

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMME EXIGENCE PARTIELLE
À L'OBTENTION DE LA
MAÎTRISE EN GÉNIE DE LA CONSTRUCTION
M. Ing.

PAR
ROND, Thierry

APPROCHE INFORMATISÉE D'AIDE À LA SÉLECTION DES SYSTÈMES
STRUCTURAUX LORS DU DESIGN CONCEPTUEL DES BÂTIMENTS

MONTRÉAL, LE 05 SEPTEMBRE 2007

© Thierry Rond, 2007

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Hugues Rivard, directeur de mémoire
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Claude Bédard, codirecteur de mémoire
Doyen à la recherche et au transfert technologique à l'École de technologie supérieure

Mme Marie-José Nollet, président du jury
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

Mme Sylvie Boulanger, membre du jury
Directrice générale de l'ICCA-Québec

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 30 AOÛT 2007

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier mes directeurs de recherche M. Hugues Rivard et M. Claude Bédard pour leur aide tout au long de l'étude, leurs conseils judicieux et leur support financier.

APPROCHE INFORMATISÉE D'AIDE À LA SÉLECTION DES SYSTÈMES STRUCTURAUX LORS DU DESIGN CONCEPTUEL DES BÂTIMENTS

ROND, Thierry

RÉSUMÉ

Le design conceptuel est l'une des premières étapes de la conception des bâtiments. Durant cette étape, les ingénieurs doivent déterminer les systèmes structuraux en fonction de la morphologie du bâtiment, des exigences de conception dues à la fonction du bâtiment et des contraintes associées au contexte du projet. Ce choix a d'importants impacts sur la suite de la conception et détermine une grande partie des coûts associés à la construction et au cycle de vie du bâtiment. Le problème est qu'en pratique, les ingénieurs n'ont pas de méthode informatisée pour la sélection des systèmes structuraux et utilisent plutôt leur intuition et leur expérience.

Les outils commerciaux permettent de concevoir les bâtiments à un très haut niveau de détail, mais ne sont pas adaptés au design conceptuel. Quant aux recherches menées sur l'optimisation (selon des critères variés) de la conception en phases préliminaires, elles proposent toutes, à quelques exceptions près, de substituer le rôle de l'ingénieur par des systèmes d'intelligence artificielle.

Cette étude propose d'assister les ingénieurs dans le choix des systèmes structuraux en phase de design conceptuel à l'aide d'une approche informatisée. L'application dispose d'une base de connaissances contenant des règles portant sur la sélection des systèmes structuraux, ce qui lui permet de conseiller l'utilisateur dans les choix structuraux. On a choisi, pour développer le prototype, de continuer les travaux menés sur le module DKM (Fortin 2006; Parent 2006). Les connaissances portant sur la conception de la structure des bâtiments sont modélisées sous la forme de règles *si-alors* organisées en processus décisionnels. L'utilisateur contrôle les nœuds décisionnels ce qui lui permet de maîtriser la conception des systèmes structuraux. L'approche proposée dans le cadre de cette étude est validée lors de l'évaluation de l'utilisation du prototype sur deux projets concrets de construction de bâtiments.

Mots-clés : Conception, Design conceptuel, Bâtiment, Système structural, Système de base de connaissances.

COMPUTERIZED APPROACH TO ASSIST THE SELECTION OF STRUCTURAL SYSTEMS DURING CONCEPTUAL BUILDING DESIGN

ROND, Thierry

ABSTRACT

Conceptual design is one of the first stages of building design. During this phase, structural engineers have to select structural systems according to the project context, the building morphology and its use. This choice has a significant impact on the building design and establishes a large part of the construction and life-cycle costs. However, in practice, engineers do not use computerized methods to select structural systems but rather their intuition and experience.

Commercial software allows engineers to design buildings up to a high level of detail, but current software is not adequate for the conceptual design. Academic projects focus on the design optimization during preliminary stages and often substitute the engineers with artificial intelligence systems.

The present study develops a software application to assist engineers while choosing structural systems during the conceptual design stage. The program accesses a knowledge base that gives advice to the user during the selection of structural systems. The prototype is based on the work of the DKM module (Fortin 2006; Parent 2006). Knowledge about the design of building structures takes the form of *if-then* rules organized in decision trees. The user controls the execution of rules which allows him to remain in control of the design of structural systems. The approach proposed in the present study is validated through the evaluation of the prototype with two real construction projects.

Key-words: Design, conceptual design, building, structural systems, knowledge-based system.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
REMERCIEMENTS	III
RÉSUMÉ	IV
ABSTRACT	V
LISTE DES TABLEAUX	XI
LISTE DES FIGURES	XII
CHAPITRE 1 INTRODUCTION	1
1.1 Problématique	1
1.2 Objectif principal	1
1.3 Limites de l'étude	2
1.4 Organisation du mémoire	3
CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE	5
2.1 Les étapes de la conception	5
2.2 Les impacts du design conceptuel	7
2.3 Les problèmes de la conception	9
2.4 Les logiciels de conception structurale	11
2.4.1 Modélisation structurale	11
2.4.2 Outils de support du concepteur	12
2.5 Les systèmes experts	13
2.5.1 Définitions des systèmes experts	14
2.5.2 Architecture des systèmes experts	15
2.5.3 La base de connaissances	16
2.5.4 Le moteur d'inférence	18
2.5.5 Exemples de systèmes experts	21
2.6 Les systèmes de raisonnement par cas	25
2.6.1 Définition et caractéristiques	25
2.6.2 Description du cycle de raisonnement par cas	26
2.6.3 Exemples de systèmes de raisonnement par cas	28
2.7 Les algorithmes génétiques	31
2.7.1 Présentation	31
2.7.2 Exemples de systèmes de conception par algorithmes génétiques	32
2.8 Les réseaux de neurones artificiels	33
2.8.1 Présentation	33
2.8.2 Exemple de système basé sur des réseaux de neurones artificiels	34
2.9 Comparaison entre les différents systèmes d'intelligence artificielle présentés	34
2.10 La conception intégrée	36

2.10.1	IDBE	36
2.10.2	SEED.....	38
2.10.3	EsQUIsE, StAr et DKM	40
2.11	Conclusions.....	43
CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE ET OBJECTIFS.....		45
3.1	Évaluation du DKM après sa première implémentation	45
3.1.1	Contexte.....	45
3.1.2	Commentaires.....	46
3.1.3	Conclusions	47
3.2	Objectifs secondaires.....	48
3.2.1	Faire un outil pédagogique	48
3.2.2	Compléter les connaissances du DKM	48
3.2.3	Créer un module de StAr	49
3.3	Présentation des outils d'implémentation	49
3.3.1	Java.....	49
3.3.2	La librairie JUNG.....	51
3.3.3	Caché.....	51
3.4	Méthodologie de recherche	52
CHAPITRE 4 PROCESSUS DÉCISIONNEL EN PHASE DE DESIGN CONCEPTUEL ...		54
4.1	Présentation du processus décisionnel déjà implémenté dans le DKM	54
4.2	Processus décisionnel augmenté pour le DKM	56
4.3	Présentation des systèmes structuraux couramment utilisés.....	58
4.4	Détermination des caractéristiques du bâtiment	62
4.4.1	Le nombre d'étages du bâtiment	63
4.4.2	Choix entre un système unidirectionnel ou un système bidirectionnel	67
4.4.3	Les portées des travées horizontales	67
4.4.4	L'usage des espaces	69
4.4.5	L'intensité des charges vives.....	69
4.4.6	Les caractéristiques du projet	72
4.4.7	L'usage prévu du bâtiment	72
4.4.8	Calcul du niveau d'aptitude.....	75
4.5	La sélection des sous-systèmes verticaux	78
4.5.1	Lien entre les sous-systèmes horizontaux et verticaux.....	79
4.5.2	Le nombre d'étages du bâtiment	83
4.5.3	Les caractéristiques du projet	83
4.5.4	Calcul du niveau d'aptitude.....	83
4.6	Calcul de l'excentricité.....	85
4.6.1	Calcul du poids propre.....	85
4.6.2	Calcul de la pression du vent.....	85
4.6.3	Rappel du calcul de l'excentricité	87
4.7	Choix des éléments structuraux	88
4.8	Conclusion.....	88
CHAPITRE 5 IMPLÉMENTATION DU LOGICIEL		90

5.1	Présentation de l'interface.....	90
5.2	Communication entre la base de données Caché et le DKM.....	93
5.2.1	Lecture et sauvegarde des données – persistance des classes	93
5.2.2	Les paquetages de Caché.....	94
5.3	La modélisation des entités structurales – le paquetage <code>cacheEntities</code>	96
5.3.1	Description du modèle représentant les propriétés du projet et du bâtiment – la superclasse <code>BuildingProperty</code>	98
5.3.2	Description du modèle représentant les entités structurales – la superclasse <code>BuildingEntity</code>	100
5.3.3	Description du modèle représentant les grilles structurales – la superclasse <code>Grid</code>	102
5.4	Mécanismes d'inférence associés aux connaissances dans le DKM.....	102
5.4.1	Les nœuds décisionnels	102
5.4.2	Le processus décisionnel	104
5.4.3	Représentations et interactions associées aux processus décisionnels	104
5.4.4	Mécanismes d'inférence associés au changement de l'état applicable des nœuds décisionnels	105
5.4.5	Application des nœuds décisionnels	107
5.5	Description des nœuds associés aux connaissances portant sur la sélection des systèmes structuraux.....	107
5.5.1	<code>StAr</code>	109
5.5.2	Géométrie du bâtiment.....	109
5.5.3	Nombre d'étages	110
5.5.4	Détermination de l'usage du bâtiment	111
5.5.5	Détermination des caractéristiques du projet	112
5.5.6	Détermination des charges vives.....	113
5.5.7	Détermination de la charge due au vent	114
5.5.8	Détermination du poids propre.....	115
5.5.9	Sélection des sous-systèmes structuraux	116
5.5.10	Évaluation de l'excentricité.....	118
5.5.11	Sélection des éléments structuraux	119
5.6	Création du modèle structural – le programme <code>PrototypeBuilder</code> et le paquetage <code>tablesSystemes</code>	121
5.7	Lien entre les processus implémentés dans le DKM.....	123
5.8	Conclusion.....	124
CHAPITRE 6 TEST ET VALIDATION		125
6.1	Présentation du projet de Maison du développement durable	125
6.1.1	L'équipe de conception.....	126
6.1.2	Le projet.....	127
6.1.3	Résumé de l'étude comparative des systèmes structuraux	130
6.2	Application du DKM sur le projet de Maison du développement durable	130
6.2.1	Initialisation du DKM.....	131
6.2.2	Modélisation du bâtiment sous Caché	131
6.2.3	Affichage de l'arbre décisionnel	134

6.2.4	Définition des caractéristiques du projet	135
6.2.5	Sélection des sous-systèmes structuraux	139
6.2.6	Évaluation de la stabilité du bâtiment.....	144
6.2.7	Sélection des éléments et des assemblages structuraux.....	146
6.2.8	Suite de la conception	147
6.2.9	Conclusions sur l'utilisation du DKM pour le projet de Maison de développement durable.....	151
6.3	Présentation du projet de phase 4 de l'ÉTS	152
6.4	Application du DKM au projet de phase 4 de l'ÉTS.....	154
6.4.1	Modélisation du bâtiment sous Caché	154
6.4.2	Modélisation du bâtiment dans le DKM.....	155
6.4.3	Définition des caractéristiques du projet	156
6.4.4	Sélection des sous-systèmes structuraux	158
6.4.5	Évaluation de la stabilité du bâtiment.....	159
6.4.6	Sélection des éléments et assemblages structuraux	160
6.4.7	Suite de la conception	161
6.4.8	Conclusions sur l'utilisation du DKM pour le projet de phase 4 de l'ÉTS ..	164
6.5	Évaluation.....	165
6.5.1	Sur les résultats de l'application du DKM lors du processus de sélection des systèmes structuraux	165
6.5.2	Sur le soutien d'utilisateurs peu expérimentés lors du processus de sélection des systèmes structuraux.....	166
6.5.3	Sur le soutien d'utilisateurs expérimentés lors du processus de sélection des systèmes structuraux	167
6.5.4	Sur l'intégration du DKM avec d'autres logiciels complémentaires	167
6.5.5	Sur l'implémentation d'un processus décisionnel intervenant plus en amont dans la conception	168
6.6	Conclusions.....	169
CHAPITRE 7 SOMMAIRE, CONTRIBUTIONS ET SUGGESTIONS		170
7.1	Sommaire	170
7.2	Contributions.....	173
7.2.1	Recherche et synthèse de connaissances portant sur le design conceptuel des bâtiments.....	173
7.2.2	Définition d'une méthodologie de sélection des systèmes structuraux en phase de design conceptuel	174
7.2.3	Calcul du niveau d'aptitude des systèmes structuraux	174
7.2.4	Interprétation des nœuds décisionnels	175
7.2.5	Implémentation d'un nouveau processus décisionnel dans le DKM	175
7.2.6	Modifications du DKM.....	175
7.3	Suggestions pour les recherches futures.....	176
7.3.1	Interaction entre le DKM et StAr	176
7.3.2	Création d'un éditeur de processus et de nœuds décisionnels.....	177
7.3.3	Développement de la base de connaissances	177

ANNEXE I PROCESSUS DÉCISIONNEL ASSOCIÉ AU DESIGN CONCEPTUEL DES SYSTÈMES STRUCTURAUX.....	178
I.1 Exemple du nœud décisionnel associé à la spécification du poids propre	178
I.2 La méthode <code>apply()</code>	178
I.3 La méthode <code>isApplicable()</code>	180
ANNEXE II MANUEL D'AIDE DU PROCESSUS DÉCISIONNEL ASSOCIÉ AU PROCESSUS DE SÉLECTION DES SYSTÈMES STRUCTURAUX	181
II.1 Exemple de la page sommaire.....	181
II.2 Exemple de la page consacrée à la spécification de la localisation du bâtiment et de la pression du vent.....	182
ANNEXE III MODIFICATIONS DE LA MÉTHODE DE VISUALISATION DU MODÈLE STRUCTURAL DANS LE DKM	184
ANNEXE IV MODIFICATIONS DU PROCESSUS DÉCISIONNEL ASSOCIÉ AUX DALLES – LIEN AVEC LE PROCESSUS DE DESIGN CONCEPTUEL DES SYSTÈMES STRUCTURAUX.....	187
IV.1 Modification des nœuds décisionnels portant sur le cheminement des charges – l'exemple de la classe associée cheminement bidirectionnel <code>Dec_DirectionelBidirectionnel</code>	187
IV.2 Modification des nœuds décisionnels portant sur le choix du matériau – l'exemple de la classe associée à l'acier <code>Dec_MaterielAcier</code>	188
IV.3 Modification des nœuds décisionnels portant sur le choix du type de dalle – l'exemple de la classe associée à la dalle en béton sur tablier métallique supporté par des poutres ajourées en acier et des poutres en I <code>Dec_ConcreteSlabSteelDeckOpenWebJoistWBeam</code>	189
BIBLIOGRAPHIE	191

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau I	Une table O.-A.-V. 18
Tableau II	Nombre d'étages maximum d'un bâtiment en fonction du sous-système horizontal utilisé 66
Tableau III	Portées recommandées pour différents sous-systèmes horizontaux (Schodek 2001; Allen et Iano 2006) 68
Tableau IV	Charges vives associées à l'occupation des espaces (International Code Council 2000; Conseil national de recherches du Canada 2006a) 70
Tableau V	Charges vives admissibles conseillées pour différents sous-systèmes horizontaux (Allen et Iano 2006)..... 71
Tableau VI	Sous-systèmes horizontaux conseillés en fonction des caractéristiques du projet (Allen et Iano 2006)..... 73
Tableau VII	Sous-systèmes horizontaux conseillés en fonction de l'usage du bâtiment (Allen et Iano 2006)..... 74
Tableau VIII	Correspondance entre les sous-systèmes verticaux et horizontaux 80
Tableau IX	Nombre d'étages maximums d'un bâtiment en fonction du système vertical utilisé 83
Tableau X	Sous-systèmes verticaux conseillés en fonction des caractéristiques du projet (Allen et Iano 2006)..... 84
Tableau XI	Portées recommandées des différents éléments horizontaux (Schodek 2001; Allen et Iano 2006)..... 89
Tableau XII	Synthèse du calcul du niveau d'aptitude pour les dalles de béton sans nervure bidirectionnelles..... 143

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1	Approche descendante (Mora et al. 2006) 6
Figure 2	Impact des décisions par rapport aux ressources (Rivard 2006) 8
Figure 3	Différents points de vue d'un bâtiment : (a) la structure, (b) les espaces, (c) l'enveloppe (Bailey et Smith 1994) 9
Figure 4	Architecture d'un système expert 16
Figure 5	Chaînage avant 19
Figure 6	Chaînage arrière 20
Figure 7	Cycle de raisonnement par cas (Aamodt et Plaza 1994) 26
Figure 8	Adaptation de la topologie (Bailey et Smith 1994) 30
Figure 9	Nombre d'apparition des différents types de pont en fonction de la portée (Zhao et al. 2001) 34
Figure 10	Architecture de IDBE (Fenves et al. 1990) 37
Figure 11	Architecture de SEED (Fenves et al. 2000) 38
Figure 12	Le gestionnaire des connaissances de SEED (Fenves et al. 2000) 39
Figure 13	EsQUIsE (Leclercq 2002) 41
Figure 14	Vue structurale de StAr (Mora et al. 2006) 42
Figure 15	Processus décisionnel associé aux dalles de béton sur tablier métallique supporté par des poutrelles ajourées (Parent 2006b) 55
Figure 16	Processus décisionnel associé aux dalles plates de béton avec abaques (Parent 2006b) 56
Figure 17	Processus décisionnel associé à la sélection des sous-systèmes et des éléments structuraux 57
Figure 18	Construction à ossature de bois (à gauche) et construction à poutres et poteaux (à droite) (Conseil canadien du bois 1989) 62

Figure 19	Déflexion (Δ) d'un bâtiment soumis aux charges horizontales (H) (Lin et Stotesbury 1988).....	64
Figure 20	Loi de calcul du score d'aptitude (en ordonnée) en fonction du nombre d'étages (en abscisse).....	75
Figure 21	Loi de calcul du score d'aptitude (en ordonnée) en fonction de la portée à franchir (en abscisse).....	77
Figure 22	Forces appliquées au bâtiment (Lin et Stotesbury 1988).....	88
Figure 23	Coefficients de reprise de charge (Lin et Stotesbury 1988).....	88
Figure 24	Interface principale du DKM.....	91
Figure 25	Représentation des entités structurales dans le DKM.....	92
Figure 26	Séparation du stockage des données et des logiciels (Fortin 2006).....	93
Figure 27	La modélisation structurale.....	97
Figure 28	Processus décisionnel lié à la sélection des systèmes structuraux.....	108
Figure 29	Fenêtre <i>Géométrie du bâtiment</i>	110
Figure 30	Fenêtre <i>Nombre d'étages</i>	111
Figure 31	Fenêtre <i>Usage</i>	111
Figure 32	Fenêtre <i>Caractéristiques</i>	113
Figure 33	Fenêtre <i>Intensité des charges vives</i>	114
Figure 34	Fenêtre <i>Charge due à la pression du vent</i>	115
Figure 35	Fenêtre <i>Localisation du bâtiment</i>	115
Figure 36	Fenêtre <i>Poids propre</i>	116
Figure 37	Fenêtre <i>Sous-systèmes horizontaux</i>	117
Figure 38	Fenêtre <i>Sous-systèmes verticaux</i>	118
Figure 39	Fenêtre <i>Excentricité</i>	119
Figure 40	Fenêtre <i>Éléments structuraux</i>	120
Figure 41	Modélisation des grilles structurales.....	123

Figure 42	Présélection des nœuds décisionnels du processus décisionnel associé aux dalles.....	124
Figure 43	Vue extérieure du projet de Maison du développement durable (MDD) (Menkès Shooner Dagenais Letourneaux Architectes 2007).....	127
Figure 44	MDD : Grille structurale [mm] (Niveau 1) (Menkès Shooner Dagenais Letourneaux Architectes 2007).....	128
Figure 45	MDD : Modélisation du bâtiment : fenêtre principale du DKM	134
Figure 46	MDD : Arbre décisionnel initial	135
Figure 47	MDD : Récupération de la géométrie du bâtiment.....	136
Figure 48	MDD : Mise à jour des détails et de l'historique.....	136
Figure 49	MDD : Confirmation du nombre d'étages	137
Figure 50	MDD : Spécification de l'usage du bâtiment.....	137
Figure 51	MDD : Spécification des caractéristiques du projet.....	138
Figure 52	MDD : Spécification de l'intensité des charges vives.....	139
Figure 53	MDD : Sélection des sous-systèmes horizontaux.....	140
Figure 54	MDD : Sélection des sous-systèmes verticaux	141
Figure 55	MDD : Saisie de la charge due à la pression du vent	144
Figure 56	MDD : Localisation du bâtiment	145
Figure 57	MDD : Spécification du poids propre	146
Figure 58	MDD : Vérification de l'excentricité	146
Figure 59	MDD : Sélection des éléments structuraux.....	147
Figure 60	MDD : Arbre décisionnel complété	149
Figure 61	MDD : Sélection d'une dalle	150
Figure 62	MDD : Arbre décisionnel des dalles avec nœuds présélectionnés	150
Figure 63	Phase 4 de l'ÉTS (Côté et Talbot Architectes 2007).....	153
Figure 64	ÉTS : Grilles structurales [mm] (2 ^e étage) (Côté et Talbot Architectes 2007)	153

Figure 65	ÉTS : Spécification des caractéristiques du projet	156
Figure 66	ÉTS : Spécification de l'usage du bâtiment	157
Figure 67	ÉTS : Sélection des sous-systèmes horizontaux	158
Figure 68	ÉTS : Sélection des sous-systèmes verticaux	158
Figure 69	ÉTS : Spécification du poids propre.....	159
Figure 70	ÉTS : Vérification de la stabilité du bâtiment.....	160
Figure 71	ÉTS : Sélection des éléments structuraux	161
Figure 72	ÉTS : Arbre décisionnel complété.....	162
Figure 73	ÉTS : Sélection d'une dalle.....	163
Figure 74	ÉTS : Arbre décisionnel avec nœuds présélectionnés.....	163
Figure 75	Portée entre poutrelles (P_1) et portée des dalles (P_2)	164

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

Le design conceptuel constitue l'une des premières étapes du processus de conception d'un bâtiment. À partir des exigences et contraintes de conception reliées à la fonction du bâtiment et au contexte du projet, les concepteurs définissent les points saillants de la conception du bâtiment, comme l'organisation des systèmes structuraux et la morphologie générale du bâtiment. Le design conceptuel est une étape qui a un impact particulièrement important sur la conception d'un bâtiment. En effet, les décisions prises à cette étape vont déterminer en grande partie la qualité de la conception et les coûts associés lors de la réalisation du bâtiment. De plus, après cette étape, les modifications au concept seront de plus en plus difficiles à apporter.

1.1 Problématique

Une tâche importante des ingénieurs en structure pendant la phase conceptuelle est de choisir les systèmes structuraux en fonction des contraintes reliées à la fonctionnalité du bâtiment, au contexte, à l'échéancier et au budget de construction. La sélection reste toutefois complexe. D'une part, il existe de nombreux types de systèmes structuraux, et d'autre part, les connaissances liées à la sélection de ces systèmes exigent de nombreuses années de pratique. De plus, les outils existants n'offrent pas d'aide pour la sélection de ces systèmes.

1.2 Objectif principal

L'objectif de ce projet de recherche est de créer un prototype informatique qui aide les ingénieurs à choisir les systèmes et les éléments structuraux associés à la phase du design conceptuel. Pour cela, le prototype présente les différentes étapes de sélection des systèmes structuraux à l'utilisateur qui contrôle leur exécution. Le programme interroge l'utilisateur sur ses choix et présente les connaissances liées aux différentes étapes de manière interactive.

Plus précisément, l'application aide les ingénieurs à choisir les systèmes structuraux et les éléments structuraux associés en fonction de certaines contraintes liées au projet :

- la géométrie du bâtiment (nombre d'étages, espacement des grilles structurales);
- l'usage du bâtiment (école, bureaux);
- l'efficacité du concept retenu (faciliter les modifications futures, fournir des espaces camouflés pour les conduits);
- les conditions sur le site (travaux sous la pluie, sol peu stables);
- les contraintes de temps (réduire le temps de construction);
- les charges d'utilisation et les surcharges extérieures;
- la stabilité du bâtiment (effet de soulèvement du bâtiment dû à l'excentricité des charges appliquées sur le bâtiment).

Les contraintes associées aux coûts ne sont pas prises en compte par l'application à cette étape de la conception.

En fonction de ces contraintes, certains systèmes s'avèrent plus appropriés que d'autres. Après que l'utilisateur ait fixé les différentes contraintes et leur importance relative dans le projet, l'application informatique détermine le niveau d'aptitude de chaque type de système structural. L'utilisateur est alors capable de choisir les systèmes les plus adéquats. Ensuite, en fonction des systèmes choisis, le programme présente les éléments ou les assemblages d'éléments qui les composent.

1.3 Limites de l'étude

L'étude se limite à la réalisation du design conceptuel de la structure de bâtiments "standards", c'est-à-dire bureaux, bâtiments industriels, immeubles résidentiels, bâtiments institutionnels, etc. L'enveloppe de ce genre de bâtiments adopte des formes simples, avec peu d'irrégularités et ne présentant pas de défis techniques particuliers. Les matériaux utilisés sont l'acier, le béton, le bois et la maçonnerie. Ce sont les matériaux de construction les plus couramment utilisés pour la structure des bâtiments. On se limite aux systèmes structuraux

simples que l'on retrouve dans les bâtiments de moins de 40 étages, soit les contreventements en treillis, les cadres rigides et les murs de refend.

1.4 Organisation du mémoire

Ce mémoire se décompose en six parties. Le chapitre 2 est consacré à la présentation du processus de conception et à la synthèse de l'état de l'art. On décrit différentes alternatives de programmes informatiques de conception en phase préliminaire ou conceptuelle, dont les systèmes experts, les systèmes de raisonnement par cas et les systèmes de conception intégrée. Le chapitre se termine par la présentation de l'approche envisagée pour le programme de support du design conceptuel.

Le chapitre 3 enchaîne sur les objectifs de l'étude et sur la méthodologie de recherche. Après un retour sur les objectifs, le chapitre présente les technologies et les logiciels utilisés lors du développement du prototype. Enfin, on définit les étapes de recherche, de développement et d'essais qui sont associées à la réalisation d'un prototype fonctionnel.

Le chapitre 4 décrit le processus décisionnel à implémenter dans le prototype. On présente précisément les connaissances associées au processus de sélection des systèmes structuraux de manière à faciliter la phase d'implémentation.

Le chapitre 5 poursuit sur la présentation des détails liés à l'implémentation du prototype. On explique d'abord les points clés du fonctionnement du prototype, puis on expose l'organisation du code informatique associé au processus de sélection des systèmes structuraux.

Le chapitre 6 est dédié aux exemples d'application. Le prototype est testé sur deux projets de construction. Après avoir présenté les projets, on explique en détail l'utilisation du prototype. Le chapitre 6 termine par l'analyse des résultats obtenus lors des deux sessions d'exemples.

Enfin, le chapitre 7 conclut le mémoire. On revient d'abord sur les contributions de l'étude vis-à-vis de la recherche en design conceptuel des structures de bâtiments et du développement d'un logiciel de support du design conceptuel. Puis, on expose les suggestions de développements futurs qui pourraient être apportés au prototype afin de l'améliorer.

CHAPITRE 2

REVUE DE LITTÉRATURE

L'élaboration des bâtiments a beaucoup bénéficié du développement des outils informatiques. Les logiciels de calculs structuraux sont de nos jours très performants et permettent de réaliser la conception avec un très haut niveau de précision. Néanmoins, les progrès informatiques n'ont pas été bénéfiques à l'ensemble du processus de conception. L'étape de design conceptuel, qui est une étape préliminaire à la conception d'un bâtiment, reste délaissée. Les techniques utilisées par les professionnels durant cette étape demeurent inchangées depuis le développement de l'informatique. Ces derniers utilisent toujours des croquis, accomplissent leurs calculs à la main et font différentes approximations d'après leur expérience de concepteur.

Ce chapitre a pour but dans un premier temps d'examiner l'étape de design conceptuel, d'en déduire les problèmes qui la contraignent puis de parcourir les différentes pistes d'étude envisagées par les chercheurs jusqu'à présent. Dans un premier temps, le processus de conception et la terminologie liée aux différentes phases de raffinement de la conception seront définis. Puis on se focalisera sur l'étape de design conceptuel. On discutera de l'importance de cette étape et des facteurs qui freinent la conception à cette étape. L'analyse des différents problèmes lors de la conception conduira à s'intéresser à plusieurs pistes de recherche : les systèmes experts, le raisonnement par cas, les algorithmes génétiques, les réseaux de neurones artificiels et les systèmes de conception intégrés.

2.1 Les étapes de la conception

La conception est le processus par lequel une personne ou un groupe de personnes imagine un artefact. L'approche descendante (top-down) est une manière naturelle d'appréhender ce processus. Cette démarche consiste à définir un bâtiment du plus général au plus précis. Par exemple, sur la Figure 1, on part de l'architecture générale d'un bâtiment, que l'on subdivise en volumes structuraux, puis en espaces structuraux. Pour chaque espace structural on va

définir les sous-systèmes structuraux puis les assemblages, pour finir avec les éléments structuraux et les assemblages.

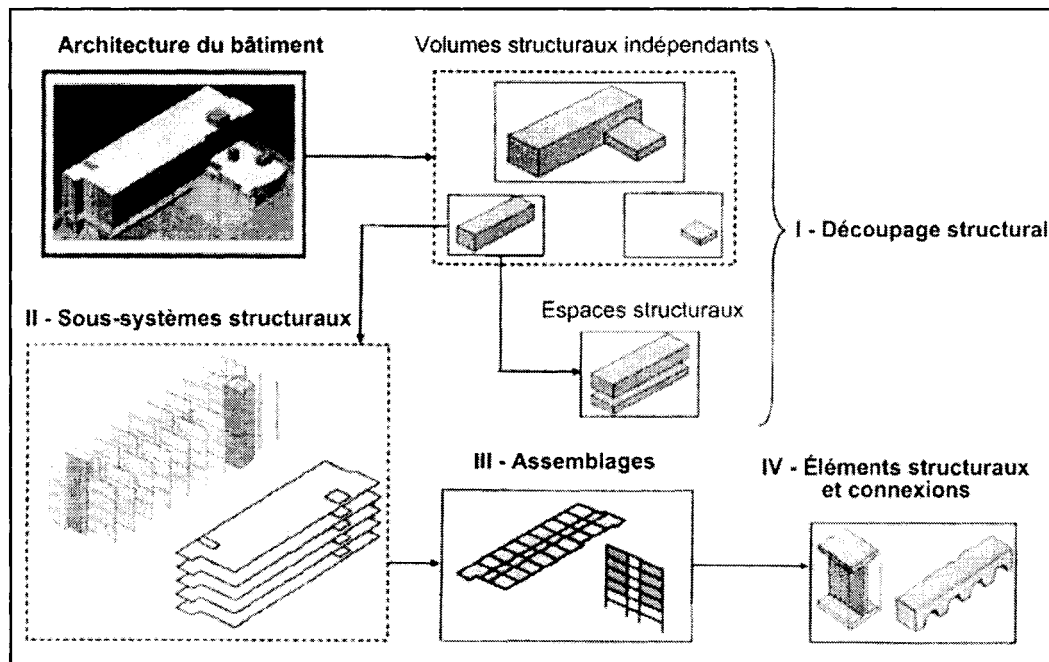


Figure 1 Approche descendante (Mora et al. 2006)

Quatre étapes se détachent du processus de conception. Ces étapes représentent l'ordre dans lequel sont prises les décisions. La conception débute en définissant le bâtiment de manière générale, puis chaque étape va apporter un niveau de raffinement dans la conception :

1. La programmation architecturale décrit les contraintes imposées par le propriétaire, les fonctionnalités du bâtiment et les installations demandées. Il établit les coûts, les critères d'opération, de performances et de qualité (Mora 2005).

La programmation architecturale n'est pas vraiment une étape de conception mais plus un travail de rassemblement des informations qui vont contraindre la conception. Le but n'est pas encore d'imaginer ce à quoi le bâtiment va ressembler mais plutôt de bien définir le problème et ses contraintes. La plupart des ouvrages (Lin et Stotesbury 1988; Schodek 2001) décrivent la programmation architecturale comme une tâche précédant la conception.

2. Le design conceptuel (ou conception schématique) traite de manière générale des relations entre :

- les éléments et les systèmes structuraux;
- les exigences de conception dues à la fonction du bâtiment;
- les contraintes dues au contexte et au programme.

Cette étape établit de manière globale le type de bâtiment et l'organisation des systèmes structuraux en relation avec la morphologie globale du bâtiment ou des autres entités fonctionnelles, ce qui inclut la manière dont les espaces seront configurés et définis par les éléments structuraux. On établit si la structure va être une seule grande unité structurale ou l'assemblage de plusieurs petites unités structurales. Des schémas basiques montrant la forme générale du bâtiment et de sa configuration sont produits (Schodek 2001).

3. La conception préliminaire amène la conception à un niveau de détail supérieur. On analyse le bâtiment afin d'aboutir à une solution optimale en terme de structure, enveloppe, consommation énergétique, coût du cycle de vie, etc. (Rivard et Bédard 2003). Selon les auteurs et les ouvrages, le terme de conception préliminaire peut signifier design conceptuel. Ici, le terme de conception préliminaire sera utilisé au sens strict.

4. La conception détaillée (ou développement de la conception ou conception finale) traite du dimensionnement spécifique des éléments. On choisit le type de section des éléments (rectangulaire, circulaire, en T...), les dimensions des ferrailages... (Schodek 2001). Cette étape a pour but de décrire le bâtiment dans ses moindres détails et de produire les plans et devis finaux qui serviront aux entrepreneurs.

2.2 Les impacts du design conceptuel

Les décisions les plus importantes sont prises durant la phase de design conceptuel, comme (Mora 2006) :

- les facteurs qui vont déterminer l'architecture du bâtiment, l'arrangement des espaces et des éléments physiques;
- mais aussi ceux qui sont à l'origine du choix des systèmes d'ingénierie tels que le choix des matériaux, des types de système, des enveloppes et des dimensions majeures.

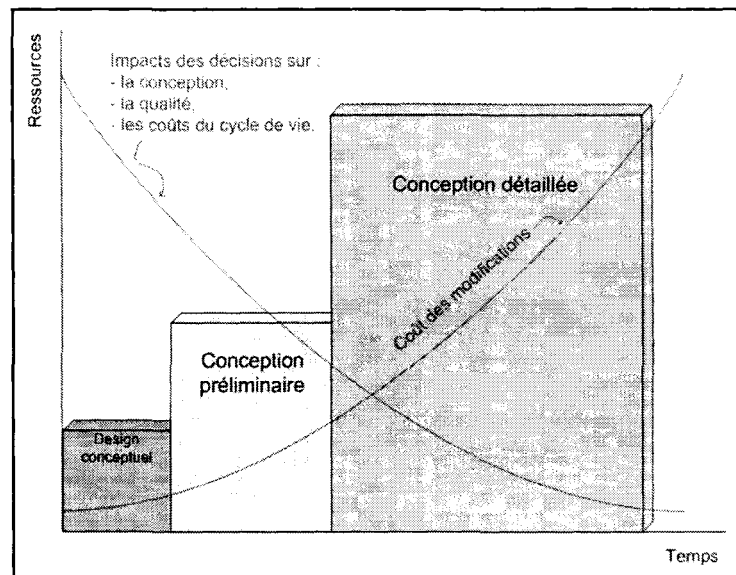


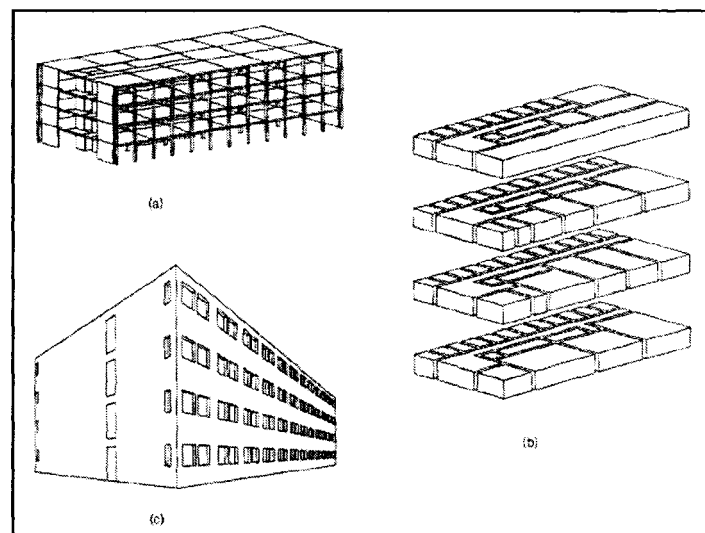
Figure 2 Impact des décisions par rapport aux ressources (Rivard 2006)

D'après Miles (2005), 80% des coûts sont déterminés pendant cette étape. Il apparaît aussi que l'impact des décisions prises durant les différentes étapes de la conception décroît en avançant dans la conception (voir Figure 2). Pourtant l'étape de design conceptuel est l'étape de conception à qui on alloue le moins de ressources. De plus les modifications sont de plus en plus difficiles à apporter à mesure que la conception avance.

L'étape de design conceptuel est jusqu'à présent relativement délaissée (voir §2.4). Il n'existe à ce jour aucun logiciel commercial supportant cette étape de la conception (Miles 2005). Les contraintes auxquelles est soumise la conception des bâtiments se font de plus en plus strictes et l'on cherche à diminuer les coûts du cycle de vie des bâtiments. L'étape de design conceptuel est donc une étape clef.

2.3 Les problèmes de la conception

La conception d'un bâtiment est guidée par plusieurs impératifs ou contraintes. Il faut que l'aspect du bâtiment réponde à certains critères esthétiques, que les espaces soient bien organisés, que les systèmes mécaniques soient efficaces, que la structure du bâtiment soit résistante, que les coûts du cycle de vie soient les plus faibles possible, etc. Ces contraintes peuvent être synthétisées en quatre catégories : les impératifs d'esthétisme, de fonctionnalité, de sécurité et de coût. Selon la complexité du bâtiment, celui-ci ne pourra pas être conçu par une seule personne mais par une équipe composée d'architectes, d'ingénieurs et de différents spécialistes.



**Figure 3 Différents points de vue d'un bâtiment :
(a) la structure, (b) les espaces, (c) l'enveloppe (Bailey et Smith 1994)**

Les systèmes structuraux, l'enveloppe du bâtiment, les espaces, les systèmes mécaniques, etc. sont liés physiquement. Mais chacun de ces "points de vue" du bâtiment (voir Figure 3) sont développés de manière séparée, ce qui génère des conflits. L'architecte imagine l'enveloppe et les espaces du bâtiment. L'ingénieur en structure conçoit la structure pour qu'elle puisse supporter le bâtiment tout en respectant les espaces définis par l'architecte. L'ingénieur doit s'arranger, par exemple, à ce qu'il n'y ait pas de colonnes au milieu d'une pièce. Les ingénieurs mécaniques, HVAC, etc. disposent les différents systèmes mécaniques,

conduits d'aération, etc. afin qu'ils respectent les espaces architecturaux et les systèmes structuraux (il faut éviter, par exemple, que les conduits d'aérations traversent des poutres). Chaque spécialiste doit exprimer ses besoins aux autres afin de modifier le modèle du bâtiment de manière à ce qu'une solution convenant à tous soit obtenue. On dit que la conception est un processus itératif, car les solutions sont synthétisées puis analysées jusqu'à ce qu'une solution satisfaisante soit trouvée (Rivard et Fenves 2000a).

Un autre aspect de la conception des bâtiments est la discontinuité du flux d'information. La conception d'un bâtiment étant réalisée par différents spécialistes qui traitent chacun un aspect de la conception, l'idéal serait qu'ils puissent travailler sur un unique modèle de bâtiment sur lequel chacun pourrait ajouter les informations qui correspondent à sa spécialité. Mais ce n'est pas le cas et les ingénieurs doivent souvent reconstruire les modèles à partir de zéro. À cela s'ajoute la lenteur des moyens de communication. Le téléphone, le fax et les courriels restent les moyens de communication les plus employés. Le processus de conception est donc très freiné par cette fragmentation.

La conception d'un bâtiment n'est pas une chose facile. De nombreux critères, dont certains sont subjectifs, difficiles à quantifier ou invisibles au début du processus de conception, vont jouer sur la qualité du produit. On dit que la conception est un processus exploratoire, car les critères pertinents du problème de conception sont déterminés à mesure que la conception avance (Rivard et Fenves 2000a). Mais de par la complexité de concevoir un bâtiment, le manque de ressources et de temps, les concepteurs ne peuvent pas explorer toutes les possibilités. Les concepteurs doivent alors faire appel à leur intuition et leur expérience pour aboutir à une solution correcte (Fenves et al. 2000).

Les recherches sur l'aide à la conception sont donc menées sur deux axes principaux :

- les systèmes d'aide à la conception qui assistent la production et l'exploration de différentes solutions structurales;
- les systèmes de conception intégrée qui fournissent un espace de travail commun aux ingénieurs et aux architectes.

2.4 Les logiciels de conception structurale

Les logiciels commerciaux de conception structurale sont généralement très peu adaptés au design conceptuel. Cependant, on peut catégoriser ces logiciels selon deux critères significatifs de leur utilité en design conceptuel : d'une part, le mode de modélisation et/ou de création du modèle structural du bâtiment et, d'autre part, l'importance des outils facilitant le dimensionnement et/ou le choix des éléments structuraux.

2.4.1 Modélisation structurale

On distingue deux modes de modélisation des entités structurales. Le premier type de représentation modélise les éléments structuraux par des lignes ou des surfaces et les connections structurales par des points ou des lignes. Le modèle structural est alors représenté sous la forme de "fils de fer". Les logiciels utilisant ce mode de représentation peuvent généralement effectuer des analyses en deux ou trois dimensions (comme SAFI (2007)). Les ingénieurs apprécient ce type de représentation qui permet d'effectuer des analyses approximatives, simples et rapides; ce qui est particulièrement intéressant en phase de design conceptuel. Le deuxième type de représentation correspond à une modélisation en trois dimensions et en détail des éléments et des assemblages structuraux. L'avantage de ce type de représentation est qu'elle permet de réaliser des analyses plus précises. De plus, l'utilisateur peut inspecter le modèle de manière plus réaliste. Selon les logiciels, ces derniers offrent différentes options de visualisation. Les deux types de représentations sont généralement utilisés conjointement pour effectuer des analyses plus ou moins poussées. La représentation en "fils de fer" est employée pour effectuer des analyses constituant un premier niveau de précision, puis la représentation en trois dimensions et en détail forme un second niveau de précision. Les logiciels de conception tels que SAFI (2007), VisualDesign (CivilDesign 2007), ETABS (Computers & Structures 2007), Robot Millenium (Robobat 2007) et Arche (Graitec 2007) supportent ce genre de modélisation.

La modélisation en "fils de fer" est plus pratique que la modélisation en détail et en trois dimensions pour effectuer des analyses préliminaires. Néanmoins, la modélisation en "fils de

fer" en deux dimensions est peu adaptée dans un contexte de conception intégrée (voir §2.10). En effet, si un ingénieur modélise schématiquement un bâtiment en deux dimensions, le modèle informatique créé sera très imprécis et ne contiendra aucune information sur la dimension non représentée. Le modèle ne pourra donc pas être récupéré pour la suite de la conception et il faudra reconstruire plus tard un nouveau modèle en trois dimensions.

Les deux types de modélisation utilisent une d'approche ascendante (voir définition de l'approche descendante §2.1), ce qui n'est pas adaptée au design conceptuel. L'utilisateur doit définir la structure élément par élément, alors que la forme du bâtiment n'est pas encore décidée. Ce type d'approche ne permet pas la recherche d'arrangements des éléments physiques et des espaces.

2.4.2 Outils de support du concepteur

Les logiciels commerciaux proposent des fonctions facilitant la conception structurale des bâtiments. Ces fonctions permettent de choisir, de dimensionner ou de pré-dimensionner presque automatiquement certains types d'éléments structuraux. Par exemple :

- RAM Structural Systems (Bentley 2007) permet de comparer différentes solutions structurales grâce à son interface qui permet de modifier aisément les grilles structurales. De plus des modules comme RAM Steel, disposent de fonctions de sélection des éléments structuraux les plus économiques et/ou répondant à certains critères spécifiés par l'utilisateur (comme l'utilisation exclusive de certains profilés).
- ETABS (Computers & Structures 2007) peut choisir automatiquement les éléments en acier d'une structure parmi une liste de sélection faite par l'utilisateur afin de minimiser les quantités de matériaux. ETABS peut aussi calculer et modifier les sections des éléments structuraux en acier en fonction de la déflexion du bâtiment.
- CBS Pro qui s'inscrit dans ROBOT Office (Robobat 2007), la solution intégrée de Robobat, peut réaliser différents types d'analyses approximatives pour le prédimensionnement des éléments structuraux.

- ETABS (Computers & Structures 2007), SAFI (SAFI 2007) et VisualDesign (CivilDesign 2007) peuvent générer automatiquement les ferrailages des éléments en béton armé en fonction du code de construction choisi par l'utilisateur.

Toutes ces fonctions permettent d'assister de manière automatique l'utilisateur lors de la conception. Ces fonctions sont en fait toutes basées sur des méthodes d'optimisation, comme réduire la quantité de matériau ou le nombre de profilés différents (pour les structures métalliques). Ces fonctions d'aide sont bien utiles durant la phase de conception détaillée, mais beaucoup moins durant l'étape de design conceptuel, car le concept du bâtiment n'est pas assez aboutit à cette étape. Il n'existe pas de fonctions supportant les tâches conceptuelles importantes, comme le choix des matériaux de construction.

2.5 Les systèmes experts

Pour résoudre un problème complexe, une des démarches effectuée par un être humain est de résoudre le problème de manière approximative ou d'utiliser des règles qui fonctionnent généralement bien. Les experts connaissent, grâce à leur expérience, ce genre de règles, mais ce processus d'apprentissage prend des dizaines années.

Le but des systèmes experts est de mettre ces connaissances à la disposition des utilisateurs moins expérimentés ou de mettre en application ces connaissances de manière plus ou moins automatique dans le cas d'utilisateurs novices.

Les premières recherches sur les systèmes experts ont été menées durant les années 1960 et 1970 (Wikipédia 2006b). Des prototypes ont été appliqués à divers domaines scientifiques tels que la chimie, la biologie, la médecine, les mathématiques, etc.

- DEDRA (développé en 1969) recherche la formule développée d'un corps organique à partir de la formule brute et du spectrogramme de masse du corps considéré (Denis 2006);

- MYCIN (développé en 1972) est le premier "vrai" système expert, il est aussi le plus célèbre. Ce programme permet d'assister les médecins dans le vaste choix des thérapies antimicrobiennes (Crowley 1999);
- MOLGEN (développé en 1977) engendre un plan de manipulations génétiques en vue de construire une entité biologique donnée;
- AM (développé en 1977) propose des conjectures et des concepts mathématiques (Denis 2006);
- PROSPECTOR (développé en 1978) aide le géologue à évaluer l'intérêt d'un site en vue d'une prospection minière (Denis 2006).

Le succès des premiers prototypes mena, dans les années 1980, à une émergence des systèmes experts dans des domaines très variés. HI-RISE (Maher 1984), un des premiers systèmes experts de conception préliminaire des bâtiments est l'exemple le plus connu de l'application des systèmes experts dans la conception des structures.

2.5.1 Définitions des systèmes experts

Par définition un système expert est un programme informatique **interactif** (Adeli 1988) qui tente d'obtenir des **solutions de "qualité experte"** dans un **domaine particulier**. On entend par solution de "qualité experte", une solution qui aurait pu être trouvée par un expert humain. Pour cela un système expert dispose de **règles** qui tentent à imiter le raisonnement d'experts humains. Ces règles représentent :

- des **heuristiques**, c'est-à-dire des techniques conçues pour résoudre un problème de manière efficace. Contrairement à un algorithme, une heuristique ne garantit pas que l'on puisse aboutir à une solution en un temps fini (JargonF 2003);
- des **règles du pouce**, c'est-à-dire des procédures faciles à apprendre et à appliquer pour calculer approximativement la solution d'un problème (Wikipédia 2006d);
- le **jugement** et l'**intuition d'experts**.

Les caractéristiques de l'objet du problème sont traduites sous forme de données que l'on appelle **faits**. On distingue deux types de faits : les faits primitifs qui représentent la

formulation du problème et les faits inférés qui illustrent la résolution du problème et les étapes y conduisant.

Dans certains ouvrages, les auteurs dissocient les systèmes experts des systèmes de base de connaissances et des systèmes basés sur des règles. La différence entre ces systèmes se fait uniquement sur le type de connaissances utilisé. Les systèmes experts n'utilisent au sens strict du terme que des connaissances provenant d'experts humains. Les systèmes utilisant des heuristiques ou d'autres règles sont des systèmes de base de connaissances. Certains auteurs utilisent sans distinction les termes : systèmes experts, systèmes de base de connaissances et systèmes basés sur des règles (Garcia et Chien 1991).

2.5.2 Architecture des systèmes experts

Les systèmes experts s'articulent autour de trois modules fondamentaux (Adeli 1988; Giarratano et Riley 1994) (voir Figure 4) :

- La base de connaissance : Il s'agit d'un ensemble de connaissances relatives à un domaine. Ces connaissances sont représentées par des règles de différentes natures telles que des heuristiques, des règles du pouce, des jugements d'experts, etc.
- La mémoire de travail : C'est une zone de stockage temporaire pour le problème en cours. Les données de la mémoire de travail sont composées de faits. Le système expert possède deux types de mémoire, la mémoire à long terme (base de connaissances) et la mémoire à court terme (mémoire de travail). La mémoire à court terme, ou mémoire de travail regroupe toutes les données relatives au sujet d'étude. Ces données seront effacées après le traitement du problème. La mémoire à long terme regroupe les données de la base de connaissance qui sont permanentes (Griffiths 1987).
- Le moteur d'inférence : C'est le moteur de raisonnement du programme.

D'autres modules, dont certains indispensables, sont ajoutés (Adeli 1988) (voir Figure 4):

- l'interface usager. Ce qui permet à l'utilisateur d'interagir avec le système;

- la fonction explicative. Elle fournit le chaînage logique qui conduit à la réponse donnée par le système expert (Griffiths 1987; Adeli 1988);
- un système d'acquisition des connaissances. Elle permet de développer la base de connaissances;
- la fonction d'aide. Elle supporte l'utilisateur dans l'utilisation du logiciel;
- l'éditeur de la base de connaissance. Elle permet à un utilisateur de lire et de modifier la base de connaissances.

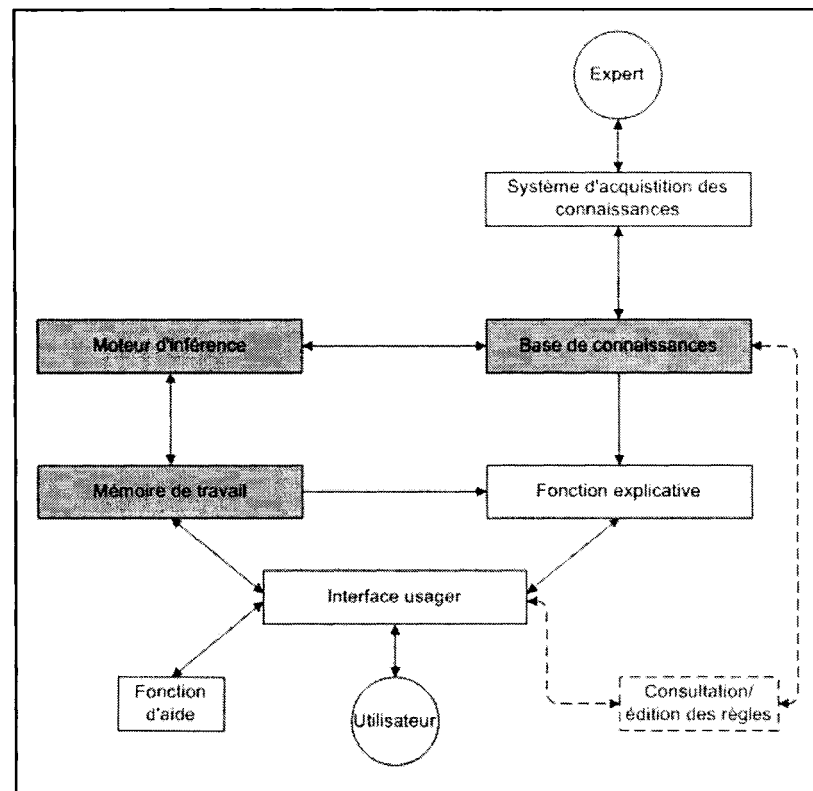


Figure 4 Architecture d'un système expert

2.5.3 La base de connaissances

La base de connaissance est composée de règles représentant des connaissances. Ces règles tentent à imiter les règles utilisées par les experts humains lors de la résolution d'un problème.

Représentation déclarative et procédurale

Il y a deux manières de représenter les connaissances : la représentation procédurale et la représentation déclarative. La représentation procédurale est très utilisée en programmation algorithmique et a l'avantage d'être très performante. Toutefois les connaissances sont camouflées et parsemées dans le code et sont donc très difficiles à lire et à modifier (Adeli 1988). Dans une représentation déclarative, les connaissances sont encodées comme des données et sont regroupées au même endroit. Les connaissances sont donc plus faciles à comprendre et à modifier (Adeli 1988). Ce genre de représentation est plus adapté aux bases de connaissances.

Il existe différentes méthodes de représentation des connaissances sous forme déclarative. Les plus utilisées sont (Hayes-Roth et al. 1983; O'Shea et Einsenstadt 1984; Brachman et Levesque 1985; Giarratano et Riley 1994) :

- les règles; environnemental
- les réseaux sémantiques;
- les triplets objet-attribut-valeur.

Les règles

Il s'agit de règles de type *si-alors*. Elles sont donc composées de deux parties :

- d'un ou plusieurs antécédents qui sont les conditions à vérifier;
- d'une ou plusieurs conséquences qui sont les implications de la règle.

Les réseaux sémantiques

Ce sont des réseaux de nœuds représentant des objets, des événements, des concepts, etc. et de liens représentant les relations entre les nœuds (Adeli 1988). Les liens *est un* (héritage) ou *a un* (attribut) sont très utilisés (Giarratano et Riley 1994).

L'héritage des relations est une des caractéristiques des réseaux sémantiques. Chaque nœud hérite des propriétés du nœud précédent (Adeli 1988) appelé superclasse (Giarratano et Riley 1994).

Les triplets objet-attribut-valeur

Un réseau de triplets O.-A.-V. (Objet-Attribut-Valeur) est un cas spécifique de réseau sémantique dans lequel il y a trois types de nœuds : les objets, les attributs et les valeurs (Adeli 1988). En effet le problème des réseaux sémantiques est qu'il n'y a pas de standard défini pour les relations entre les nœuds. On retrouve alors toutes sortes de liens ayant plus ou moins la même signification (Giarratano et Riley 1994). Le Tableau I donne un exemple de triplets O.-A.-V. pour deux objets représentant les propriétés d'une armature en acier et les propriétés d'un béton hydraulique.

Tableau I
Une table O.-A.-V.

Objet	Attribut	Valeur
armature	adhérence	HA
armature	limite d'élasticité (en MPa)	400
armature	numéro	10
béton	résistance à la compression à 28j. (en MPa)	25
béton	densité (en kg/m ³)	2400

2.5.4 Le moteur d'inférence

Les règles d'inférence

Le moteur d'inférence est le moteur de raisonnement du système expert. Il permet de démontrer ou d'infirmer de nouveaux faits basés sur des faits existants. Il dispose pour cela de plusieurs sources d'informations (Griffiths 1987) :

1. les lois générales de la logique, appelées règles d'inférences;
2. les règles de la base de connaissance;
3. les faits relatifs au problème disponibles dans la mémoire à court terme;
4. une hypothèse ou une question qui est le but à atteindre.

Les stratégies de preuve

Pour démontrer qu'un fait hypothétique H est vrai (ou faux), il faut constituer une chaîne logique entre H et des faits primitifs (Griffiths 1987). Les faits primitifs sont les faits qui représentent les données du problème que l'on connaît au départ. Pour cela on dispose de

règles *si-alors* qui se présentent sous la forme : $x_1, x_2, \dots, x_n \rightarrow f$. Si x_1, x_2, \dots, x_n sont vrais alors f est vrai. x_1, x_2, \dots, x_n sont appelés parties gauches de la règle et f partie droite. Trois stratégies existent pour obtenir l'enchaînement constituant la preuve : le chaînage avant, le chaînage arrière et les stratégies mixtes.

