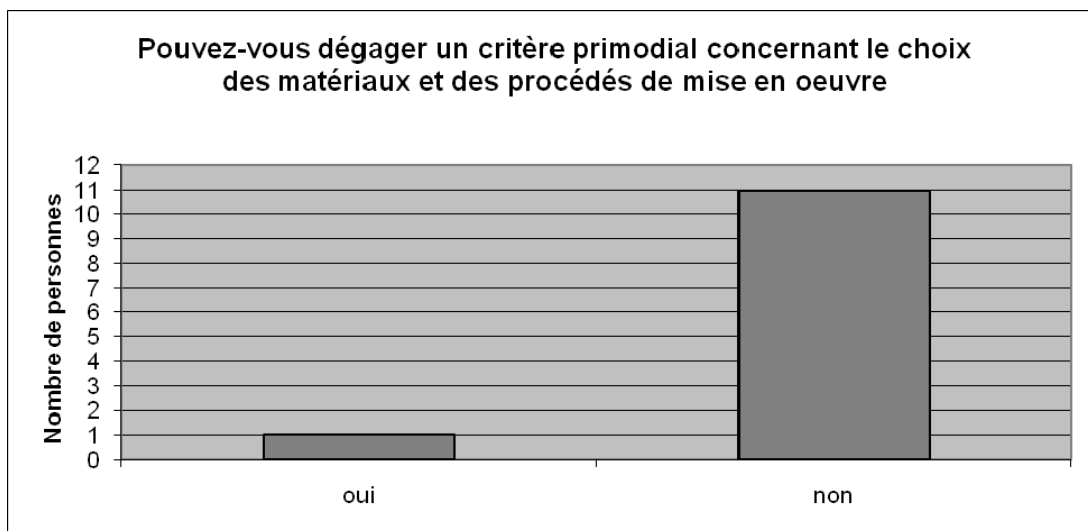
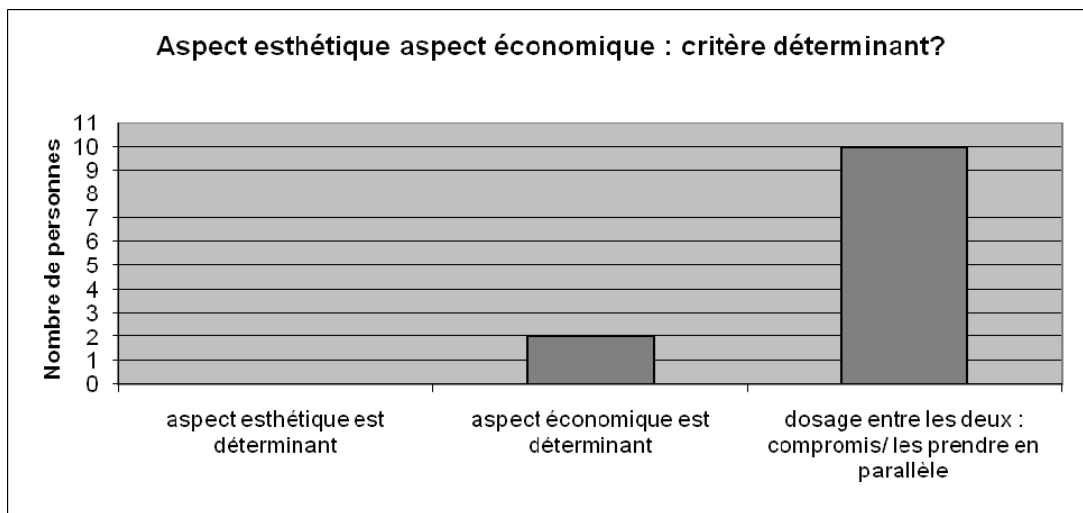
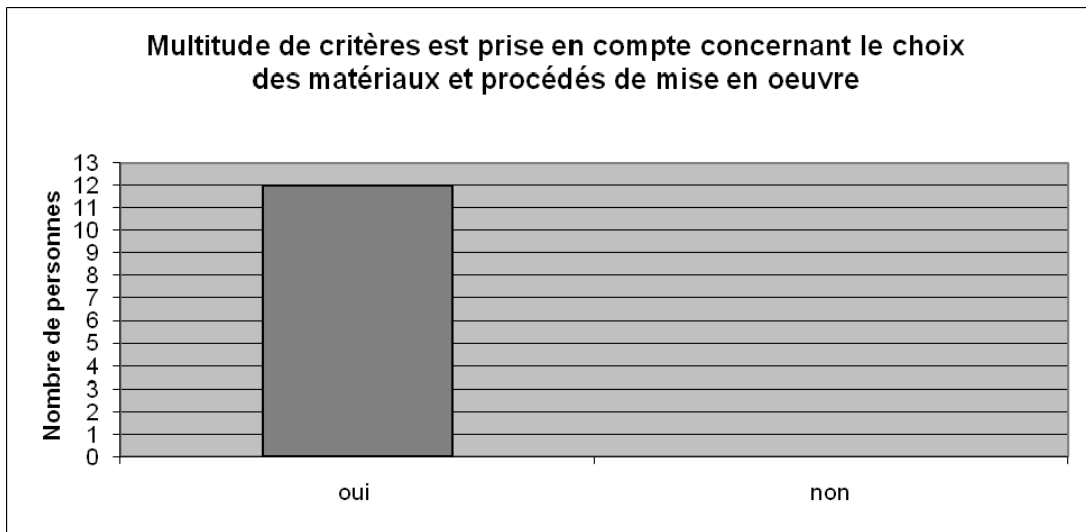
Pratique des outils d'aide au projet

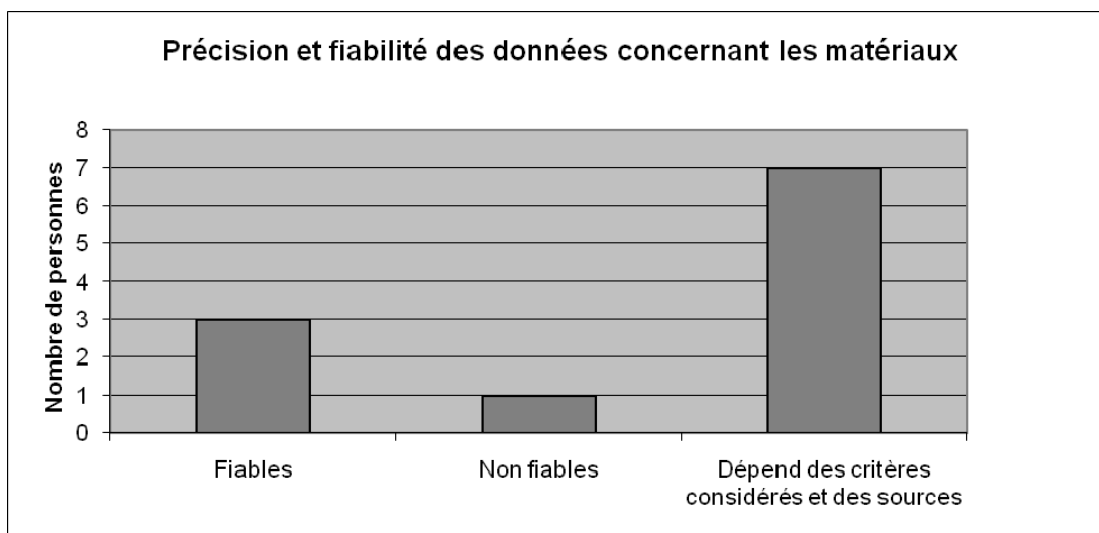
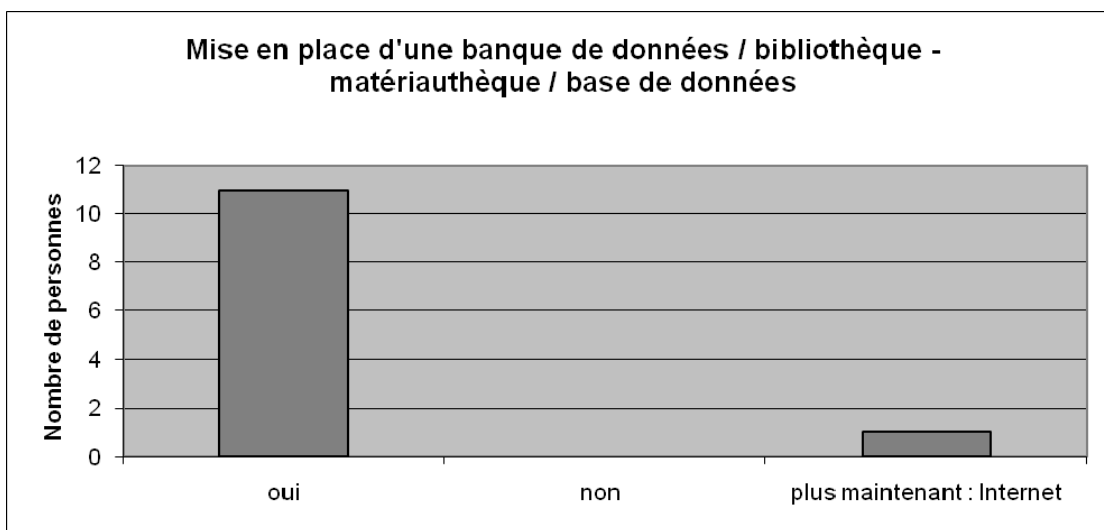
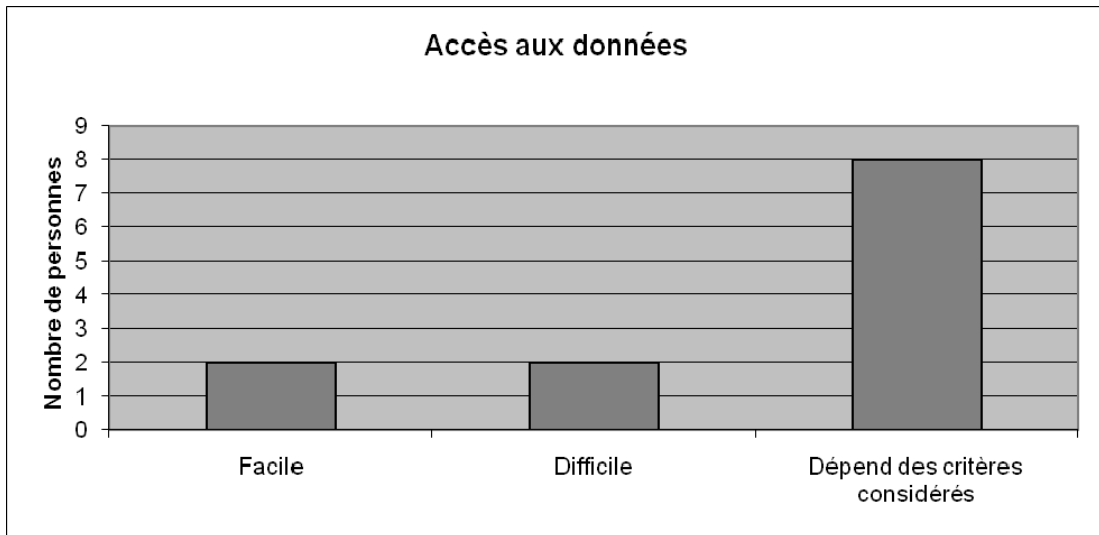






