

**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.Eng.**

**PAR  
STEVE PARENT**

**ACQUISITION, MODÉLISATION ET PROGRAMMATION DE  
CONNAISSANCES EN CONCEPTION PRÉLIMINAIRE  
DE STRUCTURES DE BÂTIMENTS**

**MONTRÉAL, LE 18 DÉCEMBRE 2006**

**© droits réservés de Steve Parent**

**CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ**

**PAR UN JURY COMPOSÉ DE :**

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

Mme Marie-José Nollet, présidente du jury  
Département de génie de la construction, École de technologie supérieure

M. Claude Bédard, jury  
Doyen à la recherche et au transfert technologique, École de technologie supérieure

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

**LE 22 NOVEMBRE 2006**

**À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE**

# **ACQUISITION, MODÉLISATION, ET PROGRAMMATION DE CONNAISSANCES EN CONCEPTION PRÉLIMINAIRE DE STRUCTURES DE BÂTIMENTS**

Steve Parent

## **SOMMAIRE**

Le domaine de la conception préliminaire de structures de bâtiments ne possède toujours pas d'outils informatiques performants, et ce, même si plusieurs recherches aient tenté de proposer des solutions. L'objectif de ce mémoire est d'assister l'ingénieur durant la conception, sans tenter de le remplacer, en lui fournissant des règles du pouce, des conseils et des évaluations rapides par l'utilisation de l'informatique.

L'assistance de l'ingénieur est envisagée par l'utilisation d'un module de gestion de connaissances (Design Knowledge Manager ou DKM) qui communique avec un module de raisonnement géométrique. L'interaction entre l'ingénieur et le DKM est définie de manière à pouvoir élaborer le prototype de gestion des connaissances, principal objet de ce mémoire. Ainsi, divers outils sont développés afin d'assister l'interaction entre l'ingénieur et le prototype. Les nœuds, appelés « nœuds décisionnels », sont utilisés afin de permettre à l'utilisateur de prendre des décisions. Chacun des nœuds contient les connaissances nécessaires à l'implémentation d'une étape de conception. Les nœuds utilisent les heuristiques (règles du pouce), comme dans les systèmes experts, mais où le moteur d'inférence est remplacé par l'ingénieur lui-même.

Une base de connaissances a été formée à partir de la littérature disponible ainsi qu'avec des entrevues avec des experts. Les connaissances présentées se limitent à la conception préliminaire des sous-systèmes horizontaux ainsi qu'aux étapes préalables.

Un prototype a été créé pour la conception préliminaire des sous-systèmes horizontaux, faisant état de preuve de concept. Le prototype est implémenté en Java. Les règles sont encapsulées dans des nœuds décisionnels organisés sous forme d'arbre de décision tandis que les conseils sont fournis à l'aide de pages HTML.

L'évaluation du prototype s'est effectuée premièrement par des chercheurs impliqués dans des recherches similaires. Les commentaires provenant de ceux-ci furent très positifs. Deuxièmement, des praticiens ont aussi évalué le prototype et ils ont pu fournir de précieux conseils pour les recherches futures.

# **ELICITATION, MODELLING, AND PROGRAMMING OF CONCEPTUAL DESIGN KNOWLEDGE FOR BUILDING STRUCTURES**

Steve Parent

## **ABSTRACT**

Conceptual structural building design is still not properly supported by efficient software even if many research projects have tackled this issue. The goal of this master thesis is to provide support to the engineer when taking conceptual decisions, and not to replace the engineer by automation. Conceptual support is provided in the form of rules of thumb, advice and quick evaluations.

Computer support will be provided to the engineer by a design knowledge manager (DKM) which communicates with a geometric reasoning module. The interaction between the engineer and the DKM is specified to identify how the design knowledge manager, which is the principal subject of this master thesis, could be elaborated. Thus, several functionalities are developed to facilitate the interaction between the engineer and the prototype. The nodes, called "decision nodes", are used to allow the engineer to take decisions. Each node contains the necessary knowledge for the implementation of one design step. The nodes make use of heuristics (rules of thumb), like in experts systems, but the inference engine is replaced by the engineer.

A knowledge base has been elaborated from the literature and from interviews with experts. The knowledge base presented is limited to the conceptual design of the horizontal subsystems and the earlier steps of conception.

A prototype has been implemented for the conceptual design of the horizontal subsystems, as a proof of concept. The prototype is implemented in Java. The rules are encapsulated in the decision nodes organised in decision trees. Advice is provided with HTML pages.

The evaluation of the prototype has been done by researchers involved in similar research projects. Their comments were truly positive. Evaluation was also carried out with practitioners and provided useful comments for future research.

## **REMERCIEMENTS**

J'aimerais remercier grandement mon directeur de mémoire, M. Hugues Rivard, pour ses conseils et sa très grande disponibilité tout au long de ce mémoire. Même lors de périodes difficiles, il a toujours su me remettre sur les rails avec ses conseils judicieux. Le travail d'équipe présent tout au long du projet, notamment avec Rodrigo et Dominic, a aussi été très apprécié.

J'aimerais souligner le support financier de mes bourses d'études supérieures provenant du CRSNG ainsi que de l'École de technologie supérieure. Ce support m'a permis de me consacrer à temps plein à mes recherches et a accéléré grandement mon travail.

Un remerciement tout spécial à Céline qui a réussi à me supporter durant ces deux années qui ont parfois été difficiles sur mon moral. Ton support m'a été aussi essentiel que ton amour.

Un gros merci au corrupteur (Ian), à Karine et autres « coquerelles » de recherche avec qui j'ai pu passer du bon temps lors des dîners et des quelques pauses que l'on s'est permises durant ces deux années...

## TABLE DES MATIÈRES

	Page
SOMMAIRE .....	i
ABSTRACT .....	ii
REMERCIEMENTS .....	iii
TABLE DES MATIÈRES .....	iv
LISTE DES TABLEAUX .....	x
LISTE DES FIGURES .....	xii
LISTE DES GRAPHIQUES .....	xvi
LISTE DE POLICES DE CARACTÈRES UTILISÉES .....	xvii
INTRODUCTION .....	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LA DOCUMENTATION .....	2
1.1. Définition du processus de réalisation d'un bâtiment et situation de la conception préliminaire .....	3
1.1.1. Phase décisionnelle .....	3
1.1.2. Phase de conception .....	3
1.1.3. Phase de construction .....	5
1.2. Logiciels existants pour la conception structurale .....	6
1.3. Tendance à la modélisation en trois dimensions .....	9
1.4. Représentation des connaissances .....	14
1.4.1. Logique formelle .....	14
1.4.2. Représentation basée sur des règles .....	16
1.4.3. Programmation orientée objet .....	18
1.4.4. Raisonnement à partir d'un modèle .....	19

1.5. Recherches portant sur les systèmes informatiques assistant la conception préliminaire .....	21
1.5.1. Environnement de design intégré pour la conception préliminaire.....	21
1.5.2. Systèmes experts.....	23
1.5.3. Raisonnement à partir de cas .....	27
1.5.4. Logique formelle.....	29
1.5.5. Système basé sur les lois de la physique .....	30
1.5.6. Algorithme génétique .....	31
1.5.7. Design génératif .....	33
1.5.8. Système hybride.....	34
1.5.9. Conclusion sur les prototypes de recherche .....	36
1.6. État de l'art en matière de conception préliminaire de structures de bâtiment... ..	37
1.6.1. Vue d'ensemble des méthodes de raisonnement .....	37
1.6.2. Vue d'ensemble des prototypes et recherches sur la conception préliminaire de structures de bâtiments.....	39
CHAPITRE 2 OBJECTIFS DU PROJET ET MÉTHODOLOGIE .....	42
2.1. Objectif .....	42
2.2. Projets de recherches reliés .....	43
2.2.1. StAr .....	43
2.2.2. EsQUIsE.....	44
2.2.3. SEED-Config .....	45
2.2.4. Ramachandran.....	46
2.3. Approche adoptée .....	47
2.4. Étapes de développement du projet.....	50
2.4.1. Développement de la base de connaissance.....	50

2.4.2. Modélisation des connaissances.....	50
2.4.3. Définition des caractéristiques du prototype en fonction du processus de conception .....	51
2.4.4. Implémentation des connaissances .....	51
2.4.5. Évaluation et tests du prototype .....	52
2.5. Justification de la méthodologie .....	52
<b>CHAPITRE 3 ACQUISITION DE CONNAISSANCES EN CONCEPTION PRÉLIMINAIRE DE STRUCTURES DE BÂTIMENTS .....</b>	<b>54</b>
3.1. But de l'acquisition de connaissances en conception préliminaire de bâtiments .....	54
3.2. Sources utilisées pour l'acquisition de connaissances en conception préliminaire de bâtiments .....	54
3.3. Processus de conception préliminaire de structures de bâtiments .....	58
3.3.1. Explication du processus de conception préliminaire.....	58
3.3.2. Validation du processus de conception préliminaire avec l'observation d'experts .....	60
3.4. Base de connaissances en conception préliminaire de structures de bâtiments .....	63
<b>CHAPITRE 4 SPÉCIFICATIONS ET CONCEPTION D'UN OUTIL D'AIDE À LA CONCEPTION.....</b>	<b>65</b>
4.1. Introduction.....	65
4.2. Éléments essentiels à l'assistance apportée à l'utilisateur.....	65
4.3. Type d'interaction souhaitée.....	66
4.4. Outils utilisés pour l'interaction avec l'utilisateur .....	66
4.4.1. Processus de conception préliminaire.....	66
4.4.2. Utilisation des arbres de décisions.....	66