Le chaînage avant

Avec la stratégie de chaînage avant, le moteur d'inférence cherche tous les faits déductibles à partir des faits primitifs. On dit que le chaînage avant est une stratégie menée par les faits primitifs.

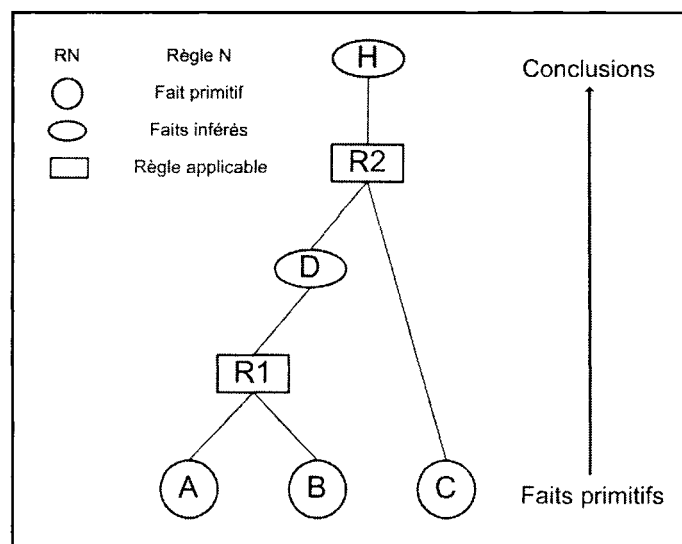


Figure 5 Chaînage avant

À partir de la base de faits (contenant initialement tous les faits primitifs), on cherche les règles de la base de connaissances applicables et on ajoute les faits inférés dans la base de faits. On réitère le procédé jusqu'à ce que l'on arrive à l'hypothèse à vérifier.

Le chaînage arrière

Suivant la stratégie de chaînage arrière, le moteur d'inférence cherche les règles qui permettent d'établir directement le fait hypothétique H, puis les conditions nécessaires à

l'application de ces règles deviennent les nouveaux faits hypothétiques ou sous-buts de H. On dit que le chaînage arrière est une stratégie guidée par le fait hypothétique.

On recherche toutes les règles ayant H comme partie droite (c'est-à-dire qui concluent à H). Les parties gauches de ces règles sont alors considérées comme des sous-buts de H. Puis on réitère le processus avec les sous-buts jusqu'à ce que l'on arrive à établir une chaîne entre les faits primitifs et H. On peut dire qu'en chaînage arrière une règle $A \rightarrow B$ est plutôt vue comme : pour démontrer B, il faut A.

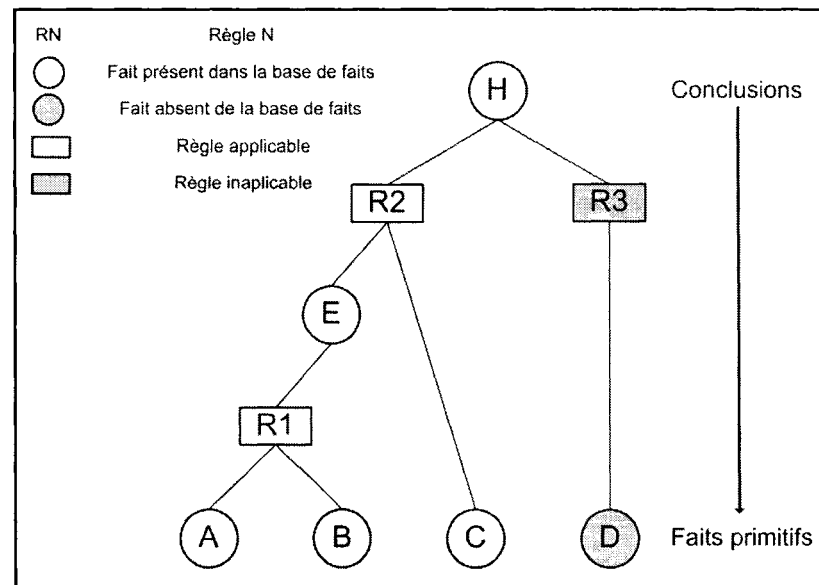


Figure 6 Chaînage arrière

Les stratégies mixtes

On peut aussi mettre en œuvre une stratégie mixte, qui utilise une combinaison des deux méthodes (Griffiths 1987; Adeli 1988).

2.5.5 Exemples de systèmes experts

HI-RISE

HI-RISE est un système expert de conception préliminaire de la structure pour bâtiments rectangulaires de grande taille. HI-RISE permet de comparer différentes alternatives dans les deux systèmes fonctionnels que sont le système résistant aux forces latérales et le système résistant aux forces gravitationnelles. HI-RISE présente alors un arbre des solutions possibles pour le bâtiment (Maher 1984).

Les données d'entrée

Les contraintes spatiales du bâtiment sont représentées par une grille en trois dimensions. L'utilisateur spécifie le nombre d'étages et le nombre de travées dans chaque direction. Les contraintes spatiales, telles que les cages d'ascenseurs sont spécifiées sur la grille. D'autres données, telles que le vent, les charges variables et l'occupation du bâtiment sont nécessaires.

Les connaissances structurales

Les connaissances structurales de HI-RISE sont dérivées d'un livre sur le design conceptuel et préliminaire des bâtiments (Lin et Stotesbury 1988) contenant des techniques d'analyse approximatives et des heuristiques de conception. Ces connaissances sont synthétisées dans la base de connaissances sous la forme de règles *si-alors*.

Le processus de conception

Les connaissances régissant les étapes du processus de conception sont appelées "connaissances de processus" (Maher 1985). Le processus de conception préliminaire des systèmes structuraux est fixe : on conçoit tout d'abord le système résistant aux forces latérales, puis le système résistant aux forces gravitationnelles. De plus, on ne peut pas commencer à concevoir un nouveau système fonctionnel avant d'avoir terminé le système précédant. Or, pour concevoir le système résistant aux forces latérales, on a besoin de connaître certains résultats de la conception du système résistant aux forces gravitationnelles, telles que le type, l'épaisseur et le poids des systèmes de plancher. Ces informations sont

estimées avec des heuristiques utilisant les données portant sur le nombre de baies du bâtiment et l'occupation du bâtiment.

ALL-RISE

ALL-RISE (Sriram 1987) est une extension de HI-RISE qui permet la conception préliminaire de bâtiments de différentes tailles. Un des avantages d'ALL-RISE est qu'il permet de comparer plusieurs solutions alternatives.

Les données d'entrée

Les contraintes sont l'espace minimum entre les étages, les espaces entre les colonnes et l'emplacement de la cage de service.

Le processus de conception

Le processus de conception est découpé en trois étapes : la présynthèse, l'évaluation et la pré-analyse. L'étape de présynthèse a pour but de définir différentes configurations pour le bâtiment. L'étape suivante évalue les différentes alternatives afin de choisir une configuration. L'étape de présynthèse analyse approximativement la configuration. Les sous-systèmes constitutifs sont délimités, la répartition des charges est déterminée et les sous-systèmes sont analysés.

Les connaissances structurales

Les connaissances représentent les différentes contraintes de conception du bâtiment. Elles sont de quatre types :

- les contraintes qui vont guider la synthèse de solutions, ce qui inclut des heuristiques représentant le style du concepteur;
- les contraintes d'interaction telle que la compatibilité des matériaux;
- les contraintes causales. Elles représentent les équations d'équilibre, les réponses des éléments structuraux, etc.;
- les contraintes paramétriques. Ce sont les contraintes sur les paramètres des composants structuraux.

DOLMEN

DOLMEN (Harty et Danaber 1997) est un programme informatique de conception préliminaire des bâtiments.

Les données d'entrée

Les contraintes qui vont guider le modèle structural du bâtiment sont de cinq types :

- les spécifications initiales. Elles définissent les contraintes qui doivent être vérifiées, ce qui regroupe la fonction du bâtiment et la géométrie du bâtiment (nombre d'étages, taille des travées, localisation des cages d'ascenseur...);
- les options disponibles. Elles regroupent les différents systèmes structuraux qui peuvent être réalisés;
- la stabilité structurale et la sécurité;
- les objectifs de conception. Ce sont les critères qui permettent de comparer différentes solutions tels que le coût de construction, le temps de construction et l'espace disponible;
- l'expérience du concepteur. Ce sont des heuristiques utilisées pour réduire le nombre de solutions alternatives.

Le processus de conception

Le processus de conception se fait en trois étapes : la spécification des contraintes du problème, la formulation d'alternatives, puis l'évaluation de la solution. Lors de la formulation d'alternatives, le choix des systèmes résistants aux forces verticales et horizontales se fait en deux temps.

TALL-D

TALL-D (Ravi 1999) est un programme informatique de conception préliminaire des bâtiments de grande taille. TALL-D supporte la conception de plusieurs alternatives structurales.

Les données d'entrée

Les contraintes de recherche de solution ne sont pas restrictives et permettent de chercher librement des structures de dimensions différentes. La surface au sol, le nombre maximum d'étages et le budget peuvent être des contraintes guidant la recherche d'un modèle structural.

Le processus de conception

Le processus de conception est découpé en deux étapes principales. La recherche de différentes configurations de bâtiment, puis après la sélection d'une configuration, la conception du système structural correspondant.

TALLEX

TALLEX (Sunder et Satyanarayanan 2001) est un système expert pour la conception préliminaire des bâtiments de grande taille.

Les connaissances

La base de connaissances a été développée à partir de livres et de monographies sur les grands bâtiments et à l'aide de trois sortes d'experts : des praticiens, des chercheurs et des académiciens.

Le processus de conception et données d'entrée

Le choix des matériaux se fait à partir de la localisation du bâtiment. Le système structural est déterminé à partir des matériaux et de la taille du bâtiment. Les fondations dépendent du type de sol. Le système de plancher est déterminé par les longueurs des travées et les matériaux. Le choix du système de dissipation de l'énergie se fait à partir du type de matériau utilisé et du type d'énergie.

Autres systèmes experts

Il existe une multitude d'autres systèmes experts :

- DESTINY (Sriram 1986) configure l'arrangement de volumes architecturaux de bâtiments;
- CONCEPTUAL (Haber et Karshenas 1990) cherche des solutions en fonction des coûts. Le programme cherche la solution la moins onéreuse à partir d'une base des coûts des composants d'un bâtiment;
- un système expert pour la conception des bâtiments en éléments préfabriqués (Retik et Warszawski 1991);
- un système expert pour la configuration des espaces architecturaux (Pan et Soh 1991);
- SPRED (Liu et Gan 1991) est un système expert de conception préliminaire des grilles spatiales basé sur les réseaux neuronaux. Il a été utilisé sur plus de 10 gros projets en Asie;
- HIPRED est un système expert qui intègre des concepts avancés provenant de l'intelligence artificielle, comme les systèmes neuronaux artificiels. Il dispose aussi d'un module d'analyse rapide des structures appelé COLSYS (Chushu et Xia 1998).

2.6 Les systèmes de raisonnement par cas

Pour résoudre les problèmes de la vie quotidienne, nous faisons naturellement appel à notre expérience. Nous nous remémorons les situations semblables déjà rencontrées. Puis nous les comparons à la situation actuelle pour construire une nouvelle solution qui, à son tour, s'ajoutera à notre expérience. Le raisonnement par cas copie ce comportement humain. Les systèmes de raisonnement par cas ont pour origine les travaux de Roger Schank et de ces étudiants de l'université de Yale pendant les années 1980 (Wikipédia 2006a).

2.6.1 Définition et caractéristiques

Est appelé raisonnement par cas, tout processus de résolution d'un problème par **rappel de cas analogues de la base de connaissances, adaptation au cas considéré puis ajout de la nouvelle solution à la base de connaissance** (Aamodt et Plaza 1994). Ces tâches constituent un cycle itéré à chaque utilisation de l'application informatique pour résoudre un problème.

Une caractéristique importante du raisonnement par cas est son lien avec le processus d'apprentissage. Un programme informatique utilisant le raisonnement par cas enrichit sa base de cas à chaque fois qu'un problème est résolu. L'application est donc capable d'accumuler des connaissances. Les entreprises de conception de bâtiments accumulent dans des archives des centaines de plans de conception. Toutes ces connaissances restent inutilisées. Un système de raisonnement par cas pourrait utiliser ces connaissances pour enrichir sa base de connaissance et devenir plus performant.

2.6.2 Description du cycle de raisonnement par cas

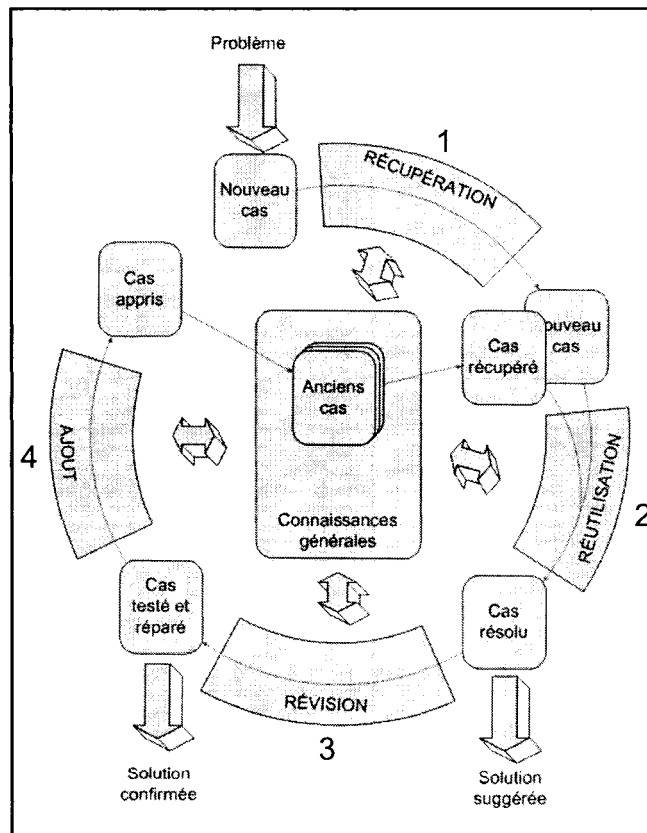


Figure 7 Cycle de raisonnement par cas (Aamodt et Plaza 1994)

De manière générale, un cycle de raisonnement par cas est composé de quatre étapes (voir Figure 7) :

1. la récupération de cas antérieurs;
2. la réutilisation des informations et des connaissances;
3. la révision de la solution proposée;
4. la conservation des informations et des connaissances qui pourrait servir dans le futur, en les intégrant dans une base de cas.

La représentation des cas

Il est nécessaire que le programme organise sa base de cas pour qu'il puisse retrouver efficacement les informations. Il existe différentes méthodes dont le modèle de mémoire dynamique et le modèle catégorie-exemple (Wikipédia 2006a).

La récupération des cas

Elle est décomposée en quatre sous-tâches :

- l'identification des caractéristiques;
- la correspondance initiale qui consiste à trouver des cas similaires au problème posé;
- la recherche qui a pour but de sélectionner les meilleurs cas parmi ceux trouvés par la correspondance initiale;
- la sélection.

La réutilisation des cas

La réutilisation des cas se fait en deux étapes :

- la copie des anciens cas, puis;
- l'adaptation des anciens cas qui peut être faite de deux manières :
 - la réutilisation par transformation de la solution passée;
 - la réutilisation par dérivation de la méthode qui a abouti à la solution passée.

La révision de la solution

Elle est composée de deux sous-tâches :

- l'évaluation de la solution proposée;
- la "réparation" de la solution si elle est incorrecte.

La conservation de la solution

Elle se fait en trois phases :

- l'extraction de la solution obtenue;
- l'indexation de la solution;
- l'intégration de la solution dans la base de cas.

Les connaissances générales

Elles interviennent durant le cycle du système de raisonnement par cas. Ces connaissances sont générales par oppositions aux connaissances tirées des cas qui sont spécifiques. Selon le programme, les connaissances générales peuvent être quasi inexistantes ou très évoluées.

2.6.3 Exemples de systèmes de raisonnement par cas

Il existe de nombreuses applications du genre. Les prototypes sont présentés de manière non exhaustive.

STRUPPLE

STRUPPLE (Zhao et Maher 1988) est un prototype qui avait pour but de montrer comment les systèmes de raisonnement par cas pouvait être utilisés durant la conception préliminaire. STRUPPLE se concentre sur les aspects de la représentation des expériences passées, le développement de critères de similarité et la définition des éléments et sous-systèmes structuraux qui serviront à synthétiser une solution.

Les données spécifiées par l'utilisateur dans STRUPPLE sont : la localisation du bâtiment, la géométrie (dimension, forme...), l'architecture (nombre d'étages, taille des travées...) et les charges supportées par la structure. À partir de ces données STRUPPLE va comparer la requête aux cas présents dans la base de données. Il va déterminer les éléments et les sous-systèmes structuraux à utiliser pour la nouvelle structure.

Un cas est représenté dans STRUPPLE par la description de ses caractéristiques telles que l'emplacement, la géométrie, l'architecture, les charges supportées, les systèmes 3D et 2D, le type de plancher et le type de fondations.

CADSYN

CADSYN (Maher et Zhang 1991) intègre des cas de conception et des connaissances générales dans un environnement qui assiste l'utilisateur durant la phase de conception préliminaire. Les cas sont représentés de manière hiérarchique, en commençant par le contexte général du bâtiment, puis par la description des grilles structurales et des systèmes structuraux. Les connaissances générales contiennent les définitions des sous-systèmes, des connaissances de décomposition du système, les contraintes de conception structurale et des fonctions procédurales.

CADSYN cherche des cas qui concordent avec les critères définis par l'utilisateur qui peut choisir quels cas il veut utiliser. Les cas sont adaptés d'abord par substitution des anciens paramètres par les nouveaux. Ces cas sont ensuite testés, puis modifiés si nécessaire par des règles de décomposition et des heuristiques.

CASECAD

CASECAD (Maher et al. 1995) contient plusieurs modules : une base de cas, un gestionnaire de la base de cas qui supporte la création, l'exploration, la modification et la sauvegarde des cas, un concepteur basé sur les cas qui récupère et ordonne les cas et un module de CAO qui sert d'interface graphique.

Un cas dans CASECAD représente un bâtiment et les sous-cas représentent les composants structuraux du cas. Un cas contient à la fois des attributs décrivant le bâtiment et des attributs permettant de rattacher des fichiers de CAO au cas.

La recherche de cas similaires se fait par concordance des attributs entre la situation courante et les cas enregistrés.

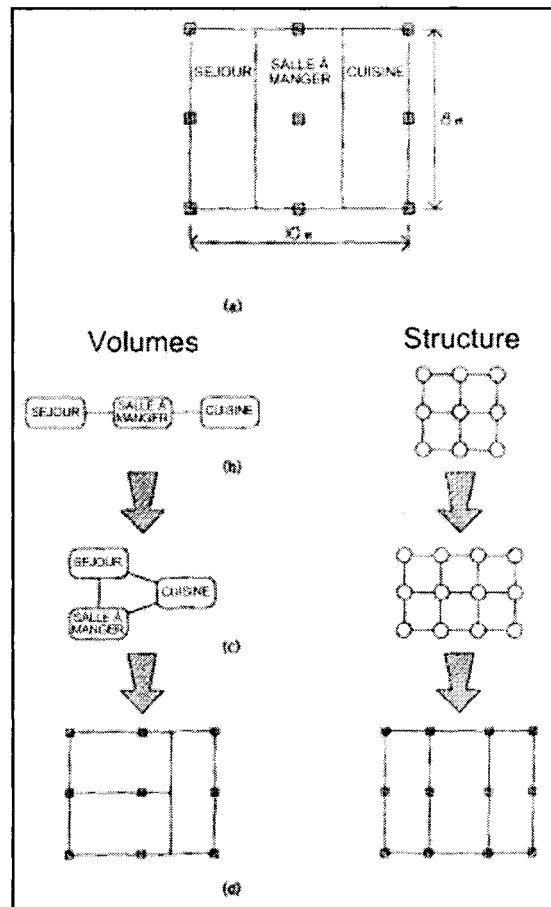


Figure 8 Adaptation de la topologie (Bailey et Smith 1994)

CADRE

Le projet CADRE se concentre sur les problèmes de la représentation et de l'adaptation des cas à la nouvelle situation (Bailey et Smith 1994). Les cas sont des modèles géométriques des systèmes structuraux, des espaces et des enveloppes architecturales. CADRE essaye, dans un premier temps, d'adapter les dimensions des anciennes solutions au nouveau problème. Le module d'adaptation a besoin pour fonctionner d'un ensemble de solutions répondant à un jeu de paramètres variant linéairement. Si CADRE n'est pas capable d'adapter les dimensions d'anciennes solutions au nouveau problème, un module se charge d'adapter la topologie du bâtiment. Ce module essaye de modifier l'arrangement des espaces et de changer la grille structurale jusqu'à trouver une solution. Par exemple sur la Figure 8(a), une colonne n'est pas camouflée par un mur. CADRE va modifier l'arrangement des espaces et

de la structure (Figure 8(b) : ancienne solution et Figure 8(c) : nouvelle solution) pour obtenir des solutions qui conviennent (Figure 8(d)).

CBDEC

CBDEC (Gowri 1995) est un système de raisonnement par cas qui aide à la conception des enveloppes des bâtiments. CBDEC n'enregistre pas les résultats, mais supporte la décomposition du problème, intègre un environnement de synthèse et indexe les cas automatiquement une fois qu'ils sont rentrés dans la librairie.

CADREM

CADREM n'aborde pas le problème de manière classique. Au lieu de récupérer des solutions, CADREM réutilise les méthodes de conception utilisées pour obtenir ces solutions (Kumar et Raphael 1997). Les cas sont donc ici des méthodologies de conception et non des modèles de conception. Pour récupérer les cas, c'est-à-dire les méthodes de conception, CADREM utilise un module appelé RBEX (Retrieval Based on EXamples). RBEX utilise des exemples et des méthodes de récupération pour obtenir des cas utiles dans la situation actuelle.

SEED-Config

SEED-Config est un des modules de SEED (Software Environment to support Early phases in building Design) (voir §2.10.2 pour de plus amples informations sur SEED). Un système de raisonnement par cas a été implémenté dans SEED-Config (Rivard et Fenves 2000b).

2.7 Les algorithmes génétiques

2.7.1 Présentation

Les algorithmes génétiques sont une technique de programmation qui s'inspire du principe de l'évolution des espèces décrit par Darwin et qui a pour but d'obtenir une solution approximative, en un temps correct, à un problème d'optimisation. Le principe des algorithmes génétiques est de produire de nouvelles solutions à partir d'un ensemble initial

de solutions (tout comme le fait le phénomène de reproduction chez les espèces vivantes) et de sélectionner les solutions les plus adaptées (tout comme sont sélectionnées les espèces d'après le principe de la sélection naturelle).

C'est au début des années 1960 que John Holland de l'Université du Michigan a commencé à s'intéresser à ce qui allait devenir les algorithmes génétiques. Ses travaux ont trouvé un premier aboutissement en 1975 avec la publication d'*Adaptation in Natural and Artificial System* (Holland 1975). L'originalité des travaux de Holland repose en particulier sur le fait qu'il n'a pas considéré les seules mutations comme source d'évolution mais aussi et surtout les phénomènes de "crossing-over" (Emmeche 1994).

2.7.2 Exemples de systèmes de conception par algorithmes génétiques

Grierson et Khajehpour (2002) proposent une méthode de recherche de modèles préliminaires basée sur de multiples critères. Ces critères sont de deux sortes : explicites ou implicites. Les contraintes explicites imposent des bornes aux dimensions géométriques principales du bâtiment comme la surface utile, la hauteur, la taille du noyau, etc. Les contraintes implicites sont des contraintes supplémentaires pour lesquelles l'utilisateur doit rentrer les différentes valeurs qu'elles peuvent prendre. Par exemple, l'utilisateur doit sélectionner les types de plancher à utiliser ou les types de structure du bâtiment. La recherche de solution est basée sur le coût du bâtiment, le coût d'utilisation du bâtiment et les revenus annuels du bâtiment.

L'application proposée par Rafiq, Mathews et Bullock (2003) utilise la technique des algorithmes génétiques structurés. Cette variante des algorithmes génétiques permet de représenter les paramètres de manière hiérarchique afin de pouvoir activer ou désactiver certains groupes ou branches de paramètres qui déterminent les caractéristiques d'un même système structural. Le but du prototype est de minimiser le coût du bâtiment et le coût d'achat du terrain. L'application ne limite pas l'exploration de solutions. L'utilisateur peut, par exemple, rechercher un modèle de bâtiment en ne définissant ni les dimensions du

bâtiment, ni le nombre d'étage ni le nombre de travées. Il peut se contenter de préciser de quelle surface utile il a besoin. Le programme va alors générer des solutions de dimensions différentes. Par ailleurs, l'application propose à l'utilisateur d'interagir pendant la recherche de solutions en lui permettant d'arrêter les cycles de recherche ou de faire des recherches cycle par cycle.

BGRID (Building GRID) est une application conçue pour optimiser la recherche de solutions structurales durant la phase de conception préliminaire. Les paramètres à optimiser sont : le coût du bâtiment et la consommation énergétique qui doivent être minimisées et les portées libres qui doivent être les plus grandes possible afin d'augmenter la flexibilité d'aménagement du bâtiment (Miles 2005).

2.8 Les réseaux de neurones artificiels

2.8.1 Présentation

« Un réseau de neurones est un modèle de calcul dont la conception est très schématiquement inspirée du fonctionnement de vrais neurones (humains ou non). Les réseaux de neurones sont généralement optimisés par des méthodes d'apprentissage de type statistique, si bien qu'ils sont placés d'une part dans la famille des applications statistiques, qu'ils enrichissent avec un ensemble de paradigmes permettant de générer de vastes espaces fonctionnels souples et partiellement structurés, et d'autre part dans la famille des méthodes de l'intelligence artificielle qu'ils enrichissent en permettant de prendre des décisions s'appuyant davantage sur la perception que sur le raisonnement logique formel. » (Wikipédia 2006c)

Un réseau de neurones artificiels est constitué d'un très grand nombre de petites unités de traitement identiques appelées neurones artificiels. Ces neurones sont interconnectés entre eux, recevant des signaux d'entrée par leurs synapses et émettant des signaux de sortie par leurs axones (Wikipédia 2006c).

2.8.2 Exemple de système basé sur des réseaux de neurones artificiels

Zhao, He et Fan (2001) ont conçu un programme informatique de conception préliminaire des ponts à poutres à caisson en béton utilisant à la fois des réseaux de neurones artificiels et des modèles de raisonnement flou. Les modèles de raisonnement flou permettent de généraliser les connaissances portant sur des paramètres à valeurs entières. La Figure 9 représente la fonction de répartition de trois types de profilés en fonction de la portée des poutres. Par exemple, pour une portée de 60 m, le profilé de type n°2 est choisi car c'est celui qui apparaît le plus souvent. Les réseaux de neurones artificiels sont, quant à eux, utilisés pour généraliser les connaissances portant sur des paramètres à valeurs numériques, comme la profondeur de la poutre ou l'épaisseur des parois des caissons.

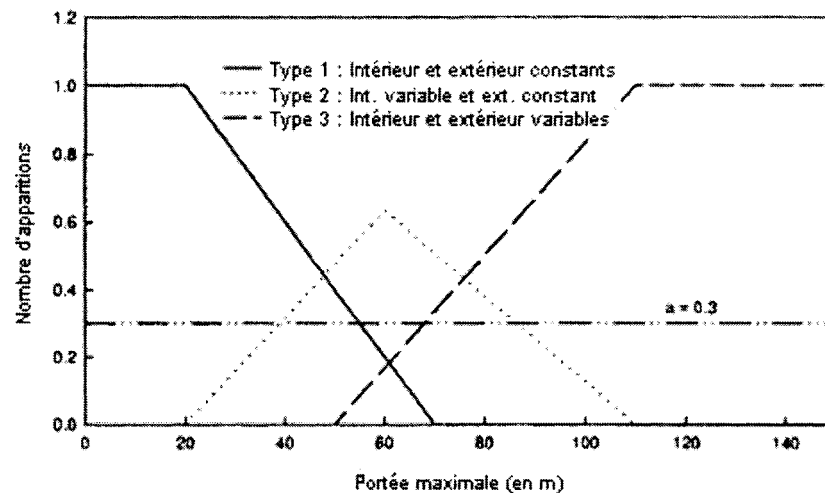


Figure 9 Nombre d'apparition des différents types de pont en fonction de la portée (Zhao et al. 2001)

2.9 Comparaison entre les différents systèmes d'intelligence artificielle présentés

Tout d'abord, on remarque que pour tous ces programmes, la base de connaissance est fondée sur l'expérience de problèmes antérieurs. Dans le cas des systèmes experts, ce sont des experts humains qui créent des règles représentant les connaissances. Pour les systèmes de raisonnement par cas, les systèmes d'optimisation par algorithmes génétiques et les

systemes de reseaux neuronaux, les connaissances proviennent de l'analyse faite par la machine d'un ensemble de cas realises precedemment. L'homme ne definit que les parametres. On remarque aussi que les systemes experts sont les seules applications qui utilisent des regles ne provenant pas que de l'experience, mais aussi des lois de la mecanique.

Le deuxieme point est la maniere de raisonner de chacun de ces programmes. Les systemes experts raisonnent grace a leurs moteurs d'inférence qui determinent l'application des regles. Pour les systemes de raisonnement par cas, le raisonnement se fait par selection de cas similaires, puis par adaptation aux contraintes presentes. Pour les algorithmes genetiques, des nouvelles solutions sont obtenues aleatoirement par croisement et mutation; les meilleures solutions adaptees aux conditions du probleme sont gardees. Les reseaux de neurones artificiels generent de nouvelles solutions a partir d'un apprentissage base sur d'anciens cas. Dans le cas d'un systeme expert, c'est l'expert humain qui generalise l'experience pour deriver des regles, alors que pour les autres applications, c'est la machine qui, en utilisant differentes methodes, generalise a partir d'exemples precedents. C'est pourquoi ces derniers programmes ont besoin de fonctions d'evaluations pour juger si leur adaptation est correcte.

Les reseaux de neurones artificiels ressemblent aux systemes de raisonnement par cas. La difference est que la solution proposee dans le cas des reseaux neuronaux s'inspire de la totalite des exemples donnes initialement au programme. Durant la phase d'apprentissage, le reseau fixe les poids des liens entre les neurones a partir de l'ensemble des exemples. Il n'y a pas de phase de selection des cas similaires.

Les systemes experts et les systemes de raisonnement par cas s'inspirent plus des methodes de raisonnement humain, alors que les moteurs de raisonnement des algorithmes genetiques et des reseaux de neurones artificiels sont plus abstraits.

2.10 La conception intégrée

Le secteur de la construction est, par nature, très fragmenté : à la fois par ses nombreux intervenants spécialisés qui peuvent être éloignés géographiquement et par les différentes étapes du cycle de vie du bâtiment. La communication entre les différents acteurs intervenant durant la vie du bâtiment est par conséquent affectée et devient fragmentée à son tour.

La conception intégrée fournit un espace de travail et une méthodologie partagés entre architectes et ingénieurs afin qu'ils puissent travailler conjointement. Pendant le design conceptuel, les ingénieurs peuvent faire des commentaires sur le design de l'architecte, qui peut ensuite faire les modifications appropriées (Fenves et al. 2000).

Les sous-sections suivantes présentent différents exemples de systèmes de conception intégrée des bâtiments.

2.10.1 IDBE

IDBE (Integrated Building Design Environment) est un projet de système intégré de conception et de construction. L'objectif était avant tout d'améliorer l'échange d'informations entre les différents intervenants et le contrôle des tâches (Fenves et al. 1990).

L'architecture du prototype

IBDE est la combinaison de sept programmes informatiques de type système expert, dont certains existaient déjà avant le projet. Chacun de ces programmes traite une tâche particulière :

- ARCHPLAN assiste le design conceptuel;
- CORE contribue à l'organisation des espaces dans le noyau de service du bâtiment (cages d'escalier, ascenseurs...);
- STRYPES accompagne la conception des systèmes structuraux;

- STANLAY analyse approximativement le système structural et génère l'enveloppe en fonction des systèmes structuraux;
- SPEX assiste la conception préliminaire;
- FOOTER conçoit les fondations;
- CONSTRUCTION PLANNER permet d'organiser la planification des travaux et d'estimer les coûts.

D'une part, les informations des différents systèmes experts sont diffusées à l'aide d'un module appelé "tableau noir" et d'un contrôleur qui gère l'usage de l'information. D'autre part, un gestionnaire de données contrôle les informations diffusées dans une base de données (voir Figure 10).

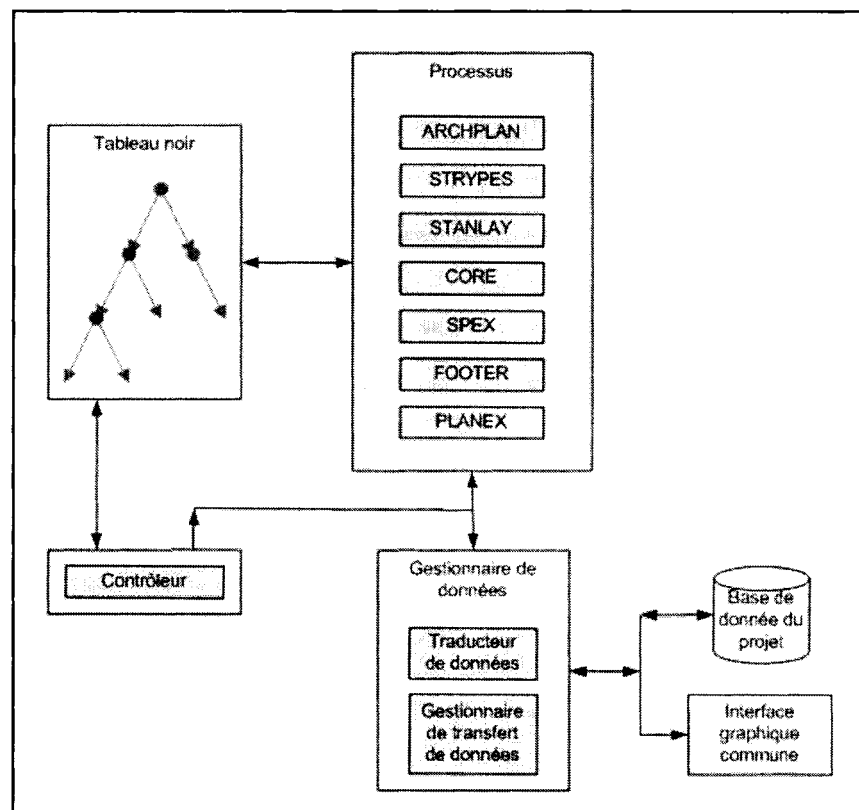


Figure 10 Architecture de IDBE (Fenves et al. 1990)

2.10.2 SEED

SEED (Software Environment to support Early phases in building Design) permet d'assister les concepteurs plutôt que de générer automatiquement la conception (Fenves et al. 2000).

L'architecture du prototype

SEED est décomposé en différents modules : SEED-Pro qui génère les programmes architecturaux, SEED-Layout qui s'occupe d'arranger les espaces et SEED-Config qui arrange la configuration en trois dimensions des composants spatiaux et physiques du bâtiment (voir Figure 11).

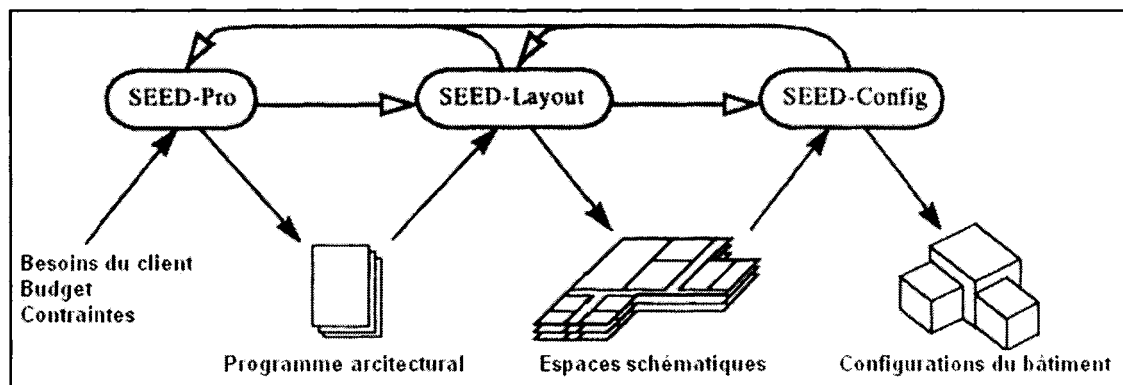


Figure 11 Architecture de SEED (Fenves et al. 2000)

SEED-Config permet d'organiser les espaces, les sous-systèmes et les composants physiques du bâtiment en trois dimensions. Les données d'entrée nécessaires à SEED-Config sont le programme architectural de SEED-Pro et les espaces de SEED-Layout. Ces données permettent de définir les contraintes et les objectifs de la structure. Les données de sortie de SEED-Config sont une conception structurale du bâtiment en accord avec les contraintes, les intervenants et l'aspect général du bâtiment.

SEED-Config est divisé en quatre modules :

- la base de dépôt des informations de conception;
- le gestionnaire des connaissances;

- le modélisateur géométrique;
- le gestionnaire des références de classification.

Cette architecture permet de séparer la représentation, les connaissances de conception, la classification et la géométrie. Chaque module est un outil spécialisé qui peut être développé séparément des autres.

La base de dépôt des informations

La base de dépôt des informations de design est la principale interface de conception. Elle présente le bâtiment sous la forme d'un arbre hiérarchique représentant chaque sous-système structural. L'utilisateur peut concevoir chaque système structural de trois façons : de manière interactive, en se basant sur d'autres cas et de manière manuelle.

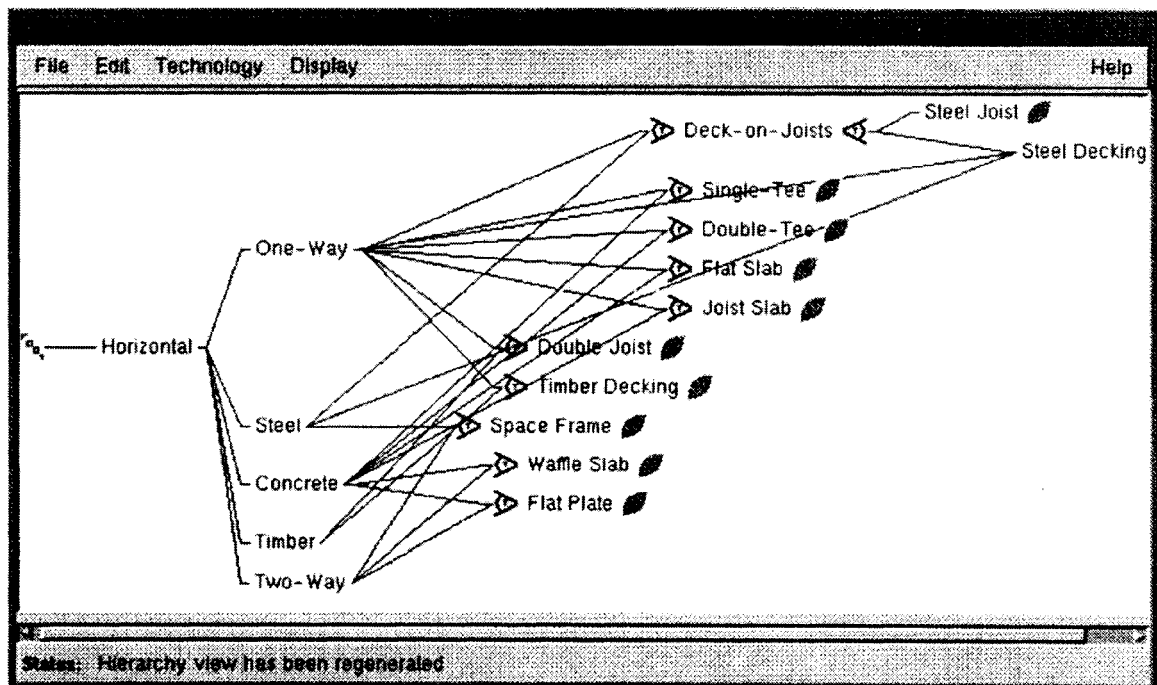


Figure 12 Le gestionnaire des connaissances de SEED (Fenves et al. 2000)

Le gestionnaire des connaissances de conception

Le gestionnaire des connaissances de conception permet à l'utilisateur de concevoir de manière interactive en lui présentant des "nœuds technologiques" représentant des choix

structuraux (tels que les différents types d'élément, de matériau, etc.) et les connaissances liées à la sélection. Le gestionnaire des connaissances de conception permet à l'utilisateur de voir les alternatives possibles (tablier sur poutrelles, etc.) et leurs éléments constitutifs (le tablier sur poutrelles est fait de poutrelles d'acier et d'un tablier en acier) (voir Figure 12). L'utilisateur dispose de plusieurs modes d'utilisation :

- un mode sélectif : l'utilisateur choisit le nœud technologique qu'il veut appliquer;
- un mode interactif : le programme lui présente tous les nœuds technologiques applicables puis l'utilisateur fait un choix;
- un mode automatique : toutes les possibilités sont sélectionnées par le programme.

Le modélisateur géométrique

Le module de modélisation permet à l'utilisateur de visionner le bâtiment en trois dimensions.

Le gestionnaire des références de classification

Le gestionnaire des références de classification sert à la définition du modèle de classification des entités structurales.

2.10.3 EsQUIsE, StAr et DKM

EsQUIsE, StAr et DKM sont trois projets de développement de logiciels utiles en design conceptuel et préliminaire des bâtiments. Ces logiciels ont été conçus pour pouvoir communiquer entre eux et effectuer des tâches complémentaires lors du design conceptuel et préliminaire d'un bâtiment.

EsQUIsE est un programme informatique d'interprétation et de capture des croquis architecturaux en temps réel. L'environnement se veut le plus proche des méthodes de travail naturelles et traditionnelles des architectes. L'utilisateur n'utilise ni souris, ni clavier. L'architecte dessine le croquis à l'aide d'un unique stylo électronique. Le programme est alors capable d'interpréter le dessin : il reconnaît les lignes pointillées, hachurées, etc., il

dispose aussi d'un module de reconnaissance de l'écriture manuscrite et d'une base de connaissances architecturales implicites qui permet de compléter le croquis d'informations absentes mais sous-entendues. Grâce à cela, EsQUIsE est capable de générer automatiquement un modèle en trois dimensions du bâtiment (Leclercq 1999).

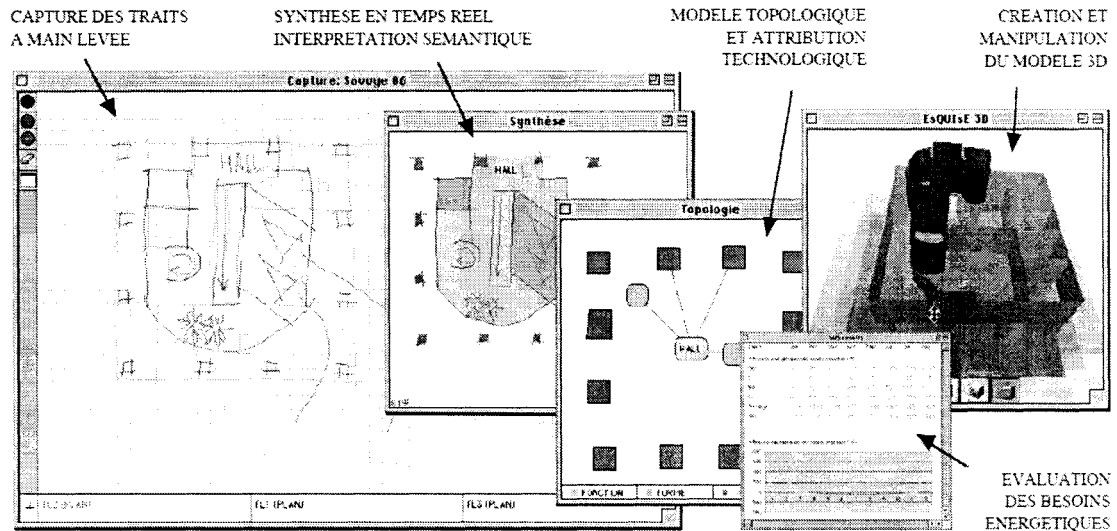


Figure 13 EsQUIsE (Leclercq 2002)

StAr (Structure Architecture) est un programme informatique qui aide les ingénieurs à inspecter les modèles architecturaux en trois dimensions et à générer des alternatives structurales de ces modèles architecturaux. StAr utilise des algorithmes de synthèse assistant l'ingénieur dans les principales tâches qu'il a à accomplir en phase conceptuelle : l'examen des cheminements des transferts de charges, la configuration des systèmes structuraux en accord avec les contraintes architecturales et la vérification de la stabilité et de l'intégrité du bâtiment (Mora 2005).

DKM (Design Knowledge Module) est un module de gestion des connaissances liées à la conception des structures en phase conceptuelle et préliminaire. Ces connaissances portent sur la sélection et/ou le dimensionnement préliminaire des éléments et/ou des systèmes structuraux. Lors du premier développement du DKM, les connaissances implémentées portaient sur la conception préliminaire des sous-systèmes horizontaux en général et sur la

conception plus en détail de deux types de sous-systèmes qui sont les dalles en béton sur tablier métallique supporté par des poutrelles ajourées et des poutres en I et les dalles plates de béton avec abaques (Parent 2006b).

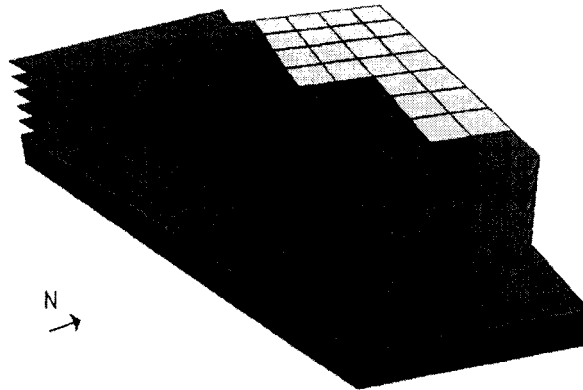


Figure 14 Vue structurale de StAr (Mora et al. 2006)

En somme, ces trois logiciels pourraient assister conjointement un processus de conception qui se déroulerait ainsi (Mora 2006) :

1. l'architecte produit un croquis en utilisant EsQUISE qui génère à son tour un modèle en trois dimensions;
2. l'ingénieur visualise le modèle sous StAr;
3. StAr vérifie les supports verticaux de l'architecture;
4. l'ingénieur définit les grilles structurales dans StAr;
5. l'ingénieur sélectionne les supports verticaux qui auront un rôle structural parmi tous les supports identifiés par StAr;
6. l'ingénieur regroupe les espaces et StAr assigne les charges en fonction de leurs types et leurs fonctions;
7. l'ingénieur définit le type de système structural, les sous-systèmes et les assemblages à l'aide du DKM;
8. StAr génère le système structural qui est visualisé par l'ingénieur et l'architecte;
9. le modèle est envoyé vers des logiciels d'optimisation ou de conception détaillé.

2.11 Conclusions

En premier lieu, la revue de littérature a permis de mettre en avant le manque d'outils en phase de design conceptuel. En effet, les logiciels commerciaux ne supportent pas cette étape. Ces logiciels adoptent une approche ascendante, c'est-à-dire que l'on conçoit la structure élément par élément. Pour utiliser ce type de logiciel, le concepteur doit avoir une idée précise du bâtiment et de la structure, ce qui n'est pas le cas en phase conceptuelle.

Deuxièmement, la plupart des recherches menées sur les phases préliminaires de la conception proposent des solutions informatiques substituant le raisonnement des concepteurs par des systèmes d'intelligence artificielle, comme les systèmes experts, les raisonnements par cas, les algorithmes génétiques, les réseaux neuronaux, etc. Or, la qualité de la conception d'un bâtiment repose sur de nombreux critères subjectifs ou difficilement mesurables, comme l'aspect esthétique d'un bâtiment. Il est donc difficile de créer une démarche automatisée qui puisse prendre en compte tous ces paramètres. Néanmoins, quelques recherches accordent une plus grande importance au rôle des concepteurs. Par exemple, le gestionnaire des connaissances de conception de SEED-Config propose un mode de conception interactif qui permet à l'utilisateur de garder le contrôle sur le processus de conception (voir §2.10.2). Dans ce type d'approche, l'interaction entre le concepteur et le logiciel est donc un point très important. Le programme fournit un maximum d'informations au concepteur afin qu'il puisse mener au mieux la conception.

C'est pourquoi, on décide dans cette étude d'utiliser un système à base de connaissance contrôlé par l'utilisateur. La base de connaissances contient des informations liées à la sélection des systèmes structuraux. Les connaissances sont modélisées sous forme de règles *si-alors*. La partie gauche (*si*) représente le critère d'applicabilité de la règle et la partie droite (*alors*) détermine les actions à exécuter. Si une règle est applicable, l'utilisateur peut décider ou pas de l'appliquer. Les règles sont aussi appelées nœuds décisionnels puisqu'ils correspondent à des décisions prises par l'utilisateur. Ce type d'approche donne un contrôle très important à l'utilisateur. L'ordre d'application des nœuds est symbolisé par des flèches.

L'ensemble des nœuds et des flèches forme alors un arbre décisionnel, aussi appelé processus décisionnel. L'utilisateur a donc la possibilité d'appréhender le processus de conception de manière claire et globale. L'utilisation des nœuds et des processus décisionnels a été inspirée à l'origine par les nœuds technologiques du modèle BENT (Rivard 1997) utilisés dans le module de connaissances de SEED (voir §2.10.2).

Ensuite, on a vu que certains programmes informatiques de conception tentent de créer un espace de conception intégré. En effet, le processus de conception de bâtiments est à l'origine très fragmenté et l'échange de données informatiques entre les différents intervenants engendre d'énormes pertes de temps parce que les données des logiciels sont incompatibles. Les environnements de conception comme IDBE et SEED ont montré l'avantage de rassembler différents modules ou logiciels de conception.

Finalement, on décide d'approfondir les recherches menées sur le DKM (Fortin 2006; Parent 2006b). En effet, cette application répond aux critères de modélisation des connaissances et a été développée de manière à pouvoir s'intégrer à d'autres logiciels (voir § 2.10.3). De plus le moteur du DKM est suffisamment généraliste pour être appliqué dès les premières étapes de la conception.

L'utilisation du DKM pour la réalisation du prototype conduit à adjoindre des objectifs secondaires et détermine en grande partie la méthodologie. En effet, le contexte du développement du DKM et le retour sur son évaluation engendrent de nouveaux objectifs. Par ailleurs, le développement du DKM suit la méthodologie imposée par les premiers concepteurs. Par exemple, on utilise les mêmes outils de programmation. Le chapitre suivant présente en détail les objectifs secondaires et la méthodologie de recherche.

CHAPITRE 3

MÉTHODOLOGIE ET OBJECTIFS

L'objectif de cette étude est de créer un outil informatique qui puisse assister les concepteurs à choisir les sous-systèmes structuraux lors du design conceptuel d'un bâtiment. Pour cela on a décidé de reprendre les travaux effectués auparavant sur le DKM pour implémenter le programme d'un processus de sélection des systèmes structuraux en fonction de différents types de contraintes associées au projet de construction. Ce chapitre revient, dans la section 3.1, sur l'évaluation du DKM lors de son précédent développement, ce qui conduit, dans la section 3.2, à présenter les objectifs secondaires provenant de l'analyse de l'évaluation et du contexte du projet DKM. Le reste de la section est dédiée à la méthodologie. D'abord, la section 3.3 présente les outils informatiques utilisés pour la programmation du prototype. Puis, la section 3.4 expose la méthodologie de recherche, c'est-à-dire les différentes phases de recherche, de développement et d'essai qui sont nécessaires à la réalisation d'un prototype fonctionnel.

3.1 Évaluation du DKM après sa première implémentation

3.1.1 Contexte

Le DKM a fait l'objet de plusieurs présentations après la première implémentation en 2006 devant des chercheurs et des experts. Il a tout d'abord été montré lors de l'*International Conference on Computing and Decision Making in Civil and Building Engineering* (Parent 2006a) qui a eu lieu à Montréal entre le 14 et le 16 juin 2006, puis a été présenté à deux ingénieurs d'expérience lors de réunions séparées. Ces experts sont Mme Hélène Brisebois, ingénieure d'une vingtaine d'années d'expérience chez Saïa Deslauriers Kadanoff Leconte Brisebois Blais, et Mme Sylvie Boulanger, directrice générale de l'ICCA-Québec (Institut Canadien de la Construction en Acier).

Les présentations comprenaient une partie sur les explications du contexte et de l'implémentation du prototype, une seconde partie sur la démonstration en direct du prototype par le concepteur et une troisième partie consacrée aux discussions. Les commentaires recueillis lors des discussions ont permis de mieux déterminer les lacunes du DKM et de cibler un nouvel objectif : l'utilisation du DKM comme outil de formation.

3.1.2 Commentaires

La modélisation du processus de conception

Le processus de conception est bien compris et représente réellement la démarche effectuée par un ingénieur. Il découpe le bâtiment en sous-systèmes indépendants, puis dimensionne les sous-systèmes horizontaux et verticaux correspondants. D'après les commentaires, le découpage du bâtiment en sous-systèmes représente 20% du travail de conception.

Limites du DKM aux cas standards

Les connaissances du DKM se limitent aux cas standards et ne permettent pas de concevoir des bâtiments présentant des irrégularités ou des caractéristiques extraordinaires. Cela peut poser problème car les structures en béton présentent souvent des éléments sur mesure pour le bâtiment. Les concepteurs mettent à profit la flexibilité du béton en concevant des éléments de formes uniques.

L'utilité d'un outil de design conceptuel

Même si certains spectateurs semblaient très intéressés par l'utilisation de logiciels informatiques pour les assister durant l'étape de design conceptuel, d'autres professionnels semblaient plus sceptiques. D'après eux, les ingénieurs expérimentés savent choisir les systèmes structuraux appropriés presque intuitivement. Cette étape ne leur pose pas vraiment de problèmes et ils l'achèvent rapidement.

Le traitement informatique du design conceptuel

Lors de l'étape conceptuelle, les ingénieurs composent la solution structurale à partir de nombreuses informations liées au contexte du projet. Certains professionnels restent sceptiques quant à la capacité d'un logiciel informatique de pouvoir prendre en compte tous ces paramètres. De plus, les données disponibles en phase conceptuelle sont très qualitatives et peu quantitatives. D'après les commentaires, l'imprécision des données disponibles rend difficile le traitement informatique de cette étape de la conception.

La possibilité de faire du DKM un outil pédagogique

D'après leurs commentaires, le DKM pourrait être un bon outil de formation pour les ingénieurs en formation. Il modélise bien le processus de conception, montre les différents choix standards possibles, et guide l'utilisateur parmi les choix pour aboutir à des solutions adaptées aux contraintes du projet.

3.1.3 Conclusions

Le DKM présente certains défauts inhérents aux prototypes. L'interface est sommaire et les connaissances sont incomplètes. Les professionnels ont du mal à imaginer le potentiel du prototype et critiquent des points mineurs. En fait, ils ne critiquent ni la démarche, ni le concept du prototype. Au contraire, les retours sur la modélisation du processus de conception sont très positifs.

Il ressort des commentaires que le DKM pourrait être un outil de formation des étudiants et des jeunes ingénieurs. Ceux-ci mettent de nombreuses années à acquérir des connaissances sur le terrain. Les experts eux-mêmes consacrent beaucoup de temps durant leur carrière à transmettre ces connaissances. Il y a là un gain de temps et de ressources considérables. De plus, une fois les ingénieurs formés à l'utilisation du DKM, ceux-ci pourraient continuer à l'utiliser, à compléter la base de connaissances et à en faire un outil très performant.

3.2 Objectifs secondaires

On définit d'autres objectifs secondaires, en plus de l'objectif principal, qui est de créer un prototype informatique d'aide à la sélection des éléments et des systèmes structuraux en phase conceptuelle.