Critères relatifs au matériaux et procédés de mise en œuvre





Annexe 9 : Analyse de l'entretien n° 108v1&211

Thématique 1

Vers.	Id. code	N°	Thème 1	Thème 2	Propos recueillis
V1&2	108v111	1.1	Etudes	1.1.1 Cursus universitaire	<ul style="list-style-type: none"> - architecte dplg - thèse de doctorat sur la « stratégie d'intégration de la composante énergétique dans la pédagogie du projet d'architecture » : trois mots clés ; énergie, pédagogie, architecture. Thème : savoir (scientifique) et savoir faire (architecturaux) - Habilitation à Diriger les Recherches.
		1.2	Expériences professionnelles	1.2.1 expériences professionnelles	<ul style="list-style-type: none"> - urbanisme (coopération internationale en côte d'ivoire) - salarié au Brésil en tant que maître d'œuvre - installé seul puis avec associés pour maîtrise d'œuvre en France - enseignement au Brésil - enseignant – chercheur au Laboratoire bioclimatique, qui est devenu GRECO - directeur du GRECAU - activité de consultant sur questions d'énergies, d'environnement et de développement durable (AMO) : 1. activités d'AMOG dans la programmation, 2. Sollicité par équipe de maîtrise d'œuvre ponctuellement pour participer à des concours : consultants pour Moe.
				1.2.2 démarche environnementale	- très coloré par architecture solaire et bioclimatique
				1.2.4 utilisation outils aide concept.	<ul style="list-style-type: none"> - AMO : oui - Archi : oui
		1.3	Activités professionnelles	1.3.1 activités actuelles	<ul style="list-style-type: none"> - directeur de l'ENSAT - AMO
				1.3.3 phases d'intervention	- programmation, concours,
				1.3.4 types d'intervention	- AMO : consultant
		2.1	Pratiques & matériaux / mise en oeuvre	2.1.1 intégration questions matériaux et mise en oeuvre	<ul style="list-style-type: none"> - système d'indicateurs précis (à la fois pour enseignement, maîtrise d'œuvre et AMO) : approche architecturale sur 4 thématiques : implantation, morphologie, matérialité et spatialité. Thématiques à croiser avec les problématiques énergétiques, environnementales. - les approches doivent être simultanées (cf. critères matérialité) - hors de question de dessiner des formes ou des schémas d'organisation fonctionnelle sans imaginer dès le départ quels sont les choix structurels et d'écriture architecturale. - question des matériaux posée au même titre que les autres car un matériaux peut influencer l'écriture architecturale, le système constructif etc. - en tant qu'AMO : ne pas enlever la créativité de l'équipe de maîtrise d'œuvre, on va donner des tendances, des niveaux de performances à atteindre. On raisonne en objectif et non en moyens. On peut citer des exemples / références mais plusieurs et à titre indicatif (aide à la conception). - suivi de chantier : changement matériaux : cas extrême, pas simple et entraîne surcoûts, ne concerne en aucun cas les matériaux d'enveloppe. - DCE : proposition des entreprises - mission AMO, 1. suivi programmation : concernant matériaux : tendances, objectifs, jamais de moyens et plusieurs exemples à titre indicatif. 2. aide à la conception. 3. suivi de chantier pour surveiller la mise en oeuvre. 4. mission EVA (1, 2 ou 3 ans) mission d'évaluation sur les performances thermiques,

				lumineuses etc. - tout monte en simultané : les questions d'harmonie, d'esthétique, d'équilibre, la matière, la spatialité, etc.
			2.1.2 phases intégration matériaux	- ces problématiques (cf. ci-dessus) doivent être croiser dès les phases amonts du projet, dès le départ. - dès les premières phases de l'esquisse.
			2.1.3 acteurs	- toujours avec les ingénieurs. Plus on est averti concernant les questions techniques en tant qu'architectes et plus on consulte les ingénieurs en amonts
			2.1.5 échanges commodes ou peu confortables	- plus facile de dialoguer tôt car pas l peur de se faire dévorer le projet. L'inverse est contre productif car après on n'a plus le contrôle du projet. - BET : consulté en brainstorming dès le départ : analyse du site et programme. - il ressort des choses que ni les uns ni les autres n'avaient en tête. - travail AMO avec BET dès concours de maîtrise d'œuvre - issue jamais une optimisation mais toujours un compromis.
			2.1.6 raisonnement : dispositif ou matériaux	- dispositif (par recoupement de ce qui a été dit)
	2.2	Critères matériaux / mise en oeuvre	2.2.1 critères pris en compte	- matérialité plutôt que matériaux parce que la thématique de la matérialité inclut les matériaux et les systèmes constructifs mais pas seulement dans leur dimension technique : on regarde la performance du matériau en terme de structure (inertie, porosité etc.), la composition architecturale (isolation intérieure ou extérieure), apparence du matériau. - écriture architecturale - mise en œuvre systèmes constructifs, - énergies grises, - disponibilités locales - tout monte en simultané : les questions d'harmonie, d'esthétique, d'équilibre, la matière, la spatialité, etc. - pas d'entrée privilégiée dans le projet.
			2.2.2 aspect esthétique : matérialité : phase	- je parle d'harmonie : technique esthétique et éthique (harmonie entre ces critères) - délicat de parler d'esthétique brute - tout monte en simultané : les questions d'harmonie, d'esthétique, d'équilibre, la matière, la spatialité, etc. - thème brûlant
			2.2.3 aspect économique	- jamais la garantie de rentrer dans l'enveloppe budgétaire fixée : quelques soient les précautions prises en amont. - indicateurs qui vont dire cela va être cher ou pas - confie cela à un économiste - malgré cela, il faut procéder à des ajustements. - discuter en phase esquisse dans un marché de grès à grès - discuter en phase esquisse + pour les concours
			2.2.5 accès aux données	- bibliothèque d'une agence : outil fondamental - commerciaux mais toujours avec un regard critique - référents des projets réalisés - Internet Mais toujours avec un regard critique.
			2.2.6 précisions et fiabilité données et renseignements	- se méfie de la rubrique impact environnemental d'un matériau dans la mesure où la logique d'une entreprise est de vendre. Toujours une entrée choisie qui montre l'angle avantageux du produit. - les données communiquées ne sont pas en principe des mensonges car commercialement on en peut pas ne pas être fiable. Mais il faut avoir un regard aiguisé sur ce qui n'est pas dit. Donc garder son libre arbitre (expériences, connaissances, BET).
			2.2.7 critères primordiaux	- tout doit être pris en simultané
	4.1	Démarche environnementale et pratique du projet	4.1.1 Préoccupation dans activité professionnelle	- oui
			4.1.2 Intégration	- analogie entre architecture et développement durable :

			démarche environnementale	deux approches systémiques - architectes recherchent équilibre et harmonie entre les questions des ambiances, de la composition, des usages, etc. et le développement durable recherche un équilibre entre critères environnementaux, sociaux culturels, économiques etc.
--	--	--	---------------------------	--