4.4.3. Présentation de l'interface utilisée.....	75
4.5. Assistance envisagée de l'utilisateur à travers tout le processus de conception préliminaire.....	78
4.5.1. Information sur le projet (Étape 1).....	80
4.5.2. Création des volumes structuraux indépendants (Étape 2) .....	81
4.5.3. Décisions stratégiques (Étape 3) .....	82
4.5.4. Création des zones structurales (Étape 4) .....	83
4.5.5. Recherche d'éléments verticaux continus (Étape 5) .....	85
4.5.6. Éléments horizontaux (Étape 6) .....	87
4.5.7. Éléments verticaux (Étape 7 et 8) .....	93
4.5.8. Étapes finales de conception .....	95
4.6. Conclusion.....	96
<b>CHAPITRE 5 IMPLÉMENTATION DU PROTOTYPE.....</b>	<b>97</b>
5.1. Architecture générale du prototype complet.....	97
5.2. Structure des données .....	99
5.3. Module de gestion des connaissances « DKM ».....	101
5.3.1. Utilisation du Java comme langage de programmation .....	101
5.3.2. Architecture spécifique au DKM .....	102
5.3.3. Paquetages utilisés .....	102
5.3.4. Utilisation des nœuds décisionnels .....	103
5.3.5. Présentation de l'interface du prototype.....	115
5.3.6. Détails de l'implémentation partielle du prototype.....	116
5.3.7. Changements effectués au fonctionnement envisagé .....	117
<b>CHAPITRE 6 PRÉSENTATION DU PROTOTYPE ET EXEMPLE D'UNE SESSION DE CONCEPTION.....</b>	<b>118</b>

6.1.	Manuel de l'utilisateur.....	118
6.1.1.	Mesures temporaires d'initialisation du modèle .....	118
6.1.2.	Fonctionnalités de l'interface.....	120
6.1.3.	Connaissances implémentées .....	122
6.2.	Exemple d'une session de conception pour les sous-systèmes horizontaux ...	123
6.2.1.	Conditions initiales .....	124
6.2.2.	Première exploration avec des baies de 3000 × 4000 mm .....	124
6.2.3.	Nouvelle solution avec une baie de 8000 × 9000 mm.....	133
6.2.4.	Solution adoptée .....	135
CHAPITRE 7 VALIDATION DU PROTOTYPE .....		137
7.1.	Validation auprès de chercheurs .....	137
7.2.	Validation avec des professionnels praticiens.....	138
7.2.1.	Hélène Brisebois, SDKLBB .....	139
7.2.2.	Sylvie Boulanger, ICCA-Québec .....	141
7.3.	Retour sur les évaluations .....	142
CHAPITRE 8 SOMMAIRE, CONTRIBUTIONS ET RECOMMANDATIONS .....		144
8.1.	Sommaire .....	144
8.2.	Contributions principales de la recherche .....	147
8.2.1.	Revue de littérature .....	147
8.2.2.	Acquisition de connaissances en conception préliminaire de structures de bâtiments .....	147
8.2.3.	Définition de l'interaction entre l'ingénieur et un outil informatique .....	148
8.2.4.	Élaboration d'arbres de décisions pour la conception préliminaire des sous-systèmes horizontaux de la structure d'un bâtiment.....	148
8.2.5.	Réalisation d'un prototype.....	149

8.3. Recommandations pour les travaux futurs .....	149
8.3.1. Développement en collaboration avec un bureau d'ingénieurs.....	150
8.3.2. Élargissement de l'assistance .....	150
8.3.3. Interaction améliorée avec StAr .....	150
8.3.4. Personnalisation du DKM par l'ingénieur praticien.....	151
ANNEXE 1 Traduction française des termes anglophones utilisés dans la littérature .....	152
ANNEXE 2 Recueil des connaissances en conception préliminaire de structures de bâtiments.....	154
ANNEXE 3 Agrandi de l'arbre circulaire de DÉCISION amenant au choix des sous-systèmes horizontaux.....	187
ANNEXE 4 Définition des groupes utilisés pour la création des liens entre les nœuds pour la définition des éléments de bases pour deux sous-systèmes horizontaux .....	189
ANNEXE 5 Détails des attributs utilisés pour les systèmes de plancher implémentés .....	192
ANNEXE 6 Présentation des arbres de connaissances détaillés .....	201
ANNEXE 7 Présentation d'exemples de méthodes implémentées pour deux sous-systèmes structuraux de plancher .....	204
ANNEXE 8 Présentation des pages HTML présentant des conseils et informations sur la conception préliminaire .....	214
BIBLIOGRAPHIE.....	224

## LISTE DES TABLEAUX

	Page	
Tableau I	Exemple d'une proposition logique et conversion de phrases en propositions logiques .....	15
Tableau II	Illustration du principe du langage des prédictats et conversion de phrases en langage des prédictats .....	16
Tableau III	Exemple d'une règle avec une <i>partie gauche</i> et une <i>partie droite</i> .....	16
Tableau IV	Masse des poutrelles (en kg/m) en fonction de la charge pondérée et de la charge de service pour les poutrelles d'une portée de 4 mètres .....	107
Tableau V	Avantages, inconvénients et temps approximatif pour l'implémentation pour chacune des trois solutions pour le traitement des tableaux.....	110
Tableau VI	Traduction française des termes anglophones utilisés dans la littérature .....	153
Tableau VII	Portées économiques des systèmes structuraux en bois et estimation de la profondeur de structure nécessaire .....	166
Tableau VIII	Portées économiques des systèmes structuraux en acier et estimation de la profondeur de structure nécessaire .....	167
Tableau IX	Portées économiques des systèmes structuraux en béton et estimation de la profondeur de structure nécessaire selon Schodek (2004).....	168
Tableau X	Portées économiques des systèmes structuraux en béton .....	169
Tableau XI	Exemple de tables permettant d'évaluer le prix au pied carré d'un système structural en fonction des dimensions de la baie et des charges surimposées.....	170
Tableau XII	Sélection de l'épaisseur et de l'essence de bois du plancher pour la classe Select.....	173
Tableau XIII	Résistance pondérée de poutres composées.....	175
Tableau XIV	Résistances pondérées de poutre lamellé-collé .....	176
Tableau XV	Résistances pondérées pour poutre Parallam.....	177

Tableau XVI	Résistances pondérées pour poutre LVL.....	178
Tableau XVII	Résistance pondérée du tablier métallique (38 mm de profondeur) sans dalle de béton en fonction de son épaisseur et de la portée....	179
Tableau XVIII	Résistance pondérée du tablier métallique d'une profondeur de 14 mm en fonction de l'épaisseur de dalle, du treillis et de la portée.....	180
Tableau XIX	Masse (en kg/m) des poutrelles d'acier ajourées en fonction de leur portée, de leur profondeur et de leur résistance.....	181
Tableau XX	Épaisseur du système de dalle nervurée.....	185
Tableau XXI	Poids propre moyen du système à dalle nervurée en fonction de l'épaisseur de la dalle et la profondeur des nervures .....	186
Tableau XXII	Attributs utilisés pour la classe <b>SlabElement</b> relatifs aux connaissances .....	193
Tableau XXIII	Attributs utilisés pour la sous-classe DalleBetonTablierMetalPoutrellePoutreW .....	194
Tableau XXIV	Attributs utilisés pour la sous-classe DallePlateBetonAvecAbaque.....	197
Tableau XXVI	Attributs utilisés dans la sous-classe PlatelageBoisPoutrelleEtPoutreBois.....	199

## LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1	Analyse de lumière réalisée avec ECOTECT ..... 11
Figure 2	Génération du modèle 3D à partir des esquisses ..... 11
Figure 3	Concept du Virtual BuildingMC d'ArchiCAD : modèle 3D et génération automatique de plans 2D ..... 11
Figure 4	Fenêtre du logiciel ETABS montrant une modélisation 3D d'un bâtiment ..... 13
Figure 5	Modélisation 3D des connexions d'une structure d'acier (modèle vs réel) réalisée avec X Steel ..... 13
Figure 6	Composantes de bases d'un système basé sur des règles ..... 17
Figure 7	Contexte global de la recherche entourant le DKM ..... 49
Figure 8	Processus de conception préliminaire de la structure ..... 59
Figure 9	Arbre de décision développé par Gomez (1998) pour le choix des sous-systèmes structuraux horizontaux ..... 67
Figure 10	Arbre circulaire de décision amenant au choix des sous-systèmes horizontaux ..... 68
Figure 11	Arbre de décisions pour le choix des sous-systèmes verticaux ..... 70
Figure 12	Arbre de décision pour un système de dalle de béton reposant sur un tablier métallique supporté par des poutrelles ajourées d'acier ..... 72
Figure 13	Arbre de décision pour définir un système de dalle plate de béton avec abaque ..... 73
Figure 14	Arbre de décision pour un système de plancher de bois supporté par des poutres de bois ..... 74
Figure 15	Interface générale envisagée de l'espace de travail ..... 76
Figure 16	Fenêtres pop-up complémentaires à l'interface principale ..... 76
Figure 17	Esquisses architecturales d'une caserne de pompiers ..... 79
Figure 18	Demande d'informations nécessaires à la conception préliminaire ..... 80
Figure 19	Rafraîchissement après l'étape 1 ..... 81
Figure 20	Prise de décisions stratégiques: choix de l'acier et du béton comme matériau structural ..... 83

Figure 21	Regroupement de baies semblables formant des zones structurales .....	84
Figure 22	Fenêtre de dialogue permettant de déterminer la charge vive de la zone structurale.....	85
Figure 23	Mise en évidence des éléments verticaux dans StAr et suggestions basées sur les connaissances.....	87
Figure 24	Boîte de dialogue pour déterminer les charges permanentes additionnelles.....	88
Figure 25	Nœuds décisionnels applicables en fonction des décisions déjà prises et évaluation rapide du coût au pied carré .....	89
Figure 26	Évolution de l'interface en fonction des décisions prises.....	92
Figure 27	Suggestions pouvant affecter le choix de l'emplacement des contreventements .....	95
Figure 28	Architecture du prototype complet assistant la conception préliminaire de structures de bâtiments .....	99
Figure 29	Hiérarchie des classes des entités structurales.....	100
Figure 30	Hiérarchie des classes de décision.....	100
Figure 31	Architecture du module DKM .....	102
Figure 32	Exemple d'une boîte de dialogue utilisée pour déterminer le sens des poutrelles.....	106
Figure 33	Présentation d'un tableau sous forme de nœuds .....	108
Figure 34	Exemple d'un tableau traitant dynamiquement les informations.....	108
Figure 35	Dialogue présentant les éléments d'un tableau sous forme de menu déroulant.....	109
Figure 36	Exemple d' <i>infobulle</i> utilisée pour fournir une évaluation.....	111
Figure 37	Utilisation de la librairie JUNG pour le logiciel « Grape » .....	112
Figure 38	Utilisation de la librairie JUNG pour l'application « shiftTHINK Connect ».....	112
Figure 39	Définition des groupes et numéros de nœuds utilisés pour l'implémentation des liens entre les nœuds.....	114
Figure 40	Interface générale implémentée de l'espace de travail en mode DKM .....	116

Figure 41	Fenêtre après la réinitialisation des entités de la base de données de « Caché ».....	119
Figure 42	Session de conception : Détermination des charges permanentes additionnelles .....	125
Figure 43	Session de conception : Aucun sous-système bidirectionnel (ou unidirectionnel) n'est possible pour une portée de $3 \times 4$ mètres .....	126
Figure 44	Session de conception : Deux choix possibles et évaluations dans une <i>infobulle</i> .....	127
Figure 45	Session de conception : Évaluations pour le second sous-système (prix et profondeur du sous-système) .....	128
Figure 46	Session de conception : Conseil fourni à l'ingénieur à l'aide d'une <i>infobulle</i> pour le nœud décisionnel « Densité de béton faible » .....	129
Figure 47	Session de conception : Choix d'épaisseur de dalle de béton en fonction des décisions déjà prise pour le tablier métallique.....	130
Figure 48	Session de conception : Choix du sens de la portée des poutrelles .....	131
Figure 49	Session de conception : Choix de la profondeur des poutrelles à utiliser.....	133
Figure 50	Session de conception : Évaluations pour une baie de $8000 \times 9000$ mm.....	134
Figure 51	Session de conception : Évaluations des trois autres systèmes applicables .....	134
Figure 52	Session de conception : Choix de l'espacement des poutrelles .....	136
Figure 53	Exemple de technique pouvant être utilisée en présence de glissements entre unités .....	172
Figure 54	Système Gerber : proportions des porte-à-faux.....	181
Figure 55	Numérotation des groupes et nœuds utilisés pour l'implémentation du sous-système de dalle de béton sur tablier métallique supportés par des poutrelles d'acier ajourées et poutre en I.....	190
Figure 56	Numérotation des groupes et nœuds utilisés pour l'implémentation du sous-système de dalle plate de béton avec abaque.....	191

Figure 57	Sous-système de dalle de béton sur tablier métallique supporté par des poutrelles et poutres en I .....	202
Figure 58	Sous-système de dalle plate de béton avec abaque .....	203
Figure 59	Page HTML présentant l'information sur les structures unidirectionnelle et bidirectionnelle .....	215
Figure 60	Page HTML présentant les structures d'acier.....	216
Figure 61	Page HTML présentant les structures de béton .....	217
Figure 62	Page HTML présentant les structures de bois.....	218
Figure 63	Page HTML du sous-système nommé « dalle de béton sur tablier métallique supporté par des poutrelles d'acier ajourées et poutres en I .....	219
Figure 64	Page HTML du sous-système nommé « dalle de béton et tablier métallique composite sur poutres en I » .....	220
Figure 65	Page HTML du sous-système nommé « dalle plate de béton» .....	220
Figure 66	Page HTML du sous-système nommé « dalle plate de béton avec abaque» .....	221
Figure 67	Page HTML du sous-système nommé « dalle plate de béton nervurée» .....	222
Figure 68	Page HTML du sous-système nommé « platelage de bois sur poutrelles et poutres de bois».....	223

## LISTE DES GRAPHIQUES

	Page	
Graphique 1	Longueur maximale de bâtiment en fonction des changements de température prévus dans le bâtiment .....	156
Graphique 2	Évaluation de l'impact environnemental d'une construction avec le logiciel Athéna .....	159
Graphique 3	Construction d'une structure en béton comparativement à une structure en acier : (a) temps pour démarrer le projet, (b) comparaison des flux monétaires en dollars, (c) temps de construction en mois en fonction du nombre d'étages pour des édifices à bureaux.....	161
Graphique 4	Comparaison d'un bâtiment en acier et en béton : (a) hauteur totale d'un bâtiment de 10 étages, (b) effet de masse thermique des structures de béton comparées à celles en acier.....	161
Graphique 5	Estimation de la profondeur d'une poutre de bois plein en fonction de la portée.....	174
Graphique 6	Armature en kg/m <sup>2</sup> et épaisseur de la dalle plate de béton en fonction des portées de la baie et ce pour des charges vives de 2,4 kPa et 4,8 kPa.....	183
Graphique 7	Armature en kg/m <sup>2</sup> et épaisseur de la dalle plate de béton avec abaque en fonction des portées de la baie et ce pour des charges vives de 2,4 kPa et 4,8 kPa.....	184

## **LISTE DE POLICES DE CARACTÈRES UTILISÉES**

### **Courrier, 11 pt, Gras**

Identifie les classes provenant de la programmation orientée-objet.

### *Courrier, 11 pt, Italic*

Identifie les exemples de lignes de codes utilisés dans le prototype.

### *Arial, 11pt, Italic*

Identifie les mots présents dans le lexique des traductions anglais-français utilisées, présenté en annexe 1.

## **INTRODUCTION**

L'étape de la conception préliminaire est l'étape où l'ingénieur doit déterminer quels seront les systèmes structuraux et leurs configurations. Cette étape a énormément de répercussions sur le projet tout entier, car les décisions les plus importantes y sont prises. Pourtant, aucun logiciel commercial ne supporte cette étape préalable aux analyses détaillées qui peuvent être réalisées avec les logiciels existants.

L'objectif de ce mémoire est d'apporter un élément de solution à cette lacune et d'assister l'ingénieur dans la gestion et l'utilisation des connaissances nécessaires au raisonnement permettant de réaliser une conception préliminaire de structures de bâtiments. L'assistance sera limitée plus particulièrement à la conception préliminaire des sous-systèmes horizontaux puisque le temps n'a pas permis de couvrir davantage d'aspects et que la conception des éléments horizontaux est une importante étape de la conception préliminaire de structures de bâtiments.