3.2.1 Faire un outil pédagogique

Les commentaires des experts suggèrent de faire du DKM un outil pédagogique. Par conséquent, le DKM se doit d'être un outil d'aide pour l'ingénieur, non pas un substitut. Le logiciel qui regroupe des connaissances (modélisées sous forme de règles) utiles lors du design conceptuel doit les présenter à l'utilisateur sous une interface claire et simple. L'ingénieur contrôle le processus de conception et le DKM doit être capable de lui fournir toutes les justifications de l'application des règles. Afin que l'utilisateur puisse comprendre tout le processus, l'interface-usager doit offrir des liens vers des pages explicatives. Avec l'expérience les ingénieurs devraient pouvoir outrepasser certaines règles et choisir des solutions non proposées par le DKM. Bref, l'objectif est ici de rendre l'utilisation du DKM la plus transparente possible.

3.2.2 Compléter les connaissances du DKM

Par rapport à la première version du DKM, les nouvelles connaissances ajoutées sont applicables plus tôt dans le processus de design conceptuel. Ces connaissances portent, entre autres, sur la sélection des sous-systèmes horizontaux en fonction des caractéristiques du projet. Elles guident l'utilisateur dans les premières étapes d'interaction avec la première version du DKM. Après l'exécution du nouveau processus décisionnel, l'utilisateur est capable de répondre aux premières questions qui portent sur le choix des matériaux, sur le cheminement des charges et sur le type de dalle.

3.2.3 Créer un module de StAr

StAr fait un pas en avant en fournissant un programme informatique d'aide au design conceptuel des structures de bâtiment. Ce logiciel assiste les ingénieurs dans différentes tâches dont : l'organisation des systèmes structuraux en fonction des espaces, la définition des supports verticaux et des grilles structurales, etc. (voir §2.10.3). Néanmoins, le module de spécification des systèmes structuraux sous StAr est peu développé (Mora 2006).

Le DKM est un outil complémentaire de StAr lors de la spécification des systèmes structuraux. Le DKM présente ces systèmes de manière plus claire qu'une simple liste énumérant les différents types.

3.3 Présentation des outils d'implémentation

Le DKM est un programme écrit en Java. Les sous-sections suivantes expliquent les raisons du choix de ce langage et des autres technologies informatiques utilisées.

3.3.1 Java

Java est le nom d'une technologie mise au point par Sun Microsystems (<http://java.sun.com/>) qui permet de produire des logiciels indépendants de toute architecture matérielle. Cette technologie s'appuie sur différents éléments, dont (Wikipédia 2007) :

- le langage Java qui est un langage de programmation orienté objet;
- le bytecode Java qui est le résultat de la compilation d'un programme écrit en Java par le compilateur Java;
- l'environnement d'exécution Java qui regroupe un ensemble de programmes permettant d'exécuter les applications Java, dont la machine virtuelle Java;
- la machine virtuelle Java qui permet d'interpréter et d'exécuter le bytecode Java;
- la plateforme Java qui correspond à la machine virtuelle Java plus des spécifications d'API (voir plus bas).

Le langage Java est un langage de programmation de haut niveau et orienté objet. L'approche orientée objet est une manière d'analyser "le monde" dans le but de concevoir un programme informatique. Cette approche consiste en la définition et l'assemblage de briques logicielles appelées objets. Un objet représente un concept, une idée ou toute entité du monde physique, comme un bâtiment, une personne ou encore une page d'un livre. L'approche orientée objet est très adaptée à la modélisation des entités structurales et des connaissances, car elle permet de représenter les relations d'agrégation et d'héritage. L'agrégation est utilisée pour définir qu'un volume structural "contient" plusieurs sous-systèmes structuraux. L'héritage des attributs et des méthodes associés aux différents types d'entités structurales peut s'interpréter par le fait qu'une poutre possède tous les attributs d'un élément structural (nom, connexions) plus ceux qui lui sont propre (type de poutre).

La machine virtuelle Java permet d'interpréter et d'exécuter les bytecodes Java. La machine virtuelle est spécifique à chaque plate-forme ou couple machine/système d'exploitation et permet aux applications Java compilées en bytecode de produire les mêmes résultats quelle que soit la plate-forme, tant que celle-ci est pourvue de la machine virtuelle Java adéquate. La portabilité des applications Java est un des grands avantages de cette technologie.

Les API (Application Programming Interface) permettent de faciliter le travail des programmeurs en leur fournissant les outils de base nécessaires. Il existe trois plateformes Java : J2SE (Java 2 Standard Edition), J2EE (Java 2 Enterprise Edition) et J2ME (Java 2 Micro Edition). Dans cette étude on utilise la version 1.4.2 de la plateforme J2SE qui contient les API de base. Les plateformes J2EE et J2ME disposent d'autres API destinées aux serveurs et aux appareils mobiles tels que les PDA (Personal Digital Assistant) ou Smartphones (téléphone mobile couplé à un PDA). L'environnement d'exécution Java, le kit de développement JSE (Java Studio Enterprise) et la plateforme J2SE sont disponibles sur le site de Sun Microsystems (<http://java.sun.com/>).

Un avantage important de Java est de proposer un environnement de développement totalement gratuit ainsi que de nombreuses bibliothèques spécialisées open-source comme JUNG

(voir §3.3.2). Grâce à ces bibliothèques le programmeur n'a pas à "réinventer la roue" lors du développement de son application. Les bibliothèques fournissent des fonctions utilisables immédiatement permettant d'exécuter des tâches plus ou moins complexes et que le programmeur n'aura pas à définir.

3.3.2 La bibliothèque JUNG

JUNG (Java Universal Network/Graph framework) est une bibliothèque open-source pour Java utilisée pour la représentation des nœuds et des processus décisionnels (<http://jung.sourceforge.net/>).

Cette bibliothèque a été conçue pour supporter la représentation d'entités sous la forme de graphes et de réseaux. JUNG est très générale et flexible. Elle a été utilisée dans des projets divers comme Xholon, un programme de représentation des voies métaboliques (Webb 2007), ou Google Cartography un programme de représentation des connexions entre les rues des villes (Jones 2004).

JUNG définit des méthodes de gestion de l'affichage et du comportement des nœuds et des liens qui seront utiles pour la représentation du processus décisionnel. Ces méthodes permettent de définir la forme, la couleur, l'étiquetage et le comportement des nœuds et des liens. La bibliothèque dispose aussi d'algorithmes gérant la disposition des nœuds.

3.3.3 Caché

StAr et DKM utilisent une base de données pour enregistrer, classer et récupérer le modèle structural. La base de données Caché d'InterSystems (<http://www.intersystems.com/>) a été choisie pour ses caractéristiques qui sont :

- sa compatibilité avec les langages C++ et Java. StAr est développé en C++, alors que le DKM est écrit en Java : il faut donc une base de données compatible avec ces deux langages;

- la représentation des données sous forme objet. Le modèle structural étant orienté objet, il est important que la base de données supporte aussi ce mode de représentation;
- la représentation des données sous format SQL (Structured Query Language) (Date et Darwen 1996). Les nœuds décisionnels font appel à des tables de données. Il faut donc que la base de données supporte les deux modes de représentation.

Par ailleurs, Caché permet de définir les classes persistantes et de les projeter en Java ou en C++. Les classes projetées possèdent directement les méthodes contrôlant la lecture et la modification des attributs spécifiques à la classe et les méthodes permettant de sauvegarder les objets dans Caché (voir §5.2.1). Cette fonctionnalité permet de développer rapidement une application basée sur une représentation persistante orientée objet.

Caché est aussi compatible avec l'interface de programmation ODBC (Open DataBase Connectivity) (Microsoft Developer Network 2007) qui permet de lier les bases de données créées sous Caché avec des logiciels de gestion de bases de données comme Microsoft Access. Access fournit une interface plus simple et pratique que le portail d'administration de Caché.

3.4 Méthodologie de recherche

Le développement d'un logiciel impose une méthodologie prédéfinie : conception, implémentation et test. Cette approche permet de ne pas s'écarter des objectifs et de mener à bien le projet. L'étude suit ce cheminement fondamental qui se traduit par les étapes suivantes :

- la recherche et la synthèse des connaissances liées à la sélection des sous-systèmes et des éléments structuraux;
- l'organisation des connaissances en un processus décisionnel;
- analyse du DKM et conception des modifications à apporter;
- implémentation du DKM;

- essai du prototype.

La recherche des connaissances porte en priorité sur les règles intervenant au tout début de la conception. Ces connaissances ont été extraites des codes de construction, d'ouvrages de références, de notes de cours et d'articles.

Une fois les connaissances recueillies, il s'agit de les organiser de manière à produire un processus décisionnel clair et logique. Le processus est alors analysé. On considère la clarté de l'interface et on imagine les actions qui seront exécutées par l'utilisateur. Pour cela on établit un "storyboard" représentant le déroulement d'une session d'application du prototype envisagé. Puis, on optimise l'interface et le processus décisionnel. On retire les éléments les moins concluants et on se concentre sur les points les plus prometteurs. On répète ces tâches jusqu'à ce qu'une solution acceptable soit trouvée.

Une fois le processus et les connaissances bien établies, on analyse le fonctionnement du DKM afin de l'adapter au nouveau processus décisionnel. Le DKM a été conçu de manière générale afin de permettre le développement de nouveaux modules de connaissances. Le processus décisionnel peut donc être implémenté sans modification majeure du moteur du DKM. Néanmoins, la modélisation structurale d'origine du DKM est limitée aux entités définies lors du développement du premier processus décisionnel implémenté, c'est-à-dire aux dalles. Il faut donc définir de nouvelles entités structurales et leurs attributs.

Une fois que l'implémentation des connaissances et des entités structurales dans le programme et dans la base de données est faite, le prototype est testé sur différents exemples. Ces exemples sont choisis pour couvrir différents types de bâtiments. On peut alors identifier clairement les lacunes du logiciel dues aux limites du champ d'application.

Le reste de ce mémoire suit le cheminement établi par la méthodologie. Le chapitre suivant porte ainsi sur la description du processus décisionnel et des connaissances structurales associées.

CHAPITRE 4

PROCESSUS DÉCISIONNEL EN PHASE DE DESIGN CONCEPTUEL

L'objectif de ce chapitre est de présenter les connaissances acquises pour le processus décisionnel en phase de design conceptuel des structures de bâtiments. Après un rappel du processus décisionnel déjà mis en place dans le DKM, le nouveau processus décisionnel à implémenter sera dévoilé. Puis, les systèmes structuraux les plus couramment utilisés seront présentés. Les sections suivantes exposeront les différentes étapes et les connaissances établies pour la sélection des éléments, des assemblages et des sous-systèmes structuraux. Enfin, la dernière section introduira la méthode de comparaison de la pertinence des systèmes structuraux. Le but est de détailler suffisamment la démarche et les connaissances associées pour permettre de concevoir le prototype d'aide à la décision.

4.1 Présentation du processus décisionnel déjà implémenté dans le DKM

Le processus décisionnel déjà mis en place dans le DKM porte sur le design conceptuel des sous-systèmes horizontaux (planchers) en général et sur la conception plus en détail de deux types de sous-systèmes (Parent 2006b), soit les dalles plates en béton (ou dalles sans nervures) et les dalles de béton sur tablier métallique supporté par des poutres ajourées. Ce processus décisionnel se décompose en trois sous-processus.

Le premier sous-processus qui conseille sur le type de sous-système horizontal à utiliser se déroule en quatre étapes :

- la spécification des charges mortes additionnelles;
- le choix du matériau de construction parmi le bois, l'acier ou le béton;
- la détermination du cheminement des charges (unidirectionnel ou bidirectionnel);
- la sélection du type de dalle parmi cinq types : les dalles plates en béton avec ou sans abaques, les dalles de béton nervurées, les dalles de béton sur tablier métallique supporté par des poutrelles ajourées ou des poutres en I.

Les deux autres sous-processus portent sur le dimensionnement préliminaire de deux types de dalles : les dalles en béton sur tablier métallique supporté par des poutrelles ajourées et les dalles plates de béton avec abaques (Parent 2006b). Ces processus sont présentés en Figure 15 et Figure 16. Les différentes étapes sont représentées par des bandes grises ou blanches. Chaque étape correspond à la spécification des caractéristiques d'une propriété de la dalle. Par exemple, la profondeur du tablier métallique est une propriété et la valeur de la profondeur est la caractéristique associée. Le DKM guide l'utilisateur, durant la session de design, en lui présentant les caractéristiques les plus appropriées. Pour plus de détails relatifs à ces processus décisionnels, veuillez consulter le mémoire de Parent (2006b).

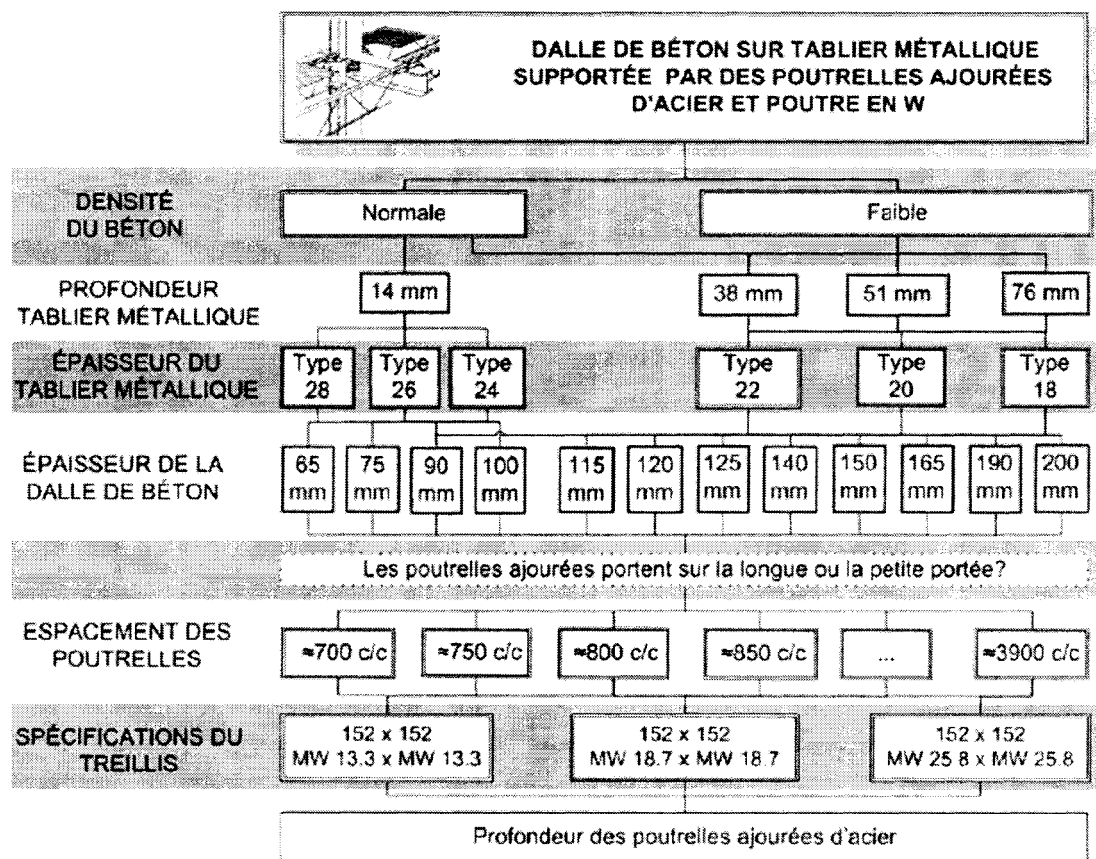


Figure 15 Processus décisionnel associé aux dalles de béton sur tablier métallique supporté par des poutrelles ajourées (Parent 2006b)

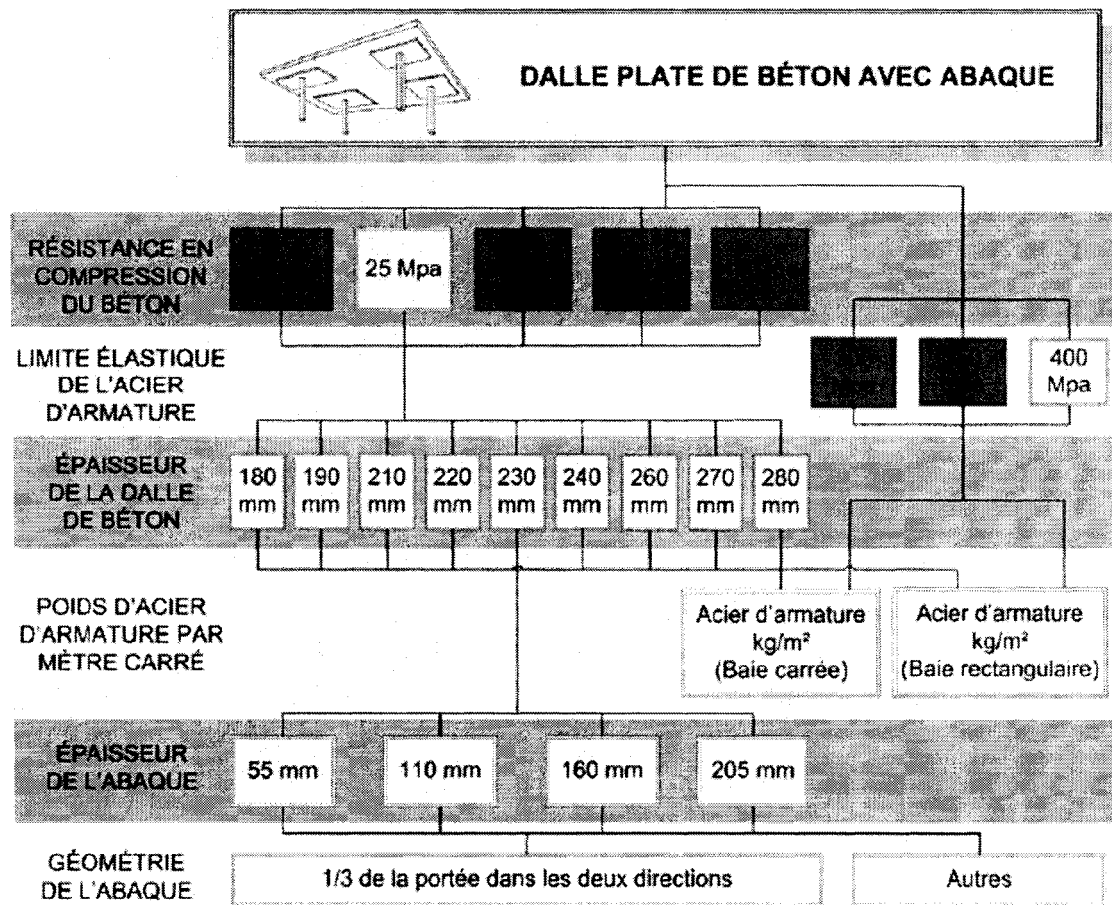


Figure 16 Processus décisionnel associé aux dalles plates de béton avec abaque (Parent 2006b)

4.2 Processus décisionnel augmenté pour le DKM

Le processus décisionnel déjà disponible dans le DKM se concentre surtout sur le dimensionnement préliminaire de deux types de dalles en béton (sous-systèmes horizontaux). Cette étude focalise sur l'aspect conceptuel du processus de design en structure. Le processus décisionnel qui sera établi intervient plus tôt, si bien qu'il se situe en amont du processus décisionnel déjà mis en place dans le DKM. Ce nouveau processus assistera l'utilisateur dans la sélection des types de sous-systèmes horizontaux et verticaux ainsi que dans la détermination des éléments structuraux associés.

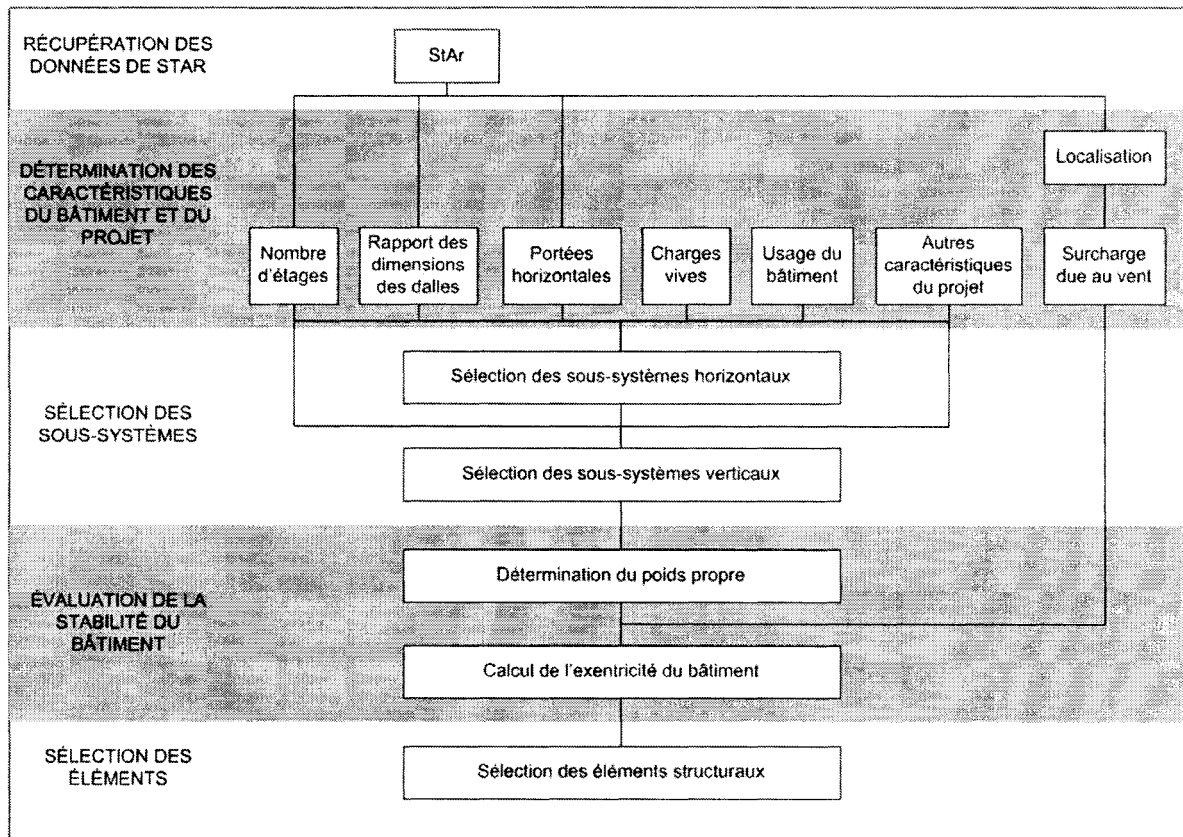


Figure 17 Processus décisionnel associé à la sélection des sous-systèmes et des éléments structuraux

Le processus décisionnel élaboré dans cette étude se déroule de la manière suivante (voir Figure 17) :

1. Tout d'abord, on récupère les informations utiles disponibles dans le modèle StAr. Ces informations portent sur la géométrie du bâtiment et la localisation du bâtiment. Cette étape est optionnelle. En effet le programme peut aussi fonctionner sans avoir récupéré les données de StAr. Dans ce cas, l'utilisateur doit spécifier manuellement la hauteur du bâtiment, les grilles structurales et la localisation du bâtiment;
2. le concepteur spécifie les autres caractéristiques du bâtiment comme l'intensité des charges vives ou l'usage du bâtiment;
3. on sélectionne les sous-systèmes structuraux. Les sous-systèmes horizontaux sont choisis en fonction des propriétés du bâtiment comme les portées (Schodek 2001) ou l'usage du bâtiment (Allen et Iano 2006). Après avoir choisi les sous-systèmes horizontaux, le choix des sous-systèmes verticaux est limité par le besoin de

connecter les sous-systèmes ensemble. Le choix portera sur des sous-systèmes verticaux qui vont de pair avec les sous-systèmes horizontaux et qui assureront au bâtiment une stabilité acceptable. La sélection des sous-systèmes horizontaux est placée avant l'étape de sélection des sous-systèmes verticaux car, en pratique, les concepteurs choisissent généralement les sous-systèmes dans cet ordre (Lin et Stotesbury 1988; Parent 2006b);

4. on vérifie la stabilité du bâtiment. D'après Lin et Stotesbury (1988), lors de la phase conceptuelle, le concepteur imagine le bâtiment comme un solide simple en trois dimensions (par exemple, un parallélépipède rectangle). Il vérifie la stabilité globale du bâtiment qui s'exprime par la comparaison de l'excentricité et de l'excentricité maximale. Pour cela il faut calculer le poids propre du bâtiment et les surcharges dues au vent. Seule l'action du vent est prise en compte dans l'estimation des forces latérales car les calculs d'estimation des charges provoquées par les séismes sont complexes (voir §4.6);
5. on sélectionne les assemblages et les éléments structuraux qui sont stables en fonction des sous-systèmes choisis précédemment.

Une fois le processus effectué, le concepteur dispose d'une liste restreinte de systèmes et d'éléments structuraux choisis en fonction des caractéristiques du bâtiment et du projet. Il pourra par la suite spécifier le type de chaque élément et de chaque sous-système à l'aide de cette liste. Le processus décisionnel déjà en place pourra utiliser cette liste pour faire apparaître les types de dalle les plus appropriés parmi les cinq types implémentés dans le DKM.

4.3 Présentation des systèmes structuraux couramment utilisés

Le processus décisionnel permet au concepteur de choisir les sous-systèmes et les éléments structuraux parmi une liste qui représente les systèmes les plus couramment utilisés. On retrouve (Schodek 2001; Allen et Iano 2006) :

Pour les sous-systèmes horizontaux :

- Pour les systèmes en bois :
 - Construction à ossature de bois
 - Construction à poutres et poteaux
 - Poutre lamellée
 - Portique lamellé
 - Treillis lourd
- Pour les systèmes en acier :
 - Dalle sur poutres en I
 - Dalle sur poutres ajourées
 - Dalle sur poutrelles
 - Portique
 - Treillis
- Pour les systèmes unidirectionnels en béton coulé sur place :
 - Dalle pleine
 - Dalle pleine post-tendue
 - Dalle sur poutres
 - Dalle nervurée
 - Dalle nervurée post-tendue
- Pour les systèmes bidirectionnels en béton coulé sur place :
 - Plaque sans nervure
 - Plaque sans nervure post-tendue
 - Dalle sur poutres
 - Dalle sans nervure
 - Dalle sans nervure post-tendue
 - Dalle nervurée
 - Dalle nervurée post-tendue
- Pour les systèmes en béton préfabriqué :
 - Dalle creuse
 - Dalle pleine
 - Profilé en T
 - Profilé en double T

Pour les sous-systèmes verticaux :

- Pour les systèmes en bois :
 - Construction à ossature de bois
 - Construction à poutres et poteaux
- Pour les systèmes en maçonnerie :
 - Colonne, mur, linteau
- Pour les systèmes en acier :
 - Construction métallique légère
 - Cadre rigide
 - Cadre à contreventement en treillis
- Pour les systèmes en béton coulé sur place :

- Colonne, mur à refend et poutre
- Pour les systèmes en béton préfabriqué :
 - Colonne
 - Mur

Les éléments et assemblages associés aux sous-systèmes horizontaux sont :

- Pour les systèmes en bois :
 - Plancher à solives
 - Plancher et charpente de toit
 - Tablier de plancher en madriers
 - Poutre
 - Poutre lamellé
 - Portique lamellé
 - Treillis lourd
- Pour les systèmes en acier :
 - Plancher mixte et toit
 - Poutre
 - Poutre ajourée
 - Poutrelle
 - Portique
 - Treillis
- Pour les systèmes en béton coulé sur place :
 - Poutre
 - Dalle pleine unidirectionnelle
 - Dalle pleine post-tendue unidirectionnelle
 - Dalle sur poutres unidirectionnelle
 - Dalle nervurée unidirectionnelle
 - Dalle nervurée post-tendues unidirectionnelle
 - Plaque sans nervure bidirectionnelle
 - Plaque sans nervure post-tendue bidirectionnelle
 - Dalle sur poutres bidirectionnelle
 - Dalle sans nervure bidirectionnelle
 - Dalle sans nervure post-tendue bidirectionnelle
 - Dalle nervurée bidirectionnelle
 - Dalle nervurée post-tendue bidirectionnelle
- Pour les systèmes en béton préfabriqué :
 - Poutre
 - Dalle creuse
 - Dalle pleine
 - Profilé en T
 - Profilé en double T

Les éléments et assemblages associés aux sous-systèmes verticaux sont :

- Pour les systèmes en bois :
 - Montant
 - Chevron
 - Poteau
- Pour les systèmes en maçonnerie :
 - Colonne en briques
 - Mur en brique
 - Linteaux en brique
 - Colonne en blocs de béton
 - Mur en blocs de béton
 - Linteaux en blocs de béton
- Pour les systèmes en acier :
 - Colonne
 - Colonne tube
- Pour les systèmes en béton coulé sur place :
 - Colonne
 - Mur à refend
- Pour les systèmes en béton préfabriqué :
 - Colonne
 - Panneau de mur

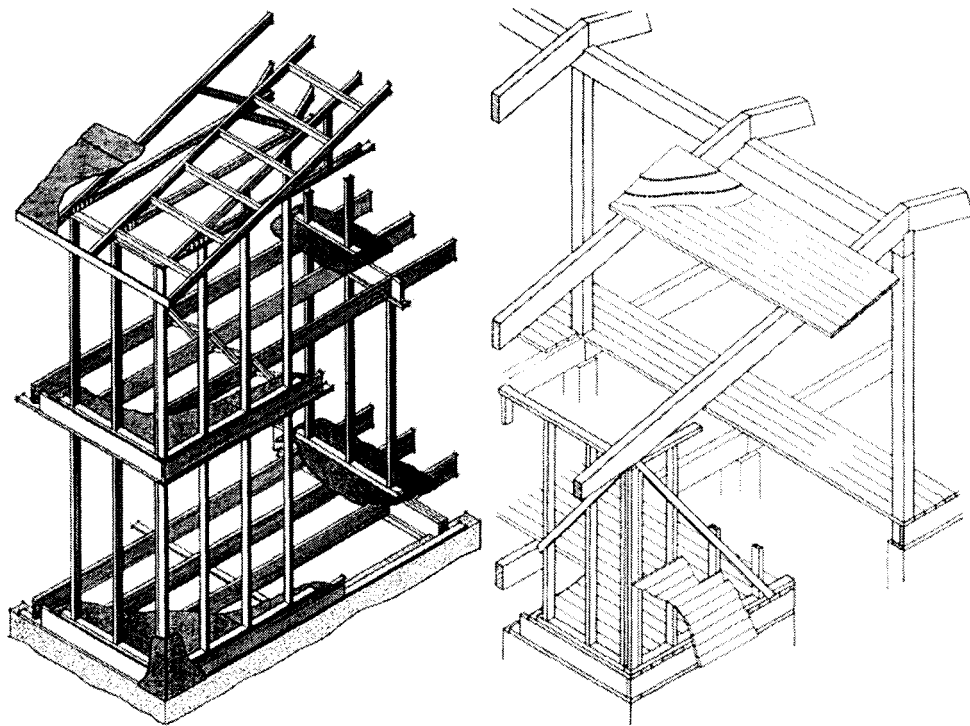
Les constructions en bois sont catégorisées selon deux types distincts (Allen et Iano 2006) (voir Figure 18) :

- les structures légères utilisant des membres relativement fins (montants, solives, chevrons, etc.) et peu espacés formant les murs, les planchers et les toits. Ces structures sont nommées constructions à ossature de bois (Conseil canadien du bois 1989);
- les constructions à éléments plus gros, appelées constructions à poteaux et poutres (Conseil canadien du bois 1989).

Les constructions métalliques sont souvent des assemblages de poutres et de colonnes formant une ossature à nœuds rigides résistant aux moments ou un cadre à contreventement en treillis. Les constructions métalliques légères sont l'équivalent en acier des constructions à ossature de bois (Allen et Iano 2006). Elles ont l'avantage d'être beaucoup plus résistantes au feu que leurs homologues en bois.

Les sous-systèmes horizontaux en béton sans nervures ni poutres et coulés sur place sont différenciés selon qu'ils comportent ou pas des abaques et/ou des panneaux surbaissés : les systèmes sans abaques et/ou panneaux surbaissés sont appelés plaques et les autres sont appelés dalles.

Le processus décisionnel et les systèmes structuraux associés ont été présentés globalement, ce qui conduit maintenant à l'introduction des connaissances utilisées à chaque étape du processus dans les sections suivantes.



**Figure 18 Construction à ossature de bois (à gauche) et construction à poutres et poteaux (à droite)
(Conseil canadien du bois 1989)**

4.4 Détermination des caractéristiques du bâtiment

À cette étape, le concepteur doit en premier lieu évaluer le degré d'aptitude au projet de chacun des sous-systèmes horizontaux définis à la section 4.3. Chaque type de système structural est jugé sur sept types de critères :

- le nombre d'étage du bâtiment;
- le rapport des dimensions (longueur et largeur) des dalles;
- les portées des travées horizontales;
- l'usage des espaces;
- l'intensité des charges vives;
- les caractéristiques du projet;
- l'usage prévu du bâtiment.

Chacun des critères d'évaluation et les connaissances associés sont présentés respectivement dans les sous-sections 4.4.1 à 4.4.7. La sous-section 4.4.8 présente comment les aptitudes de chaque type de système structural par rapport aux critères d'évaluation sont synthétisées sous la forme d'une unique note qui reflète l'aptitude du système structural au projet. Par la suite on utilisera le terme de "niveau d'aptitude" pour désigner la synthèse sous la forme d'une seule note (ou score) de l'évaluation de l'aptitude de chaque système structural par rapport à chaque critère.

4.4.1 Le nombre d'étages du bâtiment

Cette sous-section expose comment on a établi un tableau de sélection des sous-systèmes horizontaux selon le nombre d'étages. Ce tableau incorpore des connaissances de type règle du pouce (voir définition §2.5.1).

Pour des structures en bois

Le CNBC 2005 (Code National du Bâtiment du Canada) n'autorise pas les systèmes structuraux en bois dans les bâtiments de plus de cinq étages. Par conséquent les sous-systèmes horizontaux en bois sont limités aux structures de moins de cinq étages.

Pour des structures autres qu'en bois

Le nombre d'étages est relié (dans une certaine limite) à l'élancement d'un bâtiment. Si l'on construit une tour de 40 étages, c'est parce que la surface au sol est limitée. Or, plus la

structure est élancée, plus elle est sensible à la déflexion latérale (voir Figure 19) et cette déflexion est limitée par les codes de construction (Lin et Stotesbury 1988). Ainsi, plus un bâtiment est élevé, plus sa structure doit être rigide, ce qui a un impact sur le choix des systèmes structuraux.

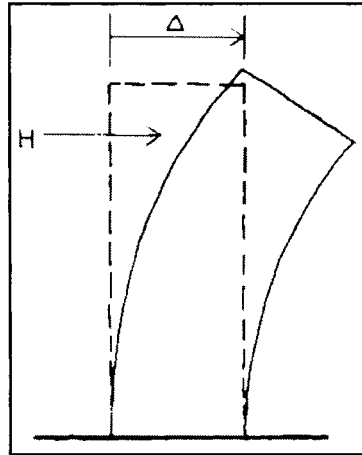


Figure 19 Déflexion (Δ) d'un bâtiment soumis aux charges horizontales (H) (Lin et Stotesbury 1988)

Cette étude se limite aux bâtiments de moins de 40 étages. Dans ce cas, on utilise des systèmes structuraux simples (ceux décrits au §4.3) et souvent confinés à une partie de l'ossature. En effet, la disposition de murs de refends à quelques emplacements bien choisis suffit souvent à limiter les déformations latérales du bâtiment. Pour les bâtiments plus élevés, il faut que les systèmes structuraux s'étendent à la totalité de l'ouvrage pour limiter les déformations. On utilise alors des systèmes tels que des tubes (World Trade Center 110 étages), des poutres traversières, des poutres ceintures, des grandes ossatures, etc.

D'après Tremblay (1997), le système de résistance à la déflexion latérale détermine le nombre d'étages maximum d'un bâtiment selon les règles du pouce suivantes :

- les contreventements en treillis sont très efficaces pour des structures de 20-25 étages et moins environ, quoiqu'ils aient déjà été utilisés pour certains bâtiments plus élevés comme les tours Woolworth (57 étages) à New-York;
- les cadres à nœuds rigides peuvent être utilisés dans des bâtiments jusqu'à 40 étages;

- les murs de refend sont efficaces pour des structures ayant jusqu'à 30-35 étages environ.

De plus, d'après Allen et Iano (2006), les sous-systèmes horizontaux sont liées à la résistance à la déflexion latérale de la manière suivante :

- les ouvrages en béton préfabriqués sont généralement associés à des murs de refend ou à des cadres à nœuds rigides, bien qu'il soit possible dans certaines circonstances de les associer à des contreventements en treillis;
- les dalles pleines unidirectionnelles, les plaques et les dalles sans nervures bidirectionnelles sont généralement associées à des structures à nœuds semi-rigides avec murs porteurs ou contreventements;
- les dalles sur poutres et les dalles nervurées peuvent être associées à des structures à nœuds rigides ou semi-rigides avec murs porteurs ou contreventements.

D'autre part, le choix des sous-systèmes horizontaux est lié au choix des sous-systèmes verticaux qui sont influencés par le nombre d'étages. Par exemple, les sous-systèmes horizontaux en acier sont associés à des sous-systèmes verticaux en acier qui sont généralement de deux types : soit des cadres à nœuds rigides, soit des structures à contreventement en treillis. Bref, les sous-systèmes horizontaux peuvent être indirectement reliés à un nombre d'étages maximal, puisque les sous-systèmes verticaux associés sont reliés directement au nombre d'étages de la structure.

Synthèse

On établit, à l'aide des informations précédentes, un tableau représentant les règles du pouce pour la sélection des sous-systèmes horizontaux. Le Tableau II présente les différents sous-systèmes horizontaux selon le nombre d'étages maximal approximatif des bâtiments dans lesquels ils sont utilisés. Les nombres suivis d'un astérisque correspondent à une limite absolue du nombre d'étages. C'est le cas des systèmes en bois qui ne sont pas autorisés pour les bâtiments de plus de cinq étages au Canada.

Tableau II

Nombre d'étages maximum d'un bâtiment en fonction du sous-système horizontal utilisé

Matériau	Sous-système horizontal	Nombre d'étages maximum
Bois	Construction à ossature de bois	5*
	Construction à poutres et poteaux	5*
	Poutre lamellée	5*
	Portique lamellé	5*
	Treillis lourd	5*
Acier	Poutre	40
	Poutre ajourée	40
	Poutrelle	40
	Portique	40
	Treillis	40
Béton coulé sur place (systèmes unidirectionnels)	Dalle pleine	35
	Dalle pleine post-tendue	35
	Dalle sur poutres	40
	Dalle nervurée	40
	Dalle nervurée post-tendue	40
Béton coulé sur place (systèmes bidirectionnels)	Plaque sans nervures	35
	Plaque sans nervure post-tendue	35
	Dalle sur poutres	40
	Dalle sans nervure	35
	Dalle sans nervure post-tendue	35
	Dalle nervurée	40
	Dalle nervurée post-tendue	40
Béton préfabriqué	Dalle creuse	40
	Dalle pleine	40
	Profilé en T	40
	Profilé en double T	40

* : Limite absolue selon le CNBC 2005

4.4.2 Choix entre un système unidirectionnel ou un système bidirectionnel

Les systèmes horizontaux en bois sont unidirectionnels et c'est en général de même pour les systèmes en acier (Schodek 2001). Les dalles de béton creuses préfabriquées sont unidirectionnelles.

D'après le CNBC 2005, les dalles de béton dont le rapport entre les deux dimensions (longueur et largeur) est supérieur à 2 agissent comme des systèmes unidirectionnels. Dans ce cas, on devra utiliser des systèmes unidirectionnels. Dans le cas contraire, les deux types de systèmes peuvent être utilisés. Notons que pour qu'une dalle travaille bidirectionnellement, il est impératif qu'elle soit soutenue sur tout son contour (par des poutres ou des murs).

4.4.3 Les portées des travées horizontales

Selon les portées à franchir, certains sous-systèmes horizontaux sont plus adaptés que d'autres. Les connaissances correspondantes proviennent des différents tableaux présentés dans *l'Architect's Studio Companion* (Allen et Iano 2006) et dans *Structures* (Schodek 2001). Elles fournissent des renseignements concernant les portées minimales et maximales des différents éléments structuraux horizontaux ainsi que les portées typiques. Toutes ces informations sont synthétisées sous la forme d'un tableau (voir Tableau III) qui rapproche les différents sous-systèmes horizontaux et les portées conseillées. Certains systèmes n'ont pas de portée typique; c'est le cas, par exemple, des treillis. Il existe différents type de treillis, avec des formes et des portées différentes. Il est donc difficile d'affirmer qu'ils ont une portée typique.

Les données des ouvrages de Schodek et d'Allen et Iano ont été recoupées de la manière suivante. Les portées minimales et maximales du Tableau III correspondent aux valeurs les moins restrictives qui ont été trouvées. Les portées maximales coïncident ainsi avec les plus grandes valeurs trouvées, et inversement pour les portées minimales. De manière générale,

les valeurs les moins restrictives proviennent de l'ouvrage d'Allen et Iano. En ce qui concerne les portées typiques, toutes les valeurs ont été récupérées de l'ouvrage de Schodek.

Tableau III

Portées recommandées pour différents sous-systèmes horizontaux (Schodek 2001; Allen et Iano 2006)¹

Matériau	Sous-système horizontal	Portée minimale [m]	Portée typique [m]	Portée maximale [m]
Bois	Construction à ossature de bois	2,5	4,5	6,5
	Construction à poutres et poteaux	2,5	5	10
	Poutre lamellée	2,5	9	30
	Portique lamellé	9	24	75
	Treillis lourd	9	-	60
Acier	Poutre	3	9	23
	Poutre ajourée	3	18	43
	Poutrelle	1,8	3	9
	Portique	9	-	45
	Ferme	9	-	90
Béton coulé sur place (systèmes unidirectionnels)	Dalle pleine	1,8	4,5	6
	Dalle pleine post-tendue	4	6,5	9
	Dalle sur poutres	4	6,5	9
	Dalle nervurée	2,5	10,5	13
	Dalle nervurée post-tendue	8	16,5	25
Béton coulé sur place (systèmes bidirectionnels)	Plaque sans nervure	3	6	12
	Plaque sans nervure post-tendue	5	9,5	14
	Dalle sur poutres	5	9,5	14
	Dalle sans nervure	2,5	9	12
	Dalle sans nervure post-tendue	4	9	14
	Dalle nervurée	7	10,5	18
	Dalle nervurée post-tendue	7	16,5	26
Béton préfabriqué	Dalle creuse	4,5	9	13
	Dalle pleine	2,5	6	9
	Profilé en T	9	24	39
	Profilé en double T	7	17	30

¹ Le tableau est la compilation de tableaux et d'informations tirées de *The Architect's Studio Companion* de Allen et Iano (2006), et de *Structures* de Schodek (2001).

4.4.4 L'usage des espaces

Le CNBC 2005 et l'UBC (International Code Council 2000) fournissent des tables concernant les charges vives associées à différents types d'occupations des espaces. Les charges définies à la fois par le CNBC 2005 et l'UBC 2000 se recoupent la plus part du temps. Néanmoins, certaines charges ne sont définies que par l'un ou l'autre des deux codes ; ce qui permet, en regroupant les informations des deux sources, d'avoir un ensemble de charges vives typiques plus vaste. En effet selon l'occupation d'une pièce, celle-ci va devoir supporter plus ou moins de charges. Par exemple, des bureaux n'auront pas à supporter beaucoup d'équipement, ni de nombreuses personnes. La charge vive associée à ce type d'espace est de 2,4 kPa (sauf si elle se situe au premier étage), alors qu'elle est de 12 kPa pour des entrepôts lourds (les espaces de ce type doivent supporter beaucoup de charges). Toutes ces informations sont synthétisées dans le Tableau IV.

4.4.5 L'intensité des charges vives

Selon les charges vives à supporter, certains sous-systèmes horizontaux se montrent plus efficaces ou économiques que d'autres. Les connaissances portant sur la relation entre les charges vives admissibles conseillées des sous-systèmes horizontaux proviennent de l'*Architect's Studio Companion* (Allen et Iano 2006) et sont rassemblées dans le Tableau V. L'ouvrage propose d'associer à chaque système un niveau d'intensité des charges vives plutôt qu'une valeur exacte. Il y a quatre niveaux :

- intensité faible, pour les charges de 1,0 kPa à 2,9 kPa;
- intensité moyenne, pour les charges de 2,9 kPa à 4,8 kPa;
- intensité importante, pour les charges de 4,8 kPa à 7,2 kPa;
- intensité très importante, pour les charges de 7,2 kPa à 12,0 kPa.

L'avantage d'un tel découpage est qu'il permet de choisir rapidement un système en fonction de l'occupation du bâtiment en utilisant le Tableau IV et le Tableau V. En design conceptuel, il est souhaitable d'utiliser des règles d'évaluation rapide.

Tableau IV

Charges vives associées à l'occupation des espaces (International Code Council 2000; Conseil national de recherches du Canada 2006a)²

Type de pièce		CV [kPa]	Type de pièce		CV [kPa]	
Aire résidentielle (autre que chambre)	privée	1,9	Mezzanine		4,8	
	publique	4,8	Musée		4,8	
Allée		4,8	Passerelle		4,8	
Armurerie		7,2	Patinoire		4,8	
Auditorium		4,8	Piste de danse		4,8	
Balcon	résidence une ou deux familles	4,8	Promenoir		4,8	
		2,9	Restaurant		4,8	
Bibliothèque		7,2	Salle à manger		4,8	
Bureau	au premier étage	2,4	Salle d'attente		1,9	
		4,8	Salle d'audience		2,4	
Cellule		1,9	Salle de billard		3,6	
Chambre (habitation)	habitation d'une ou deux familles	1,9	Salle de classe		2,4	
		1,4	Salle de conférence		2,4	
Chambre de patient		1,9	Salle de lecture		2,9	
Comble	habitable	1,4	Salle de quilles		3,6	
	stockage	1,0	Salle de rayonnage		7,2	
	pas de stockage	0,5	Salle de séjour (habitation)		1,9	
Corniche		2,9	Salle de spectacle	sièges non fixés	4,8	
Corridor	au premier étage	4,8		sièges fixés	2,4	
	au dessus du premier étage	3,9	Salle de toilette		2,4	
	corridor privé d'habitation	1,9	Salle d'étude		2,9	
Cour		4,8	Salle d'opération		3,6	
Cuisine (hors habitation)		4,8	Scène		6,0	
Église	sièges non fixés	4,8	Stade		4,8	
	sièges fixés	2,4	Terrasse		4,8	
Entrepôt	léger	4,8	Théâtre	sièges non fixés	4,8	
	lourd	12,0		sièges fixés	2,4	
Escalier	escalier intérieur de logement	4,8	Toit	pas de neige	1,0	
		1,9		neige modérée	2,9	
Foyer		4,8		haute montagne	4,8	
Garage	pour automobiles	2,4	piéton		4,8	
	pour autobus non chargé et camion léger	6,0		Tribune		4,8
	pour camions et autobus chargés	12,0		Trottoir		12,0
Gradin		4,8	Usine	légère	6,0	
Gymnase		4,8		lourde	12,0	
Hall		4,8				
Hall d'entrée		4,8				
Issue		4,8				
Laboratoire		3,6				
Local technique		3,6				
Magasin	commerce détail (premier étage)	4,8				
	commerce détail (au dessus du premier	3,6				
	commerce en gros	6,0				

² Le tableau est la compilation de tableaux tirés du CNBC (2006) et de l'UBC (2000).

Tableau V

Charges vives admissibles conseillées pour différents sous-systèmes horizontaux (Allen et Iano 2006)³

Matériau	Sous-système horizontal	Intensité des charges vives			
		Faible	Moyenne	Importante	Très Importante
Bois	Construction à ossature de bois	■	■	■	■
	Construction à poutres et poteaux	■	■	■	■
	Poutre lamellée	■	■	■	■
	Portique lamellé	■	■	■	■
	Treillis lourd	■	■	■	■
Acier	Poutre	■	■	■	■
	Poutre ajourée	■	■	■	■
	Poutrelle	■	■	■	■
	Portique	■	■	■	■
	Ferme	■	■	■	■
Béton coulé sur place (systèmes unidirectionnels)	Dalle pleine	■	■	■	■
	Dalle pleine post-tendue	■	■	■	■
	Dalle sur poutres	■	■	■	■
	Dalle nervurée	■	■	■	■
	Dalle nervurée post-tendue	■	■	■	■
Béton coulé sur place (systèmes bidirectionnels)	Plaque sans nervure	■	■	■	■
	Plaque sans nervure post-tendue	■	■	■	■
	Dalle sur poutres	■	■	■	■
	Dalle sans nervure	■	■	■	■
	Dalle sans nervure post-tendue	■	■	■	■
	Dalle nervurée	■	■	■	■
	Dalle nervurée post-tendue	■	■	■	■
Béton préfabriqué	Dalle creuse	■	■	■	■
	Dalle pleine	■	■	■	■
	Profilé en T	■	■	■	■
	Profilé en double T	■	■	■	■

³ Le tableau a été établi à partir des tableaux de *The Architect's Studio Companion* de Allen et Iano (2006).

4.4.6 Les caractéristiques du projet

Dans *l'Architect's Studio Companion* (Allen et Iano 2006), les auteurs offrent des conseils quant au choix du type de système en fonction de certaines caractéristiques de projets que l'on rencontre régulièrement. Cela peut être, par exemple, le besoin de construire rapidement le bâtiment, de minimiser les zones occupées par des colonnes ou des murs porteurs, etc.

Ces connaissances sont synthétisées sous la forme d'un tableau (voir Tableau VI) qui met en correspondance les différentes caractéristiques avec les différents types de sous-systèmes horizontaux. Un *X* signifie que le système est adapté à la caractéristique. Un *XX* signifie qu'un système est particulièrement adapté à la caractéristique et qu'il est donc plus adapté qu'un système désigné par un *X*. Par exemple, si l'on veut minimiser l'épaisseur des planchers, les plaques sans nervures et post-tendues sont plus efficaces que les plaques sans nervures et non post-tendues, même si celles-ci restent une bonne solution pour réduire l'épaisseur du plancher. En effet, la post-tension est une technique réputée pour la réduction des sections des poutres en béton.

4.4.7 L'usage prévu du bâtiment

L'usage du bâtiment peut avoir des répercussions sur la forme du bâtiment, sur la trame de la structure et sur le type de charge rencontrée. Par exemple, un stade à une forme particulière due à sa fonction : une trame structurale avec de grandes portées afin d'éviter les colonnes qui gêneraient les spectateurs et des charges associées à la grande concentration de personnes sur les tribunes. Le Tableau VII regroupe les connaissances tirées de *l'Architect's Studio Companion* (Allen et Iano 2006). Ce tableau désigne les systèmes les plus adaptés en fonction de l'usage escompté du bâtiment. Comme précédemment, un *X* désigne la correspondance.

Tableau VI

Sous-systèmes horizontaux conseillés en fonction des caractéristiques du projet (Allen et Jano 2006)⁴

Matériau	Sous-système horizontal	Contraintes géométriques										Contraintes liées aux travaux										Contraintes liées aux réactions structurales		Contraintes diverses	
		Créer un bâtiment de forme irrégulière	Exposer la structure tout en conservant une très haute résistance au feu	Permettre de placer des colonnes en dehors des grilles	Minimiser l'épaisseur du plancher	Se passer de contreventement ou de murs porteurs	Travaux sous la pluie	Minimiser les temps de travaux hors chantier	Minimiser les temps de construction (bâtiment de moins de 2 étages)	Minimiser le temps de construction (bâtiment de 20 étages)	Minimiser le temps de construction (bâtiment de 4 à 20 étages)	Minimiser les charges mortes sur les fondations	Fournir des espaces camouflés pour les conduits	Faciliter les modifications futures	Minimiser les tensions structurales dues à des fondations instables	Fournir le nombre d'intervenants	Faciliter les modifications futures	Minimiser le nombre d'intervenants	Faciliter les modifications futures						
Bois	Construction à ossature de bois	X					X	X	X				X	X			X	X	X	X	X				
	Construction à poutres et poteaux		X				X	X	X				X	X			X	X	X	X	X				
	Poutre lamellée		X	X			X	X	X				X	X			X	X	X	X	X				
	Portique lamellé		X	X			X	X	X				X	X			X	X	X	X	X				
	Treillis lourd		X	X			X	X	X				X	X			X	X	X	X	X				
Acier	Poutre				X	X	X	X	X	X	X		X	X			X	X			X				
	Poutre ajourée	X			X	X	X	X	X	X	X		X	X			X	X			X				
	Poutrelle				X	X	X	X	X	X	X		X	X			X	X			X				
	Portique				X	X	X	X	X	X	X		X	X			X	X			X				
	Ferme				X	X	X	X	X	X	X		X	X			X	X			X				
Béton coulé sur place (systèmes unidirectionnels)	Dalle pleine	X	X				X				X										X				
	Dalle pleine post-tendue	X	X		XX		X				X										X				
	Dalle sur poutres		X				XX				X										X				
	Dalle nervurée		X			X	XX				X										X				
	Dalle nervurée post-tendue		X			X	XX				X										X				
Béton coulé sur place (systèmes bidirectionnels)	Plaque sans nervures	X	X	X	X		X				X														
	Plaque sans nervure post-tendue	X	X	X	XX		X				X														
	Dalle sur poutres		X				XX				X														
	Dalle sans nervure	X	X	X	X		XX				X														
	Dalle sans nervure post-tendue	X	X	X	XX		XX				X														
	Dalle nervurée		X			X	XX				X														
Béton préfabriqué	Dalle creuse		X		XX		X	X			X					X					X				
	Dalle pleine		X		XX		X	X			X					X					X				
	Profilé en T		X			X	X	X			X					X									
	Profilé en double T		X			X	X	X			X					X									

X : désigne un système approprié à la caractéristique

XX : désigne un système plus approprié qu'un système marqué d'un X

⁴ Le tableau a été établi à partir des tableaux et des informations de *The Architect's Studio Companion* d'Allen et Jano (2006).

Tableau VII

Sous-systèmes horizontaux conseillés en fonction de l'usage du bâtiment (Allen et Iano 2006)⁵

Matériau	Sous-système horizontal	Usage du bâtiment																
		Stade	Salle de concert	Hôpital & Laboratoire	Entrepôt & bâtiment industriel	Bâtiment institutionnel : petit à moyen	Bâtiment institutionnel : grand	Bibliothèque	Bureaux : petit à moyen	Garage	Lieu de culte	Bâtiment résidentiel	Bâtiment résidentiel : une ou deux familles	Bâtiment résidentiel : petit à moyen	École	Centre commercial	Bâtiment élevé	Théâtre
Bois	Construction à ossature de bois				X			X		X	X	X						
	Construction à poutres et poteaux				X					X	X							
	Poutre lamellée				X	X			X		X			X				X
	Portique lamellé				X					X								
Acier	Treillis lourd				X					X								
	Poutre	X	X	X	X	X	X	X	X	X			X	X	X	X	X	X
	Poutre ajourée	X		X	X	X	X		X	X			X	X				X
	Poutrelle					X			X		X							
	Portique				X					X							X	X
Béton coulé sur place (systèmes unidirectionnels)	Ferme	X	X	X	X		X										X	X
	Dalle pleine		X	X	X	X	X	X				X	X	X	X			X
	Dalle pleine post-tendue		X	X	X	X	X	X				X	X	X	X			X
	Dalle sur poutres		X	X	X	X	X	X				X	X	X	X			X
	Dalle nervurée					X			X					X				X
Béton coulé sur place (systèmes bidirectionnels)	Dalle nervurée post-tendue					X			X				X					X
	Plaque sans nervures				X	X		X				X	X		X	X	X	X
	Plaque sans nervure post-tendue				X	X		X				X	X		X	X	X	X
	Dalle sur poutres				X	X		X				X	X		X	X	X	X
	Dalle sans nervure		X	X	X		X	X	X	X				X	X			
	Dalle sans nervure post-tendue		X	X	X		X	X	X	X				X	X			
Béton préfabriqué	Dalle nervurée		X											X	X			
	Dalle nervurée post-tendue		X											X	X			
	Dalle creuse			X	X	X	X		X	X			X	X	X	X	X	
	Dalle pleine			X	X	X	X		X	X			X	X	X	X	X	
Béton préfabriqué	Profilé en T				X		X			X								
	Profilé en double T				X		X			X								

⁵ Le tableau a été établi à partir des tableaux et des informations de *The Architect's Studio Companion* d'Allen et Iano (2006).