Thématique 2

Vers.	Id. code	N°	Thème 1	Thème 2	Propos recueillis	
V1&2	108v1&211	1.1	Etudes	1.1.1 Cursus universitaire	- architecte dplg - thèse de doctorat sur la « stratégie d'intégration de la composante énergétique dans la pédagogie du projet d'architecture » : trois mots clés ; énergie, pédagogie, architecture. Thème : savoir (scientifique) et savoir faire (architecturaux) - Habilitation à Diriger les Recherches.	
		1.2	Expériences professionnelles	1.2.1 expériences professionnelles	- urbanisme (coopération internationale en côte d'ivoire) - salarié au Brésil en tant que maître d'œuvre - installé seul puis avec associés pour maîtrise d'œuvre en France - enseignement au Brésil - enseignant – chercheur au Laboratoire bioclimatique, qui est devenu GRECO - directeur du GRECAU - activité de consultant sur questions d'énergies, d'environnement et de développement durable (AMO) : 1. activités d'AMOG dans la programmation, 2. Sollicité par équipe de maîtrise d'œuvre ponctuellement pour participer à des concours : consultants pour Moe. - très coloré par architecture solaire et bioclimatique	
					1.2.2 démarche environnementale	- AMO : oui - Archi : oui
					1.2.4 utilisation outils aide concept.	- AMO : oui - Archi : oui
		1.3	Activités professionnelles	1.3.1 activités actuelles	- directeur de l'ENSAT - AMO	
				1.3.3 phases d'intervention	- programmation, concours,	
				1.3.4 types d'intervention	- AMO : consultant	
		3.1	Pratique des outils d'aide à la conception	3.1.1 outils utilisés	- TRNSYS, et autres	
				3.1.2 intérêt outils	- maîtrise d'œuvre : intérêt pour outils qui ne sont pas des mesures de performances mais des outils qui permettent de donner des indicateurs : petits outils de simulation qui donnent des tendances. Les gros outils déclenchant dans phases avancées ne sont pas intéressants car besoin de données que l'on a que dans des phases avancées là où il n'est plus possible de revenir sur des choix initiaux : éloignée de la décision importante. (Internet) - après on utilise des codes lourds (TRNSYS) où on mesure la performance : on quantifie des phénomènes après les concours (donc après esquisse +) où on va aider à s'orienter sur plusieurs alternatives possibles. - deux types d'outils : 1. outils simples dans phases amonts permettant d'orienter les décisions et 2. outils plus performants pendant phases aval, permettant des ajustements - proposer des simulations en phase esquisse oblige l'architecte à verrouiller le projet dans une phase où l'on peut encore se laisser une marge de manœuvre. - essentiel à retenir : 1. distinguer outils qui donnent des indicateurs / tendances de ceux qui, par la simulation quantifient des performances et qui permettent de faire des ajustements pour améliorer le système 2. déficiences des outils d'aide à la conception dans les phases amonts 3. MOG veulent simulation trop tôt 4. outil a tendance à chercher l'optimisation Or l'architecte n'est pas dans une logique d'optimisation et l'optimisation globale n'est	

				jamais une accumulation d'optimisation - cruel besoin d'approche multicritère car outil monocritère va dans le sens de l'optimisation
			3.1.3 outils facilitent échanges ?	- non car l'architecte se contente d'indicateur, alors que l'ingénieur souhaite des résultats et des mesures.
			3.1.5 temps nécessaire pour l'utilisation des outils	- il faut aller très vite sinon les architectes ne l'utilisent pas et que ce soit intégrer dans le temps de conception puisque ça vient infléchir la conception en phase esquisse. - nécessité d'avoir des outils aussi convivial qu'une feuille de calque
			3.1.6 qualité graphique et qualité de compréhension	complètement
			3.1.7 conseils d'utilisation	- ouverture de ma thèse : proposer des référents est intéressant du point de vue didactique
			3.1.8 architectes utilisent outils ?	- outils utiles dans les phases avancées ne sont pas utilisés par les architectes (seulement quelques uns) mais par les ingénieurs
	3.2	Outils et projet	3.2.2 Phases d'intervention	- certains phases amonts - d'autres phases avancées - deux types d'outils : 1. outils simples dans phases amonts permettant d'orienter les décisions et 2. outils plus performants pendant phases avales, permettant des ajustements
			3.2.3 Intérêt de leur utilisation dans phases amont	- permettent de donner des indicateurs d'orienter des décisions
	3.3	Résultats obtenus	3.3.1 exploitation et compréhension	- architecte aguerri peut interpréter les résultats, mais la plupart du temps ce sont les ingénieurs
	3.4	Outils et matériaux	3.4.3 Base de données suffisamment complète	- facile de trouver les caractéristiques dont on a besoin pour déclencher la simulation car elles font parties du CV du matériau ;
	4.1	Démarche environnementale et pratique du projet	4.1.1 Préoccupation dans activité professionnelle	- oui
			4.1.2 Intégration démarche environnementale	- analogie entre architecture et développement durable : deux approches systémiques - architectes recherchent équilibre et harmonie entre les questions des ambiances, de la composition, des usages, etc. et le développement durable recherche un équilibre entre critères environnementaux, sociaux culturels, économiques etc.

Eventuels commentaires :.....
.....
.....

Q3. Pensez-vous que ce logiciel puisse rendre les choix de conception plus fiables dès la phase d'esquisse ?

pas du tout très peu peu moyennement relativement bien bien tout à fait

Eventuels commentaires :.....
.....
.....

Q4. Pensez-vous que ce logiciel puisse faciliter dès l'esquisse les échanges entre bureaux d'études et maîtres d'œuvres ?

pas du tout très peu peu moyennement relativement bien bien tout à fait

Eventuels commentaires :.....
.....
.....

INTERFACE du LOGICIEL _____

Q5. L'interface du logiciel vous paraît-elle claire ?

pas du tout très peu peu moyennement relativement bien bien tout à fait

Eventuels commentaires :.....
.....
.....

Q6. La forme du logiciel vous paraît elle conviviale (voir légèrement ludique !)?

pas du tout très peu peu moyennement relativement bien bien tout à fait

Eventuels commentaires :.....
.....
.....

DONNEES d'ENTREES du LOGICIEL _____

Q7. Les données d'entrées à renseigner (volumétrie – dispositifs/ façades – ville) sont-elles adaptées à la manière dont vous procédez à la phase d'esquisse ?

pas du tout très peu peu moyennement relativement bien bien tout à fait

Eventuels commentaires :.....
.....
.....

Q8. Les données d'entrées à renseigner (volumétrie – dispositifs/ façades – ville) sont-elles pertinentes au regard de votre manière de concevoir ?

pas du tout très peu peu moyennement relativement bien bien tout à fait

Eventuels commentaires :.....
.....
.....

Q9. Les données d'entrées à renseigner (volumétrie – dispositifs/ façades – ville) vous semblent-elles faciles à renseigner ?

pas du tout très peu peu moyennement relativement bien bien tout à fait

Eventuels commentaires :.....
.....
.....

RESULTATS du LOGICIEL _____

Q10. Les critères retenus pour l'approche globale (7 au total) vous paraissent-ils adaptés ? (voir page 3 dans le dossier « cas d'étude »)

pas du tout très peu peu moyennement relativement bien bien tout à fait

Eventuels commentaires :.....
.....
.....

Q11. Voyez-vous des manques ou des disparités dans les critères retenus ?

oui

non

Si oui lesquels ?.....
.....
.....

Q12. Concernant les deux critères approfondis (empreinte environnementale et pollution physique) pensez-vous avoir l'expertise nécessaire pour identifier d'éventuels manques ? (voir pages 4 et 5 du cas d'étude)

oui

non

Si oui lesquels ?.....
.....
.....

Q13. L'explicitation des critères (passage du curseur de la souris permet vision de définitions sous la forme de rappel) vous parait-elle nécessaire ? (voir page 3 du cas d'étude)

pas du tout très peu peu moyennement relativement bien bien tout à fait

Eventuels commentaires :.....
.....
.....

Q14. L'expression des résultats sous la forme de trois degrés de compréhension selon la précision souhaitée vous parait-elle intéressante ? (précision croissante des résultats de (1) l'approche globale à (2) l'approche détaillée puis à (3) l'approche experte)

pas du tout très peu peu moyennement relativement bien bien tout à fait

Eventuels commentaires :.....
.....
.....

Q15. L'expression des résultats dans l'approche globale et détaillée sous la forme de « tendance » vous parait-elle pertinente ? (voir page 7 du cas d'étude)

pas du tout très peu peu moyennement relativement bien bien tout à fait

Eventuels commentaires :.....
.....
.....

CONCLUSION _____

Q18. Ce logiciel vous semble t'il répondre aux attentes des concepteurs concernant les questions relatives au choix des matériaux et de leurs procédés de mise en œuvre ?

pas du tout très peu peu moyennement relativement bien bien tout à fait

Eventuels commentaires :.....
.....
.....

Q19. Quelles sont, selon vous, les lacunes du logiciel ?

Commentaires :.....
.....
.....

Q20. Quelles sont, selon vous, les améliorations à apporter ?

Commentaires :.....
.....
.....

Pour tout autre commentaire, suggestion, remarque :

.....
.....
.....
.....

Je vous remercie d'avoir consacré du temps pour répondre à ce questionnaire

Annexe 11 : Cas d'étude de l'enquête n°2

Ce document a pour objectif de présenter, à travers l'analyse d'un cas d'étude, le prototype d'outil d'aide à la conception : MaTerre'iO.

Ce prototype a été élaboré dans le cadre d'une thèse encadrée par les laboratoires :

- LMDC – INSA de Toulouse – Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions
- LRA / GRECAU – ENSA de Toulouse – Laboratoire de Recherche Architecturale : Groupe de Recherche Environnement, Conception Architecturale et Urbaine.

Le projet retenu est la Maison Galopin à Séniergues (Lot) réalisée par l'Agence Gouwy-Grima et Rames.

Ce cas d'étude a pour objectif de permettre une meilleure compréhension de notre prototype d'outil d'aide à la conception

Nous tenons tout particulièrement à remercier les architectes de l'agence Gouwy – Grima – Rames pour leur collaboration dans ce travail (mise à disposition de documents et disponibilité).

Cette étude n'est pas là pour juger de la qualité de leur ouvrage *Maison Galopin* mais pour illustrer une proposition d'outil d'aide à la conception renseignant sur l'impact des matériaux et de leurs procédés de mise en œuvre.