Le premier chapitre présente une revue de la littérature pour démontrer l'ampleur des recherches déjà effectuées dans le domaine de l'aide à la conception préliminaire de structures de bâtiments. L'état de l'art en cette matière y est clarifié. La méthodologie de recherche adoptée, propre au développement d'outils logiciels, est ensuite définie au chapitre 2. Le chapitre 3 décrit quels sont les moyens qui ont été mis de l'avant afin de constituer et organiser une base de connaissances en conception préliminaire de structures de bâtiments. Le chapitre 4 se concentrera quant à lui à définir les spécifications pour créer un module de gestion des connaissances en conception de structures. Le chapitre 5 présente l'implémentation du prototype, programmé en Java, et communiquant avec une base de données orientée objet. Le manuel de l'utilisateur de ce prototype est présenté dans le chapitre 6 suivi d'un exemple d'une session de conception détaillée montrant en détail comment l'ingénieur peut interagir avec le prototype. Finalement, le chapitre 7 présente une brève évaluation du prototype par des chercheurs et des praticiens. Une conclusion vient ensuite souligner les points abordés dans ce mémoire en plus de définir les contributions de cette recherche et les avenues futures en recherche.

## **CHAPITRE 1**

### **REVUE DE LA DOCUMENTATION**

Les recherches portant sur la conception préliminaire de structures diffèrent des recherches traditionnellement faites en ingénierie des structures. Ces dernières se sont concentrées sur l'étude du comportement fondamental de structures et le développement d'outils d'analyses numériques, lesquelles requièrent une description complète de la structure par l'utilisateur. Contrairement à ces dernières, les recherches portant sur la conception préliminaire se sont concentrées davantage sur la représentation formelle de la forme structurale des bâtiments et l'utilisation d'heuristiques. Elles ont tenté de recueillir les connaissances des ingénieurs praticiens. C'est dû à cette différence dans l'objectif des recherches, que les recherches en conception préliminaire n'auraient encore pas suffisamment évolué (Fuyama et coll., 1997).

La conception préliminaire de structures de bâtiments a toutefois été ciblée depuis déjà très longtemps par différents projets de recherche. Avec l'introduction de l'intelligence artificielle dans les années 1960, l'attention a pu être portée à des problèmes structuraux plus généraux que ceux qui pouvaient déjà être résolus auparavant avec des logiciels performants d'analyses mathématiques (Fenves, 1966).

Le présent chapitre a pour but de mettre en relief les différentes recherches ayant été faites, de déterminer l'état d'avancement en matière de conception préliminaire et d'établir quelle pourrait être la voie à suivre pour continuer l'avancement de la recherche dans le domaine de l'assistance à la conception préliminaire de structures de bâtiments. Tout d'abord, le processus de réalisation d'un bâtiment sera décrit afin de bien cerner quelle étape est ciblée par la présente recherche. Ensuite, on se doit de décrire les logiciels utilisés par les ingénieurs praticiens se doivent d'être décrits afin d'identifier quels sont les manques inhérents en matière d'assistance à la conception préliminaire. Suivra la mise en évidence de la tendance à la modélisation en 3D qui se généralise dans le domaine de la conception de bâtiments. Pour débuter la description des recherches en conception préliminaire de structure, différentes méthodes de

représentation des connaissances utilisées pour la création de prototypes seront décrites. Suivra une présentation des prototypes réalisés. Ensuite, la recherche des connaissances, une étape cruciale du développement d'un prototype, sera abordée. Finalement, une description de l'état de l'art en matière de conception préliminaire de structures de bâtiments conclura ce chapitre.

### **1.1. Définition du processus de réalisation d'un bâtiment et situation de la conception préliminaire**

Le processus de réalisation d'un bâtiment contient plusieurs étapes importantes qui se doivent d'être définies de façon à saisir où se situe exactement la conception préliminaire. Habituellement, trois étapes majeures peuvent être identifiées dans un processus de conception traditionnel : la phase décisionnelle, la phase de conception et la phase de construction (Rivard et coll., 1995).

#### **1.1.1. Phase décisionnelle**

Un propriétaire a d'abord le désir de faire construire un bâtiment pour ses activités. Il commande parfois une étude de faisabilité pour déterminer le besoin et la faisabilité de la construction d'une installation. Si cela est confirmé, un programme architectural est préparé. Le programme est la compilation des buts du propriétaire, de ses objectifs et exigences tout en décrivant les fonctions et installations pouvant les assister. Le propriétaire détermine quels sont ses critères de performance, d'opération et de qualité qu'il désire tout en préparant un budget pour le projet. Une équipe de design peut ensuite être engagée par le propriétaire (Rivard et coll., 1995). Celui-ci donne souvent le mandat à l'architecte de trouver les autres professionnels nécessaires ou il est possible de procéder par un concours de soumission. À ce stade du projet, aucun design n'a été effectué.

#### **1.1.2. Phase de conception**

La phase de conception peut à nouveau être subdivisée en trois étapes. En architecture, ces étapes sont appelées : esquisses, projet préliminaire et projet définitif (Institut royal d'architecture du Canada & Programme canadien d'aide à la pratique de l'architecture, 1999). En structure, leurs équivalents sont respectivement la conception

préliminaire (conceptual design), la conception définitive (preliminary design) et la conception détaillée (detailed design). Pendant la conception préliminaire, des décisions majeures sont prises concernant le type de bâtiment, l'affectation des locaux, la forme, les dimensions et le type de système structural. Plusieurs alternatives peuvent être générées et évaluées de façon sommaire (Rivard et coll., 1995). Tandis que l'architecte a la tâche d'organiser le bâtiment en fonction du programme architectural, l'ingénieur en structure est appelé à réaliser une conception préliminaire laquelle peut être définie ainsi :

« [...] consiste à sélectionner de façon préliminaire les matériaux, sélectionner la forme structurale du bâtiment, produire un dimensionnement sommaire de la position des éléments structuraux et considérer les possibilités technologiques. Les décisions sont faites sur la base d'informations telles : la hauteur du bâtiment, l'usage du bâtiment, les charges vives typiques, la vélocité du vent, la charge de séisme, la période fondamentale du bâtiment, l'accélération pour laquelle le design doit être fait, la déflexion latérale maximale, les portées, la hauteur d'étage à étage, et autres exigences du client. » (Soibelman & Pena-Mora, 2000).<sup>1</sup>

La conception préliminaire du bâtiment est ensuite soumise au client à l'aide de plusieurs esquisses. Des correctifs peuvent être apportés aux propositions faites jusqu'à l'acceptation du client.

Vient ensuite la conception définitive qui consiste à détailler davantage la proposition faite au client. La conception du bâtiment est développée avec plus de détails, par l'architecte et les consultants, et est évaluée afin d'obtenir une solution optimale. L'ingénieur en structure sera appelé à faire des analyses structurales et le design des principaux éléments structuraux tels dalles, poutres, colonnes, murs et fondations en leur donnant des dimensions préliminaires (Rivard et coll., 1995). Les ingénieurs en mécanique donnent aussi des spécifications à l'architecte concernant les emplacements et dimensions de vides techniques importants et autres exigences concernant les services mécaniques du bâtiment. L'ingénieur en structure peut être

---

<sup>1</sup> Traduction libre.

concerné par les spécifications faites par l'ingénieur en mécanique. Une fois que l'essentiel du projet a été défini par l'architecte et ses consultants, des dessins préliminaires et des spécifications couvrant chacun des domaines professionnels sont émis. Ces documents sont ensuite remis à un estimateur qui fournira une évaluation des coûts du projet.

Finalement, la conception détaillée vise à produire toute l'information nécessaire pour réaliser la construction du bâtiment. L'architecte complétera l'arrangement détaillé des pièces et les ingénieurs réaliseront des analyses plus précises afin de confirmer ou modifier les dimensions préliminaires déjà établies. Une fois complétée, l'information est transmise sous forme de dessins et spécifications qui seront compris dans les documents contractuels liant le propriétaire à l'entrepreneur général.

### **1.1.3. Phase de construction**

L'entrepreneur général s'occupe de la construction du bâtiment et est habituellement responsable de fournir un échéancier de la réalisation de la construction. L'architecte peut être responsable de faire le lien entre l'entrepreneur général et les autres professionnels impliqués dans le projet lorsqu'il y a des changements à effectuer sur le projet. Les différents professionnels peuvent être appelés à faire la surveillance des travaux afin de vérifier leur conformité avec les plans émis. Suite à la mise en service et à l'acceptation des travaux par les professionnels, le bâtiment peut être livré au client (propriétaire).

La présente recherche cible la phase de conception et plus particulièrement la conception préliminaire. Dans un projet, c'est lors de cette étape que les décisions ayant le plus d'impacts sont prises (Lofqvist, 1994). De plus, tel qu'il sera vu dans les prochaines sections du présent chapitre, bien que l'informatique soit maintenant d'une grande utilité pour faire des analyses détaillées du comportement de la structure face à de multiples sollicitations et préparer des dessins détaillés, l'assistance informatique est quasi inexistante pour la conception préliminaire, qui est, tel que mentionné, la phase la plus décisive du projet.