4.4.8 Calcul du niveau d'aptitude

Cette sous-section présente une méthodologie pour permettre de comparer les sous-systèmes horizontaux entre eux. Comme on l'a vu dans les sections précédentes, les systèmes sont jugés sur différents critères. La méthode de comparaison consiste à calculer une note sur 100 pour chaque critère puis de faire la moyenne des notes (tous les critères ont un poids égal) pour obtenir un score final. Les scores finaux permettront à l'utilisateur de guider ses choix. Les scores des critères des sous-systèmes horizontaux se calculent de la manière suivante.

Le nombre d'étages (voir §4.4.1)

Le score est calculé à partir du Tableau II. Pour ne pas disqualifier des systèmes de manière abrupte (par exemple en donnant un score de 100 pour les systèmes si le bâtiment a moins de n étages contre un score de 0 sinon), il a été décidé d'utiliser une fonction continue pour déterminer le score. Les informations récupérées concernant le nombre d'étages étant approximées à cinq étages près, on a décidé de répartir les scores de la manière suivante.

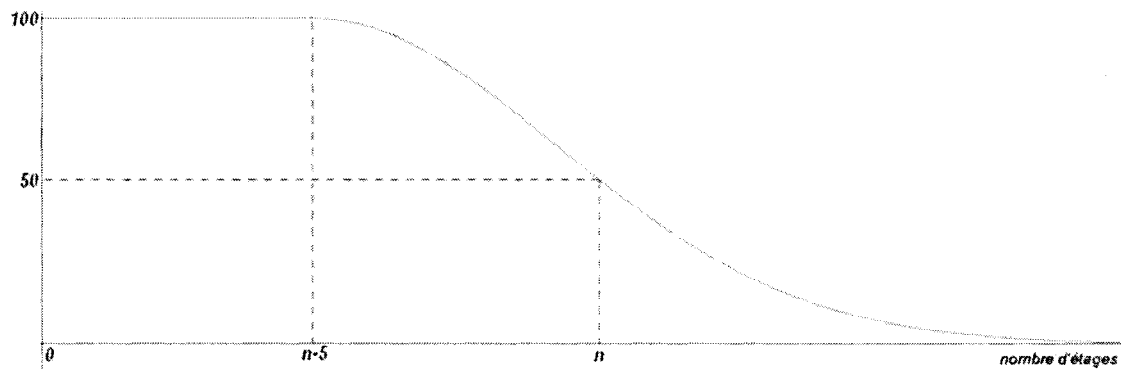


Figure 20 Loi de calcul du score d'aptitude (en ordonnée) en fonction du nombre d'étages (en abscisse)

Le score est égal à 100 si le nombre d'étage est inférieur ou égal au nombre maximal d'étages moins cinq ($n-5$) et à 50 si le nombre d'étages est égal au nombre maximal (n). Si le nombre d'étage est supérieur au nombre d'étages maximal moins cinq, alors le pointage est obtenu par la loi normale telle le maximum (score de 100) soit atteint pour un nombre $n-5$ d'étages et telle qu'elle soit égale à 50 pour un nombre n d'étages (voir Figure 20).

Cette loi s'écrit :

$$\text{score} \approx 100 \cdot e^{-\left(\frac{x}{6}\right)^2} \quad \text{Équation 4.1}$$

où : $x = \text{nombre d'étages du bâtiment} - (\text{nombre d'étages maximal} - 5)$

Le rapport des dimensions des dalles (voir §4.4.2)

Le score est égal à la moyenne des scores de toutes les dalles. Un système bidirectionnel a un score de 100 si le rapport de ces dimensions est inférieur à 2,0 ou un score de 0 sinon. Dans ce cas on n'utilise pas de loi continue. En effet, le code impose une limite précise de 2,0 du rapport entre les dimensions des dalles. Les systèmes unidirectionnels ont tous un score de 100, car ils peuvent toujours être mis en place.

Les portées des travées horizontales (voir §4.4.3)

Le score est calculé en fonction du Tableau III. Pour ne pas disqualifier des systèmes de manière abrupte (par exemple en donnant un score de 100 si la portée du sous-système est comprise entre la portée minimale et maximale ou de 0 sinon), il a été décidé d'utiliser une fonction continue pour déterminer le score. Si la portée est égale à la portée typique alors le score est de 100, sinon :

$$\text{score} = p(x) = 100 - 100 \cdot x^2 \quad \text{Équation 4.2}$$

- Si la portée est comprise entre la portée minimale et la portée typique :

$$x = \frac{\text{portée} - \text{portée typique}}{\text{portée minimale} - \text{portée typique}}$$

- Si la portée est comprise entre la portée typique et la portée maximale :

$$x = \frac{\text{portée} - \text{portée typique}}{\text{portée maximale} - \text{portée typique}}$$

Ainsi, $p_1(\text{portée typique}) = p_2(\text{portée typique}) = 100$ et $p_1(\text{portée minimale}) = p_2(\text{portée maximale}) = 0$ (voir Figure 21).

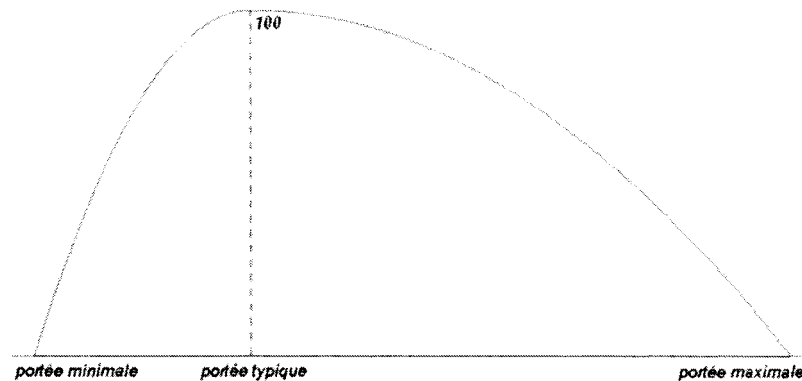


Figure 21 Loi de calcul du score d'aptitude (en ordonnée) en fonction de la portée à franchir (en abscisse)

Pour les sous-systèmes qui n'ont pas de portée typique (voir Tableau III), le score est tout simplement de 100 si la portée est comprise entre la portée minimale et maximale ou de 0 sinon. Par exemple, dans le cas des treillis, il n'y a pas de raison d'avantager un treillis de 10 m par rapport à un treillis de 30 m. En effet, il existe plusieurs types de treillis, de formes et de portées différentes. Les sous-systèmes pour lesquels on n'a pas défini de portée typique peuvent donc s'adapter à différents types de situation.

L'intensité des charges vives (voir §4.4.5)

Le score est de 100 si le système correspond au niveau d'intensité des charges vives (voir Tableau V) ou de 0 sinon. Dans ce cas on n'utilise pas de loi continue, car il n'y a que quatre niveaux d'intensité de charge.

Les caractéristiques du projet (si spécifiées) (voir §4.4.6)

Le score de chaque système est calculé en fonction du Tableau VI. Pour permettre à l'utilisateur de spécifier que certaines caractéristiques sont plus importantes que d'autres, la méthode suivante est proposée : le score est égal à la moyenne des scores pour chaque caractéristique pondérée de la manière suivante : 1 si la caractéristique est peu importante, 2 si la caractéristique est moyennement importante et 3 si la caractéristique est importante. Le score d'un sous-système en fonction d'une caractéristique est de 100 s'il correspond ou de 0 sinon. Pour les caractéristiques qui proposent deux niveau d'aptitude (XX et X sur le Tableau

VI), les sous-systèmes les plus adaptés (*XX*) ont un score de 100, alors que les autres sous-systèmes adaptés (*X*) ont un score de 50.

L'usage prévu du bâtiment (si spécifié) (voir §4.4.7)

Le score est calculé en fonction du Tableau VII. Le score est de 100 si l'usage correspond à un sous-système. Sinon, il est de 0.

On obtient alors quatre à six notes. En effet, l'utilisateur a la possibilité de spécifier ni caractéristique pour le projet, ni usage pour le bâtiment. Dans ce cas, il n'y a que quatre notes. La note finale est la moyenne non pondérée de chacun des scores à l'exception du cas suivant. Pour les sous-systèmes qui ont une limite absolue du nombre d'étage, si le nombre d'étages du bâtiment est supérieur à cette limite, alors le score du sous-système est de zéro. C'est le cas des sous-systèmes en bois qui sont déconseillés pour les bâtiments de plus de cinq étages.

Comme il n'existe pas d'informations portant sur l'importance de chaque critère, il a été décidé d'utiliser une pondération égale pour chaque note. Si un ingénieur souhaite modifier cette pondération, cela peut se faire facilement en modifiant le code informatique associé.

4.5 La sélection des sous-systèmes verticaux

Après les sous-systèmes horizontaux, on choisit les sous-systèmes verticaux. Ce choix doit être en accord avec les sous-systèmes horizontaux sélectionnés. Par exemple, on ne choisira pas de poser une dalle de béton sur une ossature en bois. Ensuite pour choisir entre les différents sous-systèmes verticaux possibles, on estime leur niveau d'aptitude à la situation. Cette estimation est similaire à celle faite dans la section précédente, si ce n'est qu'il n'y a que deux critères :

- le nombre d'étages du bâtiment;
- les caractéristiques du projet.

Le lien entre les sous-systèmes verticaux et horizontaux, ainsi que les critères de sélection sont présentés respectivement dans les sous-sections suivantes.

4.5.1 Lien entre les sous-systèmes horizontaux et verticaux

Les sous-systèmes horizontaux sont généralement associés à un nombre limité de sous-systèmes verticaux. Voici comment ces liens de correspondance ont été établis entre les systèmes verticaux et horizontaux.

Les sous-systèmes verticaux en bois

Les constructions à éléments porteurs en bois ne sont associées qu'à des sous-systèmes horizontaux en bois.

Les sous-systèmes verticaux en maçonnerie (Allen et Iano 2006)

Les constructions en maçonnerie sont souvent associés avec des dalles en béton sans nervure ni poutre. Ces dalles peuvent être coulées sur place ou préfabriquées. Les systèmes porteurs en maçonnerie peuvent se combiner à des sous-systèmes horizontaux en bois.

Les sous-systèmes verticaux en béton

Ces systèmes peuvent être associés à des sous-systèmes horizontaux en acier ou en béton.

Les sous-systèmes verticaux en acier

Les sous-systèmes verticaux en acier peuvent être associés avec l'ensemble des sous-systèmes horizontaux en acier ou des dalles mixtes.

Le Tableau VIII présente comment ont été liés les sous-systèmes horizontaux et verticaux présentés à la section 4.3. Chaque case de la colonne *Sous-système horizontal* (qui représente un type de sous-systèmes horizontal) fait face à plusieurs cases de la colonne *Sous-système vertical* qui représentent les sous-systèmes verticaux associés. Pour une question de lisibilité les matériaux de construction sont précisés à part, dans les colonnes extérieures.

Tableau VIII (partie 1)

Correspondance entre les sous-systèmes verticaux et horizontaux

Matériau	Sous-système horizontal	Sous-système vertical	Matériau
Bois	Construction à ossature de bois	Construction à ossature de bois	Bois
		Colonne, mur, linteau	Maçonnerie
	Construction à poutres et poteaux	Construction à ossature de bois	Bois
		Colonne, mur, linteau	Maçonnerie
	Poutre lamellée	Construction à ossature de bois	Bois
		Colonne, mur, linteau	Maçonnerie
	Portique lamellé	Construction à ossature de bois	Bois
		Colonne, mur, linteau	Maçonnerie
	Treillis lourd	Construction à ossature de bois	Bois
		Colonne, mur, linteau	Maçonnerie
Acier	Poutre	Colonne, mur, linteau	Maçonnerie
		Cadre rigide	Acier
		Cadre à contreventement en treillis	Acier
		Colonne, mur à refend et poutre	Béton coulé sur place
		Colonne	Béton préfabriqué
		Mur	Béton préfabriqué
	Poutre ajourée	Colonne, mur, linteau	Maçonnerie
		Cadre rigide	Acier
		Cadre à contreventement en treillis	Acier
		Colonne, mur à refend et poutre	Béton coulé sur place
		Colonne	Béton préfabriqué
		Mur	Béton préfabriqué
	Poutrelle	Colonne, mur, linteau	Maçonnerie
		Construction métallique légère	Acier
		Cadre rigide	Acier
		Cadre à contreventement en treillis	Acier
		Colonne, mur à refend et poutre	Béton coulé sur place
		Colonne	Béton préfabriqué
	Portique	Mur	Béton préfabriqué
		Cadre rigide	Acier
	Ferme	Cadre articulé	Acier
		Colonne, mur, linteau	Maçonnerie
		Cadre rigide	Acier
		Cadre à contreventement en treillis	Acier
Colonne, mur à refend et poutre		Béton coulé sur place	
Colonne		Béton préfabriqué	
Mur	Béton préfabriqué		

Tableau X (partie 2)

Correspondance entre les sous-systèmes verticaux et horizontaux

Matériau	Sous-système horizontal	Sous-système vertical	Matériau
Béton coulé sur place	Dalle pleine unidirectionnelle	Colonne, mur, linteau	Maçonnerie
		Cadre rigide	Acier
		Cadre à contreventement en treillis	Acier
		Colonne, mur à refend et poutre	Béton coulé sur place
		Colonne	Béton préfabriqué
		Mur	Béton préfabriqué
	Dalles pleine post-tendue unidirectionnelle	Colonne, mur, linteau	Maçonnerie
		Cadre rigide	Acier
		Cadre à contreventement en treillis	Acier
		Colonne, mur à refend et poutre	Béton coulé sur place
		Colonne	Béton préfabriqué
		Mur	Béton préfabriqué
	Dalle sur poutres unidirectionnelle	Colonne, mur à refend et poutre	Béton coulé sur place
		Colonne	Béton préfabriqué
		Mur	Béton préfabriqué
	Dalle nervurée unidirectionnelle	Colonne, mur à refend et poutre	Béton coulé sur place
		Colonne	Béton préfabriqué
		Mur	Béton préfabriqué
	Dalle nervurée post-tendues unidirectionnelle	Colonne, mur à refend et poutre	Béton coulé sur place
		Colonne	Béton préfabriqué
		Mur	Béton préfabriqué
	Plaque sans nervures bidirectionnelle	Colonne, mur à refend et poutre	Béton coulé sur place
		Colonne	Béton préfabriqué
		Mur	Béton préfabriqué
	Plaque sans nervures post-tendues bidirectionnelle	Colonne, mur à refend et poutre	Béton coulé sur place
		Colonne	Béton préfabriqué
		Mur	Béton préfabriqué
	Dalle sur poutres bidirectionnelle	Colonne, mur à refend et poutre	Béton coulé sur place
Colonne		Béton préfabriqué	
Mur		Béton préfabriqué	
Dalle sans nervures bidirectionnelle	Colonne, mur à refend et poutre	Béton coulé sur place	
	Colonne	Béton préfabriqué	
	Mur	Béton préfabriqué	
Dalle sans nervures post-tendue bidirectionnelle	Colonne, mur à refend et poutre	Béton coulé sur place	
	Colonne	Béton préfabriqué	
	Mur	Béton préfabriqué	
Dalle nervurée bidirectionnelle	Colonne, mur à refend et poutre	Béton coulé sur place	
	Colonne	Béton préfabriqué	
	Mur	Béton préfabriqué	
Dalle nervurée post-tendue bidirectionnelle	Colonne, mur à refend et poutre	Béton coulé sur place	
	Colonne	Béton préfabriqué	
	Colonne, mur	Béton préfabriqué	
Dalle pleine préfabriquée bidirectionnelle	Colonne, mur à refend et poutre	Béton coulé sur place	
	Mur	Béton préfabriqué	
	Colonne, mur	Béton préfabriqué	
Dalle creuse préfabriquée bidirectionnelle	Colonne, mur à refend et poutre	Béton coulé sur place	
	Mur	Béton préfabriqué	
	Colonne, mur	Béton préfabriqué	

Tableau X (partie 3)

Correspondance entre les sous-systèmes verticaux et horizontaux

Matériau	Sous-système horizontal	Sous-système vertical	Matériau
Béton préfabriqué	Dalle creuse	Colonne, mur, linteau	Maçonnerie
		Cadre rigide	Acier
		Cadre à contreventement en treillis	Acier
		Colonne, mur à refend et poutre	Béton coulé sur place
		Colonne	Béton préfabriqué
		Mur	Béton préfabriqué
	Dalle pleine	Colonne, mur, linteau	Maçonnerie
		Cadre rigide	Acier
		Cadre à contreventement en treillis	Acier
		Colonne, mur à refend et poutre	Béton coulé sur place
		Colonne	Béton préfabriqué
		Mur	Béton préfabriqué
	Profilé en T	Cadre rigide	Acier
		Cadre à contreventement en treillis	Acier
		Colonne, mur à refend et poutre	Béton coulé sur place
		Colonne	Béton préfabriqué
		Mur	Béton préfabriqué
		Profilé en double T	Cadre rigide
	Cadre à contreventement en treillis		Acier
	Colonne, mur à refend et poutre		Béton coulé sur place
Colonne	Béton préfabriqué		
Mur	Béton préfabriqué		

4.5.2 Le nombre d'étages du bâtiment

Le Tableau IX présente les différents sous-systèmes verticaux conseillés en fonction du nombre d'étages maximum conseillé pour le bâtiment. Les justifications sont données dans la sous-section 4.4.1. De plus, d'après le CNBC 2005, les sous-systèmes verticaux en maçonnerie sont limités à cinq étages.

Tableau IX

Nombre d'étages maximums d'un bâtiment en fonction du système vertical utilisé

Matériau	Sous-système vertical	Nombre d'étages maximum
Bois	Construction à ossature de bois	5*
	Construction à poutres et poteaux	5*
Maçonnerie	Colonne, mur, linteau	5*
Acier	Construction métallique légère	5
	Cadre rigide	40
	Cadre à contreventement à treillis	25
Béton coulé sur place	Colonne, mur à refend et poutre	35
Béton préfabriqué	Colonne	35
	Mur	35

* : Limite absolue selon le CNBC 2005

4.5.3 Les caractéristiques du projet

Le Tableau X présente les différents sous-systèmes verticaux conseillés en fonction des caractéristiques du projet. Les justifications sont données dans la sous-section 4.4.6.

4.5.4 Calcul du niveau d'aptitude

La sélection des sous-systèmes verticaux se fait de manière similaire à la sélection des sous-systèmes horizontaux (voir §4.4.8) sauf qu'il n'y a que deux critères : le nombre d'étages et les caractéristiques du projet.

Tableau X

Sous-systèmes verticaux conseillés en fonction des caractéristiques du projet (Allen et Iano 2006)⁶

Contraintes géométriques						Contraintes liées aux travaux						Contraintes liées aux réactions structurales	Contraintes diverses		Sous-système vertical	Matériau		
X						X	X		X			X	X		X	X	Construction à ossature de bois	Bois
	X			X		X		X	X			X	X		X	X	Construction à poutres et poteaux	
X	X			X			X							X	X	X	Colonne, mur, linteau	Maçonnerie
X						X	X		X			X			X	X	Construction métallique légère	Acier
			X	X		X		XX	X	X	X	X	X		X	X	Cadre rigide	
			X			X		X	X	X	X	X			X	X	Cadre à contre-ventement en treillis	
X	X	X	X	X	X		X			X						X	Colonne, mur à refend et poutre	Béton coulé sur place
X	X	X	X	X	X	X		X		X			X			X	Colonne	Béton préfabriqué
X	X	X	X	X	X	X		X		X			X	X		X	Mur	

X : désigne un système approprié à la caractéristique

XX : désigne un système plus approprié qu'un système marqué d'un X

⁶ Le tableau a été établi à partir des tableaux et des informations de *The Architect's Studio Companion* d'Allen et Iano (2006).

4.6 Calcul de l'excentricité

Après avoir choisi les sous-systèmes horizontaux et verticaux, l'étape qui suit consiste à valider le choix structural en vérifiant que les zones structurales associées soient stables. Pour cela on calcule l'excentricité des volumes structuraux soumis à leur propre poids et aux surcharges dues à la pression du vent. Les charges séismiques ne sont pas prises en compte, même si elles peuvent avoir un impact important sur la stabilité des bâtiments en hauteur (l'estimation des charges séismiques pourrait faire l'objet d'un développement ultérieur du prototype). En effet, les calculs associées aux effets séismiques sont trop complexes pour la phase de design conceptuelle (cf. §4.1.8 du CNBC 2005). Les sections suivantes expliquent comment estimer les charges, puis rappellent comment calculer l'excentricité du bâtiment.

4.6.1 Calcul du poids propre

Lin et Stotesbury (1988) suggèrent, en phase conceptuelle, de considérer le bâtiment (ou chaque volume structural) comme un tout. Le meilleur moyen, alors, d'estimer le poids propre de l'ouvrage est de l'exprimer en charge uniformément répartie due au poids des dalles. Dans de telles approximations :

- le poids propre de bâtiments en bois est compris entre 2.0 kPa et 2.4 kPa;
- le poids propre de bâtiments en acier est compris entre 2.4 kPa et 3.9 kPa;
- le poids propre de bâtiments en béton armé est compris entre 4.8 kPa et 7.2 kPa;
- le poids propre de bâtiments en béton précontraint entre 3.4 kPa et 5.8 kPa.

Bien que ces valeurs soient exprimées en terme de surface de plancher, celles-ci prennent en compte en plus du poids propre des dalles structurales, le poids de la toiture, des murs, des cages d'escalier, des colonnes, du revêtement des dalles et des cloisons.

4.6.2 Calcul de la pression du vent

Le calcul de la pression extérieure exercée par le vent est réglementé par le CNBC 2005. Elle est calculée par la formule suivante :

$$p = I_w \cdot q \cdot C_e \cdot C_g \cdot C_p \quad \text{Équation 4.3}$$

où :

p est la pression extérieure s'exerçant de manière statique et dans une direction normale aux parois du bâtiment;

I_w est le coefficient de risque de la charge due au vent (cf. §4.1.7.1.1 du CNBC 2005);

q est la pression dynamique susceptible d'être égale ou dépassée une fois en 50 ans (cf. tables en annexe C du CNBC 2005);

C_e est le coefficient d'exposition (cf. §4.1.7.1.4 du CNBC 2005);

C_g est le coefficient de rafale (cf. §4.1.7.1.6 du CNBC 2005);

C_p est le coefficient de pression extérieure calculé d'après la moyenne des valeurs sur la surface considérée.

Pour simplifier les calculs, on prend :

$I_w = 1,0$, ce qui correspond à un risque normal à l'état limite ultime. La valeur de I_w peut changer selon le type d'usage du bâtiment. Par exemple, pour des écoles I_w est plus important. L'estimation de coefficient I_w en fonction de l'usage du bâtiment pourrait faire l'objet d'un développement ultérieur du prototype;

$C_e \cdot C_p = 1,0$. Ce produit de ces deux coefficients dépend des ouvertures du bâtiment, mais après analyse des commentaires sur le calcul des structures selon le CNBC 2005 (Conseil national de recherches du Canada 2006b), il s'avère que résultat est généralement de l'ordre de 1;

$C_g = 2,0$, ce qui correspond au coefficient de rafale pour l'ensemble du bâtiment.

On obtient ainsi :

$$p = p_e - p_i \approx 2 \cdot q \quad \text{Équation 4.4}$$

Pour les bâtiments dont la hauteur est supérieure à quatre fois leur largeur minimale effective, ou à 120 m et pour ceux qui, à cause de leur légèreté, leur basse fréquence d'oscillation et leur faible capacité d'amortissement, ont une nette tendance à vibrer, les calculs se font par d'autres méthodes plus précises. Ce type de bâtiment n'entre pas dans le cadre de l'étude.

4.6.3 Rappel du calcul de l'excentricité

Pour vérifier la stabilité, l'excentricité e est comparée à l'excentricité maximale de stabilité e_{\max} . Si $e < e_{\max}$, alors le bâtiment (ou le volume structural) est stable. Si $e > e_{\max}$ alors les fondations extérieures vont devoir travailler en traction ce qui n'est pas recommandé (Lin et Stotesbury 1988). Plus e est grand, plus les forces de traction dans les fondations seront importantes. e est calculée approximativement par (Lin et Stotesbury 1988) :

$$e \approx \frac{h/2 \cdot V}{P} - \frac{d}{2} \quad \text{Équation 4.5}$$

Dans le cas d'appuis ponctuels, e_{\max} est calculé par :

$$e_{\max} = \frac{\sum_{\text{appuis}} x^2 \cdot p_i}{\sum_{\text{appuis}} x \cdot p_i} - \frac{d}{2} \quad \text{Équation 4.6}$$

Dans le cas d'appuis continus, e_{\max} est calculé par :

$$e_{\max} = \frac{\int_{\text{appuis}} x^2 \cdot p_i \cdot dx}{\int_{\text{appuis}} x \cdot p_i \cdot dx} - \frac{d}{2} \quad \text{Équation 4.7}$$

où :

d et h sont la profondeur et la hauteur du bâtiment (ou du volume structural);

V est la somme des surcharges extérieures horizontales (ex : vent);

P est le poids propre du bâtiment (voir Figure 22);

$(p_i)_{i \in \text{appuis}}$ sont les coefficients de reprise de charge. Ils sont calculés en fonction de l'aire à supporter par les colonnes (voir Figure 23). Ils sont calculés à une constante multiplicative près.

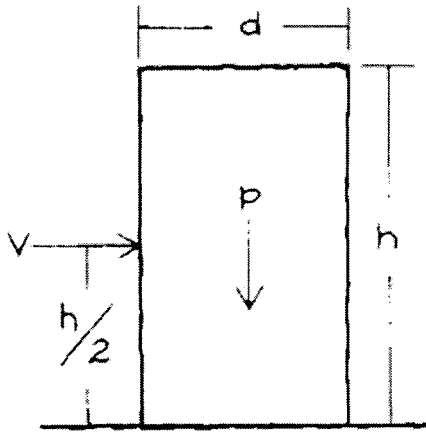


Figure 22 Forces appliquées au bâtiment
(Lin et Stotesbury 1988)

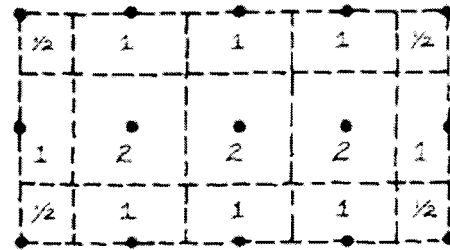


Figure 23 Coefficients de reprise de charge
(Lin et Stotesbury 1988)

4.7 Choix des éléments structuraux

Après avoir choisi les sous-systèmes horizontaux et verticaux du bâtiment, vérifié la stabilité des volumes structuraux indépendants, le choix des systèmes structuraux est affiné. Comme on l'a vu dans la section 4.3 certains systèmes structuraux regroupent plusieurs éléments ou assemblages d'éléments. Par exemple les constructions en bois d'œuvre sont un assemblage de poutres en bois d'œuvre ou lamellées, de colonnes, de planchers, de treillis lourds, etc. Cette étape a pour but de permettre au concepteur de choisir entre les différents types d'éléments qu'il a choisis implicitement à la première étape. Les différents éléments ou assemblages ne sont jugés que sur les portées qu'ils ont à franchir. Le Tableau XI présente les portées recommandées des éléments et des assemblages structuraux composant les sous-systèmes horizontaux du Tableau III.

4.8 Conclusion

En résumé, on a défini toutes les connaissances nécessaires à l'implémentation du nouveau processus décisionnel. Le processus décisionnel a été décrit dans son ensemble, ainsi que chaque étape. La suite du développement consiste à coder les connaissances de manière à ce que le DKM puisse interpréter ces informations, ce qui sera l'objet du chapitre suivant.

Tableau XI

Portées recommandées des différents éléments horizontaux (Schodek 2001; Allen et Iano 2006)⁷

Matériau	Élément horizontal	Portée minimale [m]	Portée typique [m]	Portée maximale [m]
Bois	Plancher à poutrelles	2,5	4,5	6,5
	Charpente de planchers ou de toits	3	12	21
	Plancher	2,5	2,5	7
	Poutre	2,5	5	10
	Poutre lamellé	2,5	9	30
	Portique lamellé	9	24	75
	Treillis lourd	9	-	60
Acier	Plancher mixte et toit	2,5	3	6
	Poutre	3	9	23
	Poutre ajourée	3	18	43
	Poutrelle	1,8	3	9
	Portique	9	-	45
	Treillis	9	-	90
Béton coulé sur place (système unidirectionnel)	Poutre	3	9	23
	Dalle pleine	1,8	4,5	6
	Dalle pleine post-tendue	4	6,5	9
	Dalle sur poutre	4	6,5	9
	Dalle nervurée	2,5	10,5	13
	Dalle nervurée post-tendue	8	16,5	25
Béton coulé sur place (système bidirectionnel)	Plaque sans nervure	3	6	12
	Plaque sans nervure post-tendue	5	9,5	14
	Dalle sur poutres	5	9,5	14
	Dalle sans nervure	2,5	9	12
	Dalle sans nervure post-tendue	4	9	14
	Dalle nervurée	7	10,5	18
	Dalle nervurée post-tendue	7	16,5	26
Béton préfabriqué	Poutre	4,5	12	19
	Dalle creuse	4,5	9	13
	Dalle pleine	2,5	6	9
	T	9	24	39
	Double T	7	17	30

⁷ Le tableau est la compilation de tableaux et d'informations tirées de *The Architect's Studio Companion* d'Allen et Iano (2006) et de *Structures* de Schodek (2001).

CHAPITRE 5

IMPLÉMENTATION DU LOGICIEL

Après avoir synthétisé un ensemble de connaissances, l'étape à venir est l'implémentation du DKM. En plus de fournir les détails liés à l'ajout des connaissances, ce chapitre expose le fonctionnement et les modifications apportées aux mécanismes du logiciel afin de l'adapter aux besoins. Ces mécanismes s'articulent autour des points suivants :

- l'interface qui permet à l'utilisateur d'interagir avec le logiciel (§5.1);
- la base de données qui enregistre les données du problème, fournit les tables de sélection des systèmes structuraux et permet au DKM de communiquer avec StAr (§5.2);
- la modélisation des données (§5.3). Pour stocker les données, il faut d'abord définir un modèle de représentation des données;
- les nœuds décisionnels et le processus décisionnel (§5.4 et §5.5);
- la génération du modèle structural (§5.6). Comme StAr ne communique pas encore avec le DKM, on utilise un programme en substitut;
- la relation entre le processus décisionnel déjà en place et le nouveau processus (§5.7).

Convention :

Pour une raison de clarté, le texte et les termes associés au code, comme les noms des classes, des paquets, des variables d'instances, des méthodes et des espaces de travail sont identifiés par la police Courier New, 12 Pt.

5.1 Présentation de l'interface

L'interface est une "zone" permettant d'échanger des informations entre l'utilisateur et le logiciel. L'interface principale est séparée en deux espaces : StAr et DKM (voir Figure 24). L'espace StAr est consacré à la représentation et à la sélection des éléments structuraux

(décrits dans les sections 5.4 et 5.5) alors que l'espace DKM est dédié à la représentation et à l'exécution des processus décisionnels (décrits dans la section 5.3).

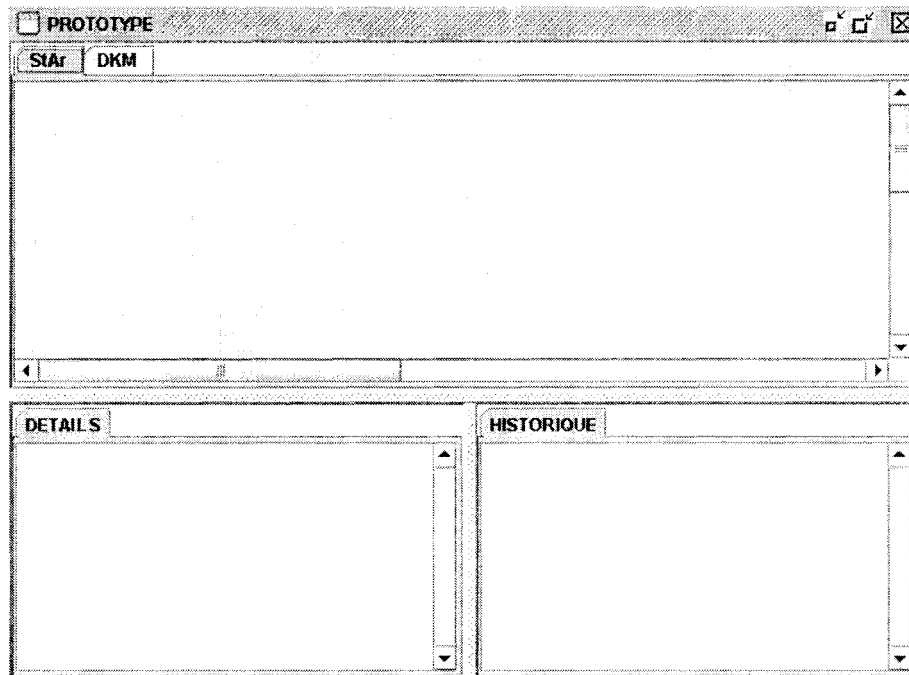


Figure 24 Interface principale du DKM

Lorsque l'on clique sur l'onglet *StAr* (voir Figure 24), le DKM affiche la représentation structurale du projet. Comme la première version du DKM ne s'intéressait qu'aux planchers, la représentation ne portait que sur une partie de la structure. On a donc modifié le DKM pour qu'il modélise plus globalement le bâtiment. Pour cela, il a fallu réécrire la méthode `buildEntityTree()` (voir ANNEXE III) de la classe `GraphBuilder`, qui est consacrée à la modélisation du bâtiment (voir description du modèle structural §5.3). La Figure 25 présente les entités qui sont représentées dans l'espace *StAr*. La partie inférieure (à partir de l'entité *Planchers*) était déjà présente dans la première version du DKM. La partie supérieure a été rajoutée pour correspondre aux entités structurales présentées dans la sous-section 5.3.2. Lorsque l'on sélectionne une entité structurale, celle-ci est marquée en rouge (en gris foncé sur la Figure 25).

Pour passer à l'espace DKM, il suffit de cliquer sur l'onglet associé en haut à gauche (voir Figure 24). L'espace DKM affiche l'arbre décisionnel associé à l'entité structurale sélectionnée dans l'espace StAr. En effet les processus décisionnels sont toujours associés à un type d'entité. Les modifications apportées lors de l'exécution du processus décisionnel ne sont apportées qu'à l'entité structurale sélectionnée.

L'interface présente aussi deux fenêtres en bas de l'écran. La fenêtre de gauche affiche les attributs de l'entité structurale sélectionnée dans l'espace StAr et la fenêtre de droite affiche l'historique d'application des nœuds décisionnels.

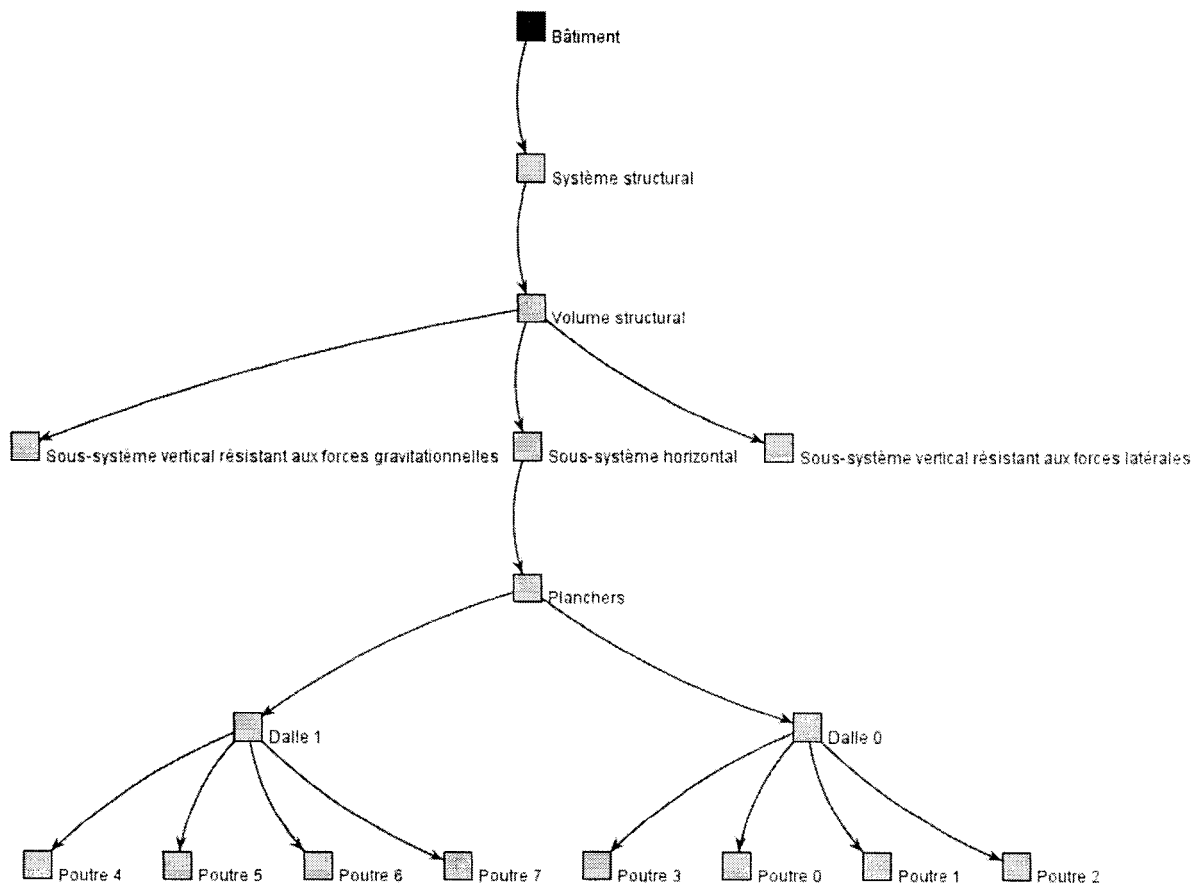


Figure 25 Représentation des entités structurales dans le DKM

5.2 Communication entre la base de données Caché et le DKM

Un des objectifs du développement est de faire communiquer le DKM avec StAr. Pour cela, on a décidé d'utiliser une base de données séparée des applications elles-mêmes pour sauvegarder les données liées au projet (Fortin 2006) (voir Figure 26). Ces données représentent à la fois les entités structurales, les grilles structurales et les caractéristiques du projet. Le mode de représentation des données choisi est l'approche orientée objet (voir définition §5.3).

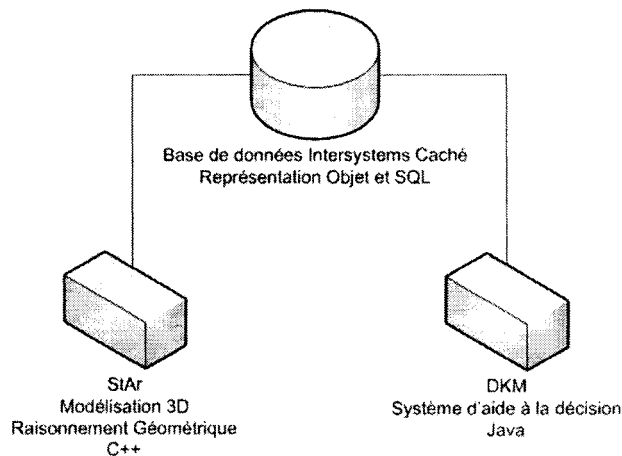


Figure 26 Séparation du stockage des données et des logiciels (Fortin 2006)

5.2.1 Lecture et sauvegarde des données – persistance des classes

Les classes projetées sont persistantes, c'est-à-dire qu'elles peuvent être sauvegardées de manière définitive. Lors de l'exécution d'un programme les données sont normalement stockées en mémoire de manière temporaire. Les classes définies à partir de l'API de la plateforme J2SE (voir §3.3.1 pour plus d'informations sur les API) n'ont pas les méthodes disponibles pour les sauvegarder de manière permanente. Par contre, les classes projetées héritent de méthodes spécifiques à Caché. Ces méthodes permettent aux objets d'être sauvegardés de manière permanente.

En plus de sauvegarder les objets, la base de données **définit** et **projette** les classes structurant les données de la manière suivante. Tout d'abord, on définit les classes à partir de du Studio de Caché (interface de programmation et de développement de la base de données). Les classes qui devront être sauvegardées sont alors déclarées persistantes. Ensuite, une fois que l'on a défini toutes les classes et leurs attributs, Caché compile les classes. Les classes pourront alors être intégrées aux programmes écrits en Java ou C++.

Les classes projetées héritent de classes spécifiques à Caché qui contrôlent la lecture et la sauvegarde des données dans la base de données. Elles implémentent aussi des méthodes permettant de consulter ou de modifier les attributs spécifiques à la classe. En somme, les classes projetées sont immédiatement fonctionnelles dans le programme.

Le prototype sauvegarde les données de manière cyclique. Les objets représentant les entités structurales sont enregistrés à chaque exécution d'un nœud décisionnel (voir §5.4.1 pour plus d'informations sur les nœuds décisionnels). Les données peuvent alors être reprises lors d'une prochaine utilisation du DKM (ce qui peut être utile si l'on a arrêté une session en cours) ou peuvent être lues par StAr (qui récupère les données du DKM).

De même StAr devrait pouvoir stocker ses données sous Caché. Le DKM pourrait alors récupérer les informations apportées par StAr. En attendant que StAr enregistre ses données sous Caché, le programme `PrototypeBuilder` (voir §5.6 pour plus d'informations sur ce programme) se charge de générer les objets représentant les entités, les grilles et les propriétés structurales (Fortin 2006).

5.2.2 Les paquetages de Caché

On définit, à l'aide de Caché, un espace dédié au stockage des données du DKM et de StAr. Cet espace est nommé DKM. Les objets et les classes de l'espace DKM sont organisés en quatre paquetages :

- `cacheEntities` qui est consacré aux classes associées aux entités structurales, aux caractéristiques du projet et aux grilles structurales (voir §5.3);
- `tables` qui représente les tableaux nécessaires aux règles du module des connaissances associées au premier développement du DKM (Parent 2006b). On retrouve entre autres, les tables représentant le coût et le poids de différents types de dalles;
- `tablesChoixSystemes` qui contient les tables permettant de sélectionner les systèmes structuraux (Tableau II à Tableau XI). On trouve, par exemple, les tables conseillant le choix des sous-systèmes horizontaux en fonction des caractéristiques du projet;
- `tablesSystemes` qui regroupe les tables énumérant les différents sous-systèmes horizontaux et verticaux, les scores d'aptitude associés, les caractéristiques du projet qui peuvent être sélectionnées, etc.

Le paquetage `tablesSystemes` initialise certains objets du paquetage `cacheEntities` (voir §5.6 pour plus d'information sur l'initialisation des données). Ces objets représentent les différents choix de sous-systèmes structuraux et de propriétés du bâtiment. Les objets et leurs paramètres initiaux sont sauvegardés sous forme de tableaux. Chaque tableau représente une classe, les lignes et les colonnes représentant respectivement les objets et les valeurs des paramètres initiaux. Par exemple chaque ligne de la table `tablesSystemes.usage` représente un type d'usage avec ses propriétés. Le programme `PrototypeBuilder` crée autant d'objets de la classe `cacheEntities.Use`. Chacun des objets représente un usage du bâtiment (école, hôpital, bureau...) et les caractéristiques liées à cet usage (nom de l'usage, numéro d'identification, usage choisi).

Le DKM consulte les tables des paquetages `tables` et `tablesChoixSystemes` uniquement par requêtes SQL. En effet ces données n'ont pas besoin d'être modifiées pendant une session d'utilisation du DKM. Si on veut modifier les valeurs de ces tables, on peut soit utiliser le portail d'administration de Caché, soit utiliser un logiciel de manipulation des bases de données comme Microsoft Access que l'on lie à l'espace DKM créé par Caché.

Pour implémenter les tables de `tablesChoixSystemes` dans la base de données Caché, la méthode suivante a été utilisée. Les tableaux enregistrés au format de Microsoft Excel sont convertis au format texte à l'aide de macros VBA (Visual Basic for Applications). Les fichiers texte peuvent ensuite être lus par le portail d'administration de Caché. Les macros sont programmées sur mesure pour que les fichiers textes soient directement compréhensibles par le portail d'administration.

Les paquetages `cacheEntities` et `tables` ont été implémentés lors de la création du DKM (Fortin 2006). `cacheEntities` a été modifié afin d'y incorporer de nouvelles entités et de nouveaux attributs qui sont nécessaires à l'utilisation du processus décisionnel à implémenter. Les paquetages `tablesChoixSystemes`, `tablesSystemes` sont totalement nouveaux.

5.3 La modélisation des entités structurales – le paquetage `cacheEntities`

La modélisation du bâtiment est orientée objet car cette approche est très pratique et intuitive. Les entités structurales s'agrègent (l'agrégation est une relation de type ensemble-élément) de manière descendante. Par exemple, on définit une classe associée au bâtiment qui agrège la classe associée au système structural.

La modélisation des classes associées aux entités structurales a été développée par le projet StAr (Mora 2005). Certaines modifications ont été apportées après, pour tenir compte des besoins du DKM. La particularité du modèle de StAr est de modéliser à la fois l'architecture et la structure du bâtiment. Dans le cadre du DKM, seule la partie associée à la structure a été implémentée. En plus des classes représentant les entités et les grilles structurales, on définit des classes représentant les propriétés du bâtiment. Ces classes sont regroupées dans le paquetage `cacheEntities`. Les classes de ce paquetage sont représentées sur la Figure 27, puis sont décrites dans les sous-sections suivantes.

Les classes du paquetage `cacheEntities` héritent de trois superclasses abstraites. Les classes représentant les entités structurales héritent de la superclasse `BuildingEntity`, les classes associées aux propriétés du bâtiment héritent de la superclasse `BuildingProperty` et les classes liées aux grilles structurales héritent de la superclasse `Grid` (voir Figure 27). Développement

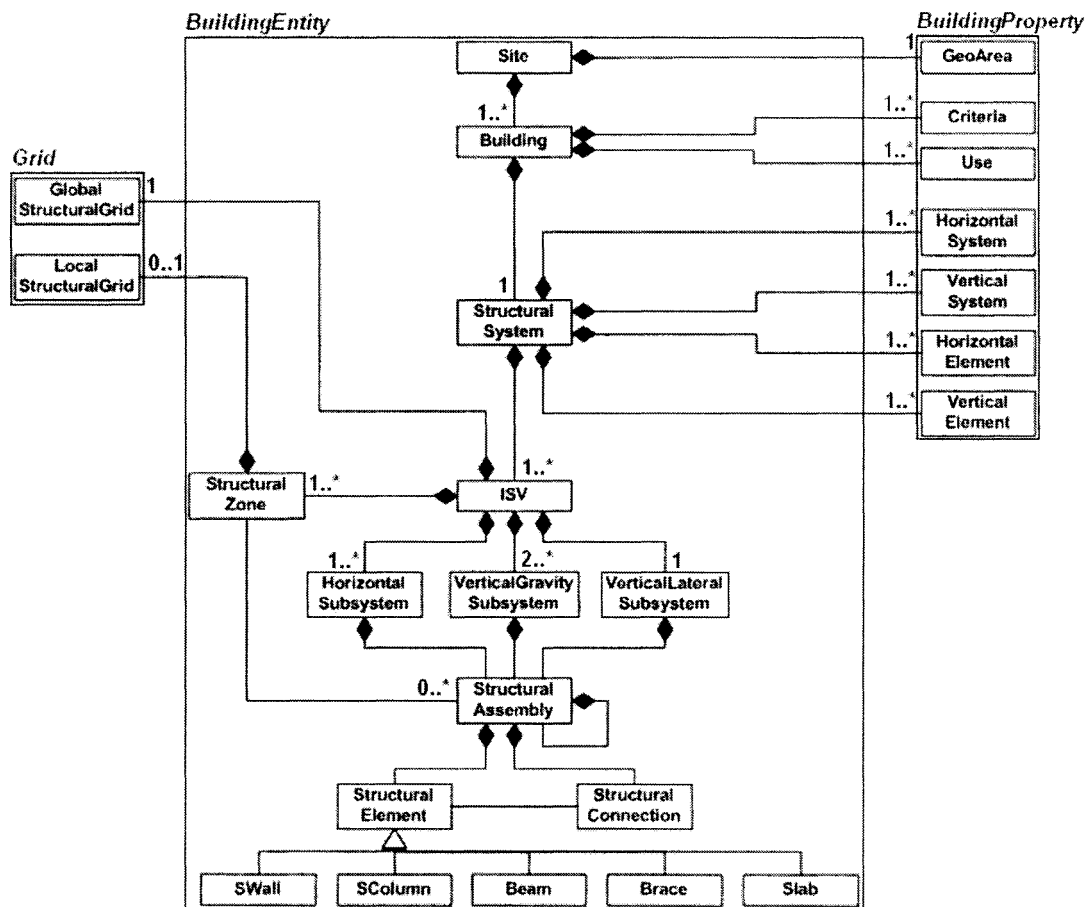


Figure 27 La modélisation structurale⁸

Les classes `BuildingEntity` et `Grid` ont été implémentées lors de la création du DKM (Fortin 2006). Les attributs qui ont été ajoutés aux sous-classes héritant de

⁸ L'illustration a été récupérée et modifiée de la thèse de Mora (2005) afin d'y incorporer les nouvelles entités.

BuildingEntity, sont présentés dans la sous-section 5.3.2. La classe BuildingProperty qui est totalement nouvelle, est décrite dans la sous-section 5.3.1.

5.3.1 Description du modèle représentant les propriétés du projet et du bâtiment – la superclasse BuildingProperty

La superclasse BuildingProperty a été adjointe afin de représenter les propriétés du bâtiment que l'utilisateur spécifiera lors de la session de design conceptuel. On compte parmi les propriétés, l'emplacement et l'usage du bâtiment, certaines caractéristiques du projet et les listes de sélection des systèmes structuraux associés à des scores d'aptitude.

GeoArea

Cette classe représente l'emplacement géographique du bâtiment et ses propriétés.

Attributs :

- Index, le numéro d'identification de l'emplacement.
- niveau, chaque niveau représente une zone géographique plus ou moins large. Par exemple, le niveau 1 correspond aux pays, le niveau 2 aux régions et le niveau 3 aux villes.
- emplacement, le nom de l'emplacement.
- q , la pression statique du vent associée à une probabilité annuelle de dépassement de 1/50° (voir §4.6.2).

Criteria

Cette classe représente les caractéristiques du bâtiment qui sont spécifiées par l'utilisateur (comme créer un bâtiment de forme irrégulière ou minimiser l'épaisseur des dalles).

Attributs :

- Index, le numéro d'identification de la caractéristique.
- typeContrainte, chaque caractéristique est classée selon quatre types : les contraintes géométriques, les contraintes liées aux travaux, les contraintes liées aux réactions structurales et les contraintes diverses.

- `caracteristique`, le nom de la caractéristique.
- `choisiVF`, initialement la variable a pour valeur *Faux*, si l'utilisateur spécifie que la caractéristique s'applique au projet alors la variable prend pour valeur *Vrai*.
- `poids`, le poids de la caractéristique. Si l'utilisateur spécifie que la caractéristique est importante alors la variable prend pour valeur 3. Si la caractéristique est moyennement importante ou peu importante, la variable prend respectivement la valeur 2 ou 1 (voir §4.4.8 pour plus d'informations sur l'utilité des poids).

Use

Cette classe représente l'usage du bâtiment qui est spécifié par l'utilisateur.

Attributs :

- `Index`, le numéro d'identification de l'usage.
- `usage`, le nom de l'usage.
- `choisiVF`, initialement la variable a pour valeur *Faux*, si l'utilisateur spécifie que l'usage s'applique au projet alors la variable prend pour valeur *Vrai*.

HorizontalSystem/VerticalSystem/HorizontalElement/VerticalElement

Ces classes représentent les types de sous-systèmes et d'éléments qui ont été choisis par l'utilisateur.

Attributs :

- `Index`, le numéro d'identification du sous-système ou de l'élément.
- `materiau`, le matériau associé au sous-système ou à l'élément.
- `systeme/element`, le nom du sous-système ou de l'élément.
- `aptitude`, le score d'aptitude du sous-système ou de l'élément (voir §4.4.8 pour plus d'informations sur le calcul de l'aptitude).
- `choisi`, la variable a pour valeur *Vrai* si le sous-système ou l'élément a été choisi par l'utilisateur.

5.3.2 Description du modèle représentant les entités structurales – la superclasse **BuildingEntity**

On ne décrit ici que les classes qui interviennent dans l'implémentation des connaissances liées à la sélection des éléments et systèmes structuraux.

Site

Cette classe représente le site de construction du chantier. L'attribut décrivant la localisation du site se trouve dans la classe `GeoArea` qui est agrégé à la classe `Site`.

Building

Cette classe représente le bâtiment.

Attribut : `noStoreys`, le nombre d'étages du bâtiment.

StructuralSystem

Cette classe représente le système structural du bâtiment. Les choix structuraux sont décrit par les classes `HorizontalSystem`, `VerticalSystem`, `HorizontalElement` et `VerticalElement` qui sont agrégé à la classe `StructuralSystem`.

ISV

Cette classe représente les volumes structuraux indépendants (ISV).

Attributs :

- `eX/eY/emaXx/emaYy`, les résultats du calcul de l'excentricité du bâtiment selon les axes (Ox) et (Oy).
- `h`, la hauteur du volume structural.
- `surfX/surfY`, l'aire des surfaces du bâtiment projetées sur les plans (Oxz) et (Oyz).
- `surfZ`, la surface de plancher par étage.
- `porteeList`, la liste de toutes les portées horizontales dans le volume structural.

- `porteeXDalleList/porteeYDalleList`, les portées des dalles selon les axes (Ox) et (Oy).

HorizontalSubsystem

Cette classe représente les sous-systèmes horizontaux.

Attribut : `intChargesVives`, l'intensité des charges vives. 1 pour peu importante, 2 pour moyenne, 3 pour importante et 4 pour très importante (voir §4.4.5 pour plus d'information sur la signification des poids).

VerticalGravitySubsystem

Cette classe représente les sous-systèmes verticaux résistant aux charges gravitationnelles.

Attribut : `poidsPropre`, le poids propre de la structure liée au volume structural.

VerticalLateralSubsystem

Cette classe représente les sous-systèmes verticaux résistant aux charges latérales.

Attributs : `chargesExtX/chargesExtY`, les charges extérieures dues à la pression du vent selon les axes (Ox) et (Oy).

Remarque :

Les sous-systèmes verticaux sont séparés en systèmes résistant aux charges gravitationnelles et en systèmes résistant aux charges latérales. Les sous-systèmes verticaux gravitationnels comprennent tous les systèmes verticaux qui permettent de transférer les charges des planchers vers le sol (comme les poutres ou les murs de refend). Les sous-systèmes verticaux latéraux regroupent tous les systèmes verticaux résistant aux moments et à la déflexion latérale du bâtiment (comme les cadres rigides ou contreventés et certains types de murs). On distingue les sous-systèmes latéraux des sous-systèmes gravitationnels car ces systèmes peuvent être séparés dans certains bâtiments.

5.3.3 Description du modèle représentant les grilles structurales – la superclasse **Grid**

`GlobalStructuralGrid`

Cette classe représente la grille structurale globale associée à un volume structural.

Attribut : `GridLine`, les différents segments formant la grille structurale.

`LocalStructuralGrid`

Cette classe représente la grille structurale locale associée à une zone structurale.

Attribut : `GridLine`, les différents segments formant la grille structurale.

5.4 Mécanismes d'inférence associés aux connaissances dans le DKM

Cette section décrit les fonctionnalités générales pour modéliser les connaissances. On présente comment les nœuds décisionnels sont structurés en processus décisionnels et comment l'utilisateur interagit avec eux.

5.4.1 Les nœuds décisionnels

Les connaissances sont modélisées par des nœuds décisionnels. Un nœud décisionnel est une règle qui est capable d'évaluer si elle peut s'appliquer et qui s'exécute en fonction de l'évaluation.

Les nœuds décisionnels du DKM sont des classes héritant de la superclasse abstraite `knowledge.AbstractDecisionNode` (Fortin 2006). Chaque nœud décisionnel doit définir les deux méthodes abstraites `isApplicable()` et `apply()`. Ces méthodes représentent les parties gauches et droites de règles de type *si-alors*.

Les nœuds décisionnels héritent aussi de méthodes non abstraites, dont :

- `rollback()` (Fortin 2006). Cette méthode supprime la nouvelle version de l'entité qui a été modifiée par le nœud et retourne l'ancienne version. Cette méthode est

utilisée pour revenir en arrière durant le processus de sélection des systèmes structuraux (voir §5.4.4 pour plus d'information sur l'interaction avec l'arbre décisionnel);

- `addFollowingNode()` (Fortin 2006). Cette méthode ainsi que plusieurs autres du même type permettent de spécifier dans quel ordre sont exécutés les nœuds décisionnels. Une fois organisés, les nœuds décisionnels forment un processus décisionnel (voir §5.4.2 pour plus d'informations sur les processus décisionnels).