1. Présentation de l'outil MaTerre'iO

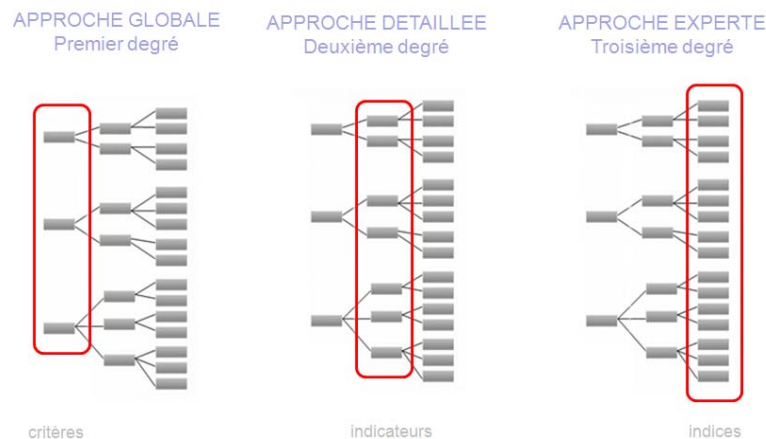
1.1 Rôle du logiciel

MaTerre'iO a pour objectif d'informer globalement les concepteurs des bâtiments architecturaux, sur les différents champs d'études explicites et relatifs à la qualité environnementale des matériaux et procédés de mise en œuvre. Il a pour but de traduire pour d'autres cultures (architecture) des connaissances nécessaires (techniques / environnementales) parfois difficiles à prendre en compte.

1.2 Principales caractéristiques du logiciel

MaTerre'iO est articulé autour de différents principes :

- Proposer une vision globale des différents critères pris en considération concernant les questions relatives au choix des matériaux. Les 7 critères retenus concernant l'approche environnementale des matériaux dans le projet architectural sont l'usage, la matérialité, le coût, la technicité, l'empreinte environnementale, la pollution physique, la réglementation et normes.
- Etre intégré au temps de conception architectural : phase esquisse.
- Proposer des résultats en fonction des attentes des différents utilisateurs. Nous avons donc mis en place une grille d'analyse multicritères en 3 degrés de compréhension : approche globale, approche détaillée et approche experte.



- Donner la possibilité à l'utilisateur, pour un même projet, de comparer 3 variantes de solutions.

1.3 La grille d'analyse multicritères retenue pour l'outil

Pour établir notre grille d'analyse multicritères, nous nous sommes basés sur un état de l'art exhaustif des connaissances et savoirs liés aux matériaux et aux questions environnementales.

L'approche globale est composée de 7 critères, eux même déclinés en indicateurs (actuellement 16) dans l'approche détaillée, eux même déclinés en indices dans l'approche experte.

ATTENTION

Dans le cadre de notre travail et aux vues du temps imparti, nous développons 2 critères : l’empreinte énergétique et la pollution physique. C’est pourquoi, dans le cadre de notre prototype d’outil, seuls ces deux critères sont développés jusqu’au niveau de l’approche experte. Les autres critères n’ont pas de résultats mentionnés.



Les 7 critères retenus qui composent l’approche globale sont les suivants. Pour chacun d’eux, une définition est proposée dans l’outil. Elle est visible par l’utilisateur en passant le curseur de la souris sur le bouton concerné.

APPROCHE GLOBALE	APPROCHE DETAILLEE	APPROCHE EXPERTE
Critères	Indicateurs	Indices
MATERIALITE	<ul style="list-style-type: none"> - Esthétique - Culture - Ambiance 	
USAGE	<ul style="list-style-type: none"> - Habitabilité - Confort thermique 	
COUT GLOBAL	<ul style="list-style-type: none"> - Coût matériaux - Coût fonctionnement 	

TECHNICITE	<ul style="list-style-type: none"> - Technique système constructif - Adaptabilité 	
<p>EMPREINTE ENERGETIQUE</p> <p><i>Impact laissé sur l'ensemble des ressources' prise en compte des différentes consommations ainsi que des profils physiques.</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> - Impact environnemental - Impact humain - Impact socio-économique des déchets 	<ul style="list-style-type: none"> - Changement climatique - Acidification atmosphérique - Pollution air - Pollution eau/sol - Destruction couche ozone stratosphérique - Formation ozone photochimique - Modification biodiversité - Humidité/microorganismes - Emissions fibres / particules - Emissions COV - Emissions radioactives - Risque cancer - Déchets valorisés - Déchets éliminés dangereux - Déchets éliminés non dangereux - Déchets inertes - Déchets radioactifs
<p>POLLUTION PHYSIQUE</p> <p><i>Introduction de substances dans l'environnement' à un point que ses effets deviennent nuisibles à la santé humaine, à celles d'autres organismes vivants, à l'environnement et/ou au climat.</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> - Consommations - Profil énergétique 	<ul style="list-style-type: none"> - Epuisement ressources - Eau - Territoires - Energies renouvelables - Energies non renouvelables
REGLEMENTATION	<ul style="list-style-type: none"> - Sécurité - Normes 	

2. Fonctionnement : Les différentes étapes d'utilisation de l'outil MaTerre'IO

Le prototype élaboré propose, à son lancement, 3 onglets :

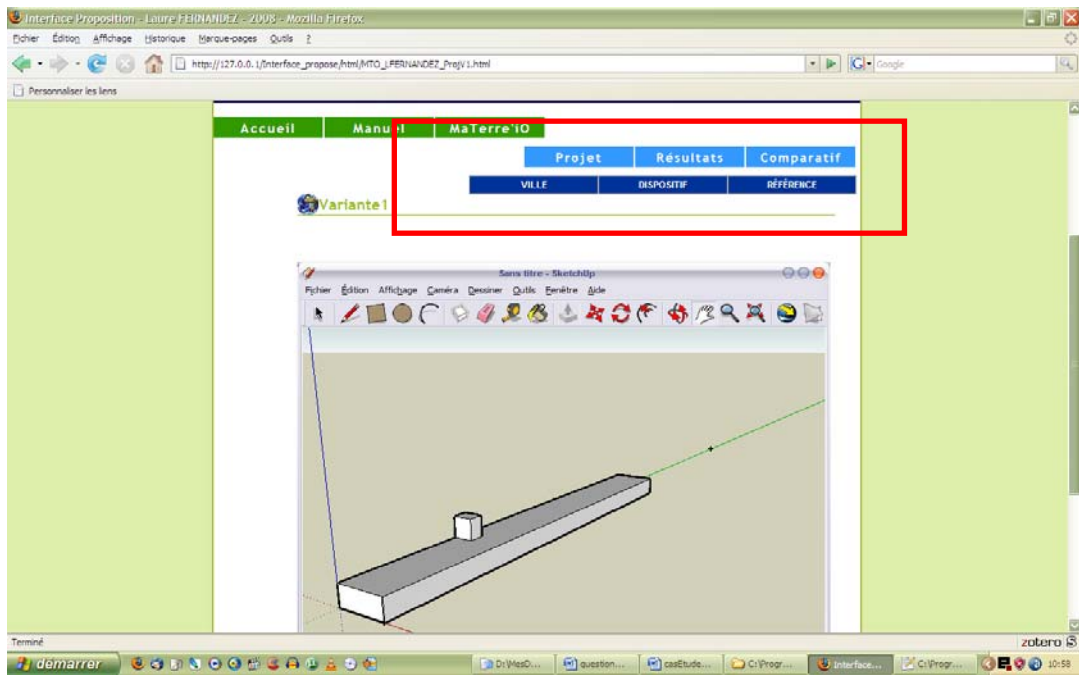
- L'onglet **ACCUEIL** : dans lequel sont détaillés : le contexte de création ainsi que le rôle de ce logiciel.
- L'onglet **MANUEL** : dans lequel sont expliquées les principales caractéristiques du logiciel ainsi que les différentes étapes de son fonctionnement.
- L'onglet **MATERRE'IO** : qui lance le logiciel (actuellement prototype).



2.1 ETAPE 1 : les données d'entrées

Les données d'entrées de ce logiciel se veulent simples et peu nombreuses :

- Charger la volumétrie simplifiée du projet réalisé à l'aide du logiciel Sketchup
- Choisir la variante (1, 2 ou 3) qui permettra par la suite de comparer les différentes solutions retenues. *Dans le cadre de notre étude, nous proposons seulement 2 variantes : la variante 1 est celle qui a été retenue par l'équipe de conception (Cf annexe 1) ; la variante 2 est une « construction dite classique » des constructions de maison individuelle (Cf annexe 2) (ceci afin de permettre des comparaisons).*
- Dans l'onglet **VILLE** : sélectionner la ville à proximité du lieu de construction.
- Sélectionner la ou les façades ayant un même dispositif et choisir le dispositif retenu dans l'onglet **DISPOSITIF**, puis **valider**. L'onglet **ajout de dispositif** situé dans l'onglet **DISPOSITIF** vous permet d'avoir accès aux différents matériaux composants la base de données (base de données mise en place au sein du GRECAU à la base d'un travail réalisé par Luc Floissac) et de pouvoir composer votre propre dispositif.
- L'onglet **REFERENCE** permettra de proposer une référence analysée par dispositif. (en cours)



Une fois les données d'entrées intégrées dans le logiciel, ceci pour une ou plusieurs variantes, vous pouvez avoir accès aux résultats en cliquant dans l'onglet **RESULTATS variante 1, 2 ou 3**.

Dans le cadre de notre cas d'étude, nous avons intégré 2 variantes différentes pour la maison Galopin (cf. Annexes 2 et 3)

2.2 ETAPE 2 : les résultats

Les résultats sont exprimés pour chacune des 3 variantes en fonction de la grille d'analyse multicritères mise en place. (cf. précédemment 2.3 La grille d'analyse multicritères)

Les résultats des 7 critères retenus dans l'approche globale ainsi que les résultats de l'approche détaillée, sont exprimés en fonction de tendances afin d'orienter rapidement le concepteur sur les choix retenus.

Les approches : détaillée et globale, découlent respectivement des résultats de l'approche experte et de l'approche détaillée. Leurs résultats sont calculés en fonction de pondérations que nous avons mises en place.