## 1.2. Logiciels existants pour la conception structurale

La conception structurale est présentement grandement assistée par des logiciels d'analyses spécialisées. Ces logiciels, déjà largement utilisés dans les bureaux de génie-conseil, aident significativement les concepteurs dans leurs tâches quotidiennes. En plus d'accélérer leur travail, ces logiciels peuvent prédire, de façon précise, le comportement de structures complexes, ce qui apporte à l'ingénieur concepteur davantage de confiance, et ce, même avec moins de marges de sécurité.

Cette section présente différents outils utilisés pour la conception structurale. Leurs caractéristiques générales sont expliquées brièvement ainsi que les étapes de la conception qui sont couvertes par les logiciels utilisés.

Une série de logiciels, pouvant réaliser rapidement des calculs précis pour une structure complète, ont été créés au cours des dernières années. Différents éditeurs de logiciel ainsi que leurs produits sont présentés ici.

« Computers & Structures Inc. », de Californie, a développé un ensemble de logiciels couvrant une grande partie du processus de conception, allant de la conception détaillée à la réalisation des dessins nécessaires à la construction du bâtiment : ETABS, SAFE et DETAILER. Avec ETABS, il est possible de modéliser une structure complète en trois dimensions à l'aide de fonctionnalités facilitant la modélisation. Il est possible d'importer des dessins faits à l'aide d'AutoCad<sup>MC</sup> vers ETABS, ce qui peut en faciliter la modélisation à partir des dessins architecturaux réalisés sur AutoCad<sup>MC</sup>. ETABS peut faire des analyses statiques et dynamiques pour des structures d'acier et de béton, pour des poutres composites, pour des murs de cisaillement, etc.. Les résultats peuvent se limiter à l'enveloppe des forces générées dans la structure pour différentes combinaisons de charges. Toutefois, le logiciel peut aussi faire la conception en fonction des codes en vigueurs. Il est aussi possible de faire l'optimisation d'une conception faite manuellement. Par conception ici, on veut dire la sélection des sections. SAFE réalise l'analyse de dalles et de poutres par la méthode des éléments finis. Il peut faire la conception de l'armature de la dalle et des poutres, et ce, autant pour la résistance en flexion que pour la résistance en cisaillement. SAFE génère

automatiquement le maillage des éléments finis. Il est aussi possible de modéliser les joints sismiques ainsi que les joints de dilatation. DETAILER prend les résultats provenant de SAFE et peut produire automatiquement tous les plans nécessaires à la construction : spécification de l'acier d'armature, dimensions, etc. (Computers & Structures Inc., 2005).

D'autres logiciels se sont aussi distingués tel SAFI, un logiciel canadien. Surtout spécialisé dans les structures d'acier, on peut réaliser automatiquement le dimensionnement des membrures ou la vérification d'une conception, tout comme avec ETABS. La modélisation de structures de béton est aussi possible ainsi que la conception automatique de l'acier d'armature. L'analyse peut se faire en deux dimensions ou en trois dimensions. L'analyse statique et l'analyse dynamique sont possibles. Comme les logiciels décrits précédemment, une bibliothèque de sections est contenue dans le logiciel de façon à accélérer la modélisation (SAFI Quality Software Inc., 2005).

Plusieurs autres logiciels offrant des fonctionnalités semblables peuvent être nommés. Parmi ceux-ci, on peut noter : la série de logiciels pcaStructure Point, dont pcaSlab et pcaBeam (pcaStructure Point, 2005), spécialisé dans les structures de béton; VisualDesign (CivilDesign inc., 2005), un logiciel canadien souvent utilisé dans l'industrie pour l'analyse sismique; STAAD.Pro (Reiworld.com, 2005), populaire pour la modélisation 3D et l'analyse de structure utilisant la combinaison de matériaux. Finalement, Ram Structural system (Ram International, 2005) peut faire les mêmes analyses que les précédents logiciels et prétend augmenter grandement la productivité par l'intégration des modules du logiciel permettant la conception du bâtiment, l'analyse et le dessin. GT-STRU\_DL, comptant plus de 30 années d'existence, est un autre logiciel utilisé par des milliers d'ingénieurs à travers plus de 30 pays (Georgia Tech Research Corporation, 2006).

L'étape précise où l'ingénieur choisit le type de système structural est décisive. Il peut être difficile de recommencer une conception préliminaire causant problème lorsqu'un projet est avancé. Un nouveau type de structure peut causer des changements dans

les portées, les dégagements nécessaires, les considérations d'ordre architecturales, et autres. Bref, il est rare que le type de structure choisi au départ d'un projet soit changé en cours de conception même s'il est trouvé par la suite inapproprié. Toutefois, de mauvais choix préliminaires peuvent causer des problèmes lors de la conception détaillée (Dekker, 2000). Les logiciels décrits n'assistent toutefois pas cette étape. Les manques inhérents en matière de conception préliminaire sont identifiés ici.

Premièrement, bien que les logiciels décrits couvrent une vaste gamme d'analyses et vont même jusqu'à réaliser les dessins nécessaires à la construction, aucun des logiciels ne guide l'utilisateur pour le choix du type de structure, des matériaux, de l'emplacement des éléments structuraux, etc. Les ingénieurs considèrent parfois faire de la conception préliminaire avec ces logiciels de conception détaillée : ils entrent les données d'une partie d'un système structural et, par un cycle d'essais erreurs, ils arrivent à trouver l'optimum pour un type de structure en particulier (Parent, 2004). Ils peuvent ainsi avoir une épaisseur de dalle approximative, une hauteur d'abaque, etc. L'ingénieur doit faire appel à ses connaissances afin de modifier les dimensions, ajouter des éléments ou utiliser un nouveau système structural afin que la structure puisse être satisfaisante. Les logiciels commerciaux disponibles auraient donc une lacune, celle de ne pas assister l'utilisateur lors de la conception préliminaire.

Deuxièmement, les logiciels présentés offrent parfois un gabarit de départ pour les différents types de structures. Toutefois, la philosophie générale de ces logiciels est d'abord une *approche ascendante*<sup>2</sup>, c'est-à-dire qu'il faut définir le modèle élément par élément pour arriver à un modèle complet de bâtiment. L'*approche descendante* est davantage utilisée en conception préliminaire, car elle vise à prendre le bâtiment complet d'abord et de le subdiviser en systèmes, sous-systèmes, assemblages, et ainsi de suite afin d'en faire la conception de plus en plus en détail. L'approche de modélisation élément par élément est donc une autre lacune identifiée dans les logiciels présentés.

---

<sup>2</sup> Voir annexe 1 pour connaître le mot anglophone habituellement utilisé dans la littérature.

Troisièmement, il serait préférable que l'architecte puisse inclure des considérations structurales dès les premières explorations de conception (Mora et coll., 2005) ce que les logiciels présentés font peu. En effet, l'ingénieur doit pouvoir donner à l'architecte des informations sur la structure qui serviront grandement à l'organisation du bâtiment. Les logiciels présentés assistent peu cette étape très importante. Avec les outils présents, il est difficile de partir de l'architecture et faire une conception et analyse préliminaire de la structure tôt dans le processus. Donc très souvent, on attend plus tard dans le processus quand l'architecture est plus fixée, ce qui cause un manque d'intégration.

### **1.3. Tendance à la modélisation en trois dimensions**

Le passage de la table à dessin au dessin assisté par ordinateur en deux dimensions (2D) peut être considéré comme une étape intermédiaire menant vers la modélisation en trois dimensions (3D) des bâtiments (Sacks et coll., 2004). Les logiciels de dessins 2D ne peuvent détecter les conflits d'espaces, les composantes manquantes, les connexions incompatibles, les incompatibilités entre plusieurs dessins, les configurations impossibles et autres erreurs relatives à la conception (Gallaher et coll., 2004). La modélisation en 3D est de plus en plus utilisée dans l'industrie de la construction. En effet, certains intervenants font appel à divers modèles en 3D, afin de réaliser leurs activités respectives avec l'aide de l'ordinateur. Les bénéfices à court terme dus à la réduction du temps de dessin sont évalués à 80 - 84%. La réduction des coûts d'ingénierie est évaluée à 35 - 51%. Finalement, la réduction totale par rapport à l'ensemble du projet est évaluée à 2,5 à 6,7 %. (Sacks, 2004).

Diverses modélisations 3D sont faites au cours du processus de réalisation d'un bâtiment. Ces modélisations sont rarement partagées et ceci souligne un manque d'interopérabilité des logiciels utilisés dans le domaine de la construction de bâtiments. Un rapport a été présenté sur ce que l'interopérabilité inadéquate provoque dans l'industrie de la construction. Ce problème peut amener à ne pas considérer certaines possibilités qui auraient pu résulter en des bénéfices importants autant pour l'industrie de la construction que pour les propriétaires. Les coûts associés à ce manque d'interopérabilité ont été estimés de façon conservatrice à \$15.8 milliards par année

dans la construction de bâtiments industriels aux États-Unis (Gallaher et coll., 2004). La modélisation 3D pourrait être appelée, dans un futur rapproché, à résoudre en partie ce manque d'interopérabilité puisque de plus en plus, les différents intervenants utilisent les modélisations 3D.