Les nœuds décisionnels héritent aussi des variables d'instance (appelés aussi attributs) de la superclasse. Ces attributs représentent le nom du nœud, le groupe auquel il appartient, les nœuds et les groupes qui suivent ou qui précèdent, etc. Un attribut a été rajouté pour connaître l'état du nœud (`isApply`). Cet attribut prend la valeur *Vrai* si le nœud a déjà été appliqué ou *Faux* sinon.

Les nœuds décisionnels sauvegardent les données du modèle structural de manière cyclique (voir §5.2.1). De manière schématique, voici comment le DKM traite les données persistantes et non-persistantes lors de l'exécution d'un nœud. Tout d'abord, au démarrage du DKM, le programme copie les données persistantes de *Caché* dans des classes non-persistantes. Ensuite, lors de l'exécution d'un nœud décisionnel le DKM travaille uniquement sur les données non-persistantes. Enfin, à la fin de l'exécution d'un nœud décisionnel, les classes non-persistantes (qui ont été modifiées durant l'exécution du nœud décisionnel) sont copiées dans la base de données *Caché*. Ainsi, le modèle structural de *Caché* est mis-à-jour à chaque exécution d'un nœud décisionnel. En résumé, le DKM ne travaille que sur les données non-persistantes qui sont temporaires. Après avoir modifié les données non-persistantes durant l'exécution d'un nœud décisionnel, le DKM met à jour les données persistantes dans *Caché*, ce qui sert de sauvegarde.

5.4.2 Le processus décisionnel

Le processus décisionnel détermine l'ordre dans lequel sont exécutés les nœuds décisionnels. Il est organisé en groupes (de la classe `knowledge.DecisionGroup`) et en nœuds décisionnels (de la classe `knowledge.AbstractDecisionNode`) (Fortin 2006). Les groupes décisionnels sont des groupements de nœuds décisionnels.

On lie les groupes et les nœuds décisionnels en spécifiant quels sont les nœuds ou groupes suivants à l'aide des méthodes `addFollowingGroup()` et `addFollowingNode()` (Fortin 2006). Toute une gamme d'autres méthodes permet de consulter, modifier ou supprimer les liens.

Un processus décisionnel est toujours associé à un type d'entité structurale. Par exemple le processus décisionnel attaché à la sélection des systèmes structuraux est lié à la classe `StructuralSystem`. Le processus décisionnel affecté à la conception préliminaire des dalles est lié à la classe `Slab`. Les processus décisionnels (et les nœuds associés) sont instanciés pour chaque entité du type auquel le processus est lié. Par exemple, on instancie autant de processus décisionnels attachés à la conception des planchers qu'il y a de planchers. Lorsque l'on apporte des modifications à l'un des planchers durant le processus décisionnel, les autres planchers ne sont pas modifiés car ils sont liés à d'autres instances du même processus décisionnel. Il faut donc appliquer le processus à chaque plancher.

5.4.3 Représentations et interactions associées aux processus décisionnels

Les processus décisionnels et les nœuds associés sont représentés sous forme d'arbres. Visuellement, les nœuds sont symbolisés par des carrés qui portent le nom du nœud et les liens entre les nœuds sont figurés par des flèches.

La couleur du carré informe l'utilisateur sur l'état du nœud. S'il est **gris**, le nœud est **non appliqué** ou **inapplicable**. S'il est **vert**, le nœud est **applicable**. S'il est **rouge**, le nœud est **appliqué**. Initialement tous les nœuds sont gris sauf les nœuds de départ qui sont verts.

Lorsqu'un nœud est appliqué par l'utilisateur, le DKM examine s'il peut appliquer les nœuds suivants (il regarde les attributs `followingNodes` et `followingGroups` de l'objet associé au nœud). Les nœuds qui peuvent être appliqués (c'est-à-dire ceux dont la méthode `isApplicable()` retourne *Vrai*) apparaissent en vert. Les nœuds qui ne peuvent pas être appliqués (c'est-à-dire ceux dont la méthode `isApplicable()` retourne *Faux*) restent en gris. Après avoir sélectionné et appliqué un nœud qui était vert, celui-ci devient rouge.

Les nœuds sont appliqués à la demande de l'utilisateur. Le DKM ne possède pas de moteur d'inférence similaire aux systèmes experts. L'application des nœuds est réglementée à la fois par les méthodes `isApplicable()`, le processus décisionnel et les commandes de l'utilisateur. Ce sont ces trois éléments qui remplacent le moteur d'inférence des systèmes experts.

Pour appliquer un nœud, l'utilisateur double clique sur le nœud applicable qui apparaît en vert. Pour désappliquer un nœud et retourner dans l'état d'avant son application, l'utilisateur double clique sur le nœud qui a été appliqué au tour d'avant et qui apparaît maintenant en rouge.

Les liens entre les nœuds sont symbolisés par des flèches. Ce symbole informe sur l'ordre nœud précédent/nœud suivant.

5.4.4 Mécanismes d'inférence associés au changement de l'état applicable des nœuds décisionnels

Les mécanismes d'inférence sont reliés aux différents types de liens qui existent entre les nœuds et/ou les groupes de nœuds.

- Un nœud précède un autre nœud. Dans ce cas pas de problèmes. Une fois que le nœud précédent est appliqué, le nœud suivant est examiné.
- Un seul nœud précède plusieurs autres nœuds. Dans ce cas, après que le nœud précédent soit appliqué tous les nœuds suivants sont examinés. Plusieurs cas

apparaissent alors. On peut vouloir qu'il n'y ait qu'un seul nœud qui puisse être appliqué, ou au contraire que tous les nœuds puissent être appliqués (dans la mesure où leur méthode `isApplicable()` retourne *Vrai*). Enfin, on peut vouloir une combinaison des deux cas. Le moteur DKM est configuré pour fonctionner selon le premier cas.

- Plusieurs nœuds précèdent un seul nœud. Ce cas est similaire au précédent. Le moteur du DKM est configuré pour que lorsqu'un nœud précédent est appliqué, le nœud suivant est examiné et devienne éventuellement applicable. Les autres nœuds précédents qui étaient applicables deviennent alors non applicables. Une autre interprétation serait qu'il faille que tous les nœuds précédents soient appliqués avant d'examiner le nœud suivant pour qu'il devienne éventuellement applicable. On peut aussi souhaiter un mélange des deux options.
- Plusieurs nœuds précèdent plusieurs nœuds. Dans ce cas, le DKM interprète l'enchaînement comme plusieurs liens entre les éléments précédents et l'ensemble des éléments suivants.

L'attribut `isApply` a été rajouté à la superclasse `AbstractDecisionNode` pour régler les problèmes dus aux liaisons entre un élément et un groupe d'éléments. L'attribut prend la valeur *Vrai* ou *Faux* selon l'état appliqué ou non du nœud décisionnel. La méthode `isApplicable()` du nœud suivant, regarde les valeurs de l'attribut `isApply` des nœuds suivants. On peut alors créer une règle qui rend le nœud applicable en fonction de l'état des nœuds précédents. Cela peut être, par exemple, de vérifier que tous les nœuds précédents soient applicables.

Le moteur d'inférence du DKM a été conçu en fonction des besoins liés à l'implémentation de nœuds décisionnels lors du premier développement. Dans ce cas, chaque nœud représente une décision mais aussi un type de système structural. L'arbre représente alors les différents choix de systèmes structuraux. Les différentes étapes représentent alors autant de niveaux de raffinement. En schématisant, on a un nœud correspondant aux systèmes en bois et un autre correspondant aux systèmes en béton. Le nœud *bois* précède différents nœuds représentant

les types de planchers en bois et de même pour le nœud *béton*. Dans ce cas, lorsque l'on choisit un système en béton, il est normal d'empêcher l'utilisateur de choisir aussi un système en bois. L'utilisateur ne doit pas pouvoir sélectionner le système en bois après avoir choisi le nœud *béton* car le plancher associé à l'arbre décisionnel ne peut pas être à la fois un plancher en bois et une dalle en béton.

Les connaissances apportées par cette étude sont aussi organisées en nœuds. **Mais ces nœuds ne représentent pas des types de systèmes structuraux. Les nœuds correspondent en fait à des tâches.** Par exemple, la sélection du sous-système horizontal correspond à une tâche. Mais pour réaliser cette tâche, on doit d'abord examiner les charges vives (ce qui est associé à un nœud), les dimensions des grilles structurales (ce qui est associé à un autre nœud), etc. Dans ce cas, on souhaite que le nœud associé à la sélection des sous-systèmes ne soit applicable que si toutes les tâches précédentes ont été réalisées. C'est pour ce genre de situation qu'a été rajouté l'attribut `isApply`.

5.4.5 Application des nœuds décisionnels

Lorsqu'un nœud est applicable, son exécution entraîne l'application de sa méthode `apply()`, le changement de l'état applicable à l'état appliqué du nœud (ce qui se manifeste par le changement de couleur du nœud) et la sauvegarde des données.

Les opérations généralement effectuées par la méthode `apply()` sont des appels à des fenêtres de dialogues, des requêtes SQL pour lire les tables stockées dans la base de données Caché ou des accès aux attributs des entités structurales. Ces opérations sont décrites plus précisément dans la section suivante.

5.5 Description des nœuds associés aux connaissances portant sur la sélection des systèmes structuraux

Le processus décisionnel associé à la sélection des systèmes structuraux comporte 11 nœuds (voir Figure 28) qui ont été établis selon les connaissances synthétisées dans le chapitre 4.

Les nœuds des arbres décisionnels associés ouvrent des fenêtres de dialogue pour recevoir les instructions de l'utilisateur. Ces fenêtres sont présentées dans les sous-sections suivantes.

Remarque :

Les boutons *Aide* des fenêtres de dialogue présentées ouvrent le manuel d'aide. Ce manuel se présente sous la forme de pages HTML (Hypertext Markup Language) (World Wide Web Consortium 2007). Chaque bouton *Aide* ouvre la page de manuel correspondant au nœud décisionnel. Ces pages d'aide fournissent des informations sur l'utilisation du DKM, synthétise les connaissances utilisées par les nœuds décisionnels et informe l'utilisateur sur la source des renseignements (voir ANNEXE II pour une description du manuel d'aide).

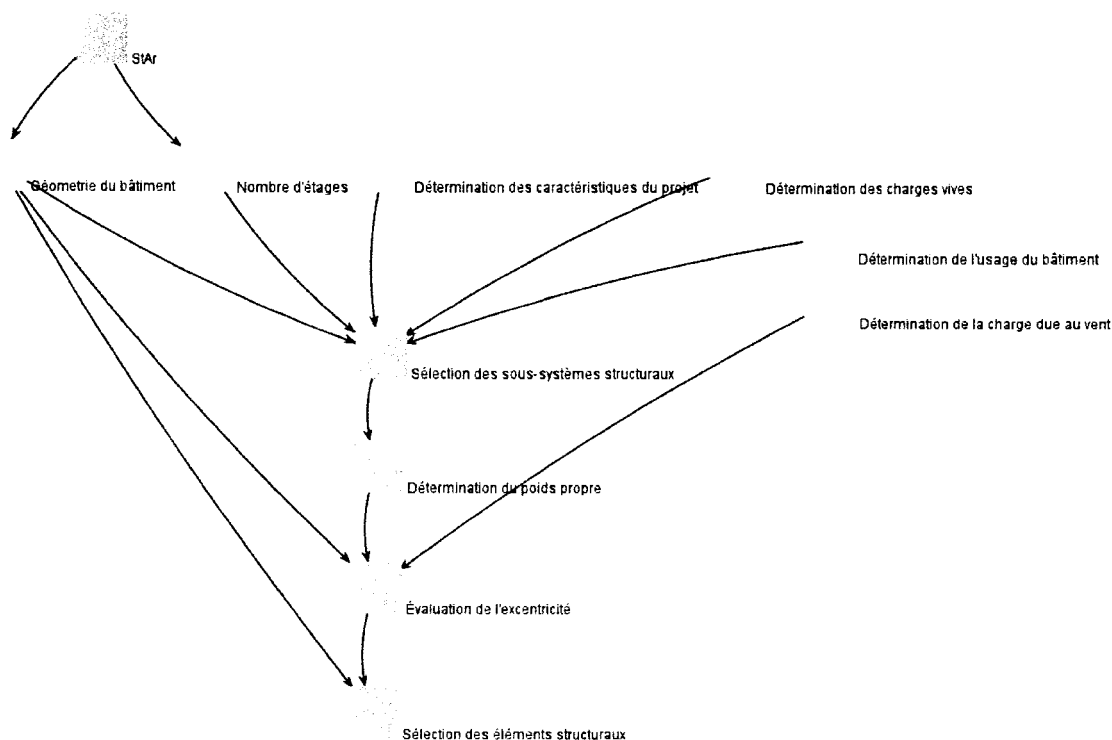


Figure 28 Processus décisionnel lié à la sélection des systèmes structuraux

5.5.1 StAr

Nom de la classe : `DecStAr`

C'est un pseudo-nœud qui symbolise la récupération de données à partir de StAr. La méthode `isApplicable()` retourne toujours *Faux* car l'utilisateur n'a pas à cliquer dessus. Le nœud est uniquement symbolique car les données sont en fait déjà récupérées. Ce nœud montre où interviennent les données fournies par StAr, ce qui permet à l'utilisateur d'avoir une meilleure compréhension du processus.

En fait, les données de StAr interviennent de la manière suivante. StAr sauvegarde ses données dans la base de données Caché. Ensuite, **au démarrage du DKM**, les données sont récupérées par le programme. Ainsi, lorsque l'utilisateur consulte le processus décisionnel, les données de Caché ont déjà été récupérées. Dans la présente version, StAr ne sauvegarde pas ses données dans Caché, mais cela ne change pas la démarche. La sauvegarde est effectuée par le programme `PrototypeBuilder` (voir §5.6) qui crée un model structural puis le sauvegarde dans Caché de la même manière qu'aurait fait StAr. Dans un sens, le programme `PrototypeBuilder` émule la sauvegarde des données de StAr.

Remarque :

Le modèle structural (récupéré de Caché) apparaît au lancement du DKM. Si la récupération se faisait dans un second temps, le modèle structural n'apparaîtrait pas; l'utilisateur ne pourrait plus sélectionner l'entité `StructuralSystem` (voir §5.3.2); par conséquent il ne pourrait plus accéder à l'arbre décisionnel associé à cette entité.

5.5.2 Géométrie du bâtiment

Nom de la classe : `DecBuildingGeometry`

Ce nœud décisionnel est lié à la tâche de récupération des informations sur la géométrie du bâtiment et des grilles structurales. La méthode `isApplicable()` retourne toujours *Vrai*

car c'est un des nœuds par lequel on peut commencer le processus. La méthode `apply()` examine les grilles pour établir les propriétés suivantes :

- les portées à franchir par les sous-systèmes horizontaux. Cette information est nécessaire aux nœuds `DecStructuralSystem` et `DecStructuralElement`;
- le rapport des dimensions des dalles (utile à `DecStructuralSystem`);
- les aires des surfaces extérieures de l'enveloppe du bâtiment qui permettront de calculer la pression du vent sur le bâtiment (voir `DecExteriorLoads`);
- les surfaces de plancher qui permettront de calculer le poids propre du bâtiment (voir `DecEccentricity`).

Enfin, le nœud prévient l'utilisateur que l'analyse de la géométrie du bâtiment est terminée en affichant une fenêtre (voir Figure 29).

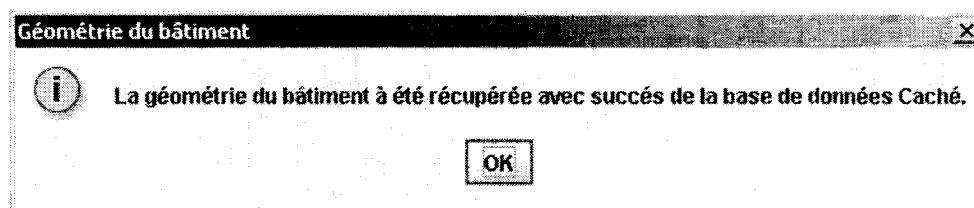


Figure 29 Fenêtre *Géométrie du bâtiment*

5.5.3 Nombre d'étages

Nom de la classe : `DecStoreyNo`

Ce nœud détermine le nombre d'étages du bâtiment et demande à l'utilisateur de confirmer l'information. La méthode `isApplicable()` retourne toujours *Vrai* car c'est un nœud de départ. La méthode `apply()` récupère le nombre d'étages du modèle non-persistant du DKM (voir §5.4.1) puis demande confirmation à l'utilisateur en affichant une fenêtre (voir Figure 30). Si l'utilisateur souhaite rectifier le nombre d'étages (en cliquant sur *Non*), alors une nouvelle fenêtre apparaît demandant de saisir le nombre d'étage.

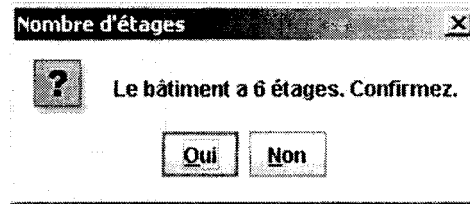


Figure 30 Fenêtre *Nombre d'étages*

5.5.4 Détermination de l'usage du bâtiment

Nom de la classe : DecBuildingUse

Ce nœud décisionnel récupère les informations portant sur l'usage du bâtiment. La méthode `isApplicable()` retourne toujours *Vrai* car c'est un nœud de départ. La méthode `apply()` regarde si des informations liées à l'usage du bâtiment sont déjà présentes, puis ouvre une fenêtre de dialogue pour interroger l'utilisateur sur l'usage escompté du bâtiment (voir Figure 31).

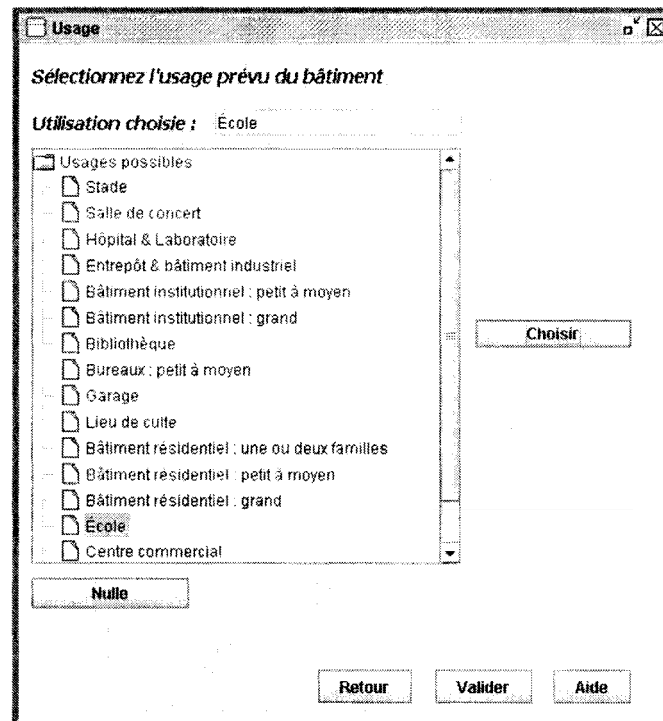


Figure 31 Fenêtre *Usage*

Pour cela, la fenêtre présente différents types d'usages. L'utilisateur n'a qu'à sélectionner un usage puis à valider avec le bouton *Choisir*. Si l'utilisateur souhaite ne pas choisir d'usage, ou si aucun usage ne correspond à la situation, il peut ne rien choisir en cliquant sur le bouton *Nulle*. Dans ce cas, le DKM ne calculera pas de note correspondant à l'usage du bâtiment (voir §4.4.8). Si un usage a déjà été défini (soit parce que l'utilisateur est revenu en arrière dans le processus décisionnel, soit parce que cette information est déjà définie dans le modèle structural) alors celui-ci est pré-affiché dans le champ *Utilisation choisie*.

5.5.1 Détermination des caractéristiques du projet

Nom de la classe : `DecProjectCharacteristics`

Ce nœud décisionnel est assigné à la tâche de désignation des caractéristiques du projet. La méthode `isApplicable()` retourne toujours *Vrai* car c'est un nœud de départ. La méthode `apply()` regarde si des informations portant sur les caractéristiques du projet sont déjà présentes, puis ouvre une fenêtre qui demande à l'utilisateur de spécifier les caractéristiques du projet (voir Figure 32).

Pour cela, la fenêtre présente une liste des caractéristiques possibles (à gauche) organisées par type (contrainte géométrique, contrainte liée aux travaux, contrainte liée aux réactions structurales et contrainte diverse). L'utilisateur n'a qu'à sélectionner une ou plusieurs caractéristiques puis à valider avec le bouton *Ajouter*. Les caractéristiques choisies s'affichent alors dans la liste de sélection (à droite). L'utilisateur peut organiser la liste avec les boutons ▲ et ▼. Le bouton *Supprimer* permet d'enlever des caractéristiques de la liste de sélection. Avant de fermer la fenêtre, l'utilisateur doit spécifier le poids des caractéristiques. Il y a trois poids possibles : peu important, moyennement important et très important (voir §4.4.8 pour plus d'informations sur l'utilité des poids). La signification des poids, ainsi que la méthode de calcul du niveau d'aptitude sont expliquées dans la page d'aide qui apparaît lorsque l'utilisateur clique sur le bouton *Aide*. Si l'utilisateur oublie de spécifier les poids, une fenêtre demande à l'utilisateur de le faire. Si des caractéristiques ont déjà été définies (soit parce que l'utilisateur est revenu en arrière dans le processus décisionnel, soit parce que

cette information est déjà définie dans le modèle structural) alors celles-ci sont pré-affichées dans la liste de sélection.

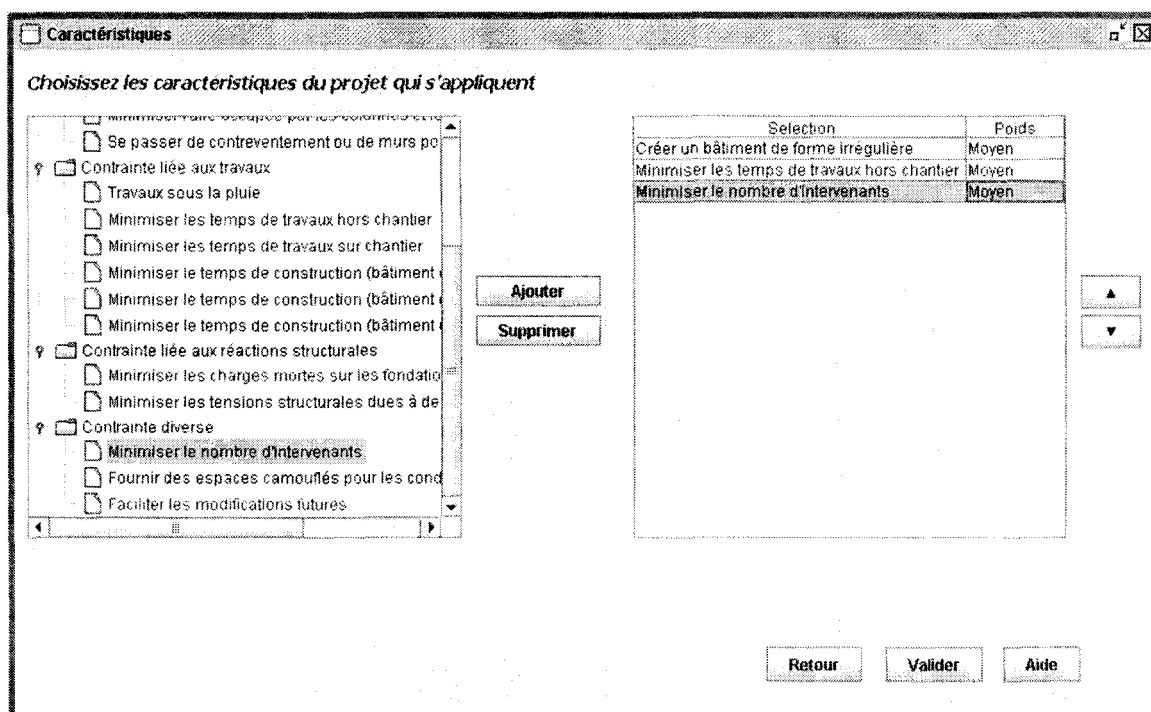


Figure 32 Fenêtre *Caractéristiques*

5.5.2 Détermination des charges vives

Nom de la classe : DecLiveLoads

Ce nœud demande à l'utilisateur de spécifier l'intensité des charges vives. Ces charges vives sont supposées verticales, vers le bas et uniformément réparties sur les planchers. La méthode `isApplicable()` retourne toujours *Vrai* car c'est un nœud de départ. La méthode `apply()` regarde si l'information est déjà présente dans le modèle puis affiche une fenêtre de dialogue (voir Figure 33) demandant à l'utilisateur de spécifier la valeur de l'intensité de l'ensemble des charges vives. Il y a quatre niveaux d'intensité (voir §4.4.5 pour la signification des niveaux) : faible, moyen, important et très important. La fenêtre affiche les usages associés aux différents niveaux d'intensité de charge afin de conseiller

l'utilisateur. Les charges ainsi qu'une liste plus exhaustive des usages associés sont expliqués dans la page qui s'affiche lorsque l'utilisateur clique sur le bouton *Aide*.

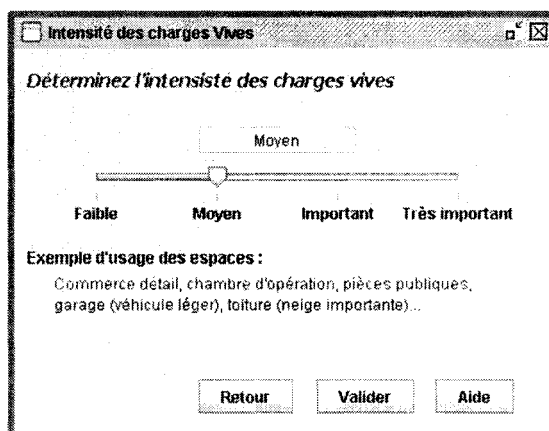


Figure 33 Fenêtre *Intensité des charges vives*

5.5.3 Détermination de la charge due au vent

Nom de la classe : DecExteriorLoads

Ce nœud permet à l'utilisateur de spécifier les charges exercées par le vent. La méthode `isApplicable()` retourne toujours *Vrai* c'est un des nœuds par lequel on peut commencer le processus. La méthode `apply()` regarde si l'information est déjà présente puis affiche une première fenêtre de dialogue. Cette fenêtre (voir Figure 34) demande à l'utilisateur de spécifier la localisation du bâtiment et la pression q du vent. Pour aider l'utilisateur le bouton *Modifier* affiche une autre fenêtre (voir Figure 35) classant des localités. Ces localités sont associées aux valeurs de pression de vent récupérées de l'annexe C du CNBC 2005. Les champs de la première fenêtre sont automatiquement remplis après que l'utilisateur ait sélectionné une localité dans la fenêtre *Localisation*. Si la localisation du bâtiment n'est pas présente dans la liste, l'utilisateur peut remplir lui-même les champs *Localité* et q . Enfin, un message prévient l'utilisateur s'il spécifie mal la localisation ou la valeur du paramètre q .

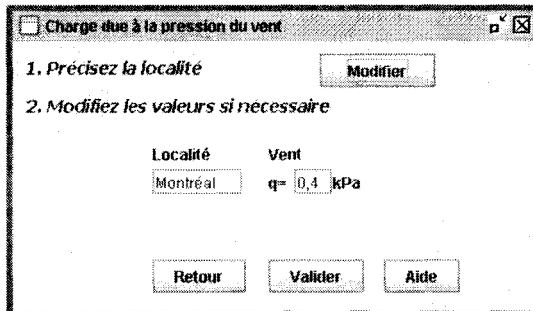


Figure 34 Fenêtre *Charge due à la pression du vent*

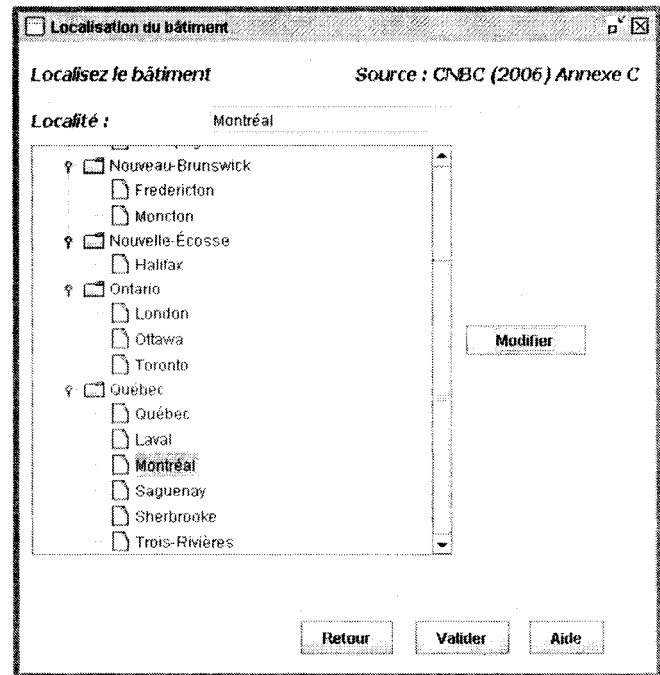


Figure 35 Fenêtre *Localisation du bâtiment*

5.5.4 Détermination du poids propre

Nom de la classe : DecDeadLoad

Ce nœud demande à l'utilisateur de spécifier le poids propre du bâtiment. La méthode `isApplicable()` retourne *Vrai* si le nœud `DecStructuralSystem` a été appliqué. La méthode `apply()` regarde le type de matériau des sous-systèmes horizontaux choisis puis affiche une fenêtre de dialogue (voir Figure 36). En fonction du matériau la fenêtre va afficher un intervalle de poids propres conseillés (voir §4.6.1). L'utilisateur peut aussi spécifier une valeur hors de l'intervalle en l'inscrivant directement dans le champ de saisie. Un message prévient l'utilisateur s'il spécifie mal le poids propre.

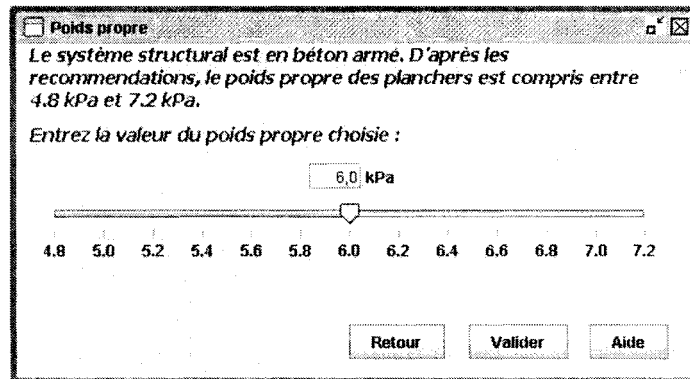


Figure 36 Fenêtre *Poids propre*

5.5.5 Sélection des sous-systèmes structuraux

Nom de la classe : `DecStructuralSystem`

Ce nœud correspond à la sélection des sous-systèmes horizontaux et verticaux. La méthode `isApplicable()` retourne *Vrai* si les nœuds `DecBuildingGeometry`, `DecStoreyNo`, `DecBuildingUse`, `DecProjectCharacteristics` et `DecLiveLoads` ont été appliqués. La méthode `apply()` appelle tout d'abord la méthode `calcAptitude()`. Cette méthode calcule les niveaux d'aptitude des différents types de sous-systèmes structuraux conformément à la sous-section 4.4.8. Puis, une première fenêtre de dialogue affiche les différents types de sous-systèmes horizontaux et leurs niveaux d'aptitude (voir Figure 37).

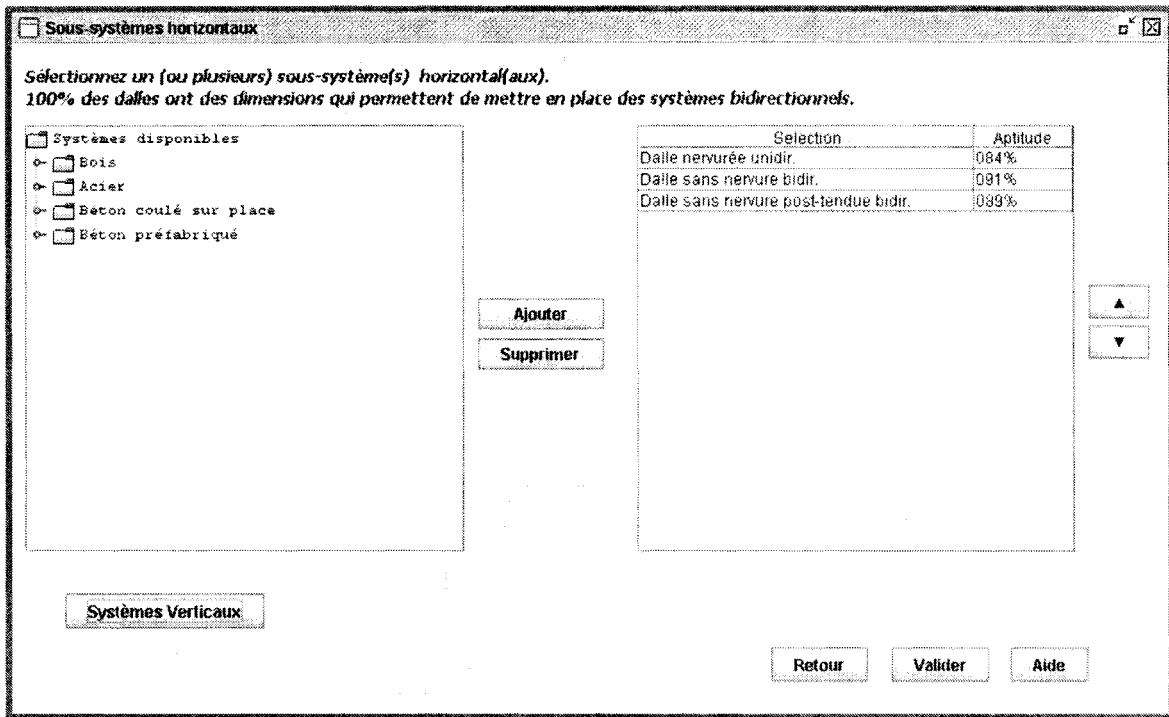
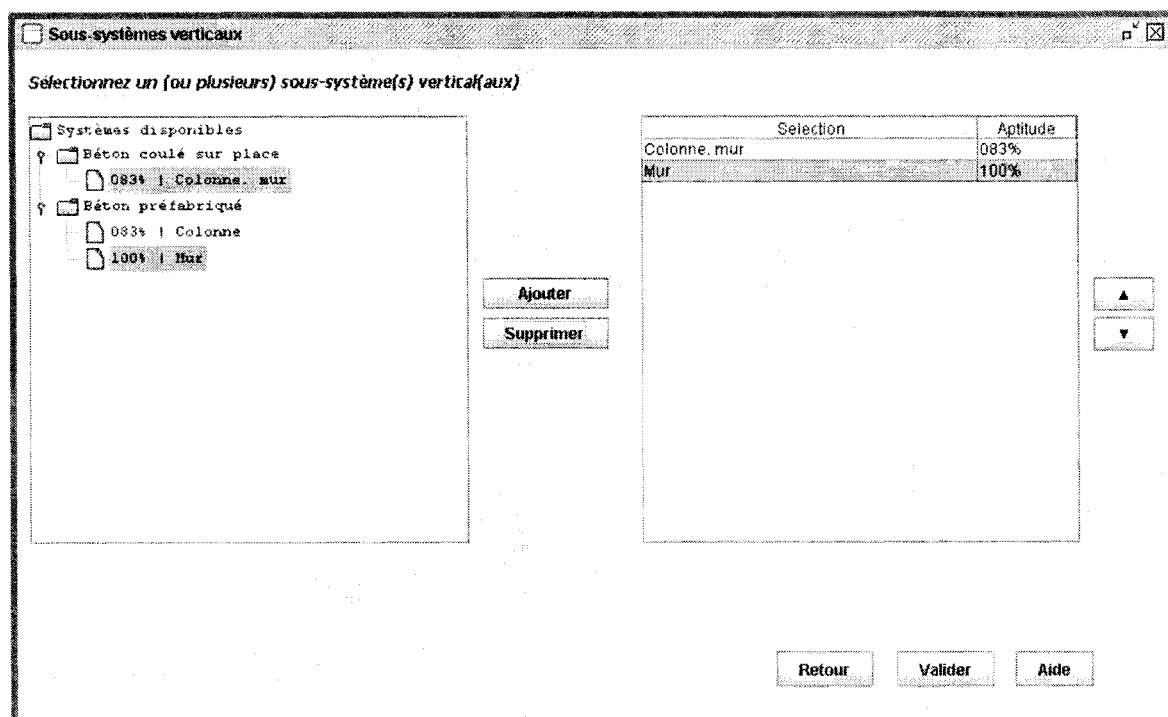


Figure 37 Fenêtre *Sous-systèmes horizontaux*

Le DKM informe tout d'abord l'utilisateur de la proportion de sous-systèmes horizontaux pouvant travailler bidirectionnellement (voir Figure 37). Cette information permet à l'utilisateur de choisir entre les systèmes horizontaux. Ensuite, il sélectionne dans la liste des systèmes (à gauche) ceux qui sont les plus conseillés en regardant les scores qui s'affichent à gauche du nom des systèmes (voir §4.4.8 pour plus d'informations sur le calcul des scores). Puis, à l'aide du bouton *Ajouter*, il les ajoute à la liste des systèmes choisis (à droite). Si l'utilisateur souhaite retirer un élément de la liste de sélection il utilise le bouton *Supprimer*. Les boutons ▲ et ▼ servent à organiser la liste. Une fois les sous-systèmes horizontaux choisis, l'utilisateur clique sur le bouton *Sous-systèmes verticaux*. Cela ouvre une seconde fenêtre correspondant à la sélection des sous-systèmes verticaux (voir Figure 38). Cette fenêtre fonctionne comme la précédente. Seuls les sous-systèmes verticaux correspondant aux sous-systèmes horizontaux choisis dans la première fenêtre sont affichés (voir §4.5.1 pour plus d'informations sur les liens entre les sous-systèmes verticaux et horizontaux). Pour valider son choix l'utilisateur clique successivement sur les boutons *Valider* des deux fenêtres.

Figure 38 Fenêtre *Sous-systèmes verticaux*

5.5.6 Évaluation de l'excentricité

Nom de la classe : DecEccentricity

Ce nœud calcule l'excentricité du bâtiment ou du volume structural (voir §4.6 pour plus d'informations sur le calcul de l'excentricité). La méthode `isApplicable()` retourne *Vrai* si les nœuds `DecBuildingGeometry`, `DecDeadLoad` et `DecExteriorLoads` ont été appliqués. La méthode `apply()` calcule l'excentricité des volumes structuraux puis affiche une fenêtre de dialogue présentant les résultats (voir Figure 39). L'utilisateur doit sélectionner chaque volume structural de la liste (*Sélectionnez un volume structural*) et vérifier que les résultats sont concluants. Dans ce cas, l'utilisateur pourra passer au nœud suivant (qui correspond à la sélection des éléments), sinon il peut modifier le type de sous-système vertical ou modifier la grille structurale à l'aide de `StAr`. En cas de dépassement important de l'excentricité maximale, la page d'aide associée à la fenêtre suggère à

l'utilisateur de mettre en place des fondations travaillant en traction ou d'élargir l'empreinte du bâtiment.

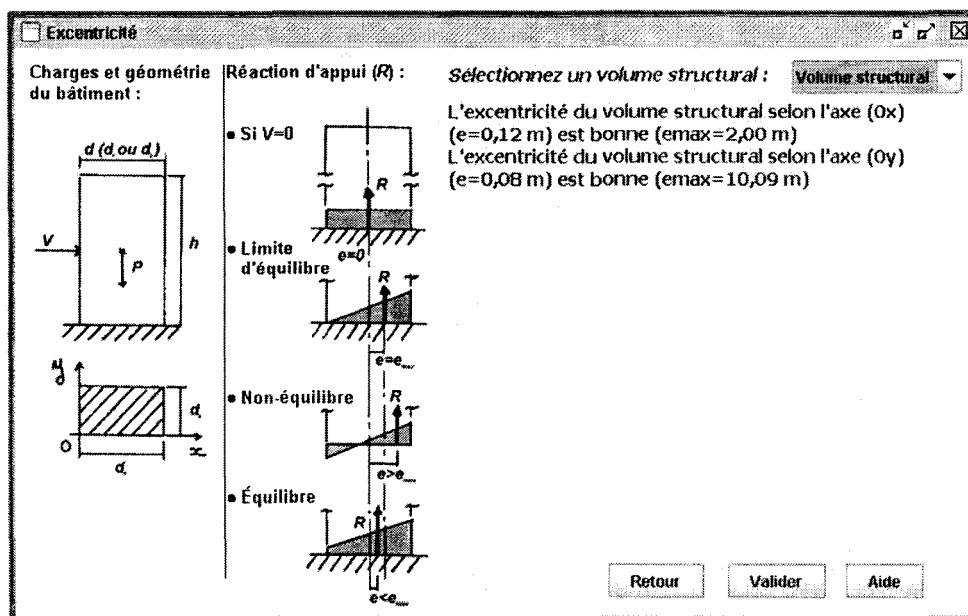


Figure 39 Fenêtre *Excentricité*

La fenêtre (Figure 39) présente les résultats du calcul de l'excentricité selon les deux axes principaux des grilles structurales (Ox) et (Oy). Dans l'exemple l'excentricité e est inférieure à l'excentricité e_{\max} sur les deux axes : $e = 0,12 \text{ m} < 2,00 \text{ m} = e_{\max}$ sur (Ox) et $e = 0,08 \text{ m} < 10,09 \text{ m} = e_{\max}$ sur (Oy).

5.5.7 Sélection des éléments structuraux

Nom de la classe : DecStructuralElement

Ce nœud correspond à la sélection des éléments ou des assemblages horizontaux et verticaux.

La méthode `isApplicable()` retourne *Vrai* si les nœuds `DecBuildingGeometry` et `DecEccentricity` ont été appliqués. La méthode `apply()` appelle tout d'abord la méthode `calcAptitude()` qui calcule les scores d'aptitudes des éléments structuraux conformément à la sous-section 4.4.8. Puis, une fenêtre de dialogue présentant les différents

types d'éléments horizontaux et verticaux et les niveaux d'aptitude associés est affichée (voir Figure 40).

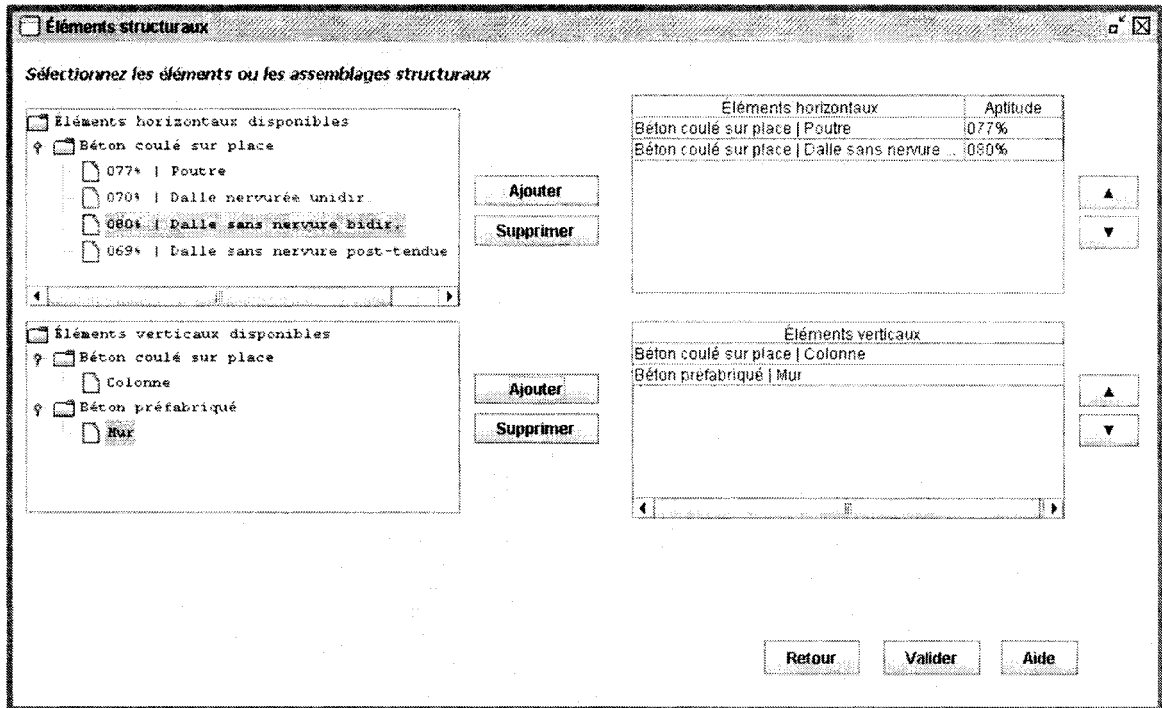


Figure 40 Fenêtre *Éléments structuraux*

L'utilisateur sélectionne dans la liste des éléments horizontaux disponibles (en haut à gauche) ceux qui sont les plus conseillés en regardant les scores qui s'affichent à gauche du nom des systèmes (voir §4.4.8 pour plus d'informations sur le calcul des scores). Puis, à l'aide du bouton *Ajouter*, il les ajoute à la liste des éléments horizontaux choisis (en haut à droite). Il sélectionne de même les éléments verticaux (les listes du bas). Les éléments ou assemblages présentés à l'utilisateur sont ceux qui correspondent aux sous-systèmes choisis précédemment. Si l'utilisateur souhaite retirer un élément des listes de sélection il utilise le bouton *Supprimer*. Les boutons ▲ et ▼ servent à organiser les listes. Pour valider son choix l'utilisateur clique sur le bouton *Valider*.

Après validation, le DKM dispose d'une liste de sélection des systèmes structuraux les plus adaptés. Cette liste représente les types de systèmes qui pourront être mis en place dans le

bâtiment. Elle servira d'une part à la sélection des types de systèmes dans les arbres décisionnels associés à chaque dalle (Parent 2006b), à chaque poutre, à chaque colonnes, etc. La liste de sélection servira aussi à StAr. Par exemple, lorsque l'on souhaitera spécifier le type d'une dalle dans StAr, la liste présentera les deux ou trois types les plus adaptés au bâtiment. L'utilisateur n'aura plus qu'à choisir parmi elles.

5.6 Création du modèle structural – le programme `PrototypeBuilder` et le paquetage `tablesSystemes`

Comme expliqué plus tôt, StAr ne communique pas avec encore avec Caché. Or, il revient à StAr de créer le modèle structural. En attendant, on utilise le programme `PrototypeBuilder` (écrit en Java lui aussi) pour faire fonctionner le DKM.

Le programme intègre une copie des classes projetées du paquetage `cacheEntities` (voir §5.2.1). Ces classes ont, dès le départ, des méthodes permettant de modifier les attributs spécifiques aux classes et de sauvegarder les objets associés dans la base de données. La tâche est donc grandement simplifiée. En résumé, la démarche consiste à :

- instancier les entités;
- modifier les attributs des entités;
- enregistrer les entités dans la base de données.

Par exemple, pour modéliser des volumes structuraux, on instancie autant d'objets `ISV` qu'il y a de volumes structuraux dans le bâtiment. Puis, on établit les propriétés des entités. On retrouve entre autres le nom des entités et les relations d'agrégation entre les entités. Les liens d'agrégation sont importants. Ces liens définissent, par exemple, que tel sous-système structural appartient à tel volume structural.

Les entités représentant les propriétés du bâtiment sont définies en fonction de tables regroupées dans un paquetage nommé `tablesSystemes`. Chaque ligne et chaque colonne

représentent respectivement les entités et les propriétés associées. Il y a sept tables correspondant à sept classes :

- `tablesSystemes.usage` correspond à des entités `cacheEntities.Use`;
- `tablesSystemes.caracteristiques` correspond à des entités de la classe `cacheEntities.Criteria`;
- `tablesSystemes.zoneGeo` correspond à des entités associées à la classe `cacheEntities.GeoArea`;
- `tablesSystemes.systemeHz` correspond à des entités associées à la classe `cacheEntities.HorizontalSystem`;
- `tablesSystemes.systemeVt` correspond à des entités associées à la classe `cacheEntities.VerticalSystem`;
- `tablesSystemes.elementHz` correspond à des entités associées à la classe `cacheEntities.HorizontalElement`;
- `tablesSystemes.elementVt` correspond à des entités associées à la classe `cacheEntities.VerticalElement`.

Le volume structural est aussi associé à une grille structurale. La grille (de la classe `cacheEntities.GlobalStructuralGrid`) est définie par une liste (de la classe `List` de l'API de J2SE) de lignes (de la classe `cacheEntities.GridLine`) (voir Figure 41). Ces lignes sont elles-mêmes définies par deux points (de la classe `cacheEntities.Position3D`) représentant les extrémités des segments (voir Figure 41). Les points sont eux-mêmes définis par leurs coordonnées cartésiennes dans un espace à trois dimensions (x , y et z) (voir Figure 41). Pour éviter de définir les grilles manuellement, ce qui serait très fastidieux, on conçoit une méthode générant les grilles structurales à partir d'une table représentant les coordonnées des extrémités des lignes.

Une fois que toutes les entités sont définies en fonction du problème, celles-ci sont sauvegardées dans la base de données.

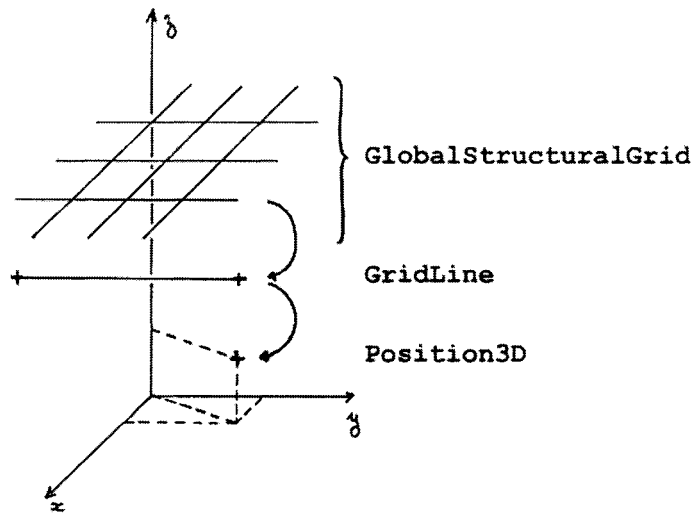


Figure 41 Modélisation des grilles structurales

5.7 Lien entre les processus implémentés dans le DKM

La dernière étape de l'implémentation correspond à la création d'un lien entre les deux processus décisionnels associés aux dalles et aux systèmes structuraux. Le processus décisionnel associé à la sélection des systèmes structuraux apporte des informations permettant de guider l'utilisateur durant les premières étapes du processus décisionnel associé à la conception préliminaire des dalles. En effet lors du processus décisionnel lié aux systèmes structuraux, on a déterminé quels sont les types de sous-systèmes horizontaux les plus appropriés.

Pour rendre visible ces sous-systèmes, on a décidé de faire apparaître en vert leurs cheminement à travers le processus décisionnel attaché aux dalles (voir Figure 42). Il faut donc modifier les méthodes `isApplicable()` (voir §5.4.3) des nœuds associés à la sélection des matériaux, du cheminement des charges et des types de sous-système horizontal. Pour les nœuds associés aux matériaux, on examine l'attribut `matériau` des sous-systèmes horizontaux sélectionnés (voir §5.3.1). Pour les nœuds associés au cheminement des charges et au type de sous-système horizontal, on compare la valeur de l'attribut `Index` des sous-systèmes choisis (voir §5.3.1) avec plusieurs listes comptabilisant

les Index de chaque système bidirectionnel, unidirectionnel, dalle plate en béton, etc. (voir ANNEXE IV).

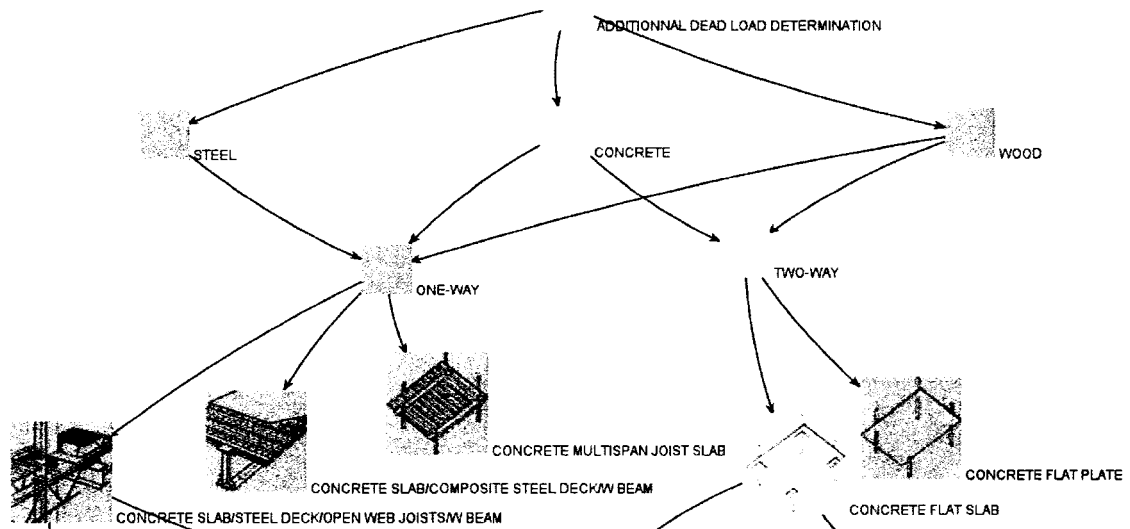


Figure 42 Présélection des nœuds décisionnels du processus décisionnel associé aux dalles

L'utilisateur du programme pourra, à cette étape, visionner le choix qu'il a fait précédemment lors du design conceptuel du système structural. Il peut alors choisir de confirmer ou de modifier son choix. Pour cela l'utilisateur doit appliquer les nœuds décisionnels correspondant à son choix dans l'ordre imposé par les flèches liant les nœuds. Ainsi, les nœuds verts de la quatrième rangée (voir Figure 42) ne peuvent être appliqués immédiatement.

5.8 Conclusion

Finalement, le nouveau processus décisionnel du DKM est fonctionnel. Le model structural a été mis à jour, les connaissances et les interfaces de dialogue ont été implémentées et le lien entre les deux processus décisionnels associés aux dalles aux systèmes structuraux a été créé. Le DKM est maintenant appliqué, dans le chapitre 6, à deux exemples d'application afin de tester et de valider le prototype et l'approche proposée par cette étude.

CHAPITRE 6

TEST ET VALIDATION

Cette partie porte, en premier lieu, sur l'application du DKM à deux projets de bâtiments à Montréal : la Maison du développement durable d'Équiterre et le bâtiment D de la phase 4 de l'ÉTS (École de Technologie Supérieure). Chaque projet est d'abord présenté de manière à extraire les propriétés des bâtiments, puis on expose un exemple de session du DKM. Les actions exécutées par l'utilisateur sont expliquées, les déductions et les résultats fournis par le logiciel sont commentés. L'évaluation du fonctionnement du DKM vient en second lieu.

Les deux projets présentent des différences marquées, ce qui permet de tester les limites du champ d'application du DKM. La Maison du développement durable est un projet de création d'un bâtiment exemplaire en termes de design environnemental. Ce bâtiment de six étages est constitué d'un seul bloc de forme simple. La particularité du projet porte avant tout sur les contraintes architecturales et écologiques. Le bâtiment D de la phase 4 de l'ÉTS porte, quant à lui, sur la réalisation d'un bâtiment dédié à des usages multiples et supportant une tour élevée.

6.1 Présentation du projet de Maison du développement durable

Énoncé du projet :

« La Maison du développement durable est un projet de bâtiment écologique démonstratif qui se veut un pôle d'innovation sociale et environnementale. En plus de contribuer à renforcer les organisations qui l'habiteront, ce projet vise à explorer des façons de faire alternatives en termes de conception, construction et d'opération de bâtiment, de montage financier et de synergie entre organisations copropriétaires. L'édifice servira également d'outil éducatif visant à inspirer et inciter l'écologisation des bâtiments au Québec. » (Menkès Shooner Dagenais Letourneaux Architectes 2007)

Équiterre, l'initiateur du projet, est un organisme à but non lucratif qui s'est donné pour mission de « contribuer à bâtir un mouvement citoyen en prônant des choix individuels et

collectifs à la fois écologiques et socialement équitables » (Équiterre 2007). Ses principaux axes d'intervention portent sur l'agriculture écologique, le commerce équitable, le transport écologique et l'efficacité énergétique. Les impératifs écologiques et énergétiques constituent donc des contraintes très importantes dans le projet.