Exemple pour le critère de l’empreinte énergétique

EMPREINTE ENERGETIQUE	Consommations	2	Epuisement ressources	3
			Eau	1
			Territoires	1
	Profil énergétique	1	Energies primaires totales	2
			Energies renouvelables	1
			Energies non renouvelables	3

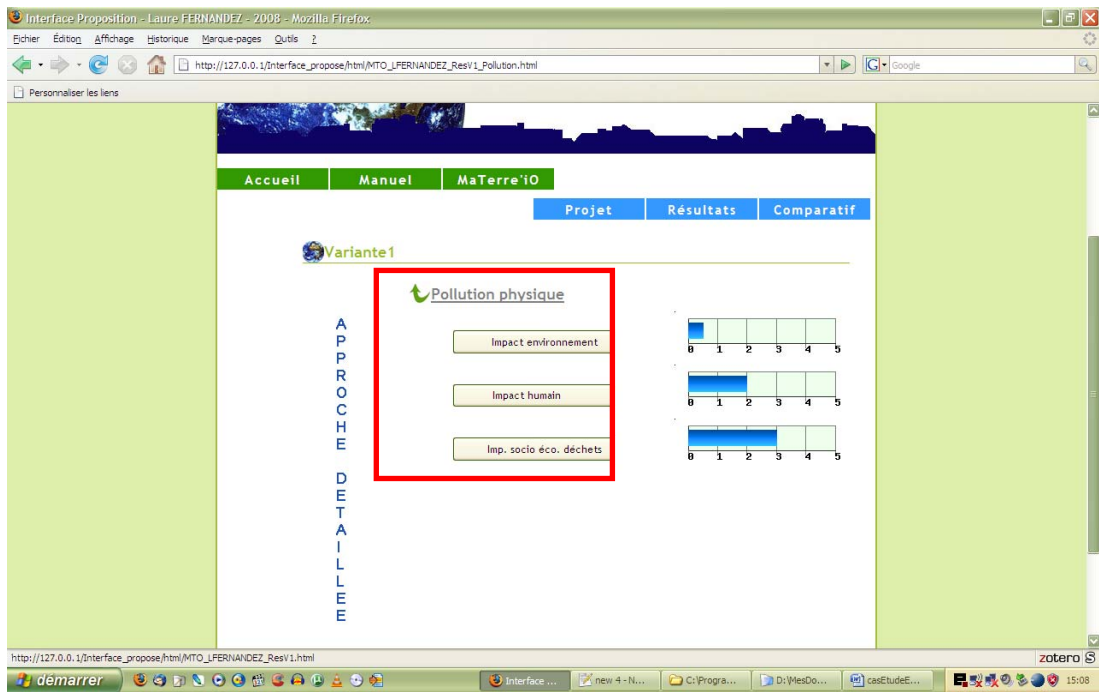
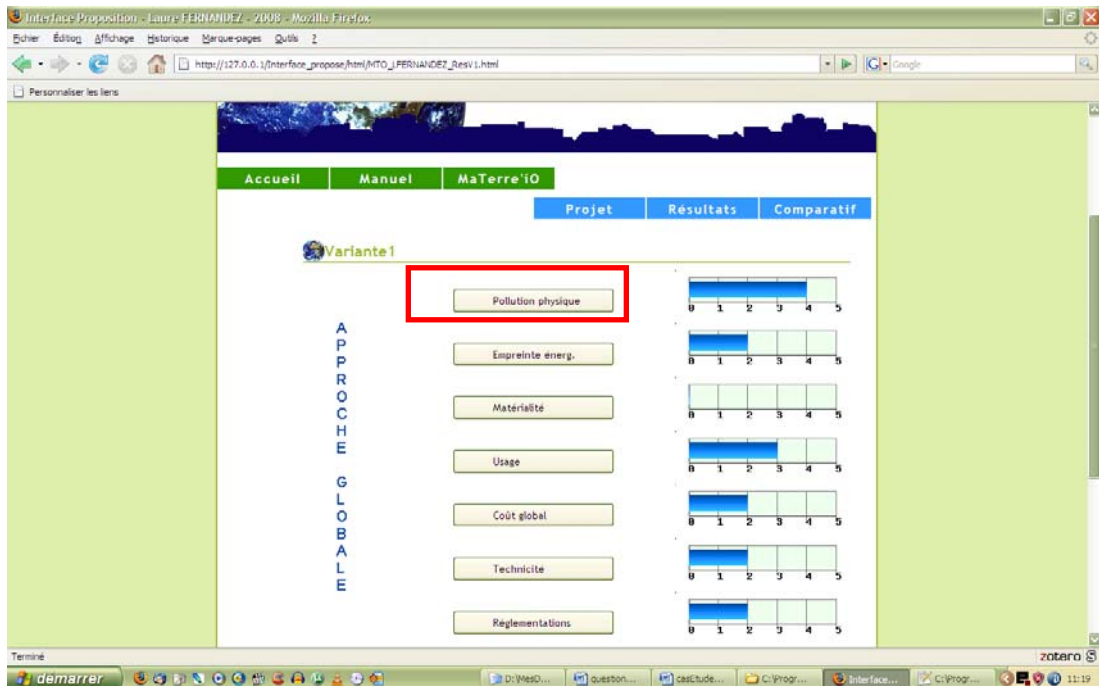
Les résultats de l’approche experte sont exprimés sous la forme de résultats chiffrés qui découlent principalement de la base de données INIES et de la base de données matériaux mise en place au sein du GRECAU et initié par Luc Floissac.

The screenshot shows a web browser window with the URL `http://127.0.0.1/Interface_propose/html/MTO_LFERNANDEZ_ResV1_Pollution_Env.html`. The page title is "Interface Proposition - Laure FERNANDEZ - 2008 - Mozilla Firefox". The main content area is titled "Pollution physique" and "Impact environnement". A red box highlights the following text: "Ces valeurs concernent 1m² de l'ensemble des dispositifs du bâtiment considéré (enveloppe, plancher, toiture) pour l'ensemble du cycle de vie des produits." Below this, a table lists environmental impact metrics:

changement climatique :	41,349 keqCO2
acidification atmosphérique :	0,223 keqSO2
pollution air :	4701,63 m3
pollution eau/sol :	4793,187 m3
destruction couche ozone stratosphérique :	NR keqCFC
formation ozone photochimique :	6,441 keqE
modification biodiversité :	NR

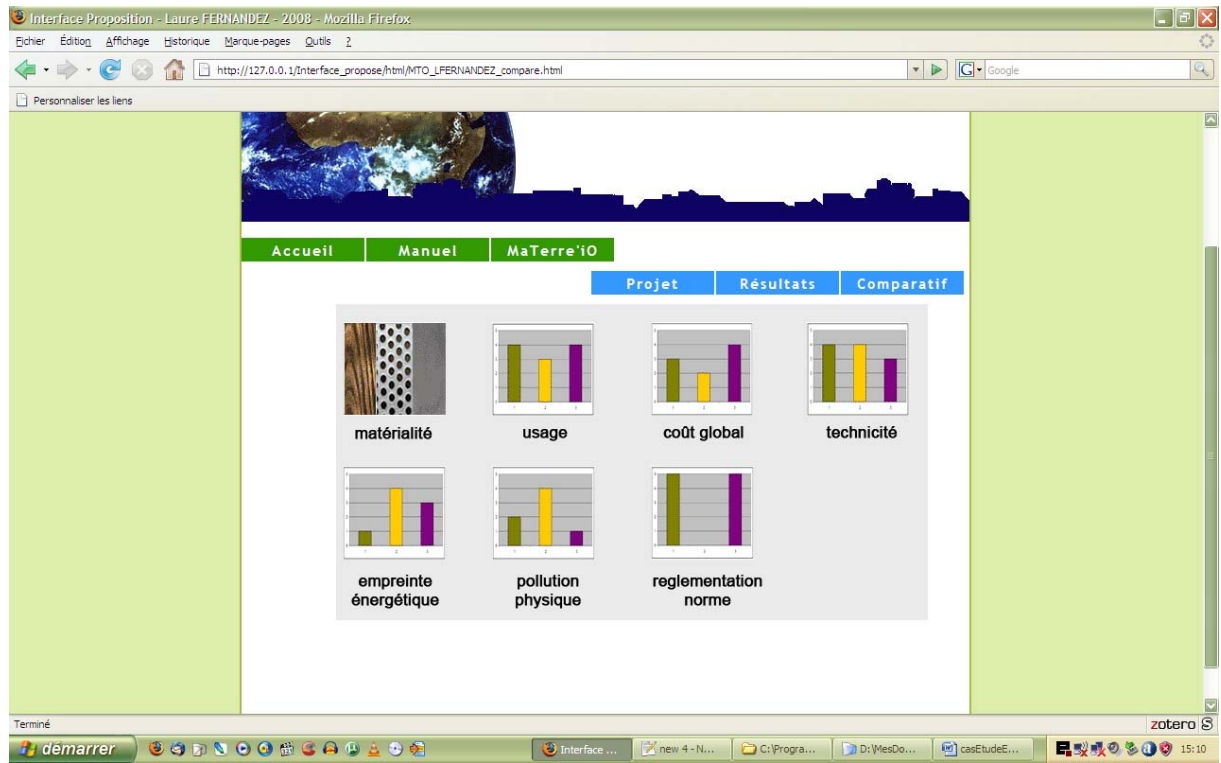
Les résultats bleus sont ceux dont l’ensemble des données concernant le dispositif sont accessibles. Dans le cas où des données sont manquantes, les résultats sont exprimés en rouge.