Une solution qui tente présentement de conquérir le monde de la construction est l'utilisation du protocole IFC (Information for Construction) développé par l'IAI (International Alliance for Interoperability (IAI), 2006).

L'institut américain de la construction en acier a reconnu les bénéfices potentiels d'un standard d'échange de données 3D dès la fin des années 1990. C'est pourquoi le modèle CIS/2 a été adopté par l'industrie de l'acier aux États-Unis (CIS/2, 2006). Un des bénéfices à travailler au sein d'un même modèle est le fait que l'information se retrouve à un seul endroit, ainsi l'architecte ne peut montrer une colonne d'une dimension différente que celle décrite par les plans d'ingénieurs. On peut trouver plusieurs raisons pour l'ingénieur d'adhérer au processus incluant un modèle en 3D : 1- Implication de l'ingénieur dès le départ du projet, 2- Une relation plus proche de l'ingénieur avec les fabricants, 3- Une meilleure communication réduisant les répétitions des tâches suite à des erreurs, 4- L'intégration avec les firmes de services mécaniques, 5- Amélioration de la planification des travaux, 6- Moins de questions nécessaires entre les intervenants, 7- Économie de ressources humaines, car les projets avancent plus rapidement, 8- Meilleure information des données du projet, 9- Meilleure productivité (Carrato & Holland, 2004).

Présentement, il est rare que l'architecte utilise des modèles en 3D comme documents officiels de communications avec les autres intervenants d'un projet. Toutefois, l'architecte imagine son bâtiment en 3D, le modélise parfois même en 3D pour lui-même afin de mieux visualiser certains détails ou pour son client qui a parfois de la difficulté à se faire une image 3D claire à partir de plans 2D. Aussi, en utilisant une modélisation 3D, des logiciels peuvent fournir diverses évaluations : par exemple ECOTECT (voir figure 1) peut réaliser des analyses thermiques ou des analyses d'éclairage par rapport à l'emplacement d'un site, de la forme du bâtiment et autre. Les

recherches effectuées par le groupe de recherche LUCID, ont identifié le besoin de modéliser en 3D et c'est pourquoi EsQUIsE, un interpréteur géométrique de l'esquisse architecturale descriptive, qui sera décrit dans la sous-section 2.2.2, fournit une modélisation 3D effectuée à partir des plans de chacun des étages (voir) (Juchmes et coll., 2005). ArchiCAD est un logiciel présentement utilisé par les architectes qui vise à utiliser la modélisation 3D pour réaliser, à l'aide d'extensions, différentes analyses, telles des analyses énergétiques, et permet la mise en plan 2D automatique du modèle 3D (voir figure 3).

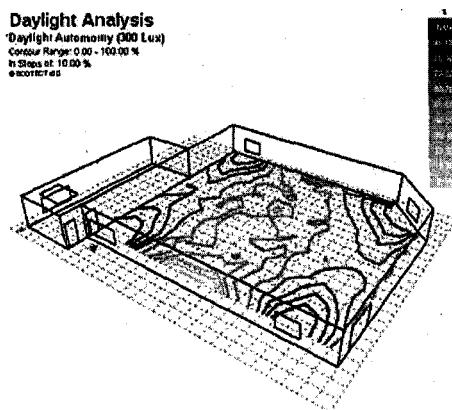


Figure 1 Analyse de lumière réalisée avec ECOTECT  
U.S. Dep. of Energy, 2006 )

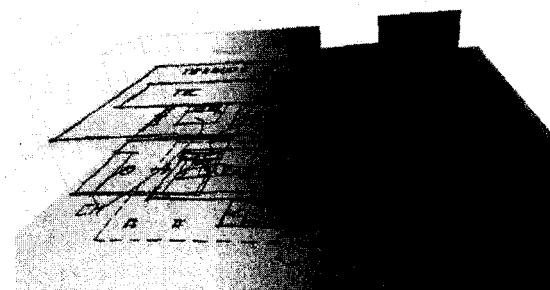


Figure 2 Génération du modèle 3D à partir des esquisses  
(Juchmes et coll., 2005)

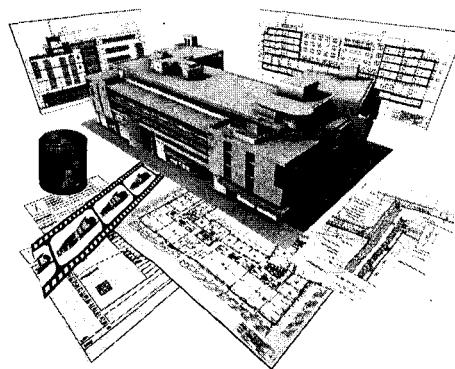


Figure 3 Concept du Virtual Building<sup>MC</sup> d'ArchiCAD :  
modèle 3D et génération automatique de plans 2D  
(Graphisoft, 2005)

Habituellement, c'est l'architecte qui se charge de faire la coordination des différents plans des professionnels. Cette tâche est importante et coûteuse, car beaucoup de temps doit y être consacré. NavisWork (NavisWork, 2006) permet de faire une analyse supplémentaire à partir d'un modèle 3D consistant à détecter les conflits d'espace des différents services du bâtiment. Une telle analyse a été utilisée pour le projet du Terminal 5 du British Airport Authority (BAA) à Heathrow, en Angleterre. Il a été évalué que cette méthode d'analyse permettra une réduction estimée à 10% du coût du projet (Stansfield, 2004). L'approche 3D a aussi été utilisée par Maher et coll. (2005) où la conception réalisée à l'aide de différents intervenants est possible grâce à des agents qui interagissent avec leur environnement de façon à faciliter la collaboration en temps réel.

Du point de vue d'un ingénieur en structure, il peut parfois sembler long et impertinent de modéliser de façon précise en 3D, dû au fait que plusieurs changements architecturaux sont à prévoir durant le projet. Les modifications à effectuer au modèle s'ajoutent donc au temps requis pour la modélisation. Malgré ce fait, la modélisation 3D est souvent utilisée pour analyser le comportement face aux séismes, ce qui ne nécessite toutefois pas une modélisation détaillée de toute la structure (Parent, 2004). Cependant, en discutant avec divers ingénieurs, on peut comprendre que certains d'entre eux modélisent de façon détaillée le bâtiment afin de pouvoir utiliser directement les efforts calculés dans les différents éléments structuraux. Pour la plupart des logiciels d'analyses présentés à la section précédente, il est présumé qu'une modélisation 3D est faite afin de pouvoir profiter de tous les avantages offerts par le logiciel. Les ingénieurs utilisent donc présentement ces logiciels à divers degrés, chacun ayant un niveau de confiance variable en ce qui concerne leur utilisation.

Les fabricants d'acier utilisent les modélisations 3D depuis plus d'une décennie. Si les concepteurs de la structure utilisaient un modèle 3D pour réaliser leur conception qu'il pourrait retransmettre aux fabricants d'acier, l'information serait comprise plus facilement, réduisant le nombre de questions techniques posées aux concepteurs par

les fabricants, et réduirait aussi le temps passé à modéliser de nouveau la structure (Voir figure 5).

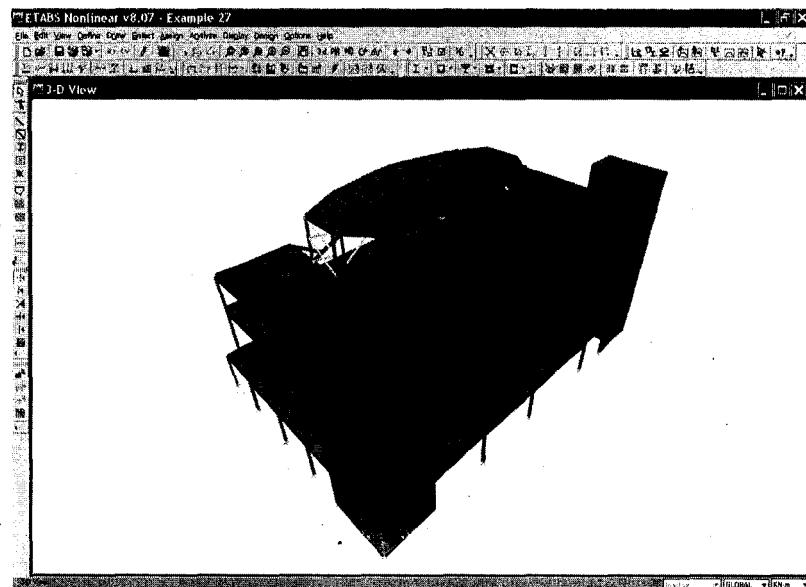


Figure 4 Fenêtre du logiciel ETABS montrant une modélisation 3D d'un bâtiment  
(Computers & Structures Inc., 2005)