6.1.1 L'équipe de conception

Le projet innove dans sa manière de concevoir un bâtiment. Une équipe composée des différents intervenants de la conception (architectes, ingénieurs en structures, ingénieurs mécaniques, entrepreneurs, etc.) se réunit régulièrement pour faire le point sur l'avancement. Chaque membre de l'équipe intervient dès la phase conceptuelle pour partager ses connaissances techniques et environnementales. Ce type d'approche intégrée favorise la synergie entre les différents membres de l'équipe de projet et améliore le programme fonctionnel, les choix de tous les systèmes du bâtiment et l'expression architecturale du bâtiment.

Cette équipe de conception est composée de :

- Client : Équiterre
- Partenaires : Hydro-Québec, ÉTS
- Architecture : Menkès Shooner Dagenais Letourneaux Architectes
- Structure / Civil : Pasquin St-Jean et Associés
- Mécanique / Électrique : Bouthillette Parizeau & Associés Inc.
- Entrepreneur : Pomerleau
- Consultant en Code du bâtiment: Le Groupe CSB Inc.
- Consultant en ascenseur : Jean-Marc Caron & Associées
- Étude géotechnique : Inspec-Sol Inc.
- Gestionnaire de projet : Services CGP Inc.
- Coordonnateur du développement durable : Teknika-HBA

6.1.2 Le projet

Après une série de réunions, l'équipe de conception est arrivée, en février 2007, à l'élaboration d'un concept apprécié de tous les intervenants. Ce concept comporte d'importants éléments architecturaux, par exemple (voir Figure 43) :

- l'utilisation de différents matériaux esthétiques (sur la figure à gauche : l'acier patiné et à l'avant : le mur rideau en verre et la résille en tubes de cuivres recyclés formant un filtre);
- la continuité du jardin (au sol) sur la façade (le mur rideau) avant puis sur le toit (toit vert);
- le jardin intérieur et les salles de conférence qui forment comme des boîtes flottantes.

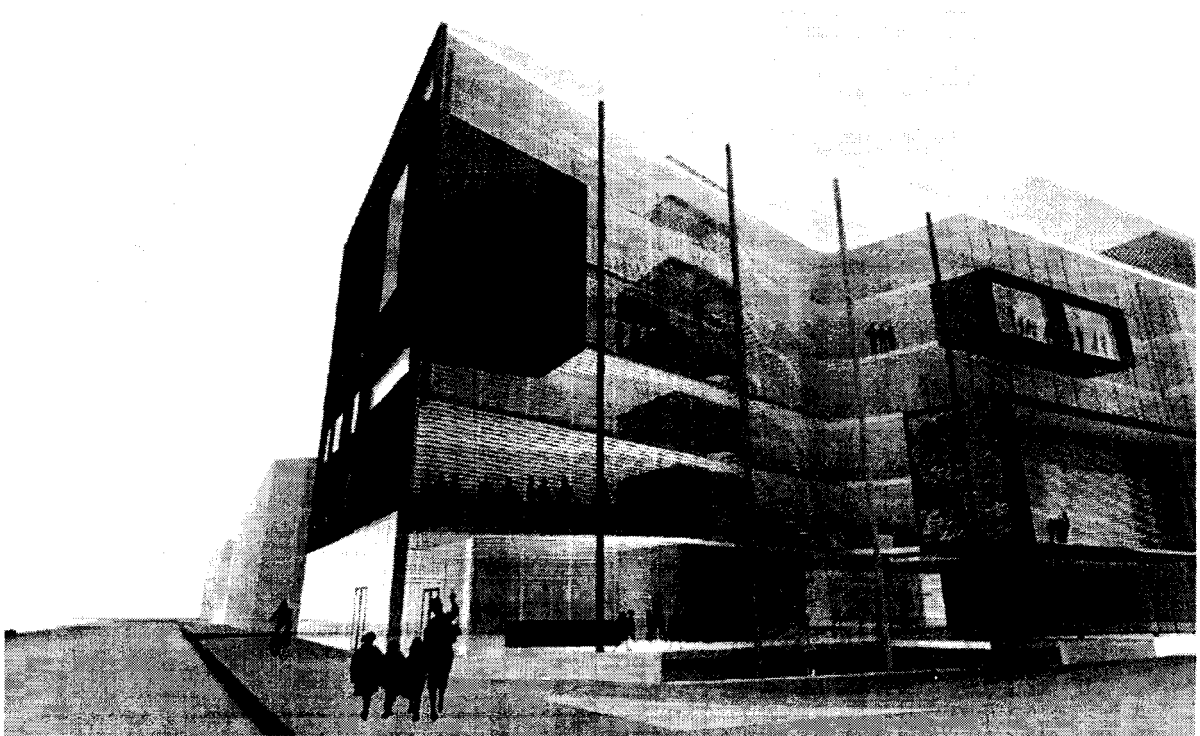


Figure 43 Vue extérieure du projet de Maison du développement durable (MDD)
(Menkès Shooner Dagenais Letourneaux Architectes 2007)

Le bâtiment se veut aussi la démonstration de nombreuses technologies environnementales, comme la Living Machine (<http://www.livingdesignsgroup.com/> 2007) (système de traitement des eaux grises), le Biowall (<http://lslwww.epfl.ch/biowall/> 2007) (système de filtration de l'air) et la géothermie (production d'énergie à partir de la chaleur du sol).

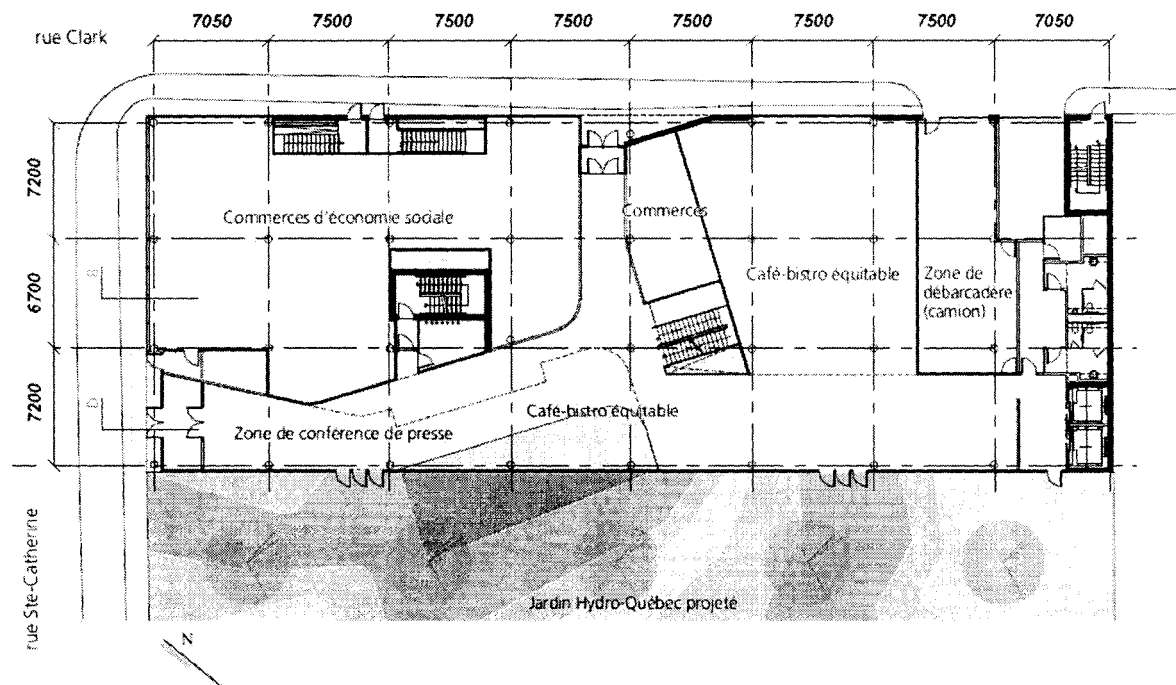


Figure 44 MDD : Grille structurale [mm] (Niveau 1)
(Menkès Shooner Dagenais Letourneaux Architectes 2007)

La forme du bâtiment consiste en un bloc de forme parallélépipédique composé de six étages plus un sous-sol et un toit aménagé. Les grilles structurales (voir Figure 44) sont assez régulières et identiques sur chaque étage.

Le bâtiment doit se situer à Montréal (Québec, Canada) à l'intersection des rues Ste-Catherine et Clark (voir Figure 44). Le bâtiment sera au cœur d'une zone commerciale très fréquentée.

Remarque :

Par la suite, le concept du bâtiment a évolué. En effet, le design proposé était trop coûteux à réaliser et les concepteurs ont dû opter pour un projet moins ambitieux. Le bâtiment prévu à la date du 19 juillet 2007 comporte toujours six étages, cependant l'architecture est plus sobre et le bâtiment présente moins de technologies démonstratives. Les surfaces vitrées sont limitées aux deux premiers étages et le reste du bâtiment est constitué d'étages à bureaux standards. Les concepteurs se sont entendus pour ne garder que les technologies environnementales les plus novatrices. Ainsi, le toit vert, que l'on trouve déjà sur d'autres bâtiments au Québec (par exemple sur les pavillons Lassonde de l'École polytechnique de Montréal) a été enlevé. La Living Machine et le Biowall sont, quant à elles, toujours prévues.

Le bâtiment est occupé par les usages suivants :

- des espaces à bureaux pour Équiterre et d'autres organismes. Ces bureaux sont répartis sur cinq étages. C'est l'usage le plus important en superficie dans le bâtiment (3272 m²);
- des espaces commerciaux (693 m²), dont un café-bistro (325 m²);
- un centre de la petite enfance - CPE au deuxième étage (652 m²);
- des espaces communs (salle à manger, salle de sport, vestiaires) (419 m²);
- un centre de conférence (281 m²);
- un centre d'interprétation (93 m²);
- un laboratoire immotique (9 m²).

Lors de l'étude on a défini les charges vives suivantes :

- 4,8 kPa pour les espaces publics (Rez-de-chaussée, salle de conférence et CPE);
- 2,38 kPa pour les bureaux;
- 3,6 kPa pour les salles mécaniques et électriques;
- 2,32 kPa + accumulations de neige pour le toit jardin.

La pression du vent de probabilité annuelle de dépassement de 1/100^e est de 0,44 kPa.

6.1.3 Résumé de l'étude comparative des systèmes structuraux

Lors de l'étude comparative, les concepteurs ont confronté différents types de matériau pour la réalisation de la structure. On retrouve en plus de l'acier et du béton armé, le bois d'œuvre, le bois lamellé collé, ainsi que le béton BubbleDeck (<http://www.bubbledeck.com/> 2007). Les systèmes structuraux correspondant à ces matériaux ont été confrontés sur plusieurs points représentant :

- la faisabilité de l'ouvrage. Le projet prévoit une structure de six étages avec des planchers d'environ 7 m × 7,5 m. Sur ce point les systèmes en bois sont désavantagés, car ils sont très rarement utilisés sur de si longues portées;
- le coût de construction de la structure;
- les contraintes LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) (Canada Green Building Council 2007) qui sont classées en cinq catégories : aménagement écologique des sites, gestion efficace de l'eau, énergie et atmosphère, matériaux et ressources, qualité des environnements intérieurs;
- différents impacts environnementaux, comme la consommation énergétique pour la mise en place des matériaux, les émissions de CO₂ et le dégagement de poussières;
- la durée de construction.

Le contexte du projet impose d'importants critères environnementaux et sociaux. Néanmoins, l'équipe de conception a opté pour une structure en béton armé. Les sous-systèmes horizontaux choisis pour le projet sont des dalles sans nervure avec panneaux surbaissés. Pour les sous-systèmes verticaux, on a choisi des colonnes et des murs de refend qui seront placés autour des cages d'ascenseur et d'escalier.

6.2 Application du DKM sur le projet de Maison du développement durable

Après avoir présenté le projet, on applique le DKM comme auraient pu le faire les concepteurs en phase de design conceptuel. Pour cela il faut d'abord initialiser le DKM, puis modéliser le bâtiment dans la base de données. Enfin on pourra utiliser le prototype.

6.2.1 Initialisation du DKM

La première étape consiste à retirer toutes les données d'anciens projets stockées dans la base de données Caché. Pour cela on supprime les objets héritant des classes de haut niveau :

- `cacheEntities.BuldingEntity`. C'est la classe d'où découlent les sous-classes telles que `Building`, `ISV` et `StructuralElement` (voir description des classes §5.3.2);
- `cacheEntities.BuldingProperty`. C'est la classe qui génère les sous-classes `Use`, `Criteria`, `VerticalSystem`, `HorizontalSystem`, `VerticalElement`, `HorizontalElement` et `GeoArea` (voir description des classes §5.3.1).

On exécute alors les requêtes SQL suivantes dans l'espace consacré au modèle structural (nommé DKM) :

```
Delete from cacheEntities.BuldingEntity
Delete from cacheEntities.BuldingProperty
```

6.2.2 Modélisation du bâtiment sous Caché

Cette étape correspond à la modélisation du bâtiment dans la base de données Caché. StAr ne communique pas encore avec Caché, ce qui implique qu'il faut définir manuellement les volumes structuraux, les grilles structurales, la géométrie et les caractéristiques du bâtiment. Pour modifier la base de données, on utilise un programme Java nommé `PrototypeBuilder`. Ce programme définit toutes les entités utiles à l'exécution du DKM, qui auraient été fournies par StAr. Les classes sont décrites dans l'ordre d'agrégation.

Site
Nom : Site Hydro-Québec
Localisation : Montréal

Building

Nom : Maison du développement durable

Nombre d'étages : 6

Les tables `tablesSystemes.Characteristique` et `tablesSystemes.Usage` sont stockées dans `Caché`, mais ne sont liées à aucun modèle structural. On définit des objets représentant chaque table (qui sont respectivement de classe `Criteria` et `Use`), puis on les agrège à l'objet de classe `Building`.

StructuralSystem

Nom : Système structural

De même, `tablesSystemes.systemeVt`, `tablesSystemes.systemeHz`, `tablesSystemes.elementVt` et `tablesSystemes.elementHz` (voir §5.3.1 et §5.6 pour plus d'informations sur ces tables et les classes associées) sont stockées dans `Caché`, mais ne sont liées à aucun modèle structural. On définit des objets représentant chaque table, puis on les agrège à l'objet de la classe `StructuralSystem`.

ISV

Nom : Volume structural

La structure du bâtiment ne constitue qu'un seul bloc. Dans ce cas, il n'est pas nécessaire de définir plusieurs volumes structuraux. Les grilles structurales sont récupérées des plans architecturaux. Puis, on définit un objet (de classe `GlobalStructuralGrid`) représentant toutes les grilles. La grille est une liste de lignes (de classe `GridLine`) qui sont définies par deux points dans l'espace (de classe `Position3D`). Ces points ont un attribut (`x`, `y` et `z`) pour chaque coordonnée d'un espace cartésien. Enfin on agrège l'objet de classe `GlobalStructuralGrid` à l'objet de classe `ISV`.

VerticalGravitySubsystem

Nom : Sous-système vertical résistant aux forces gravitationnelles

VerticalLateralSubsystem

Nom : Sous-système vertical résistant aux forces latérales

HorizontalSubsystem

Nom : Sous-système horizontal

Les classes suivantes sont définies pour l'utilisation des connaissances du processus décisionnel associé aux dalles.

FloorAssembly

Nom : Planchers

SlabElement

Nom : Dalle i , avec $i \in [1,8]$

Pour éviter de surcharger le DKM, on ne définit que huit dalles représentatives de l'ensemble des dalles du bâtiment. Leurs dimensions sont (voir Figure 44) : 6,70 m \times 7,05 m - 6,70 m \times 7,50 m - 7,20 m \times 7,05 m - 7,20 m \times 7,50 m. Les charges vives associées sont de 2,38 kPa (bureaux) ou de 4,8 kPa (espaces publics).

Beam

Nom : Poutre i , avec $i \in [1,32]$

On définit quatre poutres par dalle. Comme les dalles sont représentatives, on préfère les définir comme étant indépendantes les unes des autres : elles n'ont donc pas de poutres en commun. Si l'on avait représenté l'ensemble des dalles, on aurait dû veiller à bien définir que certaines poutres "appartiennent" à plusieurs dalles.

LineConnection

Nom : Connexion linéaire i , avec $i \in [1,32]$

On définit quatre connexions linéaires par dalle.

Après avoir compilé et lancé le programme `PrototypeBuilder`, on peut exécuter le programme `DKM`. Les sous-sections suivantes décrivent l'utilisation du `DKM` dans le cadre du projet de Maison de développement durable.

6.2.3 Affichage de l'arbre décisionnel

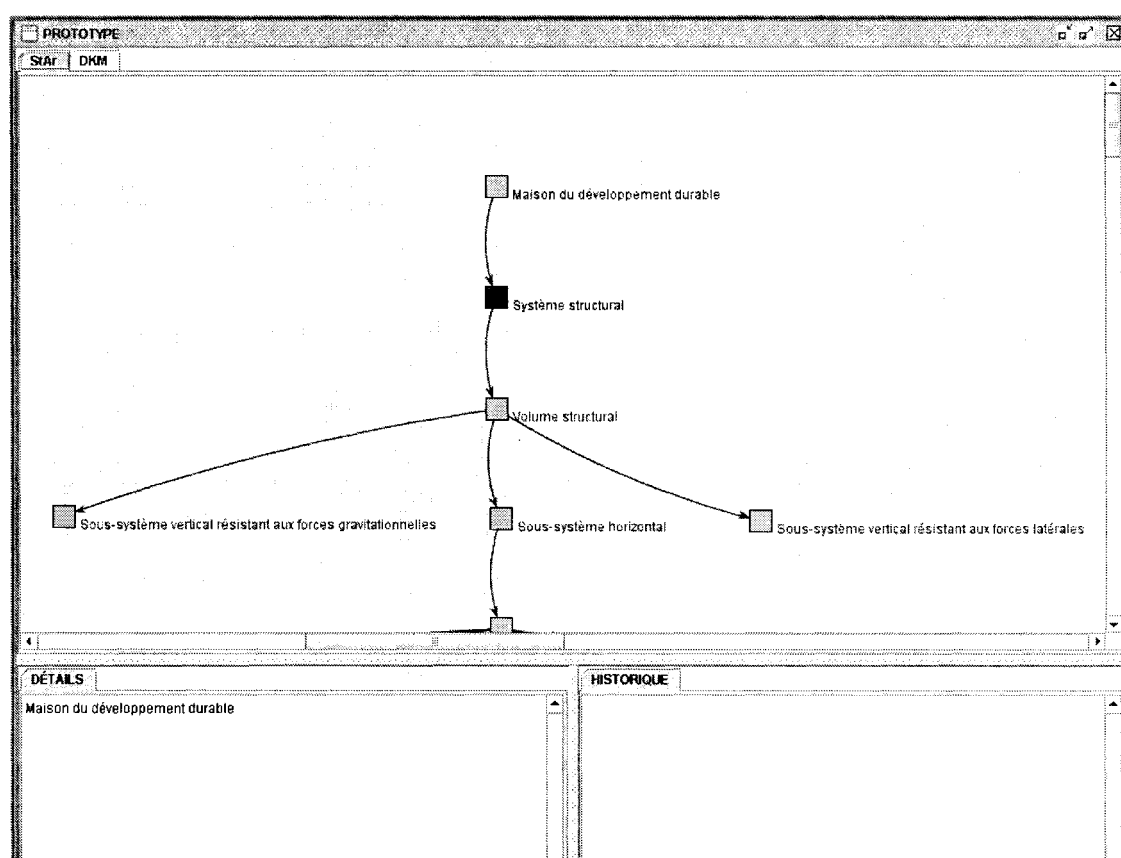


Figure 45 MDD : Modélisation du bâtiment : fenêtre principale du `DKM`

Après avoir lancé le programme, la fenêtre principale apparaît (voir Figure 45). L'espace `StAr` modélise le bâtiment tel qu'il a été défini plus tôt dans l'application `PrototypeBuilder`. Pour commencer le design conceptuel du bâtiment, l'utilisateur sélectionne l'entité *Systeme structural*. On voit alors les premiers détails associés à l'entité structurale s'afficher dans la fenêtre *Détails*. L'utilisateur clique sur l'onglet `DKM` pour faire apparaître l'arbre de décision associé aux systèmes structuraux (voir Figure 46).

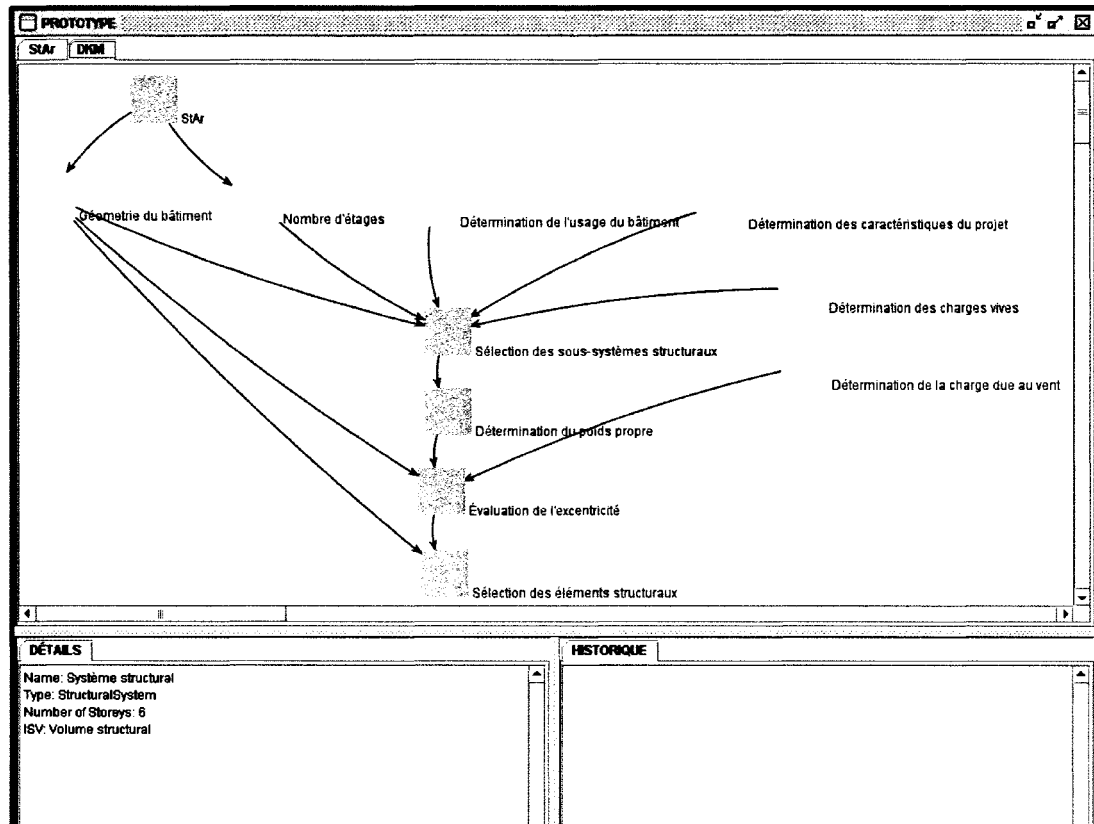


Figure 46 MDD : Arbre décisionnel initial

6.2.4 Définition des caractéristiques du projet

L'utilisateur commence à exécuter les nœuds du processus décisionnel qui apparaissent en vert. Il peut débiter, par exemple, par le nœud *Géométrie du bâtiment*. Après un court moment d'attente, une fenêtre (voir Figure 47) prévient l'utilisateur que l'opération est terminée. On remarque alors que les fenêtres *Détails* et *Historique* sont mises à jour (voir Figure 48). Le nœud a calculé les excentricités maximales de stabilité du bâtiment selon les axes principaux de la grille appelés (O_x) et (O_y) et a mesuré la hauteur du bâtiment, les surfaces des planchers et les surfaces extérieures de l'enveloppe du bâtiment. Toutes ces données seront utiles à l'exécution d'autres nœuds.

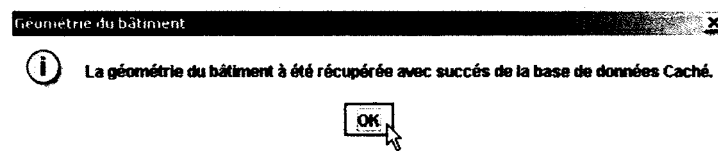


Figure 47 MDD : Récupération de la géométrie du bâtiment

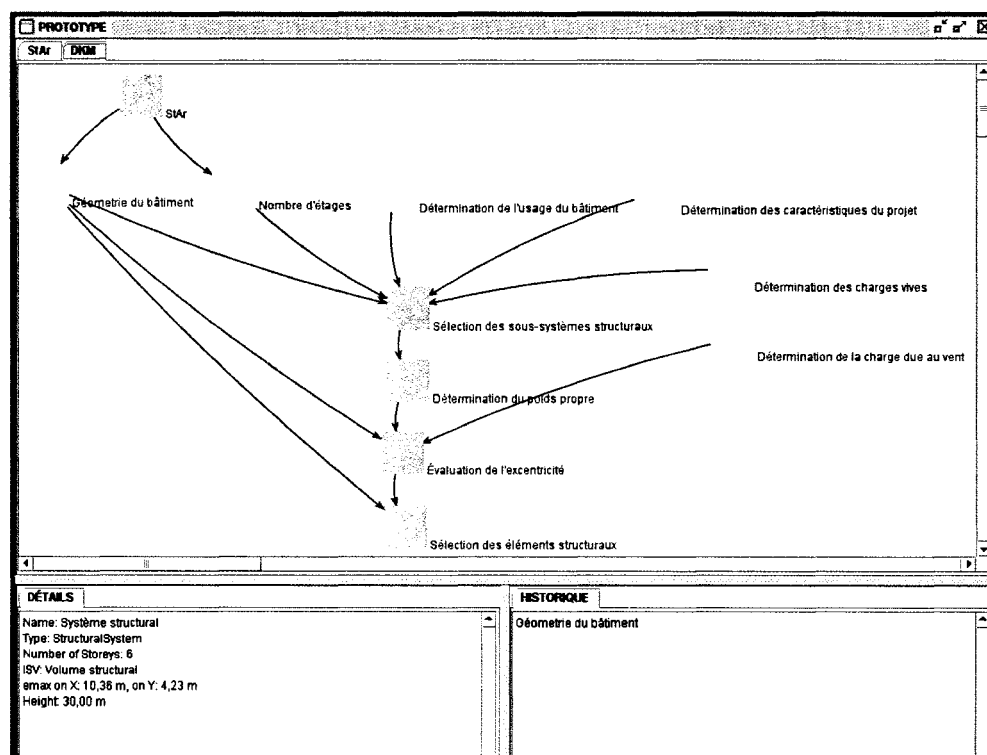


Figure 48 MDD : Mise à jour des détails et de l'historique

L'utilisateur exécute ensuite les nœuds *Nombre d'étage*, *Détermination de l'usage*, *Détermination des caractéristiques du projet* et *Détermination des charges vives*. Ces nœuds ainsi que *Géométrie du bâtiment* précèdent l'exécution du nœud *Sélection des sous-systèmes structuraux* (voir Figure 48).

Le nœud *Nombre d'étage* demande à l'utilisateur de confirmer l'information récupérée du modèle structural (voir Figure 49). Si l'utilisateur le souhaite il peut modifier cette donnée. Comme la Maison de développement durable comporte bien six étages, l'utilisateur confirme en cliquant sur *Oui*.

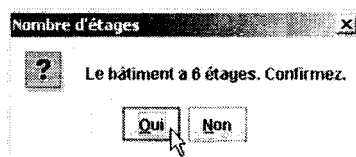


Figure 49 MDD : Confirmation du nombre d'étages

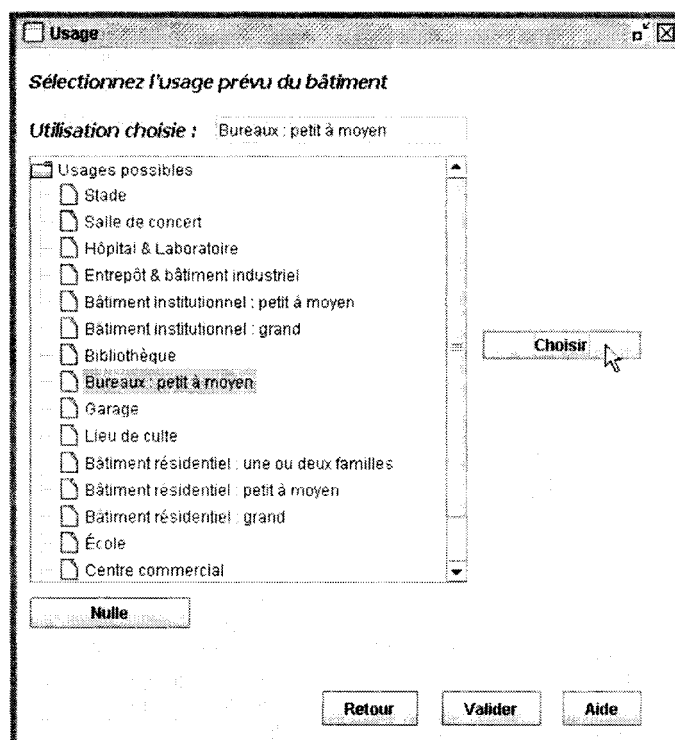


Figure 50 MDD : Spécification de l'usage du bâtiment

Le nœud *Détermination de l'usage* demande à l'utilisateur de préciser l'usage du bâtiment parmi les choix disponibles (voir Figure 50). Le bâtiment est à un immeuble à bureaux avec un atrium (ce qui aurait pu avoir des conséquences importantes sur la structure). Néanmoins, l'impact de l'atrium sur la structure est assez faible. La grille structurale est régulière et il n'y a pas d'espaces sans colonnes. L'utilisateur définit donc le bâtiment comme un immeuble de type *Bureaux : petit à moyen*.

Le nœud *Détermination des caractéristiques du projet* présente à l'utilisateur différentes contraintes pouvant qualifier le projet. L'utilisateur choisit d'abord les caractéristiques qui

correspondent au projet dans les catégories *Contraintes géométriques*, *Contraintes liées aux travaux*, etc. (voir Figure 51), puis spécifie l'importance de chaque contrainte.

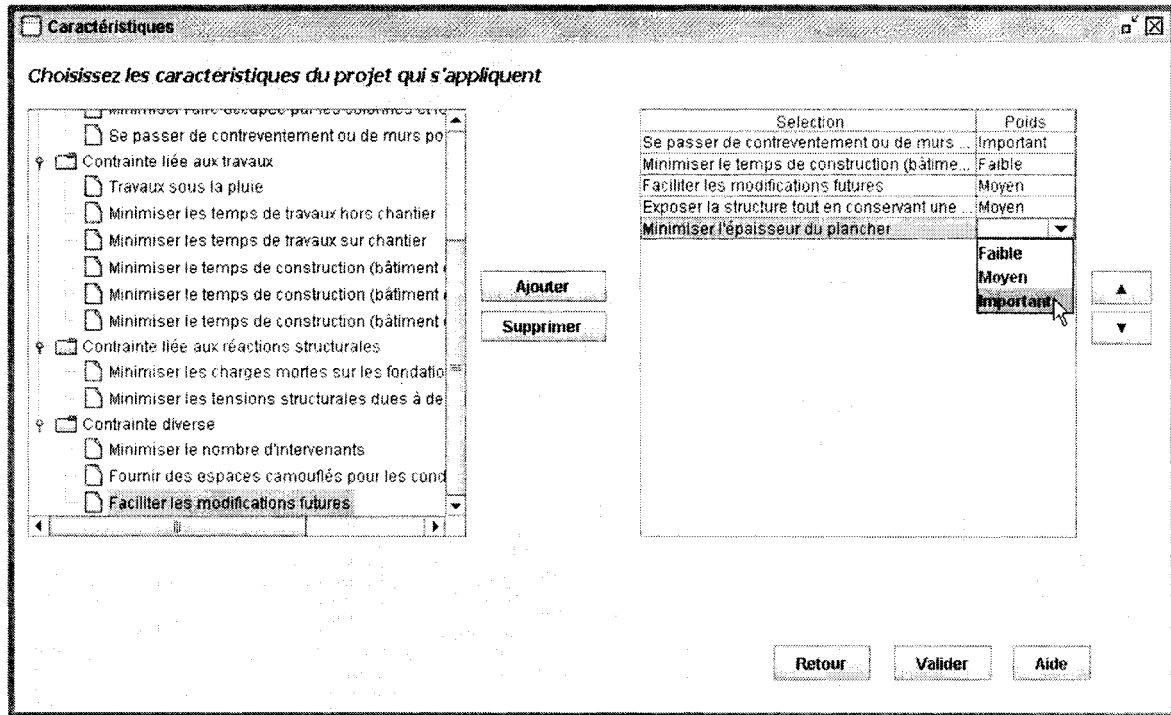


Figure 51 MDD : Spécification des caractéristiques du projet

On définit les caractéristiques d'après l'étude comparative du projet de Maison de développement durable faite par l'équipe de conception :

- exposer la structure tout en conservant une très haute résistance au feu;
- minimiser l'épaisseur du plancher. Cette caractéristique est importante, car elle a un impact sur l'architecture du bâtiment;
- se passer de contreventement ou de murs porteurs. Le projet prévoit des murs de refends placés autour des cages d'escaliers et d'ascenseurs. Les contraintes architecturales limitent l'utilisation des murs porteurs à quelques emplacements. Cette caractéristique est aussi importante, car elle a un impact sur l'architecture;
- minimiser le temps de construction (bâtiment de 4 à 20 étages). Cette caractéristique est peu importante car les délais de construction sont une contrainte moins importante dans le projet;

- faciliter les modifications futures. La réutilisation du bâtiment est un des critères LEED.

Le nœud *Détermination des charges vives* aide l'utilisateur à choisir l'intervalle de charges vives maximales dans le bâtiment. Pour cela le champ *Exemple d'usages des espaces* énumère quelques usages courants associés à l'intensité choisie (voir Figure 52). L'utilisateur choisit alors le niveau d'intensité des charges vives à l'aide des exemples. Il choisit le niveau moyen qui correspond, entre autres, à des espaces publics. Par ailleurs, d'après la sous-section 6.1.2, l'équipe de conception avait défini des charges vives maximales de 4,8 kPa correspondant aux espaces publics. Après consultation de l'aide, l'utilisateur constate que le niveau moyen correspond bien à des charges vives maximales comprises entre 2,9 kPa et 4,8 kPa.

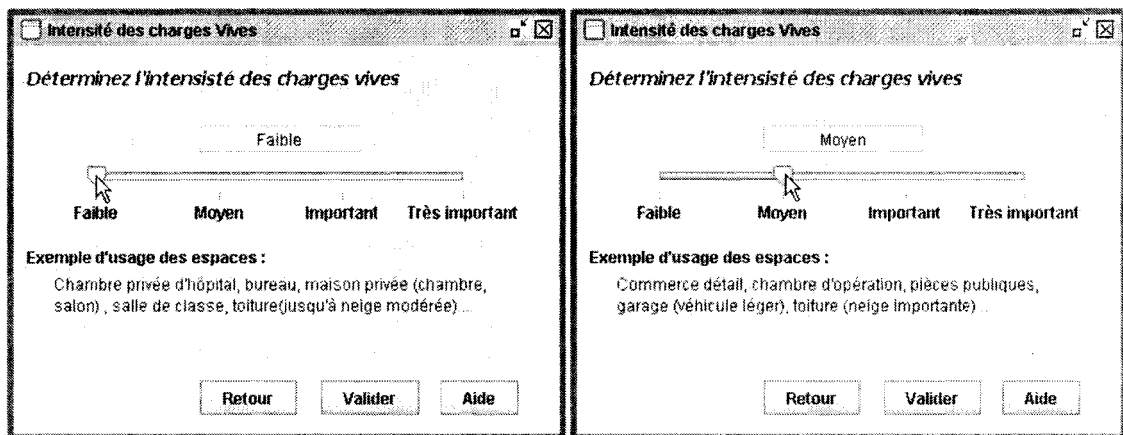


Figure 52 MDD : Spécification de l'intensité des charges vives

6.2.5 Sélection des sous-systèmes structuraux

À cette étape, le nœud *Sélection des sous-systèmes structuraux* est applicable (nœud en vert). Toutes les données nécessaires à l'exécution du nœud ont été récupérées par les nœuds précédents (voir §6.2.4). La fenêtre qui apparaît présente les différents types de sous-systèmes horizontaux implémentés dans le prototype ainsi que leur niveau d'aptitude au projet courant. La fenêtre informe aussi l'utilisateur que toutes les dalles peuvent travailler

bidirectionnellement. Ce dernier choisit alors les sous-systèmes en fonction de ces informations. Comme les systèmes peuvent travailler bidirectionnellement, il décide de choisir les systèmes bidirectionnels ayant les scores d'aptitude les plus élevés (voir Figure 53). Il choisit ainsi les dalles de béton sans nervures. Ensuite, l'utilisateur sélectionne les sous-systèmes verticaux correspondants. Il décide de choisir tous les systèmes verticaux en béton (voir Figure 54).

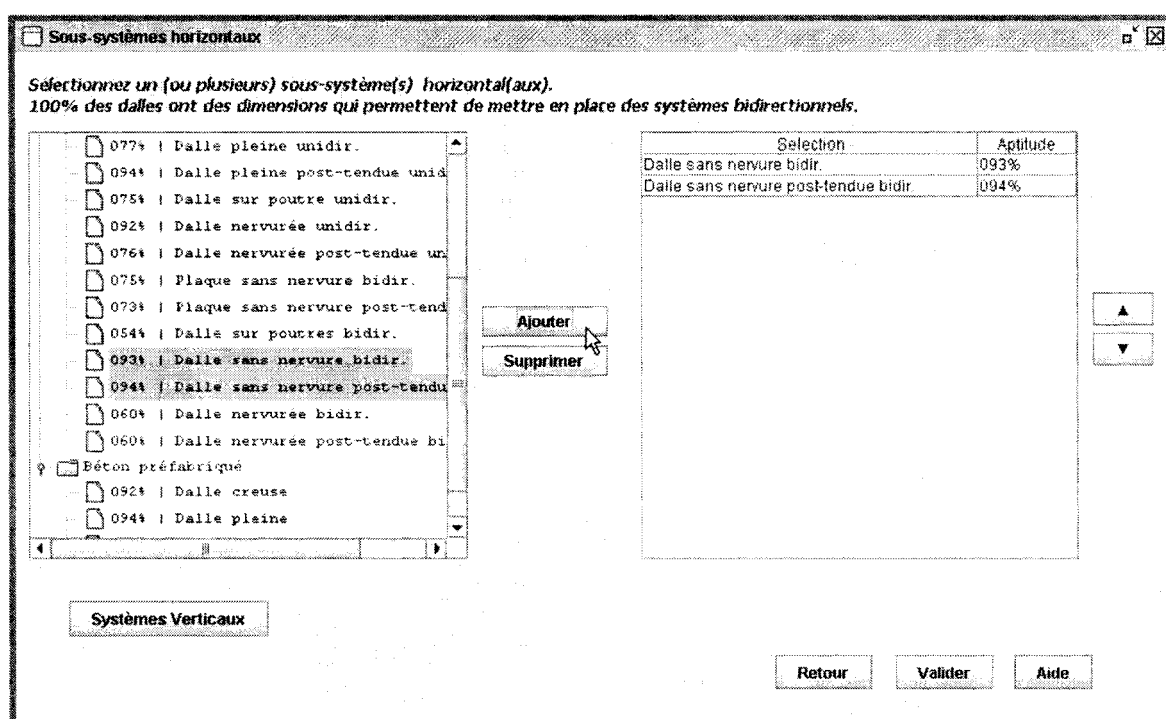


Figure 53 MDD : Sélection des sous-systèmes horizontaux

Détails des calculs :

Le DKM calcule automatiquement les niveaux d'aptitude. Néanmoins on peut calculer manuellement les scores à partir des tables et des méthodologies décrites au chapitre 4. On ne détaille ici que les calculs concernant les sous-systèmes choisis par l'utilisateur, à savoir : les dalles de béton sans nervures bidirectionnelles non post-tendues et post-tendues, ainsi que les colonnes et murs en béton.

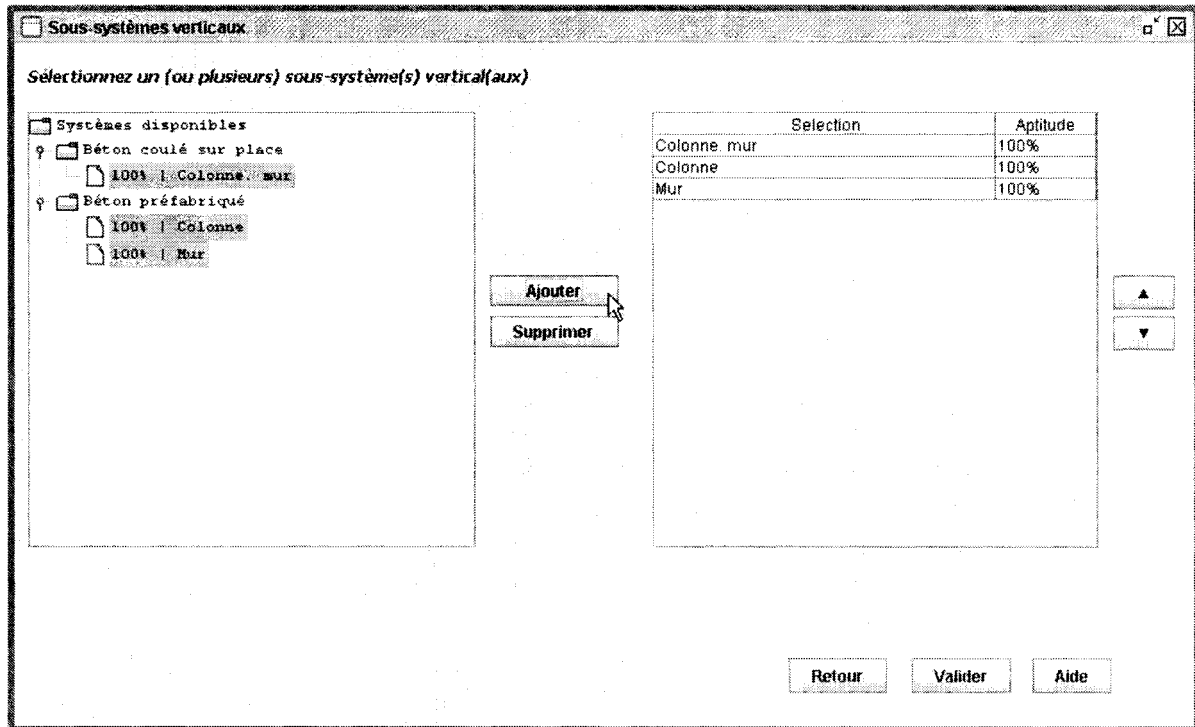


Figure 54 MDD : Sélection des sous-systèmes verticaux

Score des sous-systèmes horizontaux par rapport au nombre d'étages du bâtiment : Les deux types de sous-systèmes horizontaux ont des scores de 100 car le nombre d'étage du bâtiment est inférieur au nombre maximum d'étages – 5 (voir description du calcul du score au §4.4.8 et voir Tableau II).

Score des sous-systèmes horizontaux par rapport au cheminement des charges : Le rapport des dimensions de chaque dalle est inférieur à 2. Tous les sous-systèmes horizontaux ont donc des scores de 100.

$$7200/7050 = 1.02 ; 7500/7200 = 1.04 ; 7050/6700 = 1.05 \text{ et } 7500/6700 = 1.12 .$$

Score des sous-systèmes horizontaux par rapport aux portées horizontales : Le programme examine la portée horizontale de chaque dalle du bâtiment, puis calcule le score d'aptitude de chaque système par rapport à la valeur de la portée. Le score final de chaque sous-système est obtenu par la moyenne des scores du sous-système pour chaque dalle. Dans

cet exemple, il n'y a que deux portées différentes : 7200 mm et 6700 mm. Les dalles d'une portée de 7200 mm sont deux fois plus nombreuses que celles d'une portée de 6700 mm. Le calcul peut donc se résumer ainsi (voir description du calcul du score au §4.4.8 et voir Tableau II) :

$$score_{portée} = \frac{1}{3} \cdot [p(7,2) \cdot 2 + p(6,7)]$$

avec :

$$p(x) = 100 - 100 \cdot f(x)^2$$

- Pour les dalles de béton sans nervures bidirectionnelle non post-tendues :

$$f(x) = \frac{x - 9}{9 - 2,5}$$

- Pour les dalles de béton sans nervures bidirectionnelle post-tendues :

$$f(x) = \frac{x - 9}{9 - 4}$$

Ce qui donne : $score_{portée} \approx 91$ pour les dalles de béton sans nervures bidirectionnelle non post-tendues et $score_{portée} \approx 84$ pour les dalles de béton sans nervures bidirectionnelle post-tendues.

Score des sous-systèmes horizontaux par rapport à l'intensité des charges vives : Les deux sous-systèmes correspondent à l'intensité des charges vives spécifiée par l'utilisateur et ont donc des scores de 100 (voir Tableau V).

Score des sous-systèmes horizontaux par rapport aux caractéristiques du projet : Les dalles de béton sans nervure bidirectionnelles post-tendues répondent à quatre caractéristiques sur les cinq définies, dont deux sont importantes, une est moyennement importante et une autre est peu importante (voir Tableau VI). Ce qui donne :

$$score_{carac} = \frac{2 + 3 + 3 + 1}{2 + 3 + 3 + 1 + 2} = 82$$

Le système non post-tendu est moins adapté que le système post-tendu pour la caractéristique *minimiser l'épaisseur du plancher* (voir notations X et XX sur le Tableau VI) et a donc un score de 50 au lieu de 100 pour cette contrainte. Ce qui donne :

$$score_{carac} = \frac{2 + 3 \times 0,5 + 3 + 1}{2 + 3 + 3 + 1 + 2} = 68$$

Score des sous-systèmes horizontaux par rapport à l'usage du bâtiment : Les deux sous-systèmes correspondent à l'usage et ont donc des scores de 100 (voir Tableau VII).

Niveau d'aptitude final des sous-systèmes horizontaux (Tableau XII) : La note finale est obtenue par la moyenne non pondérée de chacun des scores (voir §4.4.8). On retrouve bien les résultats affichés de la fenêtre en Figure 53.

Tableau XII

Synthèse du calcul du niveau d'aptitude pour les dalles de béton sans nervure bidirectionnelles

Type de sous-système	Dalle de béton sans nervure bidirectionnelle non post-tendue	Dalle de béton sans nervure bidirectionnelle post-tendue
Nombre d'étages	100	100
Cheminement des charges	100	100
Portées	91	84
Intensité des charges vives	100	100
Caractéristiques du projet	68	82
Usage du bâtiment	100	100
Résultat final (moyenne)	93	94

Score des sous-systèmes verticaux par rapport aux nombre d'étages du bâtiment : Tous les sous-systèmes ont des scores de 100 car le nombre d'étage du bâtiment est inférieur au nombre maximum d'étages – 5 (voir description du calcul du score au §4.5.4 et voir Tableau IX).

Score des sous-systèmes verticaux par rapport aux caractéristiques spécifiées par l'utilisateur : Tous les sous-systèmes verticaux correspondent aux caractéristiques définies par l'utilisateur et ont donc des scores de 100 (voir Tableau X).

Niveau d'aptitude final des sous-systèmes verticaux : La note finale est obtenue par la moyenne non pondérée de chacun des scores (voir §4.5.4), ce qui donne bien des scores finaux de 100 pour chaque sous-système (voir Figure 54).

6.2.6 Évaluation de la stabilité du bâtiment

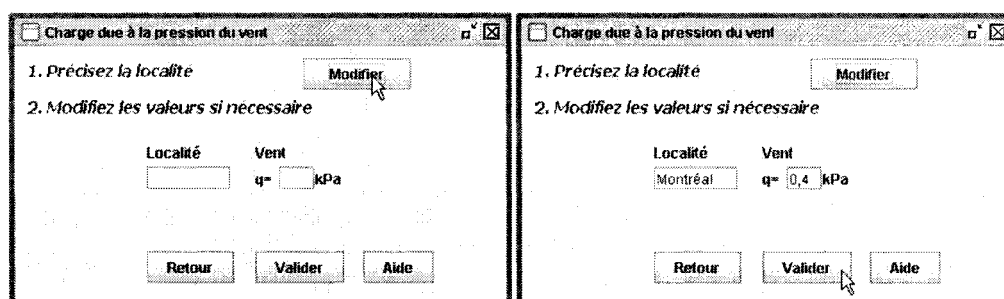


Figure 55 MDD : Saisie de la charge due à la pression du vent

Les nœuds *Détermination du poids propre* et *Détermination de la charge due au vent* doivent maintenant être appliqués pour permettre l'évaluation de la stabilité du bâtiment. L'utilisateur commence, par exemple, par le nœud associé à la charge du vent. Lorsqu'il double-clique sur le nœud, une fenêtre lui demande d'entrer la localité et la valeur de la pression du vent. Ces informations peuvent être directement saisies dans les champs (voir Figure 55 à gauche) à l'aide de la valeur définie par les concepteurs (voir §6.1.2). Les champs peuvent aussi être remplis automatiquement en cliquant sur le bouton *Modifier* puis en sélectionnant la localité dans la liste de sélection (voir Figure 56). La valeur définie par les concepteurs correspond à une probabilité annuelle de dépassement de $1/100^e$, car les concepteurs se basent sur le CNBC 95 modifié (Conseil national de recherches du Canada 2001). Cette charge est de 0,44 kPa. La charge associée à une probabilité annuelle de dépassement de $1/50^e$ (celle qui doit être prise en compte d'après le CNBC 2005) est de 0,40 kPa (voir annexe C du CNBC 2005). La différence entre les deux valeurs est assez faible et n'aura pas d'impact sur la vérification de la stabilité.

Le nœud *Détermination du poids propre* permet à l'utilisateur de spécifier le poids propre du bâtiment. Cette charge est exprimée comme une charge uniformément répartie appliquée aux

dalles du bâtiment. Cette valeur prend en compte en plus du poids des dalles, le poids des murs, des cages d'escalier, des colonnes, du revêtement des dalles et des cloisons. L'intervalle représente les valeurs conseillées en fonction du type de matériau utilisé dans le bâtiment. Étant donné que le bâtiment dispose d'un atrium, les sections des dalles seront plus importantes que dans un bâtiment standard et certaines d'entre elles devront disposer de panneaux surbaissés. L'utilisateur décide donc de choisir une valeur dans la partie supérieure de l'intervalle (voir Figure 57).

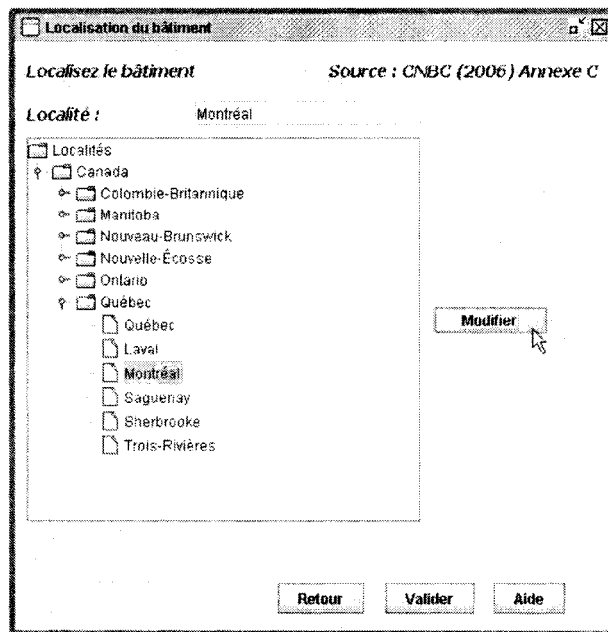


Figure 56 MDD : Localisation du bâtiment

Après que les nœuds *Détermination du poids propre* et *Détermination de la charge due au vent* soient appliqués, le nœud *Évaluation de l'excentricité* devient applicable. Ce nœud permet à l'utilisateur de vérifier la stabilité du bâtiment en comparant l'excentricité à l'excentricité maximale. Pour cela l'utilisateur sélectionne chaque volume structural dans la liste. Dans cet exemple il n'y a qu'un seul volume structural car le bâtiment est formé d'un seul bloc. La fenêtre présente alors le résultat associé au volume structural. Les résultats sont concluants sur les deux axes principaux de la grille structurale appelés (Ox) et (Oy) (voir Figure 58), ce qui n'est guère étonnant puisque le bâtiment est peu élancé.

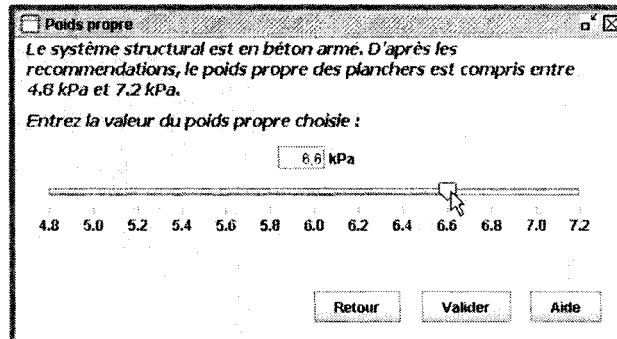


Figure 57 MDD : Spécification du poids propre

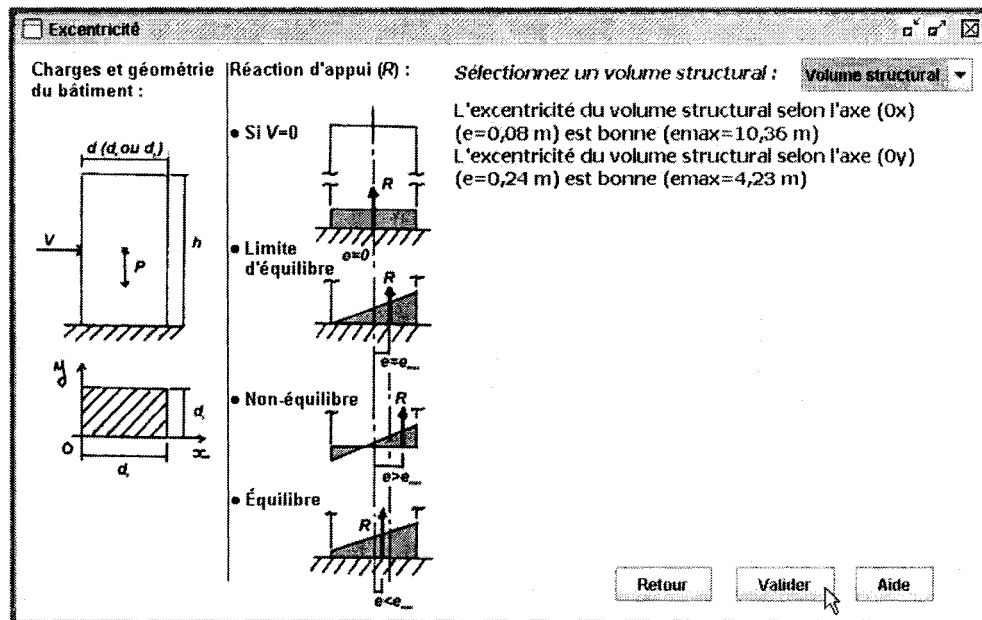


Figure 58 MDD : Vérification de l'excentricité

6.2.7 Sélection des éléments et des assemblages structuraux

Le dernier nœud correspond à la sélection des éléments et des assemblages structuraux (voir Figure 59). La fenêtre associée présente à l'utilisateur les éléments structuraux associés aux systèmes structuraux choisis auparavant. Pour les éléments horizontaux, l'utilisateur décide de choisir les poutres et les dalles sans nervures non post-tendues. L'utilisation de la précontrainte n'est pas une alternative intéressante pour ce projet. Les coûts qu'engendrera

l'utilisation d'une telle technique ne sont pas justifiés. Pour les éléments verticaux, l'utilisateur sélectionne les systèmes en béton coulé sur place. En effet, le projet n'est pas suffisamment grand pour l'utilisation d'éléments préfabriqués.