Si le concepteur le souhaite, il peut approfondir chacun des critères en cliquant sur le critère concerné afin d'avoir accès à l'approche détaillée qui décline le critère retenu en indicateurs. De même, pour avoir accès à l'approche experte, il suffit de cliquer sur l'indicateur concerné afin d'accéder aux différents indices composant l'approche experte.



2.3 ETAPE 3 : comparatif

Le logiciel offre la possibilité de comparer 3 variantes au niveau de l'approche globale. Pour cela, il suffit de cliquer sur l'onglet **COMPARATIF** qui propose différents graphiques mettant en parallèle les divers résultats de l'approche globale.



Cet onglet met donc en parallèle les résultats des 7 critères retenus pour l'ensemble des 3 variantes renseignées par l'utilisateur et propose une vue d'ensemble des solutions étudiées.

Conclusion

Le logiciel MaTerre'iO n'a pas pour prétention de donner LA solution, mais d'indiquer les avantages et inconvénients des dispositifs choisis en fonction des critères retenus concernant la qualité environnementale des matériaux et procédés de mise en œuvre, ceci dès les premières phases du processus de conception (phase esquisse).

Si vous le souhaitez, vous pouvez naviguer dans la maquette du logiciel actuellement en ligne sur <http://enquetemateriaux.com>

Login : materreio

Password : outil

Je vous remercie d'avoir lu attentivement ce document et vous serais reconnaissante de bien vouloir remplir le questionnaire joint dans ce mail.

Laure FERNANDEZ

Doctorante

06.09.84.92.73 ou 05.62.11.50.48

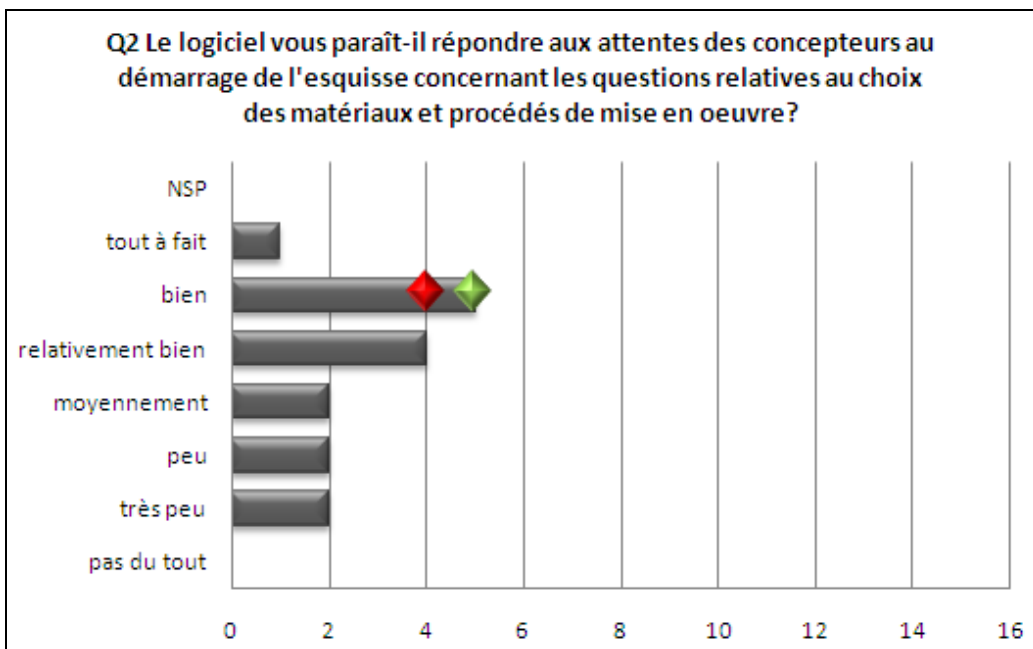
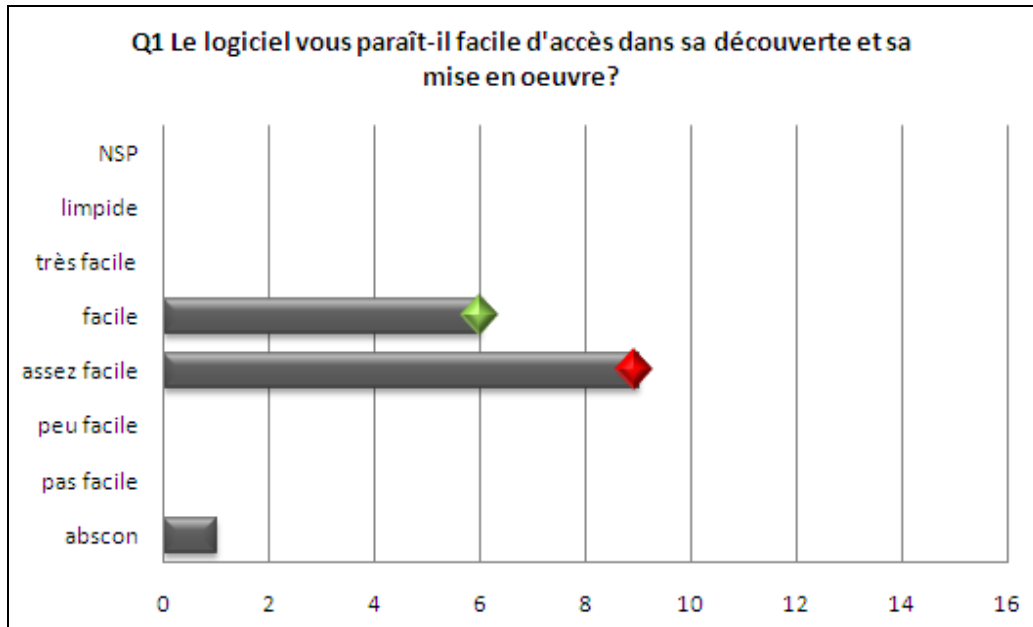
laure.fernandez@toulouse.archi.fr

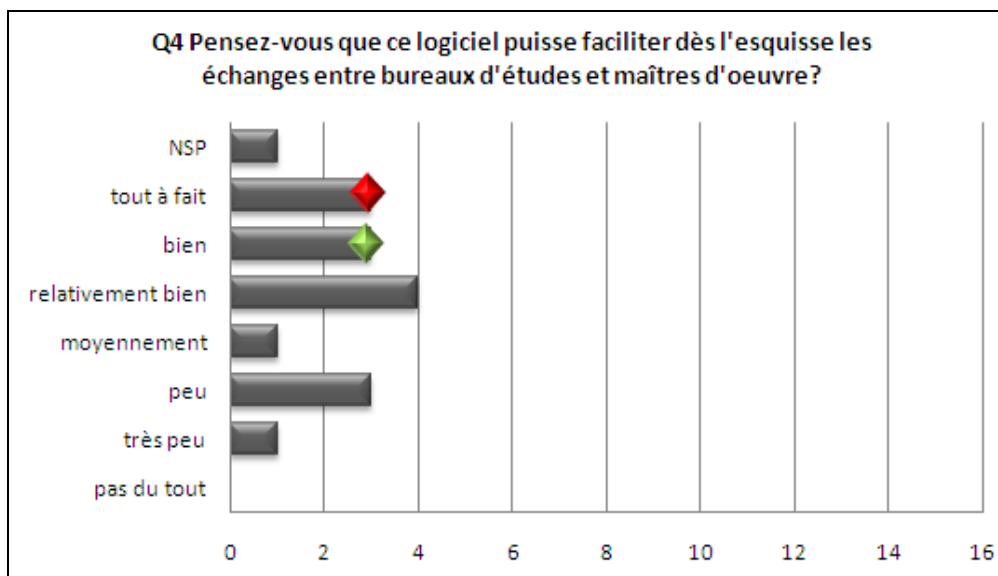
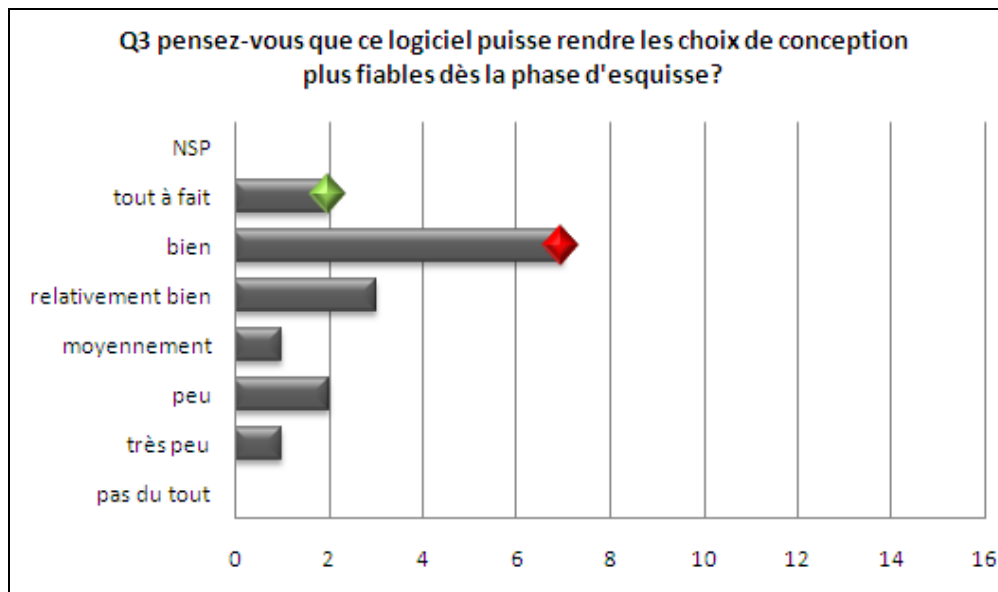
ENSA – LRA / GRECAU - 83 rue Aristide Maillol – BP 10 629 – 31 106 TOULOUSE cedex 1