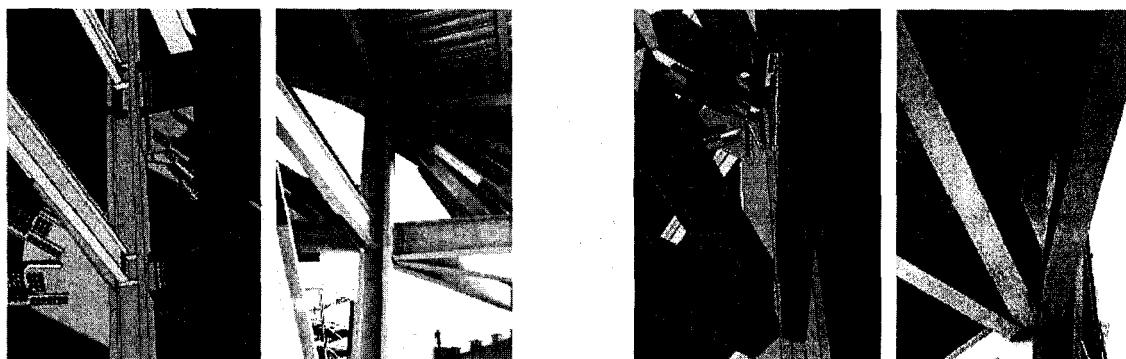


Figure 5 Modélisation 3D des connexions d'une structure d'acier (modèle vs réel)  
réalisée avec X Steel (Online Steel Detailing, 2006)  
(Burns, 2004)

Après la phase de conception du bâtiment, la planification des étapes de construction peut utiliser la modélisation 4D, qui intègre la planification des travaux en fonction du temps, et une modélisation 3D. La modélisation tient compte des éléments à mettre en

place ainsi que de la machinerie telle les grues, afin de détecter des interférences entre chacun d'eux. Depuis les années 1990, un intérêt grandissant a été porté à cette façon de faire et des logiciels commerciaux deviennent de plus en plus accessibles (Heesom & Mahdjoubi, 2004; Ma et coll., 2005).

La modélisation 3D est de plus en plus utilisée par les divers intervenants en construction. On peut donc croire que les recherches sur la conception préliminaire de bâtiment peuvent utiliser la modélisation en 3D sans pour autant être inapplicable à la pratique de la conception structurale. La modélisation 3D ne sera pas appelée à disparaître, mais bien au contraire à être de plus en plus utilisée et partagée par les différents intervenants. De plus, la puissance informatique et logicielle augmente rapidement, ce qui facilitera davantage la réalisation d'analyses complexes à partir du 3D.

#### **1.4. Représentation des connaissances**

Le domaine de l'intelligence artificielle a donné naissance à une multitude de méthodes pour représenter les connaissances. Ainsi, plusieurs façons d'approcher le problème de la représentation des connaissances existent et doivent être présentées.

##### **1.4.1. Logique formelle**

Les systèmes de *logique formelle* sont basés sur un langage mathématiquement précis qui permet de déduire de nouveaux faits cohérents à partir de ceux déjà présents dans le système. Un grand nombre de déductions peuvent être faites à partir d'une base de connaissances d'envergure. Plusieurs façons de diriger les déductions peuvent être utilisées dont la *recherche en largeur d'abord* (breadth-first search) et la *recherche en profondeur* (depth-first search). Pour expliquer ces deux méthodes d'exploration, il faut voir l'espace solution comme étant un arbre de décisions. La *recherche en largeur d'abord* consiste à mener la recherche sur tout un niveau avant de passer au second niveau dans tout l'arbre de décision. La *recherche en profondeur* consiste, quant à elle, à faire une recherche en se rendant jusqu'au bout d'une branche de l'arbre de décisions avant de passer à une autre branche (Dym & Levitt, 1991).

Deux systèmes de *logique formelle* peuvent être définis soit la *logique propositionnelle* et le *langage des prédictats du premier ordre*. Avec la *logique propositionnelle*, on peut déduire la véracité ou la fausseté d'une expression en sachant la vraie valeur des propositions contenues à l'intérieur de celles-ci. Les propositions, affirmations simples qui ne peuvent être séparées, sont liées à l'aide de connecteurs tels « et, ou, ne [...] pas ». Le Tableau I illustre le principe de proposition logique où il est possible de déduire la troisième phrase des deux premières.

Tableau I

Exemple d'une proposition logique et conversion de phrases en propositions logiques

Phrases en français	Propositions logiques
ST-LAURENT A FOURNI LE BÉTON OU LAFARGE A FOURNI LE BÉTON ST-LAURENT N'A PAS FOURNI LE BÉTON LAFARGE A FOURNI LE BÉTON	P = ST-LAURENT A FOURNI LE BÉTON Q = LAFARGE A FOURNI LE BÉTON $\rightarrow P \vee Q$ $\rightarrow \neg P$ $\rightarrow = Q$

Avec le *langage des prédictats du premier ordre*, on vient améliorer la représentation en ajoutant, aux concepts de propositions et connecteurs, les notions de fonctions, prédictats, variables et quantificateurs. Les prédictats insèrent un fait, qui peut être une action ou une relation, agissant sur une entité qui est appelée argument. Les fonctions, quant à elles, peuvent servir à définir la façon d'obtenir la valeur d'un argument. La notion de variable utilisée est la même que pour l'algèbre. Ainsi, une variable peut avoir différentes valeurs pour différentes situations. Les quantificateurs servent à déterminer la portée des variables. Le Tableau II illustre le principe du langage des prédictats où il est possible de déduire la troisième phrase des deux premières.

Tableau II

Illustration du principe du langage des prédictats  
et conversion de phrases en langage des prédictats

Phrase en français	Langage des prédictats
TOUTES LES POUTRES SONT RIGIDES B1 EST UNE POUTRE	$\rightarrow \forall x : \text{poutre}(x) \rightarrow \text{rigide}(x)$ $\rightarrow \text{poutre}(B1)$
DONC B1 EST RIGIDE	$\rightarrow \text{rigide}(B1)$

#### 1.4.2. Représentation basée sur des règles

Il a été trouvé par Brownston et coll. (1985) et Buchanan et Shotliffe (1984) que les experts raisonnent souvent en terme de règles « situation – action » qui définissent quelles actions doivent être prises dans telles situations.

Une règle est définie par deux séries d'arguments. La première série définit l'applicabilité de la règle et est appelée *partie gauche*, tandis que la *partie droite* représente les actions à effectuer si la *partie gauche* est applicable (Voir Tableau III).

Tableau III

Exemple d'une règle avec une *partie gauche* et une *partie droite*

*(Partie gauche)*

SI        UNE STRUCTURE EST MINCE (DANS LA DIMENSION Z)  
 ET        LA CHARGE SUR LA STRUCTURE EST DANS LA DIRECTION Z;  
 ET        IL N'Y A PAS D'AUTRE CHARGE SIGNIFICATIVE;

*(Partie droite)*

ALORS    LA THÉORIE DES PLAQUES (FLEXION) PEUT ÊTRE UTILISÉE  
POUR DÉCRIRE LE COMPORTEMENT DE LA STRUCTURE.

(Adapté de Dym & Levitt, 1991)

Dans ce type de système, les méthodes d'enchaînement de règles sont le *chaînage avant* et le *chaînage arrière*. On parle de *chaînage avant* lorsqu'une règle applicable est activée et que l'action qui est associée est exécutée. À l'inverse, lorsqu'on détermine un but (une action à exécuter) avant d'avoir vérifié la disponibilité des données nécessaires à l'application de règles, on parle de *chaînage arrière*. Il est préférable que les règles soient organisées par objets ou par sujets de façon à faciliter les recherches éventuelles de règles particulières. Il existe des règles appelées « métarègles » qui peuvent dicter aux règles comment utiliser les connaissances qui y sont encapsulées (Dym & Levitt, 1991).

Avec l'augmentation du nombre de règles, des conflits peuvent apparaître lorsque plusieurs règles deviennent applicables en même temps. Pour régler ces conflits, différents types de priorités peuvent être établis. Il est possible de donner une importance numérique à une règle ou une donnée lors de leur écriture. Un autre type de priorité consiste en l'activation de la règle la plus spécifique. Le dernier type consiste en l'activation de la règle ayant déjà été activée le plus récemment ou celle qui correspond aux données ayant été ajoutées ou modifiées le plus récemment (*recherche en largeur d'abord*).

Un système basé sur les connaissances est constitué de trois composantes de base. Une base de connaissances emmagasine les connaissances du domaine tandis qu'un contexte contient les données entrées par l'utilisateur et les mises à jour produites par les règles. De plus, un moteur d'inférence utilise les types de priorités déjà expliqués pour régler les conflits entre les règles et sélectionner la prochaine règle applicable (voir figure 6).