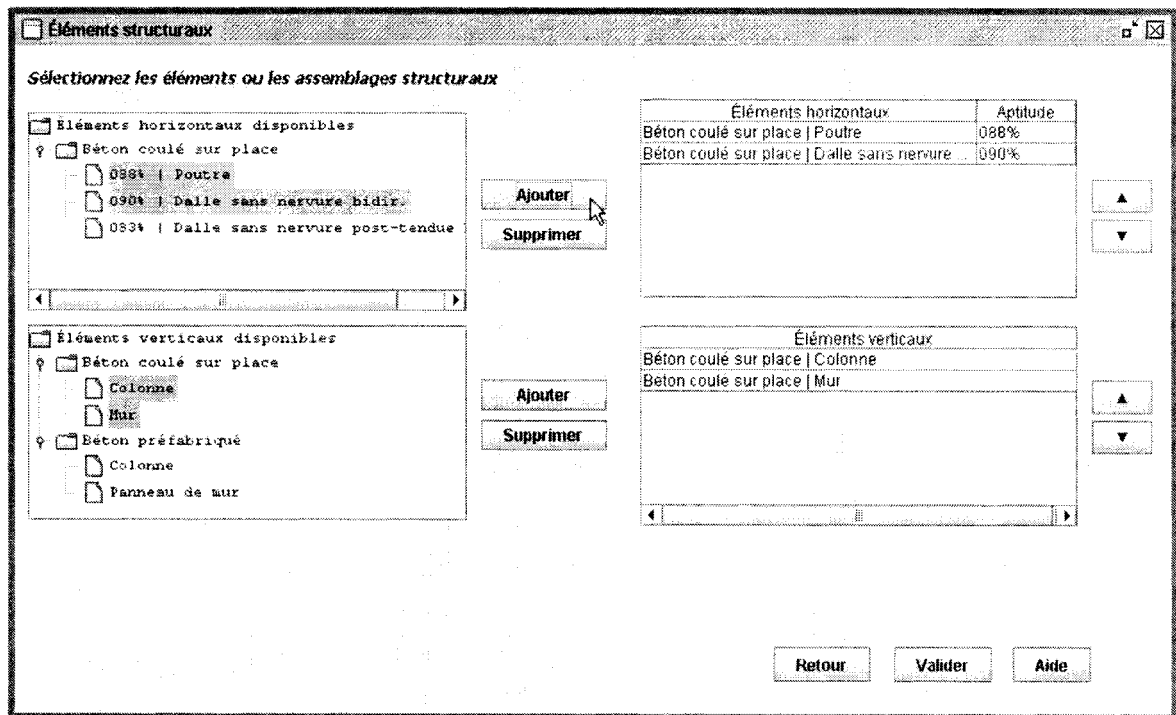


Figure 59 MDD : Sélection des éléments structuraux

6.2.8 Suite de la conception

À cette étape, les systèmes et les éléments structuraux ont été choisis. Tous les nœuds apparaissent maintenant en rouge. Les fenêtres *Détails* et *Historique* présentent les différentes informations qui ont été apportées par l'exécution du processus décisionnel, ainsi que l'historique d'application des nœuds (voir Figure 60). Le prototype dispose alors d'une liste de sélection des éléments et des systèmes structuraux choisis par l'utilisateur et qui sont les plus adaptés au projet. Cette liste est utilisée par le DKM pour l'application des processus décisionnels associés aux dalles. Pour cela, l'utilisateur repasse dans l'espace StAr et sélectionne une des dalles du modèle du bâtiment (voir Figure 61). Lorsque l'utilisateur

consulte le processus décisionnel associé à cette dalle, les nœuds correspondant à la sélection du type de dalle sont présélectionnés (voir Figure 62), ce qui permet à l'utilisateur de visionner les dalles choisies auparavant. La liste de sélection servira de même lorsque le DKM disposera d'arbres décisionnels associés à d'autres types de systèmes, comme les poutres, les colonnes, etc. D'autre part, cette liste est sauvegardée dans la base de données et pourra être consultée par StAr. Cette liste permettra au concepteur utilisant StAr de choisir les systèmes parmi ceux de la liste lors de la spécification des types de systèmes structuraux sur le modèle du bâtiment.

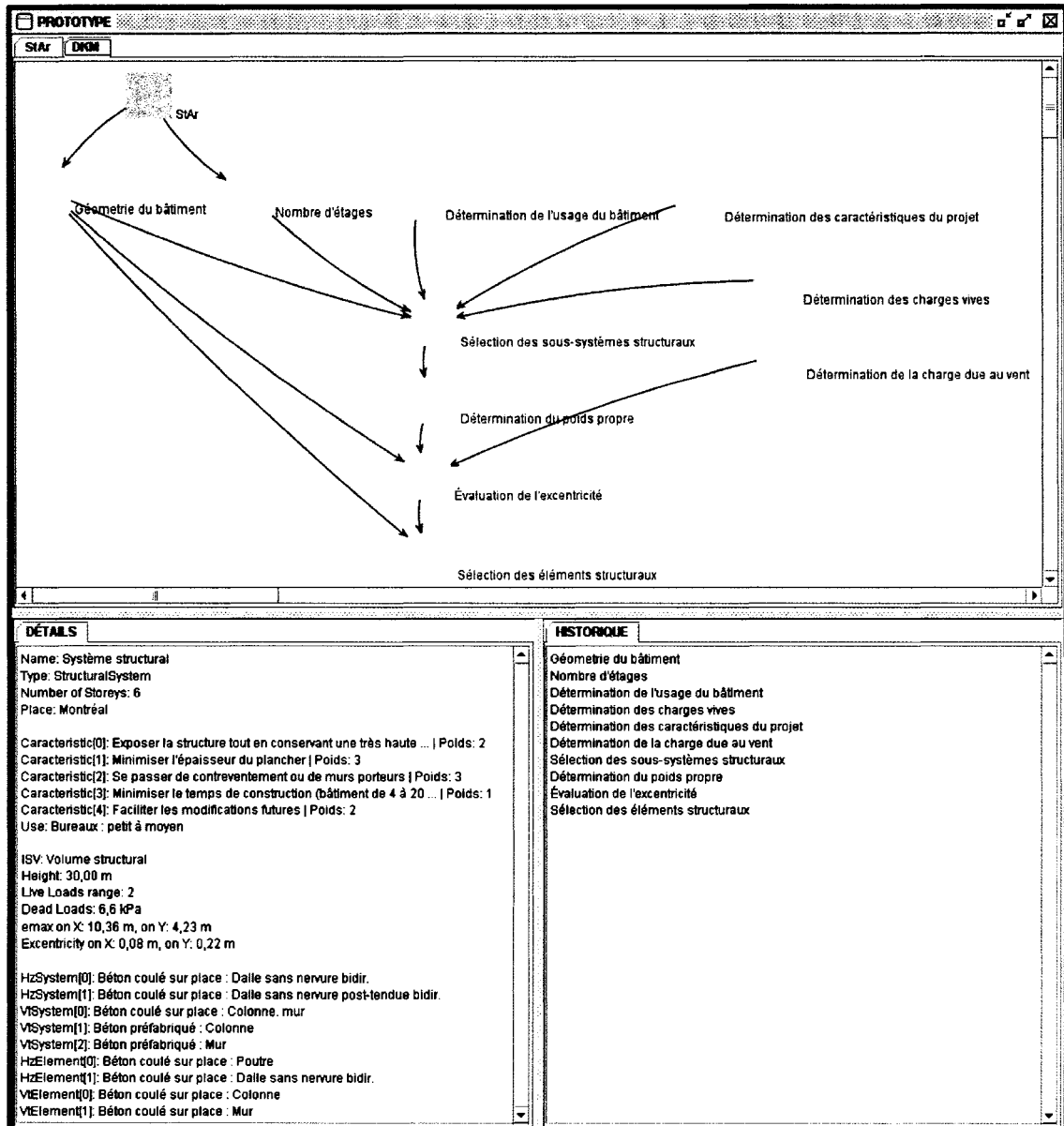


Figure 60 MDD : Arbre décisionnel complété

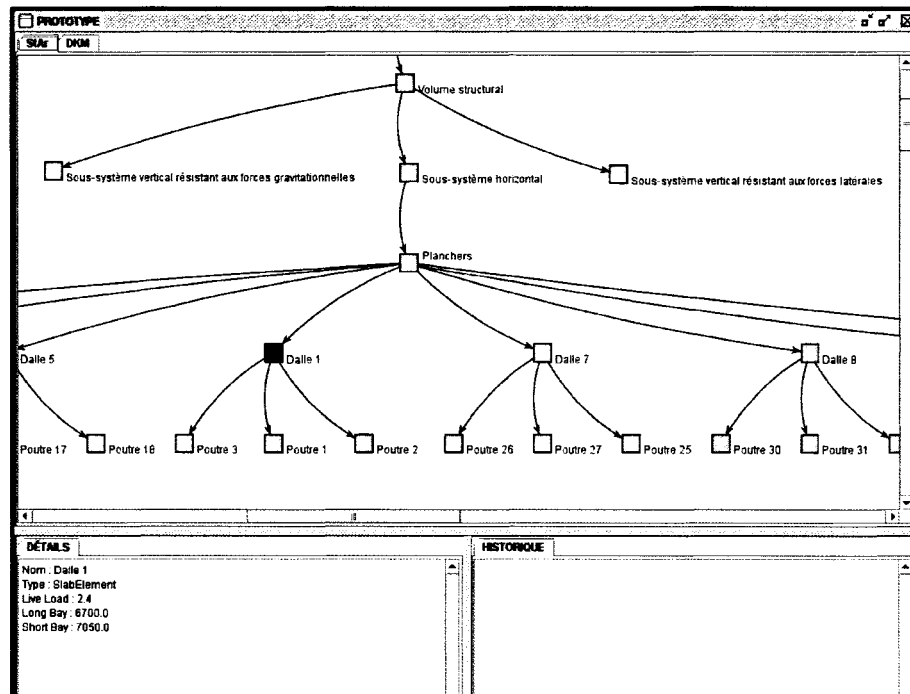


Figure 61 MDD : Sélection d'une dalle

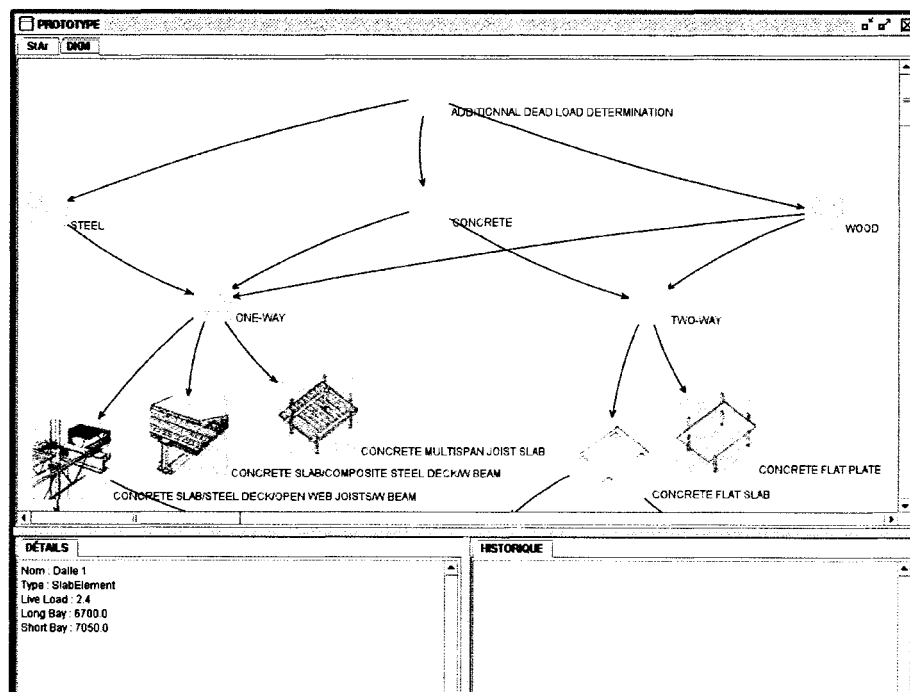


Figure 62 MDD : Arbre décisionnel des dalles avec nœuds présélectionnés

6.2.9 Conclusions sur l'utilisation du DKM pour le projet de Maison de développement durable

En ce qui concerne le calcul des scores d'aptitude des systèmes structuraux, les résultats semblent être cohérents. Le système structural le plus recommandé par le DKM est la dalle sans nervures bidirectionnelle, qui a été le choix structural adopté par les concepteurs. On peut ajouter que les systèmes post-tendu et non post-tendu ont le même niveau de recommandation lors de la sélection des sous-systèmes. Lors de la sélection des éléments et assemblages structuraux, l'écart des scores entre les systèmes post-tendu et non post-tendu est plus important, ce qui reflète que le système non post-tendu est plus approprié aux portées du bâtiment.

Les sous-systèmes structuraux horizontaux en acier sont généralement utilisés pour franchir des grandes portées (de l'ordre de 10 à 20 m) alors que les systèmes en béton sont plutôt choisis pour de plus petites portées (de l'ordre de 6 à 9 m). Les portées du bâtiment sont assez courtes (environ 7 m), ce qui explique que les sous-systèmes horizontaux en acier sont moins recommandés par le DKM que ceux en béton.

Le bâtiment est peu élevé et sa structure peut aussi bien être en béton ou en acier. Seuls le bois et la maçonnerie sont exclus des matériaux de construction possibles à cause des limites imposées par le CNBC 2005. De même, durant les étapes de recherche des solutions structurales, l'équipe de conception a exclu le bois des matériaux de construction possibles à cause du nombre d'étages qui est supérieur à cinq.

Les systèmes en béton sont avantagés sur les systèmes en acier à cause de certaines contraintes portant sur la résistance au feu du bâtiment ou l'épaisseur des planchers. Ces contraintes ont été tirées de l'analyse comparative des systèmes structuraux faite par l'équipe de conception du projet de Maison de développement durable.

Les charges vives modérées du bâtiment peuvent être soutenues par des dalles sans nervures. Les systèmes nervurés sont généralement utilisés pour supporter plus de poids ou pour franchir de plus longues portées.

Le design conceptuel du projet de Maison de développement durable est particulier. Tout au long de la conception, l'évaluation du cycle de vie du bâtiment est considérée afin de minimiser les impacts environnementaux, énergétiques et sociaux. Les concepteurs ont dû passer beaucoup de temps à comparer l'impact du choix des différents systèmes structuraux. Dans une telle optique le DKM se montre efficace, puisque l'exemple d'application du DKM aboutit à la même solution que celle déterminée par l'équipe de conception. Bien sur, le DKM possède peu d'informations portant sur les impacts environnementaux, énergétiques et sociaux en comparaison à ce qui a été synthétisé par l'équipe de conception lors des études comparatives. Néanmoins, l'approche que propose le DKM semble bien s'adapter à ce genre de problème et pourrait inclure de telles considérations dans un développement subséquent.

6.3 Présentation du projet de phase 4 de l'ÉTS

La phase 4 est un projet d'extension de l'ÉTS. Le site de construction se situe à Montréal, à l'intersection des rues Notre-Dame et Peel, en face des bâtiments actuels de l'École. Le projet de phase 4 de l'ÉTS comprend plusieurs bâtiments. Cet exemple a pour objet le bâtiment D qui est l'édifice principal de la phase 4. Le bâtiment D est un ouvrage de sept étages (bloc orange, jaune et vert sur la Figure 63) surmonté d'une tour résidentielle d'une quarantaine d'étages (en bleu sur la Figure 63). Le bâtiment D abritera des stationnements de véhicules légers au sous-sol, un commerce au premier étage, des bureaux de l'École et des bureaux loués. Les services de l'École et les bureaux sont les principaux usages de ce bâtiment. Les stationnements au sous-sol imposent des contraintes à l'emplacement des colonnes et des murs. D'un point de vue structural, le projet prévoit une charpente de poutres et de colonnes d'acier couplées avec des dalles de béton. Les grilles structurales sont assez régulières (voir Figure 64) et sont identiques sur chaque étage.

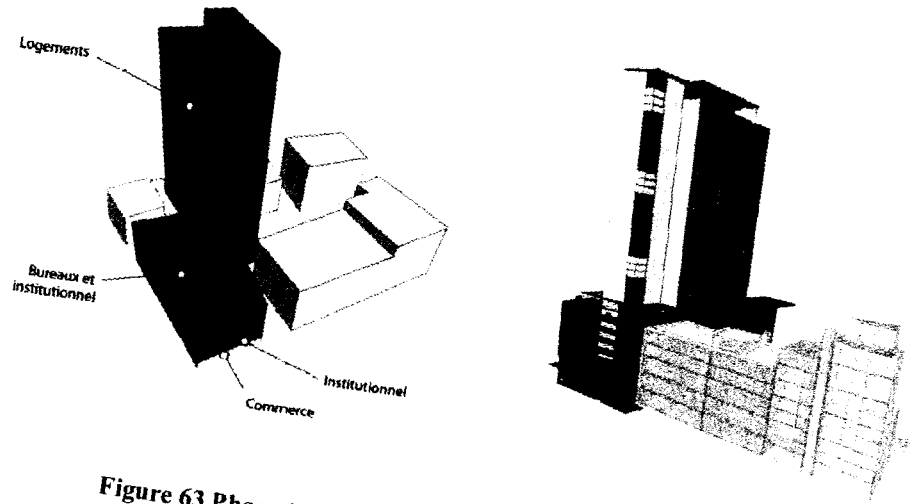


Figure 63 Phase 4 de l'ÉTS (Côté et Talbot Architectes 2007)

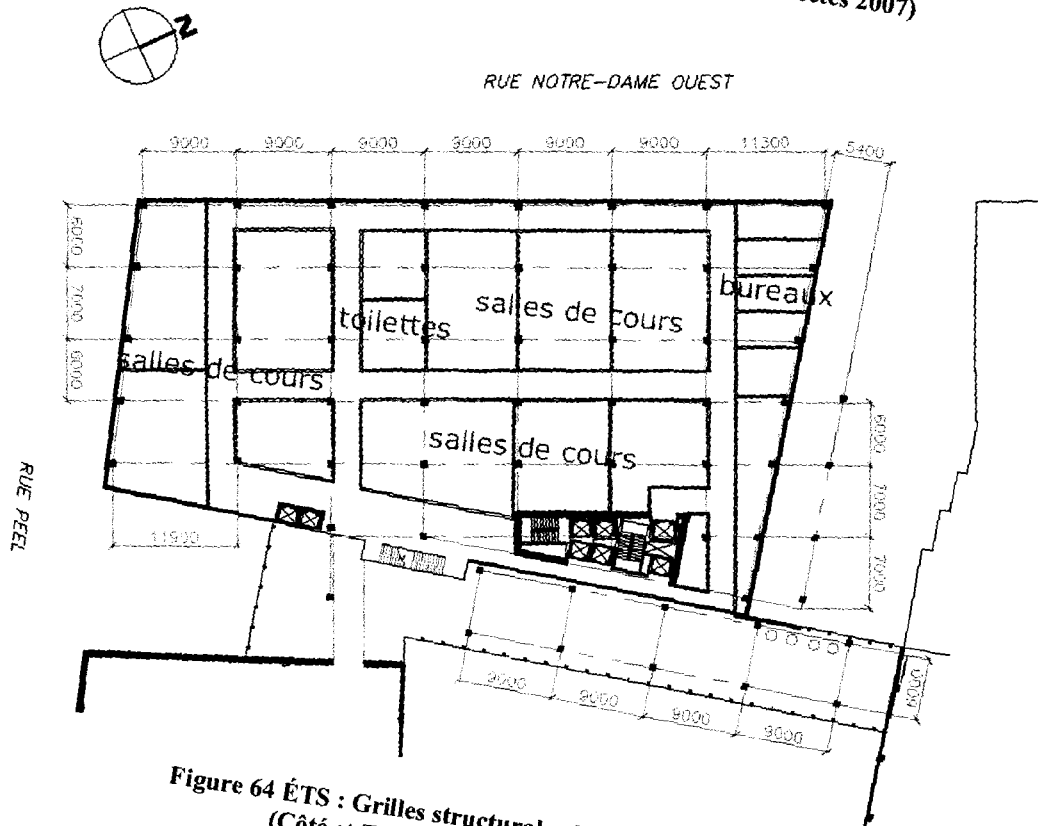


Figure 64 ÉTS : Grilles structurales [mm] (2^e étage)
(Côté et Talbot Architectes 2007)

6.4 Application du DKM au projet de phase 4 de l'ÉTS

6.4.1 Modélisation du bâtiment sous Caché

On commence à modéliser le bâtiment D dans la base de données Caché après avoir supprimé toutes les données persistantes d'anciens projets.

Site
Nom : Intersection Peel Notre-Dame
Localisation : Montréal
Building
Nom : Bâtiment D
Nombre d'étages : 7
StructuralSystem
Nom : Système structural
ISV
Nom : Volume structural
Les grilles structurales du bâtiment sont récupérées des plans architecturaux (voir Figure 64).
VerticalGravitySubsystem
Nom : Sous-système vertical résistant aux forces gravitationnelles
VerticalLateralSubsystem
Nom : Sous-système vertical résistant aux forces latérales

HorizontalSubsystem
Nom : Sous-système horizontal

SlabElement
Nom : Dalle i , avec $i \in [1,6]$
Pour éviter de surcharger le DKM, on ne définit que six dalles représentatives de l'ensemble des dalles du bâtiment. Leurs dimensions sont : 9,00 m \times 7,00 m - 9,00 m \times 6,00 m - 11,00 m \times 6,00 m. Les charges vives associées sont de 2,4 kPa (bureaux) ou de 4,8 kPa (espaces publics et parkings).

Beam
Nom : Poutre i , avec $i \in [1, 24]$
On définit quatre poutres par dalle.

LineConnection
Nom : Connexion linéaire i , avec $i \in [1, 24]$
On définit quatre connexions linéaires par dalle.

On peut exécuter le programme DKM, après avoir compilé et lancé le programme PrototypeBuilder. La fenêtre principale s'ouvre alors et affiche le modèle structural du bâtiment associé au projet de phase 4 de l'ÉTS.

6.4.2 Modélisation du bâtiment dans le DKM

Pour commencer le design conceptuel du bâtiment, l'utilisateur sélectionne l'entité *Système structural*, puis clique sur l'onglet DKM pour faire apparaître l'arbre de décision associé (voir **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

6.4.3 Définition des caractéristiques du projet

L'utilisateur exécute les nœuds *Géométrie du bâtiment*, *Nombre d'étage*, *Détermination des caractéristiques*, *Détermination de l'usage* et *Détermination des charges vives* dans n'importe quel ordre.

Le nœud *Géométrie du bâtiment* récupère les informations sur la géométrie du bâtiment, puis prévient l'utilisateur une fois que l'opération est terminée. Le nœud *Nombre d'étage* demande à l'utilisateur de confirmer si le nombre d'étage récupéré du modèle structural est exact.

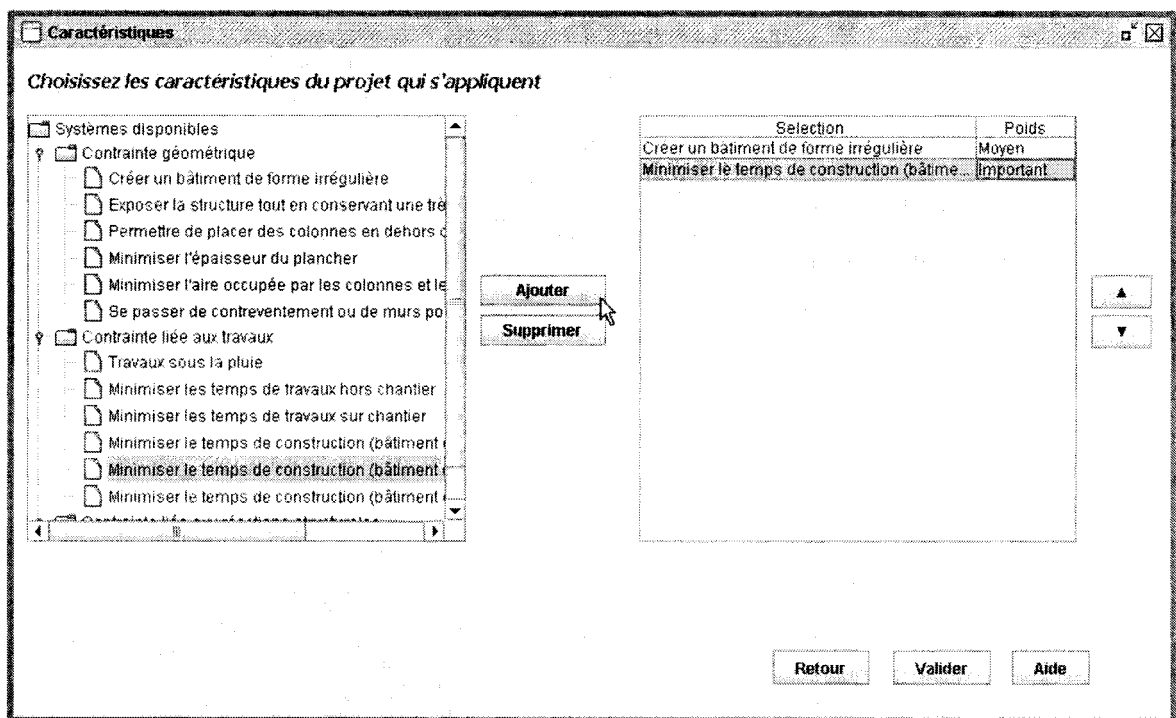


Figure 65 ÉTS : Spécification des caractéristiques du projet

Le nœud *Détermination des caractéristiques du projet* présente à l'utilisateur différentes contraintes pouvant qualifier le projet. Même si on n'a pas accès aux contraintes du projet, l'utilisateur définit les caractéristiques suivantes (voir Figure 65) : *Minimiser le temps de construction (bâtiment de plus de 30 étages)* et *Créer un bâtiment de forme irrégulière*. On

choisit ces caractéristiques qui traduisent que le bâtiment D et la tour des résidences forment un seul bâtiment très élevé et de forme irrégulière.

Le nœud *Détermination de l'usage du bâtiment* demande à l'utilisateur de préciser l'usage du bâtiment parmi les choix disponibles (voir Figure 66). Le bâtiment D abrite des bureaux, des locaux pour l'école, des commerces et des stationnements. L'usage qui correspond le mieux au bâtiment est : grand bâtiment institutionnel.

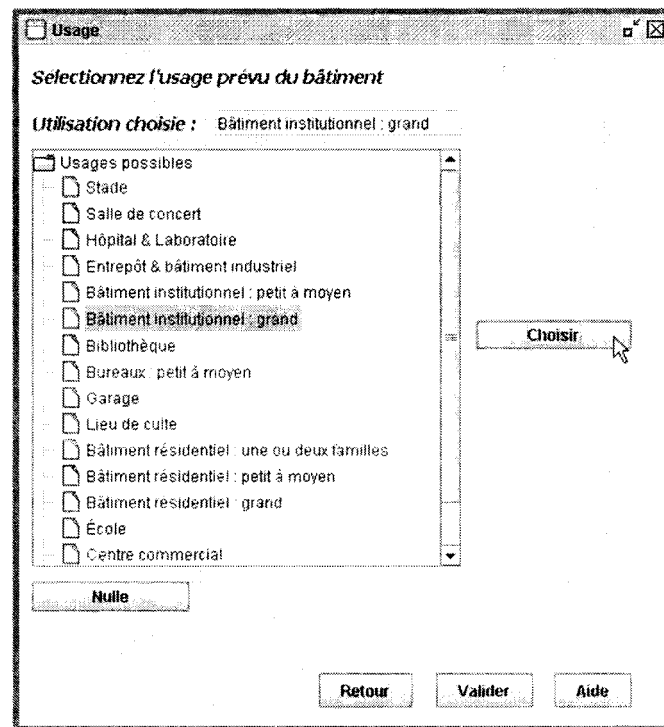


Figure 66 ÉTS : Spécification de l'usage du bâtiment

Le nœud *Détermination des charges vives* aide l'utilisateur à choisir la plage de charges vives maximales dans le bâtiment qui abrite des usages institutionnels, des commerces, des parkings et des résidences. L'utilisateur choisit le niveau moyen qui correspond, entre autres, à des charges vives maximales de 4,8 kPa.

6.4.4 Sélection des sous-systèmes structuraux

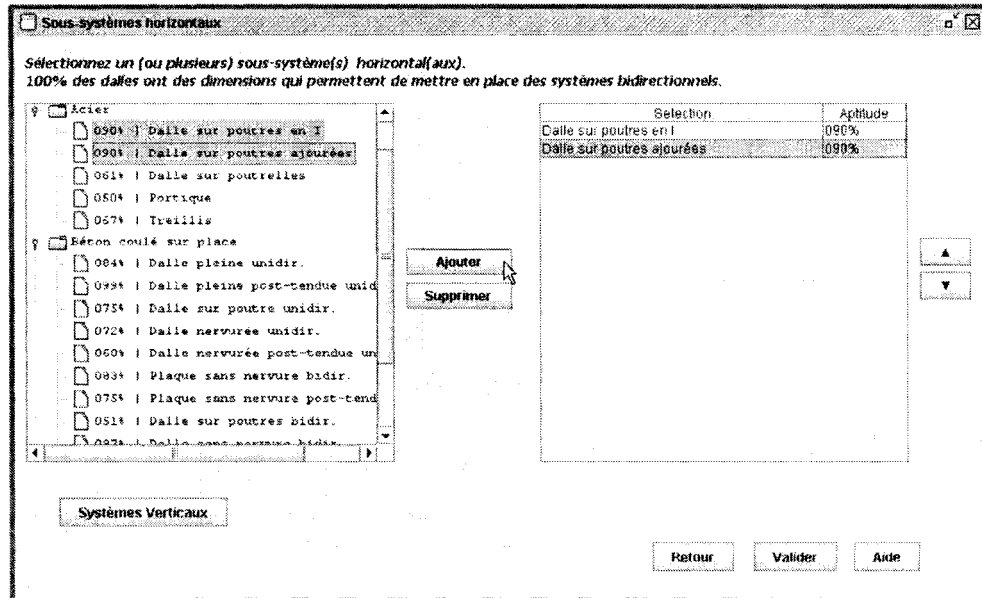


Figure 67 ÉTS : Sélection des sous-systèmes horizontaux

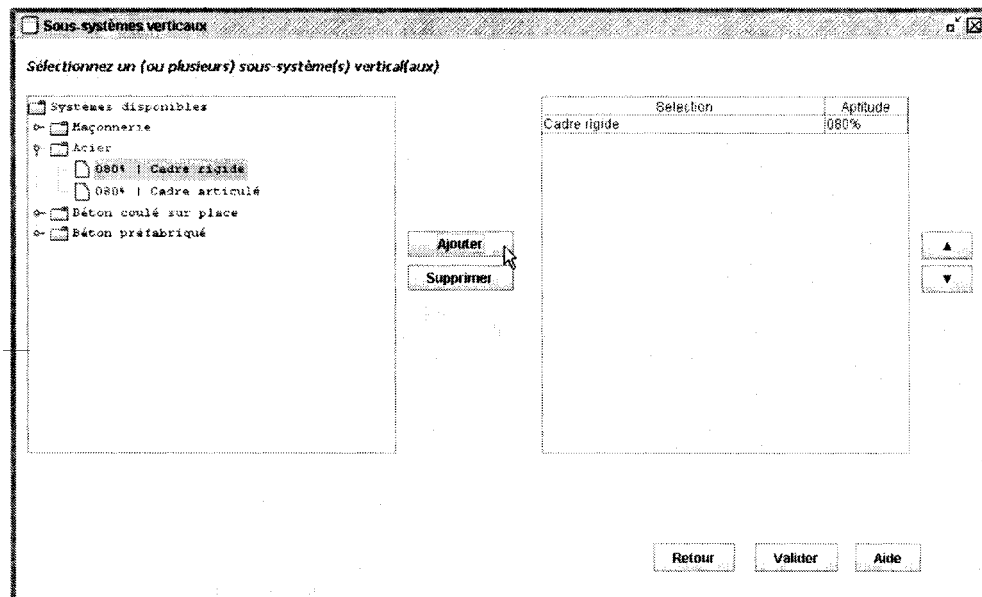


Figure 68 ÉTS : Sélection des sous-systèmes verticaux

À cette étape, le nœud *Sélection des sous-systèmes structuraux* est applicable (nœud en vert). La fenêtre associée au nœud présente les différents types de sous-systèmes horizontaux

implémentés dans le prototype ainsi que leur niveau d'aptitude au projet courant (voir Figure 67). Dans cet exemple, l'utilisateur décide de choisir des sous-systèmes horizontaux en acier. Il sélectionne les dalles sur poutres en I et/ou poutres ajourées qui sont des systèmes dont les scores d'aptitude sont élevés, puis clique sur le bouton *Systèmes verticaux*. La fenêtre de sélection des sous-systèmes verticaux apparaît alors. L'utilisateur sélectionne le système cadre rigide, puis valide son choix (voir Figure 68).

6.4.5 Évaluation de la stabilité du bâtiment

Les nœuds *Détermination du poids propre* et *Détermination de la charge due au vent* doivent maintenant être appliqués pour permettre l'évaluation de la stabilité du bâtiment. L'utilisateur commence, par exemple, par le nœud associé à la charge du vent. Après avoir cliqué sur le bouton *Modifier*, il sélectionne l'emplacement dans la liste de sélection et valide (voir Figure 56, p145).

Le nœud *Détermination du poids propre* permet à l'utilisateur de spécifier le poids propre du bâtiment. La fenêtre associée au nœud présente à l'utilisateur un intervalle de charges conseillées en fonction du matériau structural choisi. L'utilisateur garde la valeur de 3,1 kPa, puis valide (voir Figure 69).

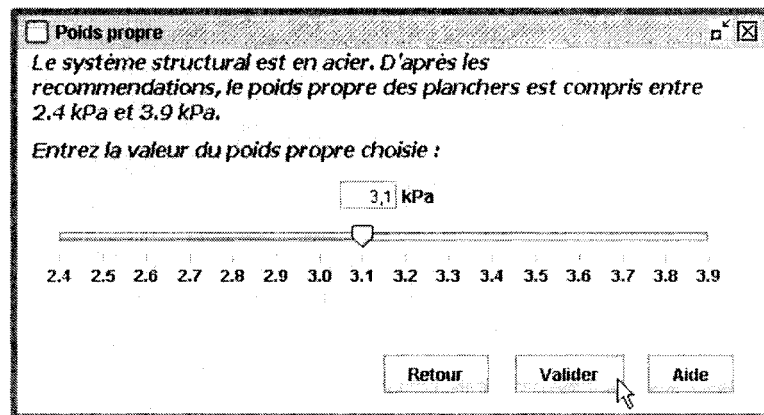


Figure 69 ÉTS : Spécification du poids propre

Après que les nœuds *Détermination du poids propre* et *Détermination de la charge due au vent* soient appliqués, le nœud *Évaluation de l'excentricité* devient applicable. L'utilisateur peut alors vérifier les résultats de la vérification de la stabilité de chaque volume structural. Après vérification, il s'avère que le bâtiment D est très stable (voir Figure 70).

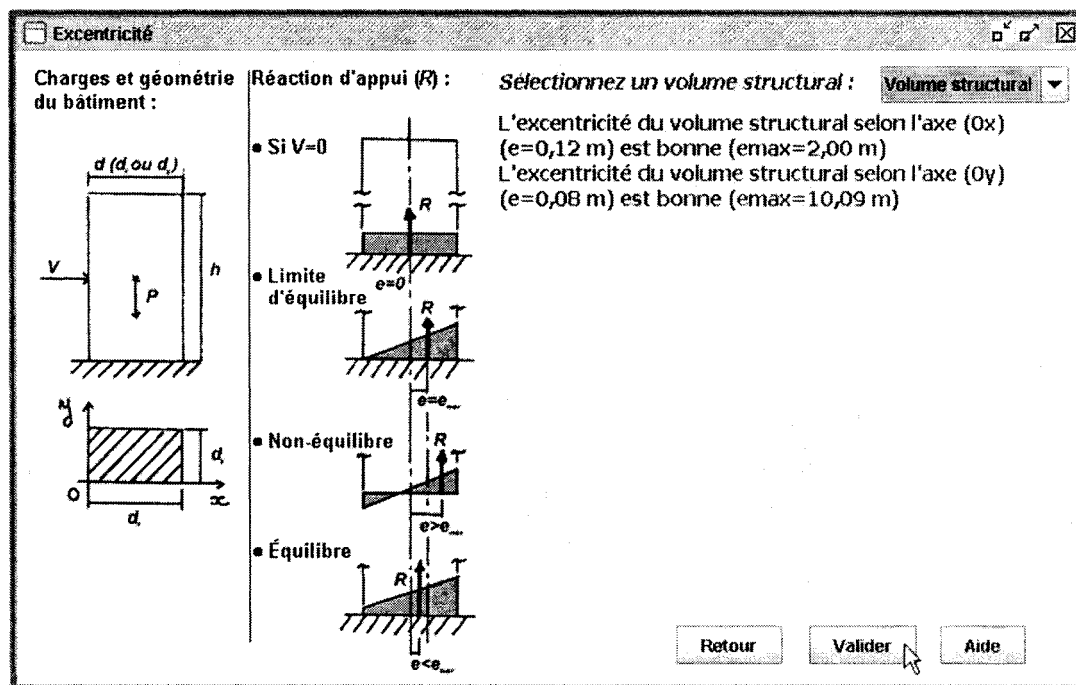


Figure 70 ÉTS : Vérification de la stabilité du bâtiment

6.4.6 Sélection des éléments et assemblages structuraux

Le dernier nœud correspond à la sélection des éléments et des assemblages structuraux (voir Figure 71). La fenêtre associée présente à l'utilisateur les éléments structuraux compatibles avec les systèmes structuraux choisis auparavant. Pour les éléments horizontaux, l'utilisateur choisit les poutres en I et les planchers mixtes. Ces éléments combinés pourront former un système de type dalle de béton sur tablier métallique supporté par des poutres en I. Ce type de système comprend l'utilisation d'une série de poutres parallèles et régulièrement espacées formant l'ossature d'un plancher, ce qui divisera la portée du plancher mixte. On remarque que le score affiché par le plancher mixte est faible car il est calculé par rapport à la portée globale (voir §6.4.8 pour de plus amples détails). C'est pourquoi l'utilisateur choisit tout de

même le plancher mixte. Pour les éléments verticaux, l'utilisateur choisit les colonnes d'acier à ailes larges et en tube.

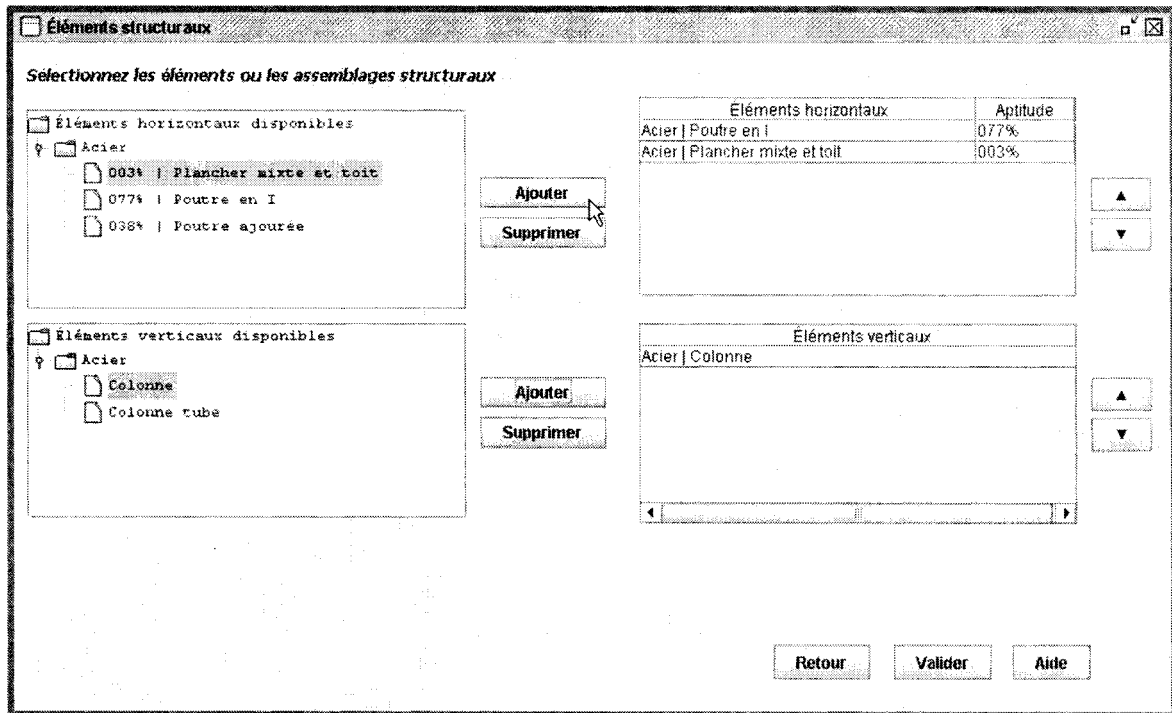


Figure 71 ÉTS : Sélection des éléments structuraux

6.4.7 Suite de la conception

À cette étape, les systèmes et les éléments structuraux ont été choisis. Tous les nœuds sont maintenant appliqués (voir Figure 72). Le programme dispose alors d'une liste de sélection des éléments et des systèmes structuraux choisis par l'utilisateur qui sont les plus adaptés au projet. Après être retourné sous l'espace StAr et sélectionné une dalle (voir Figure 73), l'utilisateur consulte l'arbre décisionnel associé aux dalles. Il constate que les nœuds correspondants à la sélection du type de dalle sont présélectionnés (voir Figure 74).

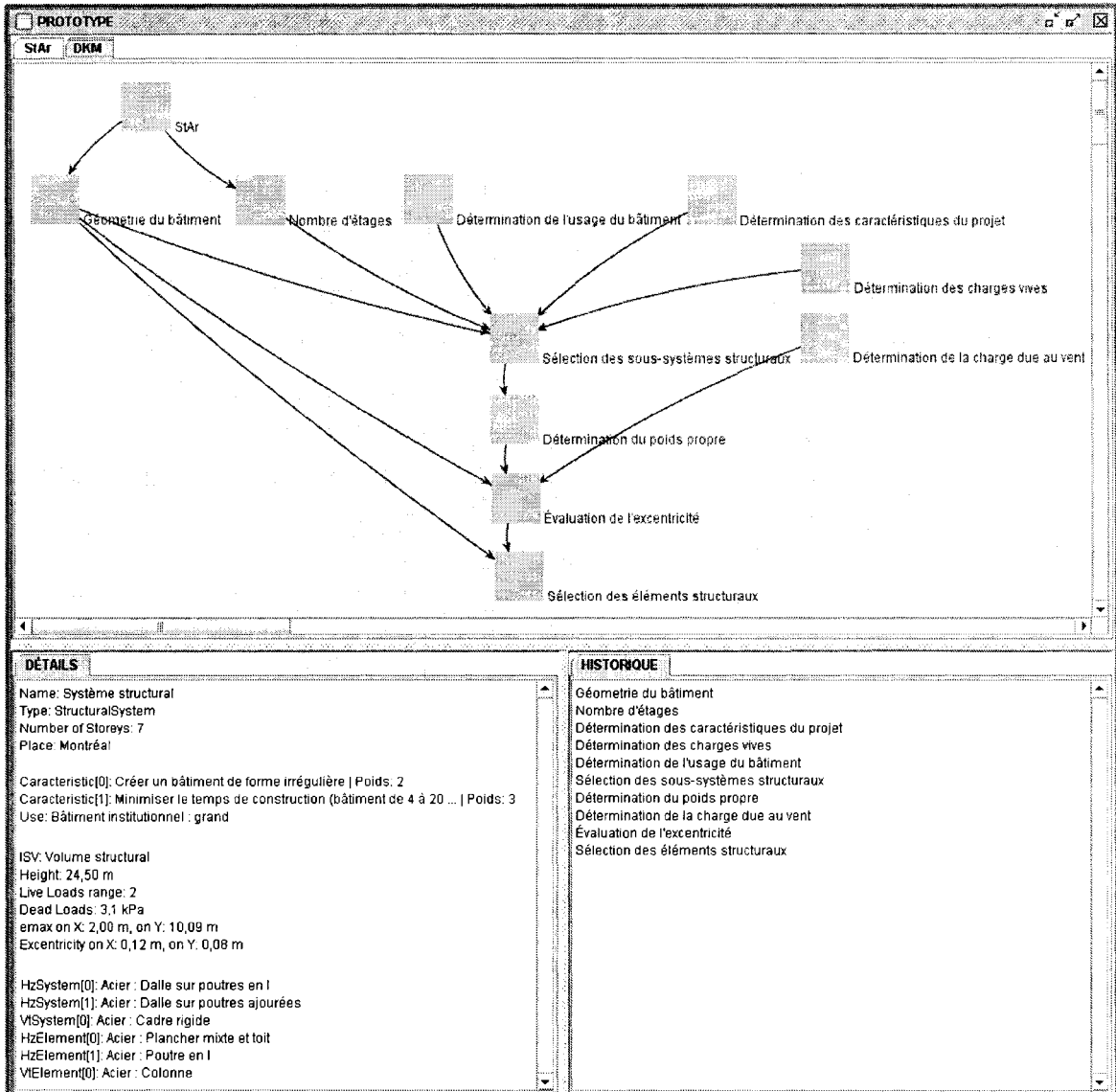


Figure 72 ÉTS : Arbre décisionnel complété

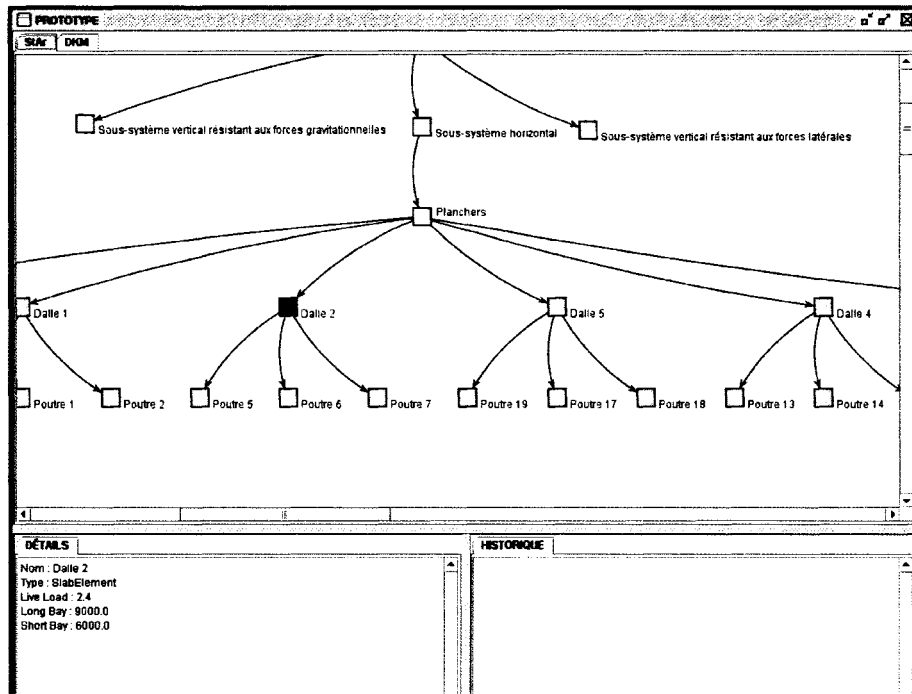


Figure 73 ÉTS : Sélection d'une dalle

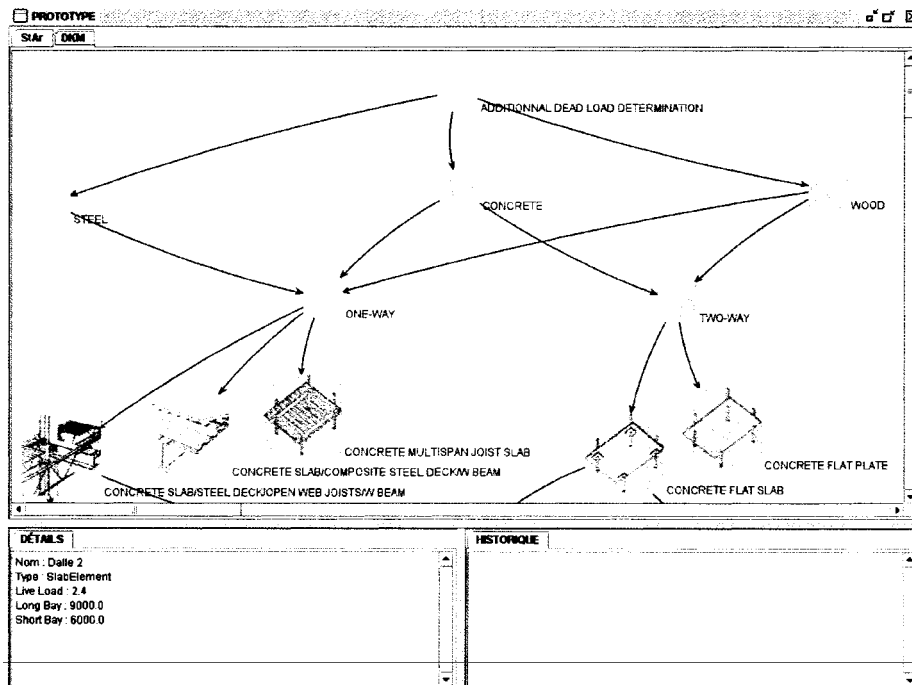


Figure 74 ÉTS : Arbre décisionnel avec nœuds présélectionnés

6.4.8 Conclusions sur l'utilisation du DKM pour le projet de phase 4 de l'ÉTS

L'utilisation du DKM a conduit l'utilisateur à choisir un système structural à ossature d'acier, ce qui est aussi le choix des concepteurs du projet. Néanmoins, le DKM décrit mal l'aptitude des sous-systèmes horizontaux composites. Les systèmes tels que les dalles de béton sur tablier métallique sont supportés par une série de poutrelles (au sens structural du terme) parallèles. Lors de l'étape de sélection des éléments structuraux, l'utilisateur a choisi des poutrelles de type poutre en I. La combinaison des poutres en I avec les dalles composites a bien été interprétée par le DKM comme un système de dalle en béton sur tablier métallique supporté par des poutres en I (voir nœud sélectionné sur la Figure 74).

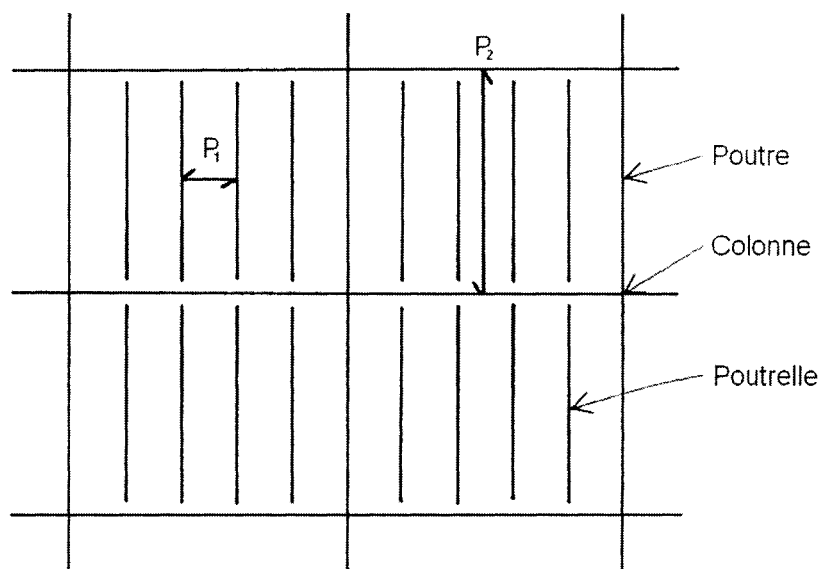


Figure 75 Portée entre poutrelles (P_1) et portée des dalles (P_2)

Le problème qui se pose alors est le suivant. Le nombre de poutrelles par rectangle (délimité par des poutres, voir Figure 75) de dalle n'est pas défini. Par conséquent le DKM ne dispose pas des portées que devront franchir les dalles entre les poutrelles (P_1 sur la Figure 75). Or, lors du calcul du niveau d'aptitude des systèmes horizontaux vis-à-vis de leur portée, le DKM compare les portées recommandées avec la portée globale de la dalle. De plus, le programme suppose que le cheminement des charges se fait dans le sens de la plus petite

dimension. Ainsi, le prototype compare les portées recommandées avec la portée P_2 au lieu de la portée P_1 (voir Figure 75).

Le DKM laisse la possibilité au concepteur de choisir d'autres types de systèmes structuraux. Le bâtiment D à part est peu élevé et sa structure peut aussi bien être en béton ou en acier. Seuls le bois et la maçonnerie sont exclus des matériaux de construction possibles à cause des limites imposées par le CNBC 2005. Si l'utilisateur l'avait voulu, il aurait pu choisir un système structural entièrement en béton. Dans ce cas il aurait certainement choisi les plaques de béton non nervurées bidirectionnelles lors de la sélection des sous-systèmes horizontaux. En effet, le rapport des dimensions des dalles du bâtiment permet de mettre en place des systèmes bidirectionnels, et les plaques non nervurées bidirectionnelles est le type de sous-système horizontal bidirectionnel le plus recommandé.

Les systèmes structuraux préfabriqués en béton ont des scores d'aptitude moyennement élevés. Pourtant l'utilisation de systèmes préfabriqués en béton est une solution intéressante pour réduire le temps de construction des grosses constructions et est fréquent en Europe. Les systèmes structuraux préfabriqués (acier ou béton) sont ici pénalisés par l'autre caractéristique qui a été spécifiée : *Créer un bâtiment de forme irrégulière*. En effet, les techniques de fabrication sur place permettent de créer facilement des éléments structuraux sur mesure, c'est-à-dire conçu et optimisé pour la structure du bâtiment. Les systèmes préfabriqués, quant à eux, sont très avantageux pour construire des structures de bâtiments très réguliers.

6.5 Évaluation

6.5.1 Sur les résultats de l'application du DKM lors du processus de sélection des systèmes structuraux

Les résultats de l'application sont cohérents. Le prototype a guidé l'utilisateur vers de bonnes solutions. Dans les deux cas, le prototype a guidé l'utilisateur vers le choix du concepteur. Les autres solutions que l'utilisateur aurait pu suivre en second choix, sont aussi correctes.

Cependant, on voit quelques lacunes lors du calcul de l'aptitude des systèmes mixtes acier-béton (voir §6.4.8).

Par ailleurs, le prototype fournit des éléments de justification des résultats. L'aide présente les sources d'information qui ont permis d'établir la base de connaissances et explique la méthodologie appliquée par le programme. Par exemple, l'aide explique comment sont calculés les niveaux d'aptitude des systèmes structuraux par rapport aux caractéristiques du projet. L'aide explique aussi le calcul de l'excentricité et informe l'utilisateur sur les approximations faites. Toutefois, l'utilisateur n'a pas accès au détail des calculs et ne peut pas vérifier leur exactitude.

6.5.2 Sur le soutien d'utilisateurs peu expérimentés lors du processus de sélection des systèmes structuraux

Le programme présente de nombreux éléments lui permettant d'assister des utilisateurs peu expérimentés. L'interface a été conçue afin de guider clairement l'utilisateur pendant la sélection des systèmes structuraux. Par exemple, lors du choix de la valeur des charges vives maximales, le programme fournit divers exemples d'usage qui permettent à l'utilisateur d'évaluer les charges. Néanmoins, d'autres actions manquent d'un peu de soutien. Dans les deux exemples, le choix de l'usage est difficile lors de la phase de sélection. Chaque bâtiment a plusieurs fonctions et il est difficile de déterminer quel est l'usage qui lui correspond le mieux. Par ailleurs, lors de la phase de sélection des éléments et des assemblages structuraux, la combinaison des poutres en acier et des dalles en béton est délicate. L'utilisateur doit bien imaginer qu'il doit choisir à la fois le type de planchers, mais aussi le type de structure porteuse. Il doit donc faire le choix du sous-système vertical de manière cohérente. Le prototype n'empêche pas l'utilisateur de rentrer un choix absurde comme : associer des colonnes en acier avec des poutres en béton supportant une dalle de béton sur tablier métallique. La fonction de retour en arrière dans le processus est alors bien utile pour rectifier des choix faits auparavant.