Annexe 12 : Résultats de l'enquête n°2

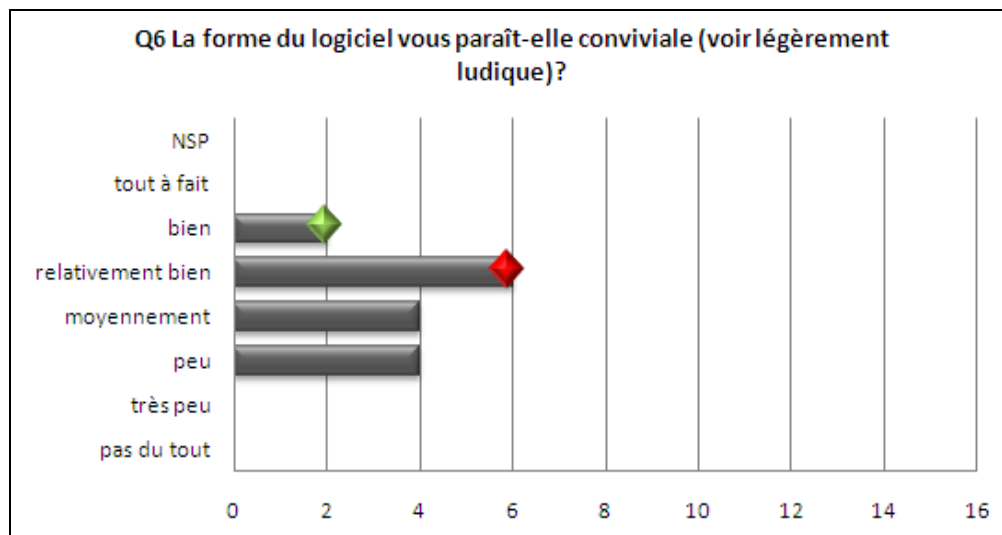
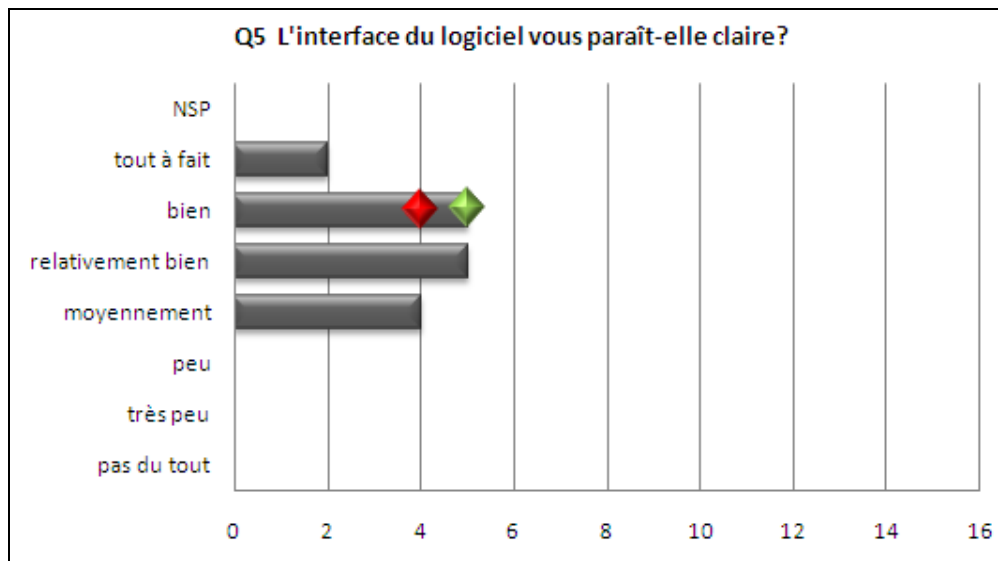
Les graphiques présentent les résultats donnés par les 16 concepteurs questionnés. Les points vert et rouge représentent les réponses obtenus auprès des deux maîtres d'œuvres utilisant des outils d'aide à la conception dans leur activité professionnelle.

Questions relatives au logiciel MaTerre'iO

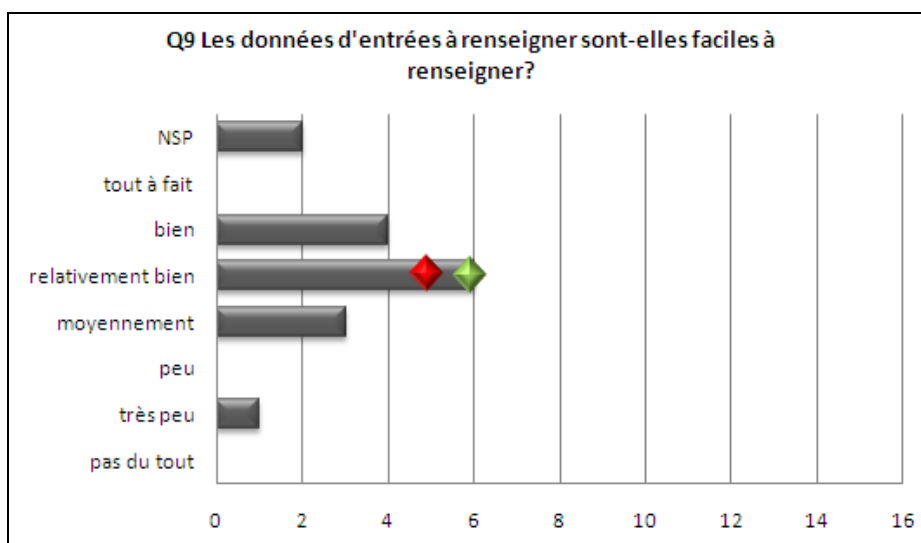
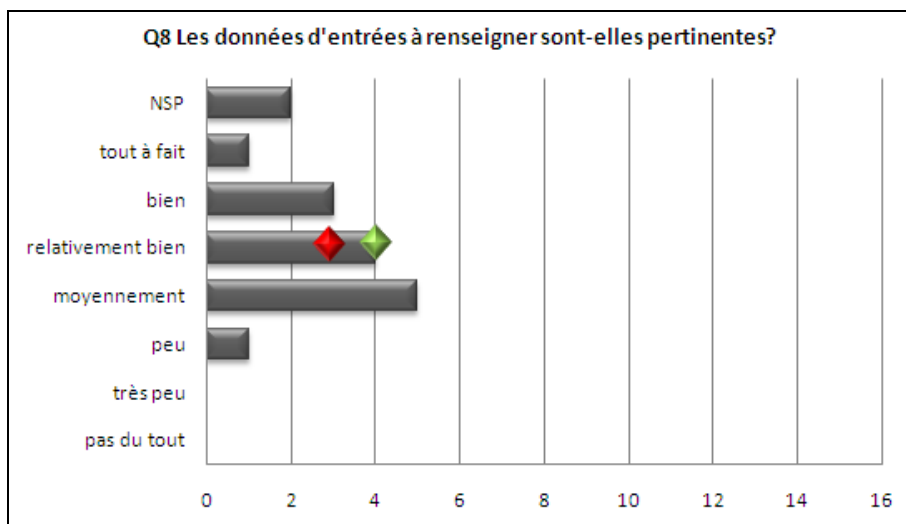
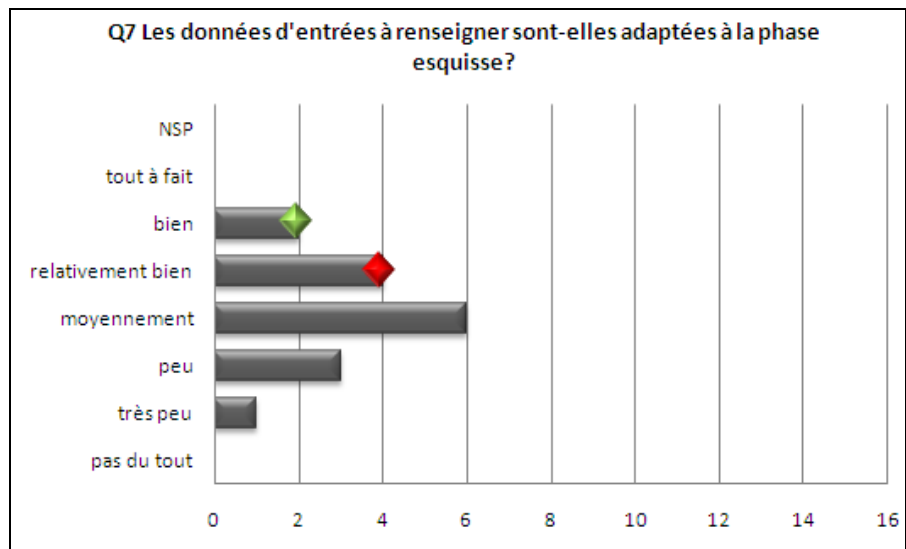