Le processus décisionnel dispose aussi de pages d'aide expliquant et commentant la méthodologie suivie par le processus décisionnel implémenté. Les utilisateurs les moins expérimentés devraient ainsi être capables d'utiliser et de comprendre le déroulement du processus décisionnel. De plus, les pages d'aide fournissent aussi des explications sur le fonctionnement de l'interface, ce qui permet à l'utilisateur de ne pas être bloqué par l'aspect technique du prototype.

6.5.3 Sur le soutien d'utilisateurs expérimentés lors du processus de sélection des systèmes structuraux

L'utilisation du processus décisionnel associé aux systèmes structuraux est aussi avantageuse pour les utilisateurs plus expérimentés. Tout d'abord, le processus ne contraint pas l'utilisateur dans ces choix. Le concepteur a toujours le dessus sur le programme et ce dernier est libre d'effectuer des choix déconseillés. Le prototype limite seulement certains choix incohérents. Par exemple, le processus décisionnel ne permet pas d'assembler des systèmes verticaux en bois avec des dalles de béton. De plus, l'exécution du processus décisionnel est rapide. Quelques minutes suffisent pour achever la sélection des systèmes structuraux. En outre, le DKM récupère de nombreuses informations de la base de données Caché, ce qui permet de limiter la quantité d'informations à entrer manuellement par l'utilisateur. D'autre part, l'utilisation du processus décisionnel propose au concepteur de suivre une méthodologie systématisée. La probabilité d'omettre des contraintes intervenant dans la sélection des systèmes structuraux est ainsi limitée. En outre, l'utilisateur a la possibilité de visualiser un vaste ensemble de solutions structurales et d'évaluer leur aptitude au projet. Par conséquent, le concepteur devrait effectuer des choix mieux adaptés au projet.

6.5.4 Sur l'intégration du DKM avec d'autres logiciels complémentaires

Le transfert des données entre le DKM et Caché se fait très bien. Ainsi, lorsque StAr sera en mesure de sauvegarder ses données dans Caché, le DKM pourra être utilisé conjointement avec StAr et, indirectement, avec EsQUISE.

Cependant StAr devra prendre en compte des ajouts apportés au modèle de représentation structurale. Cela ne devrait pas poser de problèmes puisqu'il n'y a pas de modifications dans le modèle, mais seulement des ajouts. On a, d'une part, adjoint de nouvelles classes décrivant les propriétés du projet et du bâtiment (voir §5.3.1). On retrouve, par exemple, la classe détaillant l'usage du bâtiment. D'autre part, on a annexé de nouveaux attributs aux classes existantes (voir §5.3.2). La classe *ISV* possède maintenant plusieurs attributs décrivant différentes caractéristiques géométriques des volumes structuraux.

6.5.5 Sur l'implémentation d'un processus décisionnel intervenant plus en amont dans la conception

Jusqu'à présent, le DKM disposait de peu de connaissances portant sur la sélection des systèmes structuraux. D'une part, parce que le processus décisionnel implémenté auparavant se limitait aux dalles et, d'autre part, parce que les connaissances portant sur la sélection du type de sous-systèmes horizontal étaient très sommaires.

Tout d'abord, les critères guidant le choix des systèmes étaient très généraux. Par exemple, lors de la sélection d'un système structural en acier, le DKM proposait des conseils du genre : « [L'acier] offre facilement et économiquement de grandes portées, ce qui donne une plus grande flexibilité [...] d'aménagement des espaces » (Parent 2006b). De plus, l'interface présentant les informations portant sur les critères de sélection était peu conviviale. L'utilisateur devait passer du temps à chercher les informations qui étaient présentées dans des pages de textes parfois longues. Enfin, l'ancien processus ne permettait de comparer que cinq types de sous-systèmes horizontaux et se limitait à deux types de matériaux : le béton armé et l'acier (le processus décisionnel possédait un nœud décisionnel *bois*, mais les connaissances associées au matériau étaient très superficielles).

Le nouveau processus décisionnel (qui porte sur la sélection des systèmes structuraux) vient compléter l'ancien processus. Tout d'abord, le processus s'intéresse à la fois aux sous-systèmes horizontaux et aux sous-systèmes verticaux. En outre, il dispose de connaissances sur les éléments intervenant dans l'ossature du bâtiment (comme les poutres) et ne se limite

pas aux systèmes horizontaux de type dalle. De plus, le nouveau processus dispose de connaissances portant sur plus de 25 sous-systèmes horizontaux différents, auxquels s'ajoutent les connaissances portant sur les sous-systèmes verticaux. D'autre part, les critères permettant de choisir les systèmes structuraux sont beaucoup plus nombreux et sont présentés de manière plus claire.

Cependant, le processus décisionnel associé aux dalles disposait d'informations complètes sur le dimensionnement préliminaire de deux types de dalles très utilisés dans la construction de bâtiment, à savoir : les dalles de béton non nervurée et les dalles de béton sur tablier métallique supportées par des poutres d'acier ajourées. Le processus décisionnel associé aux dalles a été modifié de manière à interpréter les résultats du nouveau processus décisionnel (voir §5.7). Ainsi, le DKM dispose de deux processus décisionnels complémentaires et intégrés l'un avec l'autre. L'utilisation du DKM tire donc parti des avantages de chaque processus décisionnel implémenté.

6.6 Conclusions

Malgré quelques lacunes, l'implémentation du DKM remplit tout ses objectifs. Le DKM supporte l'utilisateur durant la sélection des sous-systèmes structuraux de manière à le guider vers les meilleures solutions. L'utilisateur contrôle entièrement l'exécution du processus. Il dispose aussi d'informations sur le fonctionnement du programme et sur les connaissances implémentées. Le DKM communique avec la base de données servant de lien avec StAr et les résultats du processus de sélection des sous-systèmes sont correctement interprétés par le processus décisionnel déjà en place.

Pour conclure le mémoire, la section suivante fera le bilan de l'étude. Après un rappel sur l'étude et son contexte, le chapitre 7 précise les contributions apportées à l'état de la recherche en design conceptuel des bâtiments. Enfin, il suggère des pistes de recherche pour les travaux futurs.

CHAPITRE 7

SOMMAIRE, CONTRIBUTIONS ET SUGGESTIONS

7.1 Sommaire

Le design conceptuel est une étape de la conception qui est largement ignorée par les outils informatiques. Durant cette phase, les ingénieurs doivent déterminer l'organisation des systèmes structuraux en fonction de la morphologie du bâtiment et des exigences et contraintes de conception dues à la fonction du bâtiment et au contexte du projet. Par ailleurs cette tâche est complexe. D'une part, de nombreux paramètres entrent en jeu, comme l'impact du système structural sur l'architecture et vice versa, la disponibilité des matériaux, les usages futurs non prévus, etc. D'autre part, ces paramètres sont difficiles à estimer.

En pratique, pour choisir les systèmes structuraux, les ingénieurs utilisent leur intuition et ont recours à leur expérience. Ils estiment grossièrement les critères importants et font appel à leur connaissance de cas antérieurs pour choisir le système structural en fonction des contraintes. Ce type d'approche est peu optimal et demande en plus de nombreuses années de pratique. L'étape conceptuelle pose problème aux jeunes ingénieurs qui n'ont pas suffisamment de connaissances de terrain.

La grande majorité des solutions proposées par les recherches en design conceptuel couvertes par la revue de littérature tentent à créer des programmes de conception quasi automatiques. Ces programmes substituent le raisonnement des concepteurs par des systèmes d'intelligence artificielle, comme les systèmes experts, les raisonnements par cas, les algorithmes génétiques ou les réseaux neuronaux. Les solutions obtenues sont issues de raisonnements complexes auxquels l'utilisateur n'a pas accès. Ce type d'approche est écarté.

On choisit, dans cette étude, un autre type d'approche. L'utilisateur contrôle une application qui lui fournit les connaissances nécessaires à sa réflexion durant le design conceptuel. En s'inspirant du questionnaire des connaissances de conception de SEED-Config, on décide

d'utiliser un système à base de connaissances contrôlé par l'utilisateur. Dans ce type d'approche, l'interaction entre le concepteur et le logiciel est donc un point très important. La base de connaissances contient des informations liées à la sélection des systèmes structuraux. L'utilisation des connaissances est modélisée sous la forme de règles *si-alors*. La partie gauche (*si*) représente le critère d'applicabilité de la règle et la partie droite (*alors*) détermine les actions à exécuter. Si une règle est applicable, l'utilisateur peut décider ou pas de l'appliquer. Les règles sont aussi appelées nœuds décisionnels puisqu'ils correspondent à des décisions prises par l'utilisateur. Ce type d'approche donne un contrôle très important à l'utilisateur. L'ordre d'application des nœuds est symbolisé par des flèches. L'ensemble des nœuds et des flèches forme alors un arbre décisionnel, aussi appelé processus décisionnel. L'utilisateur a donc la possibilité d'appréhender et de contrôler le processus de conception de manière claire et globale.

Les nœuds décisionnels peuvent représenter des choix structuraux. Dans ce cas, la partie gauche (*si*) d'une évalue si le choix structural est possible ou conseillé et la partie droite (*alors*) exécute diverses actions. Par exemple, dans le cas d'un processus de sélection du type de poutre à utiliser dans un bâtiment, les nœuds vont représenter les différents types de poutres (poutre en acier ajourée, poutre en béton ou autres). Chaque partie gauche (*si*) va, par exemple, vérifier que les portées à franchir sont comprises entre des valeurs limite (qui sont associées au type de poutre en question), et la partie droite (*alors*) va définir le type de poutre à utiliser dans le bâtiment. Dans cette étude, les nœuds décisionnels sont interprétés comme des étapes d'un processus (par exemple, évaluer la stabilité du bâtiment). Dans ce cas, la partie gauche (*si*) de la règle vérifie que le programme informatique dispose de toutes les données nécessaires à l'exécution de l'étape (par exemple, vérifier que les toutes les charges ont été définies) et la partie droite (*alors*) accomplit les différentes actions liées à cette tâche (par exemple, calculer l'excentricité du bâtiment).

La revue de littérature présente aussi certaines applications informatiques de conception qui créent un espace de conception intégré. Les environnements de conception intégrée permettent de gagner du temps lors des échanges de données entre les différents logiciels

et/ou les différents intervenants. On décide, dans cette étude, de relier le prototype à d'autres projets de recherche liés aux designs conceptuel et préliminaire des bâtiments.

Finalement, on a décidé de compléter les travaux menés sur le DKM (Fortin 2006; Parent 2006b). Cette application répond aux critères de modélisation des connaissances et a été développée de manière à pouvoir s'intégrer au programme StAr, qui est lui-même rattaché au projet EsQUIsE. DKM, StAr et EsQUIsE sont trois applications informatiques complémentaires de conception des bâtiments en phase conceptuelle. EsQUIsE interprète les esquisses architecturales et génère un modèle tridimensionnel récupéré par le module de raisonnement géométrique StAr. Le DKM assiste alors l'utilisateur à choisir les sous-systèmes structuraux dans StAr en présentant de manière interactive les connaissances associées.

Afin d'aider l'utilisateur durant la sélection des sous-systèmes en phase conceptuelle, des connaissances de type règles du pouce ou d'autres types de règles simples ont été cherchées puis rassemblées. Ces connaissances ont été synthétisées sous la forme d'un processus décisionnel qui se déroule de la manière suivante :

- récupération des informations utiles du modèle géométrique et structural de StAr;
- spécification des autres caractéristiques du bâtiment;
- sélection des sous-systèmes structuraux. Les sous-systèmes sont choisis en fonction des propriétés du bâtiment comme le nombre d'étage, le cheminement des charges, les portées des travées horizontales, l'usage des espaces, l'intensité des charges vives, les caractéristiques du projet et l'usage prévu du bâtiment;
- vérification de la stabilité du bâtiment. On vérifie la stabilité globale du bâtiment en comparant l'excentricité à l'excentricité maximale du bâtiment de manière à ce que toutes les fondations travaillent en compression;
- sélection des éléments et assemblages structuraux stables en fonction des sous-systèmes choisis précédemment.

Une fois le processus effectué, le concepteur dispose d'une liste restreinte de systèmes et d'éléments structuraux choisis en fonction des caractéristiques du bâtiment et du projet.

Après implémentation du prototype, le DKM a été mis à l'épreuve sur deux projets réels de construction de bâtiments : la Maison du développement durable et le bâtiment D de la phase 4 de l'ÉTS. Ces essais ont permis d'évaluer le DKM sur différents points : l'exactitude des résultats calculés par le nouveau processus décisionnels, le soutien des utilisateurs plus ou moins expérimentés, l'intégration des deux processus décisionnel et la communication entre le DKM et la base de données. Ces évaluations ont démontré l'utilité du programme en cours de design conceptuel.

7.2 Contributions

Cette étude contribue à la recherche dans le domaine des systèmes d'aide au design des bâtiments. Les différents éléments de contribution sont présentés en six catégories majeures.

7.2.1 Recherche et synthèse de connaissances portant sur le design conceptuel des bâtiments

La recherche de connaissances pouvant être utiles lors du design conceptuel des bâtiments a été le premier objectif de l'étude. La recherche d'informations s'est concentrée avant tout sur les règles simples permettant de choisir ou de dimensionner les systèmes structuraux. Finalement, après avoir examiné différentes pistes, l'étude s'est limitée aux critères de sélection des sous-systèmes structuraux. Les connaissances qui ont été synthétisées proposent des règles de sélection des systèmes que les concepteurs peuvent appliquer même sans l'utilisation du DKM. On retrouve, parmi ces connaissances, des règles de sélection des systèmes structuraux en fonction de différentes caractéristiques du projet (par exemple, le nombre d'étages, l'usage ou les délais de construction du bâtiment) et de vérification de la stabilité du bâtiment (par évaluation de l'excentricité).

7.2.2 Définition d'une méthodologie de sélection des systèmes structuraux en phase de design conceptuel

La recherche bibliographique a aussi porté sur le déroulement du processus de design conceptuel et sur l'ordonnancement des tâches à effectuer. Cette recherche s'est achevée par la définition d'un processus de sélection des systèmes structuraux se déroulant ainsi :

- spécification des caractéristiques du bâtiment et des charges;
- sélection des sous-systèmes horizontaux. Les sous-systèmes sont choisis en fonction des propriétés du bâtiment comme le nombre d'étages, le cheminement des charges, les portées des travées horizontales, l'usage des espaces, l'intensité des charges vives, les caractéristiques du projet et l'usage prévu du bâtiment;
- sélection des sous-systèmes verticaux en fonction des sous-systèmes horizontaux choisis précédemment et des caractéristiques définies durant la première étape;
- vérification de la stabilité du bâtiment par évaluation de l'excentricité;
- sélection des éléments et des assemblages structuraux stables en fonction des sous-systèmes choisis précédemment.

7.2.3 Calcul du niveau d'aptitude des systèmes structuraux

Des méthodes de notations ont été définies afin d'évaluer et de comparer l'aptitude des systèmes structuraux par rapport à différentes contraintes liées au projet de construction du bâtiment qui sont :

- le nombre d'étages du bâtiment;
- le cheminement des charges;
- les portées des systèmes horizontaux;
- l'intensité des charges vives;
- l'usage prévu du bâtiment;
- d'autres caractéristiques du projet.

7.2.4 Interprétation des nœuds décisionnels

Une nouvelle interprétation des nœuds décisionnels a été faite lors de la phase d'implémentation du prototype. À l'origine, les nœuds décisionnels avaient été créés pour représenter des choix structuraux et non pas des étapes d'un processus. Il a été montré comment le fonctionnement des nœuds pouvait être modifié pour une utilisation plus généralisée grâce à l'ajout du seul attribut (`isApply`). Cet attribut permet de contrôler l'activation d'un nœud en fonction de l'état des nœuds précédents, ce qui était impossible jusqu'à présent. Ainsi, durant le processus décisionnel de sélection des systèmes structuraux, le programme peut vérifier que toutes les étapes subséquentes à une autre ont été exécutées.

7.2.5 Implémentation d'un nouveau processus décisionnel dans le DKM

Le DKM a été complété par un nouveau processus décisionnel intervenant plus tôt dans la conception. Cette implémentation a consisté en deux tâches principales : le codage en Java des nœuds décisionnels et le codage des connaissances dans la base de données Caché. Le programme dispose maintenant de deux processus décisionnels couvrant plusieurs aspects du design conceptuel et préliminaire des structures de bâtiments : l'un porte sur la sélection des sous-systèmes verticaux et horizontaux et l'autre permet de dimensionner certains types de dalles.

7.2.6 Modifications du DKM

Modification du modèle structural

Le modèle structural a dû être modifié afin de prendre en compte des caractéristiques nécessaires au fonctionnement et à la sauvegarde de l'avancement de la conception du nouveau processus décisionnel. De nouvelles classes décrivant les propriétés du projet et du bâtiment (par exemple, la classe détaillant l'usage du bâtiment) ont dû être adjointes. En outre, de nouveaux attributs ont dû être annexés aux classes existantes. Par exemple, la classe `ISV` possède maintenant plusieurs attributs décrivant différentes caractéristiques géométriques des volumes structuraux.

Modification de l'interface de modélisation structurale du DKM

L'interface de modélisation structurale du DKM se limitait à la représentation des sous-systèmes horizontaux. La fonction de modélisation a été modifiée afin de permettre à l'utilisateur de visualiser l'ensemble des entités structurales majeures du modèle structural. Des entités comme le bâtiment, les volumes structuraux, les sous-systèmes verticaux résistants aux charges latérales et aux charges gravitationnelles ont ainsi été rajoutées à l'interface de représentation des entités structurales.

Modification du processus décisionnel associé aux dalles

L'utilisation d'un modèle structural commun et d'une base de données a permis de lier les deux processus décisionnels ensemble. Le processus décisionnel associé au dimensionnement des dalles a dû être modifié afin de pouvoir récupérer les informations reliées au processus de sélection des systèmes structuraux.

7.3 Suggestions pour les recherches futures

Le DKM possède encore des lacunes qui pourraient faire l'objet de travaux futurs. Les sous-sections suivantes suggèrent quelques pistes de développement pour des travaux futurs sur le DKM.

7.3.1 Interaction entre le DKM et StAr

Le lien entre le DKM et StAr est très important dans les deux sens. D'une part le DKM a besoin, pour fonctionner, de certaines données de StAr, comme la géométrie du bâtiment. Rentrer ces données manuellement est long et fastidieux. Le temps que le DKM permet d'épargner durant la conception est bien moindre que celui nécessaire à la modélisation du bâtiment dans la base de données. Il serait bien plus rapide de récupérer le modèle créé par StAr. Pour cela, il faudrait soit modifier StAr, soit créer un module qui permet à StAr de communiquer avec Caché. De plus, pour que les résultats du DKM puissent être récupérés par StAr, il faudrait que StAr prenne en compte des ajouts qui ont été apportés au modèle

structural des bâtiments. StAr pourrait alors guider l'utilisateur dans la sélection des systèmes structuraux.

Pour l'instant StAr ne communique pas avec la base de données Caché, mais lorsque cela sera fait, l'utilisation conjointe des deux prototypes démontreront les avantages des systèmes de conception intégrés. Le partage d'information par le biais d'un modèle structural commun permet aux concepteurs de ne pas se préoccuper de la conversion des données. Les concepteurs peuvent alors se concentrer sur les tâches importantes et qui ne peuvent pas être réalisées par un ordinateur.

7.3.2 Création d'un éditeur de processus et de nœuds décisionnels

Un éditeur de règle serait un outil très utile pour le DKM. Il permettrait de créer des nouveaux processus décisionnels plus facilement. Les efforts d'implémentation du DKM seraient alors uniquement consacrés à la recherche de connaissances, ce qui permettrait de développer la base de connaissances de manière plus efficace. Toutefois, la création d'un éditeur de processus demanderait certainement beaucoup de travail sur le fonctionnement du moteur du DKM, sur la modélisation des connaissances et des entités structurales. Cette tâche demande surtout des qualifications en informatique et peu en structure.

7.3.3 Développement de la base de connaissances

La base de connaissances peut être étendue afin de rendre le DKM plus complet. Les connaissances associées aux sous-systèmes horizontaux ne couvrent jusqu'à présent que deux types de dalles. Il serait donc souhaitable d'étendre les connaissances à d'autres types de dalles ainsi qu'à d'autres sous-systèmes structuraux (comme les éléments verticaux et les fondations) et de les intégrer de la même manière.

ANNEXE I

PROCESSUS DÉCISIONNEL ASSOCIÉ AU DESIGN CONCEPTUEL DES SYSTÈMES STRUCTURAUX

I.1 Exemple du nœud décisionnel associé à la spécification du poids propre

```
package knowledge.knowledgeStructuralSystem;

import cacheEntities.*;
import com.intersys.objects.CacheException;
import knowledge.AbstractDecisionNode;
import knowledge.DecisionGroup;
import dkmApplication.Globals;
import knowledge.knowledgeStructuralSystem.windows.*;
import java.awt.event.*;
import java.util.Iterator;

public class DecDeadLoads extends AbstractDecisionNode
{
    private StructuralSystem oldEntity;
    private StructuralSystem newEntity;
    private fenetreChoixPoidsPropre frame;

    public DecDeadLoads()
    {
        name="Détermination du poids propre";
    }
}
```

I.2 La méthode apply ()

```
public BuildingEntity apply(BuildingEntity be) throws CacheException {
    // Afin de pouvoir annuler l'exécution des noeuds décisionnels,
    // on copie l'entité structurale sur laquelle on travaille dans l'état où elle se trouvai
    // avant exécution du noeud et on enregistre les modifications apportées à la nouvelle co
    // de l'entité
```

```

oldEntity = null; // la copie de l'entité avant exécution du noeud
newEntity = null; // la copie de l'entité qui contient tous les nouvelles informations
                    //fournies par l'exécution du noeud

try {
    // on vérifie que l'entité structurale est du bon type
    if (be.getType().equals("StructuralSystem")){
        // on garde une copie de l'entité dans l'état avant exécution du noeud
        oldEntity = (StructuralSystem)be;

        // on fait une seconde copie sur laquelle on travaille, cette copie contiendra toutes
        // les nouvelles informations apportées par l'exécution du noeud
        newEntity = (StructuralSystem)oldEntity.constructClone();

        newEntity.setcreatorDecision(name);
        newEntity.setpreviousVersion(oldEntity);

        // on affiche une fenêtre qui demandera à l'utilisateur de spécifier le poids propre
        frame = new fenetreChoixPoidsPropre(newEntity.getbuilding());
        frame.setVisible(true);
        frame.addWindowListener(new WindowAdapter() {
            // on enregistre les valeurs à la fermeture de la fenêtre de dialogue
            public void windowClosed(WindowEvent e) {
                try {
                    // on enregistre la valeur donnée par l'utilisateur dans la nouvelle copi
                    // de l'entité newEntiy
                    frame.updatePP(newEntity.getbuilding());

                    // on enregistre la copie de l'entité qui contient les données à jour, pu
                    // substitue l'ancienne version de l'entité par la nouvelle
                    newEntity._save();
                    Globals.getGraphBuilder().replaceInAssembly((StructuralSystem)oldEntity,
                } catch (CacheException ce) {
                    System.out.println(ce.getMessage());
                }
            }
        });

        be = newEntity;

        // on modifie la valeur de isApply pour Vrai car le noeud est maintenant appliqué
        this.isApply = true;
    }
}
catch (CacheException e) {
    System.out.println(e.getMessage());
}

```

```

// si be n'est pas de bon type (voir plus haut) on retourne l'entité telle quelle
return be;
}

```

I.3 La méthode isApplicable()

```

public boolean isApplicable(BuildingEntity be) throws CacheException{
    AbstractDecisionNode PrecNode;
    DecisionGroup PrecGroup;
    // témoin d'applicabilité du noeud
    boolean r = false;

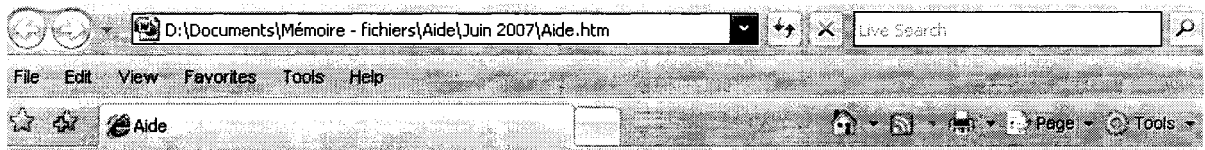
    try {
        bloc : {
            // on vérifie que l'entité est du bon type et que tous les noeuds en amont du noe
            // courant aient bien été appliqués (en regardant l'attribut isApply)
            if (be.getType().equals("StructuralSystem") ){
                for (Iterator iter = this.group.getPrecedingGroups().iterator();iter.hasNext(
                    PrecGroup = (DecisionGroup) iter.next();
                    for (Iterator iterl = PrecGroup.getNodes().iterator();iterl.hasNext();){
                        PrecNode = (AbstractDecisionNode) iterl.next();
                        if (PrecNode.isApply()==false)
                            break bloc;
                    }
                }
            }
            // on met r a Vrai si les conditions on été vérifiées
            r = true;
        }
    }
    catch (CacheException e){
        System.out.println(e.getMessage());
    }
    return r;
}

```

ANNEXE II

MANUEL D'AIDE DU PROCESSUS DÉCISIONNEL ASSOCIÉ AU PROCESSUS DE SÉLECTION DES SYSTÈMES STRUCTURAUX

II.1 Exemple de la page sommaire



Sommaire

Le processus décisionnel se déroule en quatre étapes :

1. La spécification des propriétés du projet :

- [Le nombre d'étages](#)
- [Le rapport des dimensions des dalles](#)
- [Les caractéristiques du projet](#)
- [Les portées des travées horizontales](#)
- [L'intensité des charges vives](#)
- [L'usage du bâtiment](#)

2. [La sélection des sous-systèmes structuraux](#)

3. La vérification de l'excentricité du bâtiment :

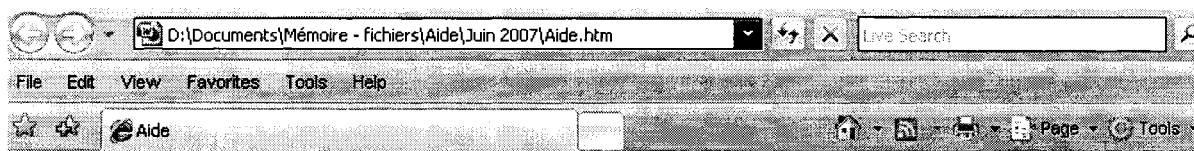
[Détermination de la charge du vent](#)

[Détermination du poids propre](#)

[Calcul de l'excentricité des volumes structuraux](#)

4. [La sélection des éléments et assemblages structuraux](#)

II.2 Exemple de la page consacrée à la spécification de la localisation du bâtiment et de la pression du vent



Détermination de la charge du vent

1. Connaissances

Le calcul de la pression extérieure exercée par le vent est réglementé par le CNBC (2006). Elle est calculée par la formule suivante :

$$p = I_w \cdot q \cdot C_e \cdot C_g \cdot C_p$$

où :

p est la pression extérieure s'exerçant de manière statique et dans une direction normale aux parois du bâtiment;

I_w est le coefficient de risque de la charge due au vent (voir §4.1.7.1.1 du CNBC {, 2006 #86});

q est la pression dynamique susceptible d'être égalée ou dépassée une fois en 50 ans (voir tables en annexe C du CNBC {, 2006 #86);

C_e est le coefficient d'exposition (voir §4.1.7.1.4 du CNBC {, 2006 #86});

C_g est le coefficient de rafale (voir §4.1.7.1.6 du CNBC {, 2006 #86});

C_p est le coefficient de pression extérieur calculé d'après la moyenne des valeurs sur la surface considérée.

Pour simplifier les calculs, on prend :

$I_w = 1,0$, ce qui correspond à un risque normal à l'état limite ultime;

$C_e \cdot C_g = 1,0$. Après analyse des commentaires sur le calcul des structures selon le CNBC {Commission canadienne des codes du bâtiment et de prévention des incendies, 2006 #105}, il s'avère que le rapport de ces deux coefficients est généralement de l'ordre de 1;

$C_g = 2,0$, ce qui correspond au coefficient de rafale pour l'ensemble du bâtiment.

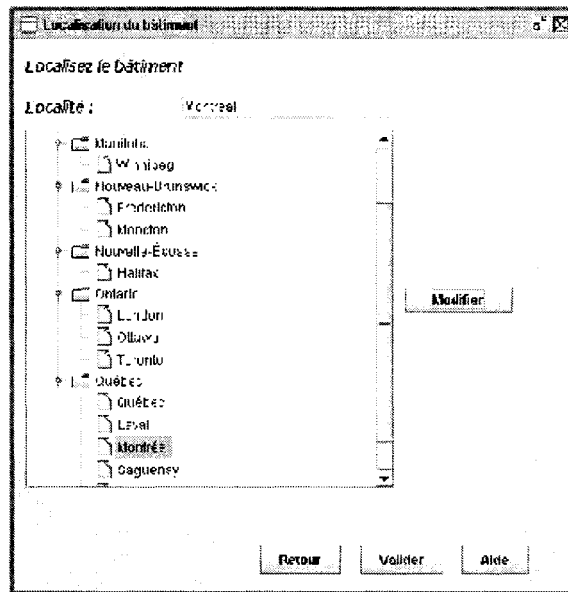
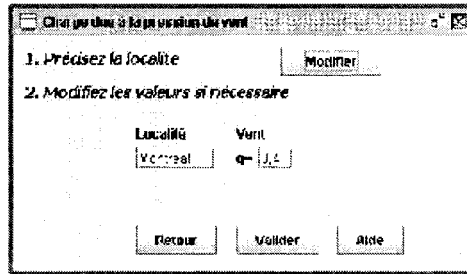
On obtient ainsi :

$$p = 2 \cdot q$$

Pour les bâtiments dont la hauteur est supérieure à quatre fois leur largeur minimale effective, ou à 120m et pour ceux qui, à cause de leur légèreté, leur basse fréquence d'oscillation et leur faible capacité d'amortissement, ont une nette tendance à vibrer, les calculs se font par d'autres méthodes plus précises. Ce type de bâtiment n'entre pas dans le cadre de l'étude.

2. Fenêtres

Cette fenêtre permet de spécifier la pression du vent. Elle peut être entrée directement ou déterminée en fonction de la localité en cliquant sur *Modifier*.



3. Références

Commission canadienne des codes du bâtiment et de prévention des incendies et Institut de recherche en construction (Canada) (2006). Guide de l'utilisateur, CNB 2005. Commentaires sur le calcul des structures (partie 4 de la division B). Ottawa, Institut de recherche en construction.

Conseil national de recherches du Canada (2006). Codes nationaux de construction. Ottawa, Ont., Conseil national de recherches du Canada.

ANNEXE III

MODIFICATIONS DE LA MÉTHODE DE VISUALISATION DU MODÈLE STRUCTURAL DANS LE DKM

```
//Modélisation du bâtiment, nouveau buildEntityTree
public SparseTree buildEntityTree(Building theBuilding) throws CacheException {
    String objectKey = "entity";

    //Niveau racine : le bâtiment
    Vertex root = new DirectedSparseVertex();
    root.addUserDatum(objectKey,theBuilding,UserData.SHARED);
    SparseTree theTree = new SparseTree(root);

    //Niveau 1 : le système structural
    StructuralSystem theSS = theBuilding.getstructuralSystem();
    Vertex v0 = (Vertex) theTree.addVertex(new DirectedSparseVertex());
    v0.addUserDatum(objectKey,theSS,UserData.SHARED);
    theTree.addEdge(new DirectedSparseEdge(root, v0));

    //Niveau 2 : les ISVs
    List theISVs = theSS.getISVList();
    Vertex v1 = null;
    for (Iterator iter1 = theISVs.iterator(); iter1.hasNext();){
        ISV isv = (ISV)iter1.next();

        v1 = (Vertex) theTree.addVertex(new DirectedSparseVertex());
        v1.addUserDatum(objectKey,isv,UserData.SHARED);
        theTree.addEdge(new DirectedSparseEdge(v0, v1));

    //Niveau 3 : les sous-systèmes vt gravitationnels
        List theVGSS = isv.getVGSubsystemList();
        Vertex v6 = null;
        for (Iterator iter8 = theVGSS.iterator(); iter8.hasNext();) {
            v6 = (Vertex) theTree.addVertex(new DirectedSparseVertex());
            v6.addUserDatum(objectKey,(VerticalGravitySubsystem)iter8.next(),UserData.SHARED);
            theTree.addEdge(new DirectedSparseEdge(v1, v6));
        }

    //Niveau 3 : les sous-systèmes vt latéraux
        List theVLSs = isv.getVLSubsystemList();
        Vertex v7 = null;
        for (Iterator iter7 = theVLSs.iterator(); iter7.hasNext();) {
            v7 = (Vertex) theTree.addVertex(new DirectedSparseVertex());
            v7.addUserDatum(objectKey,(VerticalLateralSubsystem)iter7.next(),UserData.SHARED);
            theTree.addEdge(new DirectedSparseEdge(v1, v7));
        }
    }
}
```

```

    }

//Niveau 3 : les sous-systèmes hz
    List theHSs = isv.getHSubsystemList();
    Vertex v2 = null;
    for (Iterator iter2 = theHSs.iterator(); iter2.hasNext();) {
        HorizontalSubsystem hs = (HorizontalSubsystem)iter2.next();

        v2 = (Vertex) theTree.addVertex(new DirectedSparseVertex());
        v2.addUserDatum(objectKey,hs,UserData.SHARED);
        theTree.addEdge(new DirectedSparseEdge(v1, v2));

//Niveau 4 : les assemblages de planchers
        List theFAs = hs.getFloorAssemblyList();
        Vertex v3 = null;
        for (Iterator iter3 = theFAs.iterator(); iter3.hasNext();) {
            FloorAssembly fa = (FloorAssembly)iter3.next();

            v3 = (Vertex) theTree.addVertex(new DirectedSparseVertex());
            v3.addUserDatum(objectKey,fa,UserData.SHARED);
            theTree.addEdge(new DirectedSparseEdge(v2, v3));

//Niveau 5 : les planchers
            List theSlabElements = fa.getSlabElementList();
            Vertex v4 = null;
            for (Iterator iter4 = theSlabElements.iterator(); iter4.hasNext();) {
                SlabElement se = (SlabElement)iter4.next();

                v4 = theTree.addVertex(new DirectedSparseVertex());
                v4.addUserDatum(objectKey,se,UserData.SHARED);
                theTree.addEdge(new DirectedSparseEdge(v3, v4));

//Niveau 6 : les poutres
                List theLines = se.getLineConnectionList();
                Vertex v5 = null;
                for (Iterator iter5 = theLines.iterator(); iter5.hasNext();) {
                    LineConnection lc = (LineConnection)iter5.next();

                    List theElements = lc.getStructuralElementList();
                    for (Iterator iter6 = theElements.iterator(); iter6.hasNext();) {
                        StructuralElement str = (StructuralElement)iter6.next();

                        if (str.getType().compareTo("Beam") == 0){
                            Beam b = (Beam)str;

                            v5 = theTree.addVertex(new DirectedSparseVertex());
                            v5.addUserDatum(objectKey,b,UserData.SHARED);
                            theTree.addEdge(new DirectedSparseEdge(v4, v5));
                        }
                    }
                }
            }
        }
    }
}

```



```
        }  
    }  
}  
return theTree;  
}
```

ANNEXE IV

**MODIFICATIONS DU PROCESSUS DÉCISIONNEL ASSOCIÉ AUX DALLES –
LIEN AVEC LE PROCESSUS DE DESIGN CONCEPTUEL DES SYSTÈMES
STRUCTURAUX**

**IV.1 Modification des nœuds décisionnels portant sur le cheminement des charges
– l'exemple de la classe associée cheminement bidirectionnel
Dec_DirectionelBidirectionnel**

```

public boolean isApplicable(BuildingEntity be){
    boolean r = false;
    SlabElement sElement= null;

    try
    {
        if (be.gettype().equals("SlabElement")){
            sElement = (SlabElement)be;

            //[...]

            // On récupère les éléments structuraux horizontaux associé à la dalle en cours
            // (sElement).
            List sas = sElement.getstructuralAssemblyList();
            for (Iterator iter = sas.iterator(); iter.hasNext());{
                StructuralAssembly sa = (StructuralAssembly)iter.next();
                if( sa.gettype().equals("FloorAssembly")){
                    FloorAssembly fa = (FloorAssembly) sa;
                    HorizontalSubsystem hs = (HorizontalSubsystem) fa.getHSubsystem();
                    ISV isv = (ISV) hs.getISV();
                    StructuralSystem ss = (StructuralSystem) isv.getstructuralSystem();
                    // On a remonté les niveaux des entités jusqu'à StructuralSystem.
                    // On récupère la liste des éléments horizontaux choisis lors du
                    // processus décisionnel associé aux systèmes structuraux
                    // (getelementHzList()).

                    List shl = ss.getelementHzList();
                    for(Iterator iter2 = shl.iterator(); iter2.hasNext());{

                        // hzSys énumère les différents éléments horizontaux associés
                        // à la dalle sElement.
                        HorizontalElement hzSys = (HorizontalElement) iter2.next();

```

```
        // On regarde les attributs Index et choisi des éléments
        // horizontaux. Si des systèmes bidirectionnels (20<=getIndex())<=26)
        // ont été choisis (getchoisi()==true), alors la méthode retourne
        // vrai (r=true).
        if (hzSys.getchoisi()){
            int id = hzSys.getIndex();
            if(id>=20 && id <=26)
                r = true ;
        }
    }
}
}
}
}
}
catch (CacheException e){
    System.out.println(e.getMessage());
}
return r;
}
```

IV.2 Modification des nœuds décisionnels portant sur le choix du matériau – l'exemple de la classe associée à l'acier `Dec_MaterielAcier`

```
public boolean isApplicable(BuildingEntity be){
    boolean r = false;
    SlabElement sElement = null;

    try{
        if (be.gettype().equals("SlabElement")){
            sElement = (SlabElement)be;

            //[...]

            // On récupère les éléments structuraux horizontaux associé à la dalle en cours
            // (sElement).
            List sas = sElement.getstructuralAssemblyList();
            for (Iterator iter = sas.iterator(); iter.hasNext());{
                StructuralAssembly sa = (StructuralAssembly)iter.next();
                if( sa.gettype().equals("FloorAssembly")){
                    FloorAssembly fa = (FloorAssembly) sa;
                    HorizontalSubsystem hs = (HorizontalSubsystem) fa.getHSubsystem();
                    ISV isv = (ISV) hs.getISV();
                    StructuralSystem ss = (StructuralSystem) isv.getstructuralSystem();
                    // On a remonté les niveaux des entités jusqu'à StructuralSystem.
                    // On récupère la liste des éléments horizontaux choisis lors du
                    // processus décisionnel associé aux systèmes structuraux
```

```

// (getelementHzList()).

List shl = ss.getelementHzList();
for(Iterator iter2 = shl.iterator(); iter2.hasNext();){

    // hzSys énumère les différents éléments horizontaux associés
    // à la dalle sElement.
    HorizontalElement hzSys = (HorizontalElement) iter2.next();

    // On regarde les attributs materiau et choisi des éléments
    // horizontaux. Si des systèmes en acier (getmateriau()=="acier")
    // ont été choisis (getchoisi()==true), alors la méthode retourne
    // vrai (r=true).
    if(hzSys.getmateriau().equals("Acier") && hzSys.getchoisi())
        r = true ;
    }
}
} // Traitement des exceptions
catch (CacheException e){
    System.out.println(e.getMessage());
}

return r;
}

```

IV.3 Modification des nœuds décisionnels portant sur le choix du type de dalle – l'exemple de la classe associée à la dalle en béton sur tablier métallique supporté par des poutres ajourées en acier et des poutres en I Dec_ConcreteSlabSteelDeckOpenWebJoistWBeam

```

public boolean isApplicable(BuildingEntity be){
    boolean r = false;

    try{
        if (be.gettype().equals("SlabElement")){
            sElement = (SlabElement)be;

            //[...]

            // On récupère les éléments structuraux horizontaux associé à la dalle en cours
            // (sElement).
            List sas = sElement.getstructuralAssemblyList();
            for (Iterator iter = sas.iterator(); iter.hasNext();){
                StructuralAssembly sa = (StructuralAssembly)iter.next();
                if( sa.gettype().equals("FloorAssembly")){
                    FloorAssembly fa = (FloorAssembly) sa;

```

```

HorizontalSubsystem hs = (HorizontalSubsystem) fa.getHSubsystem();
ISV isv = (ISV) hs.getISV();
StructuralSystem ss = (StructuralSystem) isv.getstructuralSystem();
// On a remonté les niveaux des entités jusqu'à StructuralSystem.
// On récupère la liste des éléments horizontaux choisis lors du
// processus décisionnel associé aux systèmes structuraux
// (getelementHzList()).

List shl = ss.getelementHzList();
boolean condition1 = false;
boolean condition2 = false;
boolean condition3 = false;

// On regarde les attributs Index et choisi des éléments horizontaux.
// Si les systèmes Plancher mixte et toit (getIndex()==8),
// Poutre en I (getIndex()==9) et Poutre ajourée (getIndex()==10)
// ont été choisis (getchoisi()==true),
// alors la méthode retourne vrai (r=true).
for(Iterator iter2 = shl.iterator(); iter2.hasNext();){
    HorizontalElement hzElt = (HorizontalElement) iter2.next();
    if(hzElt.getIndex().equals(8) && hzElt.getchoisi())
        condition1 = true ;
    if(hzElt.getIndex().equals(9) && hzElt.getchoisi())
        condition2 = true ;
    if(hzElt.getIndex().equals(10) && hzElt.getchoisi())
        condition3 = true ;
    if (condition1 && condition2 && condition3)
        r =true;
    }
}
}
}
}

catch (CacheException e){
    System.out.println(e.getMessage());
}

return r;
}

```

BIBLIOGRAPHIE

- Aamodt, A. et Plaza, E. (1994). "Case-Based Reasoning: Foundational Issues, Methodological Variations, and System Approaches." IOS Press, Artificial Intelligence Communications, 7(1): p 39 - 59.
- Adeli, H. (1988). Expert Systems in Construction and Structural Engineering. New York, NY: Chapman and Hall. 330 p.
- Allen, E. et Iano, J. (2006). The Architect's Studio Companion: Rules of Thumb for Preliminary Design. 3e éd. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc. 468 p.
- Bailey, S. F. et Smith, I. F. C. (1994). "Case-based preliminary building design." ASCE, Journal of Computing in Civil Engineering, 8(4): p 454 - 468.
- Bentley (2007). "RAM Structural System." In Bentley Web Site. En ligne, <http://ww.bentley.com/en-US/Products/RAM+Structural+System/>. Consulté le 1er Septembre 2007.
- Brachman, R. J. et Levesque, H. J. (1985). Readings in Knowledge Representation. Los Altos, CA: Morgan Kaufman. 571 p.
- Canada Green Building Council (2007). "LEED." In Canada Green Building Council Homepage. En ligne, http://www.cagbc.org/building_rating_systems/leed_rating_system.php. Consulté le 1er juillet 2007.
- Chushu, L. et Xia, L. (1998). "Expert system of structural preliminary design for high-rise buildings." Beijing, CN: Tsinghua University, Engineering Mechanics, 15(4): p 9 - 17.
- CivilDesign (2007). "VisualDesign: Aperçu général." In CivilDesign Web Site. En ligne, http://civild.com/FR/Frame_fr.asp. Consulté le 1er Septembre 2007
- Computers & Structures (2007). "ETABS." In Computers & Structures Web Site. En ligne, http://www.csiberkeley.com/products_ETABS.html. Consulté le 1er Septembre 2007
- Conseil canadien du bois (1989). Bois de construction canadien. 2e éd. Ottawa, ON: Conseil canadien du bois 1 v. (pag. multiple).
- Conseil national de recherches du Canada (2001). Code national du bâtiment: Canada 1995 (modifié). 1ère éd. Ottawa, ON: Conseil national de recherches du Canada. 1 v. (pag. multiple).

- Conseil national de recherches du Canada (2006a). Codes national du bâtiment: Canada 2005. Ottawa, ON: Conseil national de recherches du Canada. 1 v. (pag. multiple).
- Conseil national de recherches du Canada (2006b). Guide de l'utilisateur, CNB 2005. Commentaires sur le calcul des structures (partie 4 de la division B). 2e éd. Ottawa, ON: Conseil national de recherches du Canada. 1 v. (pag. multiple).
- Côté et Talbot Architectes (2007). Réhabilitation de l'îlot Molson. p 14 - 29. Non publié.
- Crowley, J. L. (1999). "Introduction aux systèmes experts." Notes de cours: Programmation des Systèmes Experts. Grenoble, FR, ENSIMAG 2. p 1.1 -1.6.
- Date, C. J. et Darwen, H. (1996). A Guide to SQL Standard. 4e éd. Indianapolis, IN: Addison-Wesley Professional. 544 p.
- Denis, F. (2006). "Cours d'intelligence artificielle - Systèmes experts." In GRAPPA: Groupe de Recherche sur l'apprentissage Automatique. En ligne, <http://www.grappa.univ-lille3.fr/polys/se/index.html>. Consulté le 1er septembre 2006.
- Emmeche, C. (1994). Garden in the Machine. The Emerging Science of Artificial Life. Princeton, NJ: Princeton University Press. 199 p.
- Équiterre (2007). "Équiterre - Organisme." In Site web d'Équiterre. En ligne, <http://www.equiterre.org/>. Consulté le 1er juin 2007.
- Fenves, S. J., Flemming, U., Hendrickson, C., Maher, M. L. et Schmitt, G. (1990). "Integrated software environment for building design and construction." Butterworth-Heinemann, Computer-aided design, **22**(1): p 27 - 36.
- Fenves, S. J., Rivard, H. et Gomez, N. (2000). "SEED-Config: a tool for conceptual structural design in a collaborative building design environment." Elsevier, Artificial Intelligence in Engineering, **14**: p 233 - 247.
- Fortin, D. (2006). "Système d'aide à la décision en conception préliminaire de structure." Projet de synthèse en génie logiciel et des TI. Département du génie logiciel et des TI, Montréal, QC, École de technologie supérieure. iv, 12 p.
- Garcia, O. N. et Chien, Y.-T. (1991). Knowledge-based systems: fundamentals and tools. Los Alamitos, CA: IEEE Computer Society Press. xiv, 495 p.
- Giarratano, J. et Riley, G. (1994). Expert Systems: Principles and Programming. 2e éd. Boston, MA: PWS Publishing Company. xv, 644 p.

- Gowri, K. (1995). A case-based model for building envelope design assistance. In Second Congress of Computing in Civil Engineering. Atlanta, GA, June 5-8. p 171 - 178. ASCE.
- Graitec (2007). "Arche." In Site web de Graitec. En ligne, <http://www.graitec.com/Fr/arche.asp>. Consulté le 1er Septembre 2007
- Grierson, D. E. et Khajehpour, S. (2002). "Method for Conceptual Design Applied to Office Buildings." ASCE, Journal of Computing in Civil Engineering, **16**(2): p 83 - 103.
- Griffiths, M. (1987). "L'intelligence artificielle pour la mécanique : état de l'art et perspectives". In Calcul des structures et intelligence artificielle. **1** p 199 - 211. Paris, FR: Éditions Pluralis.
- Haber, D. et Karshenas, S. (1990). "CONCEPTUAL: An expert system for conceptual structural design." Elsevier, Microcomputers in Civil Engineering, **5**(2): p 119 - 127.
- Harty, N. et Danaber, M. (1997). "Evaluating preliminary structural designs in an expert system." Elsevier, Computers & Structures, **63**(6): p 1243 - 1249.
- Hayes-Roth, F., Waterman, D. A. et Lenat, D. (1983). "An overview of expert systems". In Building Expert Systems. p 3 - 29. Reading, MA: Addison-Wesley.
- Holland, J. H. (1975). Adaptation in natural and artificial system. Ann Arbor, MI: The University of Michigan Press. 228 p.
- International Code Council (2000). Uniform Building Code. Whittier, CA: International Conference of Building Officials. 3 v. (pag. multiple).
- JargonF (2003). "Heuristique." In Le jargon français. En ligne, <http://www.linux-france.org/prj/jargonf/H/heuristique.html>. Consulté le 1er juillet 2006.
- Jones, R. (2004). "Google Cartography." In Richard Jones Web Page. En ligne, <http://richard.jones.name/google-hacks/google-cartography/google-cartography.html>. Consulté, 1er mai 2007.
- Kumar, M. et Raphael, B. (1997). "CADREM: A Case-Based System for Conceptual Structural Design." Springer London, Engineering with Computers, **13**(3): p 153 - 164.
- Leclercq, P. (1999). Interpretative Tool for Architectural Sketches. In International Roundtable Conference on Visual and Spatial Reasoning in Design: Computational and Cognitive Approaches. MIT, Cambridge, MA, June 15-17. p 69 -80. Gero and Tversky.

- Leclercq, P. (2002). "Interface-esquisse effacée en ingénierie de conception." Poitiers, FR: ACM, IHM 2002(November 26-29): p 203 - 204.
- Lin, T. Y. et Stotesbury, S. D. (1988). Structural concepts and systems for architects and engineers. 2e éd. New York, NY: Van Nostrand Reinhold. xiii, 507, [81] p.
- Liu, X. et Gan, M. (1991). "A preliminary structural design expert system (SPRED-1) based on neural networks." Butterworth-Heinemann, Artificial Intelligence in Design '91, **12**(3): p 71 - 76.
- Maher, M. L. (1984). "HI-RISE: A knowledge-based expert system for the preliminary structural design of high rise buildings." Thèse de doctorat en génie civil et environnemental. Department of Civil and Environmental Engineering, Pittsburgh, PA, Carnegie Mellon University. 134 p.
- Maher, M. L. (1985). "HI-RISE and beyond: directions for expert systems in design." Elsevier, Computer-aided design, **17**(9): p 420 - 427.
- Maher, M. L., Balachandran, M. B. et Zhang, D. M. (1995). Cased-based reasoning in design. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associate. 342 p.
- Maher, M. L. et Zhang, D. M. (1991). "CADSYN : Using case and decomposition knowledge for design synthesis." Butterworth-Heinemann, Artificial Intelligence in Design, (June): p 137 - 150.
- Menkès Shooner Dagenais Letourneaux Architectes (2007). Brochure de présentation du projet de Maison du développement durable. 350 p. Non publié.
- Microsoft Developer Network (2007). "Microsoft Open Database Connectivity (ODBC)." In Microsoft Developer Network. En ligne, <http://msdn.microsoft.com/library/default.asp?url=/library/en-us/odbc/htm/dasdkodbcoverview.asp>. Consulté le 1er mai 2007.
- Miles, J. (2005). "Conceptual Design: How It Can Be Improved." Zurich, CH: Int. Assoc. for Bridge and Structural Eng., Information and Communication Technology for Structural Engineering, **15**(3): p 122 -128.
- Mora, R. (2005). "Representation and reasoning for integrated conceptual design of building structures." Thèse de doctorat en génie du bâtiment, civil et environnemental. Department of Building, Civil and Environmental Engineering, Montréal, QC, Concordia University. xxi, 344 p
- Mora, R. (2006). Collaboration support for an architect and a structural engineer at sketch time. 19 p. Non publié.

- Mora, R., Rivard, H. et Bédard, C. (2006). "Computer Representation to Support Conceptual Structural Design within a Building Architectural Context." ASCE, Journal of Computing in Civil Engineering, **20**(2): p 76 - 87.
- O'Shea, T. et Einsenstadt, M. (1984). Artificial Intelligence - Tools, Techniques and Applications. New York, NY: Harper and Row. 497 p.
- Pan, T.-C. et Soh, C. K. (1991). "Preliminary development of a knowledge-based system for building configuration." IEEE, Computer-Aided Engineering Journal, **8**(1): p 6 - 12.
- Parent, S. (2006a). Acquisition and Modeling of Conceptual Structural Design Knowledge. In Joint International Conference on Computing and Decision Making in Civil and Building Engineering. Montréal, QC, June 14-16. p 3519-3528. Rivard, Miresco & Melhem.
- Parent, S. (2006b). "Acquisition, modélisation et programmation de connaissances en conception préliminaire de structures de bâtiments." Mémoire de maîtrise en génie de la construction. Département du génie de la construction, Montréal, QC, École de technologie supérieure. xvii, 232 p.
- Rafiq, M. Y., Mathews, J. D. et Bullock, G. N. (2003). "Conceptual Building Design: Evolutionary Approach." ASCE, Journal of Computing in Civil Engineering, **17**(3): p 150 - 158.
- Ravi, M. (1999). "Expert validation of TALL-D: A KBS for tall buildings design." M.A. Lacasse & D.J. Vanier, Information Technology in Construction, **4**(May 30 - June 3): p 2619 - 2628.
- Retik, A. et Warszawski, A. (1991). Knowledge based systems for design of prefabricated buildings. In Artificial Intelligence and Civil Engineering. Oxford, UK, September 3-5. p 187 - 195. Edingburgh, UK: Civil-Comp Limited.
- Rivard, H. (1997). "A Building Design Representation for Conceptual Design and Case-Based Reasoning." Thèse de doctorat en génie civil et environnemental. Department of Civil and Environmental Engineering, Pittsburgh, PA, Carnegie Mellon University. xi, 210 p.
- Rivard, H. (2006). "L'avenir des TI en construction." Note de cours MGC-846 : Nouvelles technologies de l'information appliquées à la construction. Département du génie de la construction, Montréal, QC, École de technologie supérieure. 49 p.
- Rivard, H. et Bédard, C. (2003). "A course on computer-aided building design." ITcon, Electronic Journal of Information Technology in Construction, **9**: p 267 - 279.

- Rivard, H. et Fenves, S. J. (2000a). "A representation for Conceptual Design of Buildings." ASCE, Journal of Computing in Civil Engineering, **14**(3): p 151 - 159.
- Rivard, H. et Fenves, S. J. (2000b). "SEED-Config: A case-based reasoning system for conceptual building design." Cambridge University Press, Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing: AIEDAM, **14**(5): p 415 - 430.
- Robobat (2007). "Robot Millenium." In Robobat Web Site. En ligne, <http://www.robobat.com/>. Consulté le 1er Septembre 2007.
- SAFI (2007). "SAFI Homepage." In SAFI Web Site. En ligne, <http://www.safi.com/>. Consulté le 1er Septembre 2007.
- Schodek, D. L. (2001). Structures. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall. xvi, 581 p.
- Sriram, D. (1986). "Knowledge-based approaches for structural design." Thèse de doctorat en génie civil et environnemental. Department of Civil and Environmental Engineering, Pittsburg, PA, Carnegie Mellon University. 204 p.
- Sriram, D. (1987). "ALL-RISE: A Case Study in Constrained-Based Design." Computational Mechanics Publications, Artificial Intelligence in Engineering, **2**(4): p 186 - 203.
- Sunder, N. et Satyanarayanan, S. (2001). "Tallex: Knowledge-based expert system for preliminary design of tall buildings." Associated Cement Companies Ltd., Indian Concrete Journal, **75**(8): p 524 - 528.
- Tremblay, R. (1997). "Calcul avancé des charpentes d'acier: Chapitre 5." Notes de cours CIV6506: Calcul avancé des charpentes d'acier. Département de génie civil, Montréal, QC, Polytechnique. p 5.8 - 5.52.
- Webb, K. (2007). "Xholon." In Sourceforge.net. En ligne, <http://sourceforge.net/projects/xholon/>. Consulté le 1er mai 2007.
- Wikipédia (2006a). "Case-based reasoning." In Wikipédia. En ligne, http://en.wikipedia.org/wiki/Case-based_reasoning. Consulté le 1er juillet 2006.
- Wikipédia (2006b). "Expert system." In Wikipédia. En ligne, http://en.wikipedia.org/wiki/Expert_system. Consulté le 1er juillet 2006.
- Wikipédia (2006c). "Réseau de neurones." In Wikipédia. En ligne, http://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9seau_de_neurones. Consulté le 1er juillet 2006.
- Wikipédia (2006d). "Rule of thumb." In Wikipédia. En ligne, http://en.wikipedia.org/wiki/Rule_of_thumb. Consulté le 1er juillet 2006.

- Wikipédia (2007). "Java (technologie)." In Wikipédia. En ligne, http://fr.wikipedia.org/wiki/Java_%28technologie%29. Consulté le 1er mai 2007.
- World Wide Web Consortium (2007). "HTML 4.01 Specification." In W3C Recommendation. En ligne, <http://www.w3.org/TR/html4/>. Consulté le 1er juin 2007.
- Zhao, F. et Maher, M. L. (1988). "Using Analogical Reasoning to Design Buildings." Springer London, Engineering with Computers, 4: p 107 - 119.
- Zhao, Z., He, W. et Fan, S. C. (2001). "Preliminary Design System for Concrete Box Girder Bridges." ASCE, Journal of Computing in Civil Engineering, 15(3): p 184 - 192.