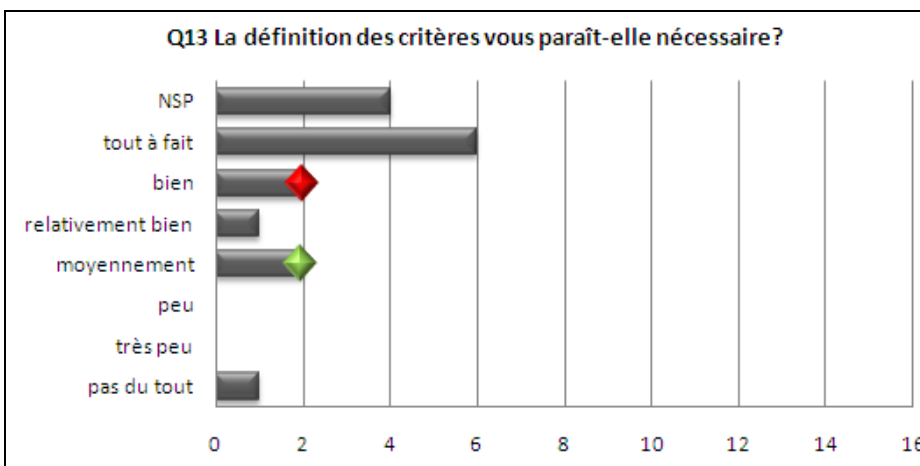
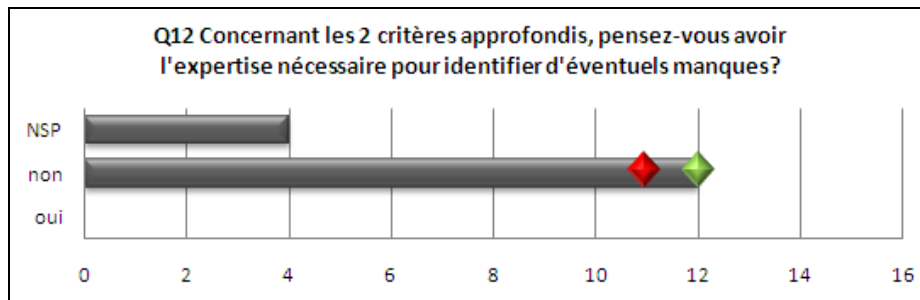
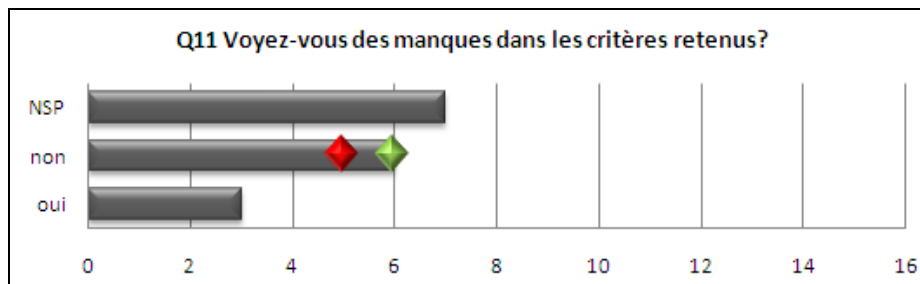
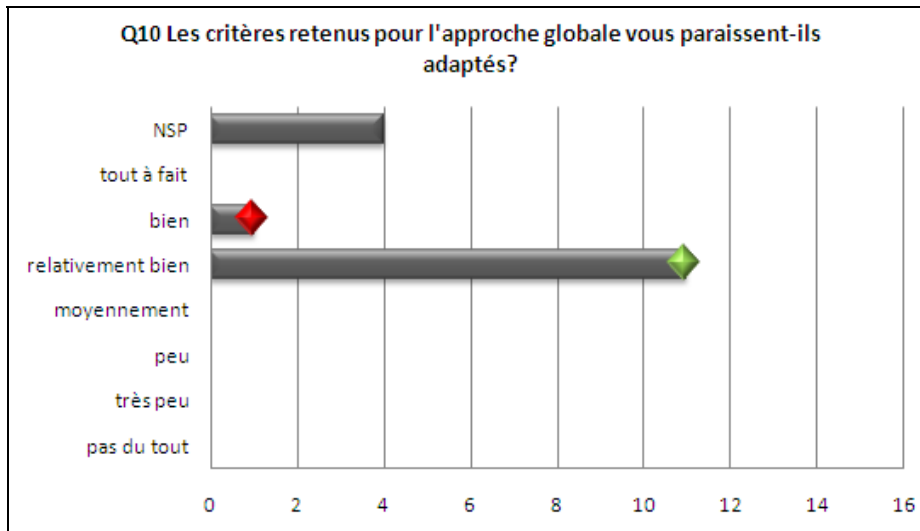
Questions relatives à l'interface du logiciel MaTerre'iO

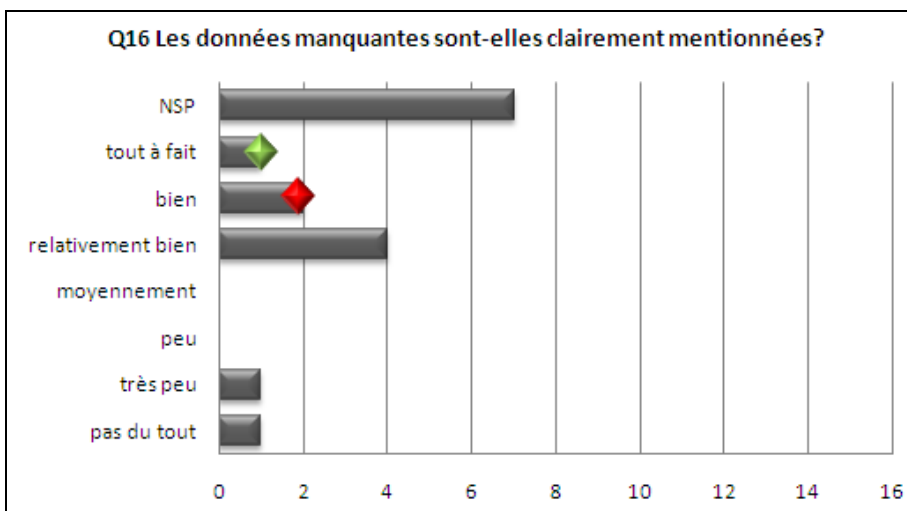
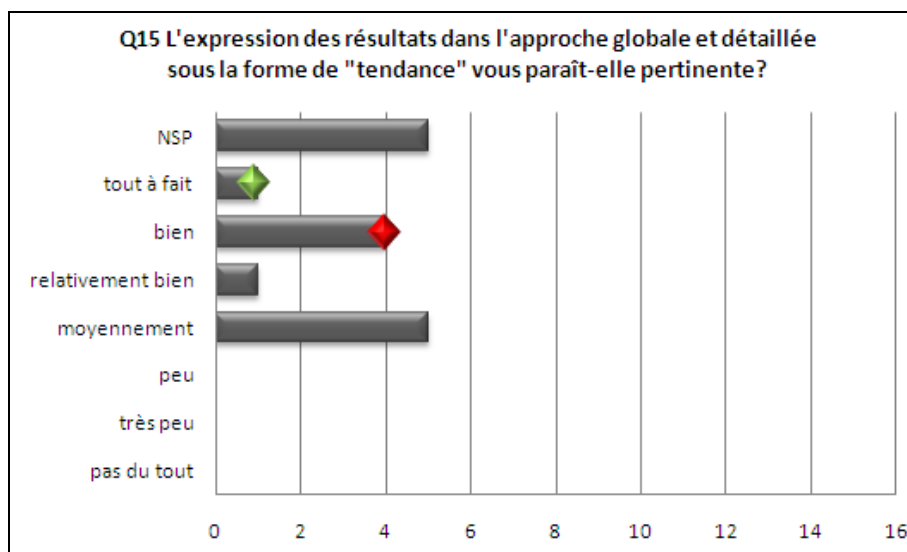
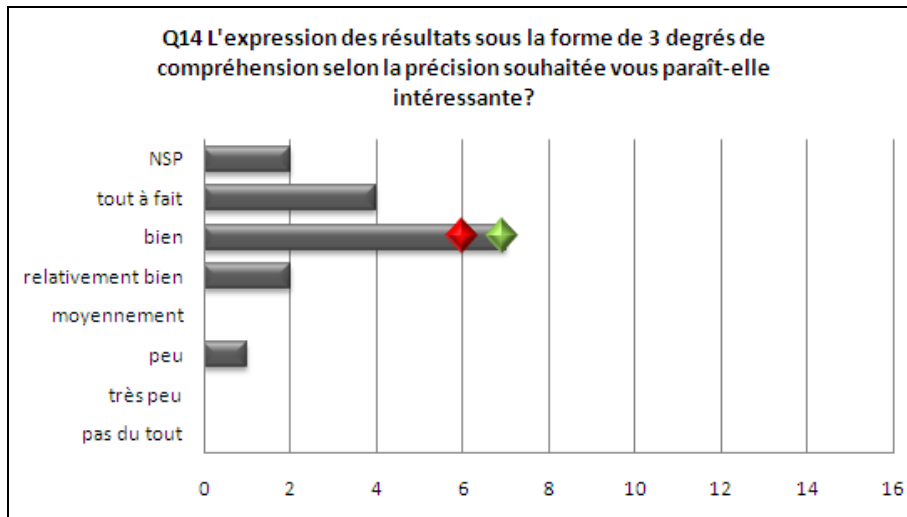


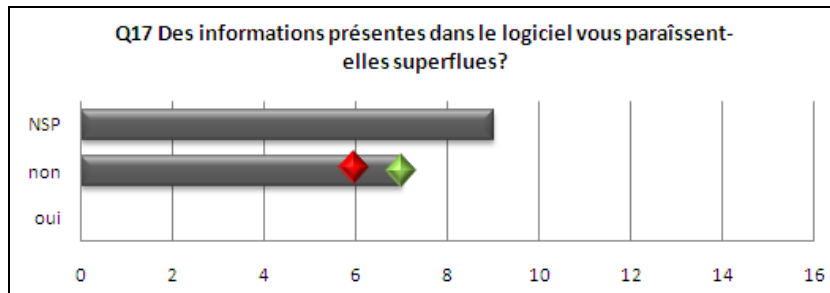
Questions relatives aux données d'entrées du logiciel MaTerre'iO



Questions relatives aux résultats du logiciel MaTerre'iO







Avis général de l'outil