Figure 6 Composantes de bases d'un système basé sur des règles  
(Adapté de Maher & American Society of Civil Engineers, 1987)

Une force des systèmes basés sur les règles est l'aspect de la modularité. En effet, les connaissances sont séparées du module de contrôle, facilitant ainsi l'ajout ou la modification de connaissances. En contrepartie, différents problèmes peuvent survenir suite à l'utilisation de plusieurs sources d'informations. Notons le manque de complétude des informations, l'agrégation ou la combinaison de plusieurs informations de sources différentes, et l'imprécision inhérente au langage de la représentation (Dym & Levitt, 1991).

#### 1.4.3. Programmation orientée objet

La programmation orientée objet est apparue en 1970 et est maintenant la méthode de programmation privilégiée par les développeurs (Dubois, 2003).

« La réutilisabilité logicielle [laquelle est simplifiée par la programmation orientée objet] épargne bien du temps de développement des programmes. Elle encourage l'exploitation de logiciels de haute qualité, établis et débogués, réduisant la probabilité des problèmes lors de la mise en production des systèmes. » (Deitel & Deitel, 2002)

L'orienté objet peut être résumé par les quatre concepts suivants : la classe, l'objet, l'héritage et le polymorphisme. « Une classe est une abstraction, une description commune de plusieurs objets de même type, de même genre. » (Dubois, 2003). Par exemple, une classe pourrait être faite pour représenter tous les avions, qui ont tous un nombre de passagers, un moteur, et peuvent tous décoller, atterrir, etc. Les deux actions de l'exemple sont des méthodes, ou procédures, déclarées dans la classe, qui servent à décrire le comportement de l'objet et sont applicables à n'importe quelle instance de la classe.

Un objet, aussi appelé instance, représente un objet de la vie réelle ou un concept; « C'est un paquet, un module contenant à la fois : 1. Des variables (données). 2. Des méthodes (fonctions). » Par exemple, un objet « avion » pourrait être créé pour l'Airbus 380. Celui-ci aurait un nombre de passagers défini, et autres caractéristiques propres à cet objet. Une variable ou variable d'instance, sert à définir l'état de l'objet. Ainsi, le nombre de passagers, de l'exemple, serait une variable (Dubois, 2003).

« L'héritage permet la création de nouvelles classes à partir d'anciennes en absorbant leurs attributs et leurs comportements, tout en ajoutant les fonctionnalités particulières dont les nouvelles classes ont besoin » (Deitel & Deitel, 2002). Par exemple, on pourrait créer une classe **PoutreBéton** qui hériterait de la classe **Materiau** utilisée comme matériaux.

L'héritage peut être simple ou multiple. Il est simple lorsqu'une classe hérite d'une seule classe et multiple lorsqu'elle hérite de plusieurs classes. Bien que l'héritage multiple puisse être utile comme dans l'exemple qui suivra, ce ne sont pas tous les langages qui le permettent. Le C++ le permet tandis que le langage Java ne le permet pas, mais fournit le concept d'interface pour palier ce manque. Une interface peut être vue comme une classe dont toutes les méthodes sont abstraites, c'est-à-dire qu'elles n'ont pas de variables ni de code. « L'interface représente des déclarations sans implémentation, une sémantique » (Dubois, 2003). L'héritage multiple pourrait être utile dans la situation suivante où la **PoutreBéton** hérite de la classe **Materiau** qui lui fournit les propriétés du béton utilisé, mais a aussi besoin de la classe **ComposantesStructurales** qui lui fournit la charge horizontale et finalement la classe **ComposantesBatiment** qui lui fournit le temps de préfabrication de l'objet (Dym & Levitt, 1991).

Le polymorphisme est aussi un concept important de l'orienté objet. « Le polymorphisme est la possibilité de voir une instance d'une classe comme si c'était une instance d'une de ses surclasses » (Dubois, 2003). Cela amène comme avantage que l'on peut se permettre d'écrire les programmes de façon générique afin d'éviter d'avoir à considérer les cas particuliers (Deitel & Deitel, 2002). Pour poursuivre l'exemple de la poutre de béton, on pourrait voir la poutre de béton comme sa surclasse **Materiau**. Ainsi, on pourrait demander à **PoutreBéton** quelle est la résistance du béton utilisé, information que l'on peut retrouver dans **Materiau**.

#### 1.4.4. Raisonnement à partir d'un modèle

Le *raisonnement à partir d'un modèle* incorpore l'utilisation de règles et la programmation orientée objet. Cette méthode représente explicitement le produit (Dym

& Levitt, 1991), c'est-à-dire qu'un modèle virtuel d'une entité physique est créé, sur lequel il est possible de faire des simulations diverses.

Un système de *raisonnement à partir d'un modèle* peut être résumé en quatre points (Dym & Levitt, 1991):

1. Les différents éléments du produit sont créés à partir d'une librairie d'éléments standards auxquels sont attachées des connaissances sur leur comportement.
2. La structure du produit est représentée comme une hiérarchie de ses éléments et par des liens topologiques entre eux.
3. Les fonctions des éléments sont déduites de leur emplacement dans la hiérarchie du produit ainsi que par les relations topologiques.
4. Le comportement du produit est déduit par des simulations, en utilisant le comportement hérité des attributs locaux de chacun des éléments.

L'approche du *raisonnement à partir d'un modèle* peut servir à se créer une « expérience virtuelle ». Ceci peut être fait à l'aide de simulations faites sur le produit et de la définition des comportements des éléments le composant. Ainsi, à l'aide de simulations utilisant différentes options possibles de conception ou en simulant divers événements influençant le modèle, on peut avoir une certaine expérience pour un système qui n'a jamais été bâti auparavant (Dym & Levitt, 1991).

Appliqué au présent domaine de recherche, le produit est donc la structure du bâtiment modélisée en 3D. Par exemple, chacune des poutres possède ses caractéristiques propres : une résistance en flexion, une flèche en fonction de la charge soumise et des connexions aux éléments la supportant. Chacun des éléments composant la structure ayant un comportement défini, il est possible de soumettre la structure à différents cas de chargement et en observer les effets sur toute la structure.

Les principales méthodes de raisonnement à partir de connaissances ont été expliquées dans cette dernière section. Chacune de ces méthodes de raisonnement a été exploitée afin de proposer des prototypes tentant d'assister la conception

préliminaire de structures. Les principaux prototypes seront présentés dans la prochaine section.

### **1.5. Recherches portant sur les systèmes informatiques assistant la conception préliminaire**

Diverses méthodes ont été utilisées afin de tenter d'assister adéquatement la conception préliminaire et aujourd'hui encore, plusieurs sont constamment proposées. Aucune de celles-ci n'est encore commercialisée pour le domaine de la conception préliminaire de bâtiment, ce qui n'est pas le cas dans d'autres domaines de conception. Différents projets seront expliqués en commençant par les prototypes fournissant un environnement de design intégré, suivront ensuite les prototypes ayant utilisés les systèmes experts, le raisonnement par cas, la *logique formelle*, les *lois de la physique*, les algorithmes génétiques, le design génératif et finalement les prototypes ayant combiné deux de ces derniers. La présentation des prototypes réalisés sera complétée par une conclusion sur ceux-ci.

#### **1.5.1. Environnement de design intégré pour la conception préliminaire**

Les environnements de design intégré ont la particularité de faciliter la mise en contact des professionnels ayant à faire la conception préliminaire d'un bâtiment de façon à assister le plus tôt possible la conception d'un bâtiment. Ainsi, les architectes, ingénieurs et autres intervenants peuvent avoir un même environnement de travail pouvant fournir des particularités propres à chacun des domaines. Ainsi, chacun des professionnels peut avoir accès à l'information fragmentée lui permettant peut-être de faire des commentaires aux autres professionnels.

IBDE (Integrated Building Design Environment) (Fenves et coll., 1994) est un banc d'essai, et non un prototype d'un possible système commercial, pour l'intégration et la communication entre les différentes tâches de design et de planification. IBDE couvre les tâches suivantes : la définition du programme architectural, le suivi de l'aménagement du bâtiment comprenant certains services techniques, la définition de la structure et la planification des étapes de construction. IBDE utilise une multitude d'agents implémentés en système expert. « STRYPES » sélectionne l'ensemble des

systèmes structuraux à utiliser tandis que « STANLAY » génère la topologie de la structure et en fait une analyse préliminaire des efforts générés dans la structure de façon simplifiée en utilisant la méthode des portiques pour les cadres et les murs de cisaillement comme des poutres en porte-à-faux, « FOOTER » synthétise et fait le design des fondations, « SPEX » fait la conception préliminaire des éléments structuraux tout en définissant le grade du matériau, le nom du standard de conception à respecter ainsi qu'un critère qui permettra son optimisation. S'ajoutent à ceux-ci, des agents qui critiquent : « STRUCTURAL CRITIC » qui fait une évaluation de la structure. Une série de modules de gestion sont nécessaires afin de faire le lien entre les différents agents ce qui a été vu par Bailey & Smith (1994) comme étant une source de conflits possible qui pourrait résulter en une boucle continue. Deux niveaux d'automatisation sont possibles soit le niveau interactif ou automatique, mais l'interaction se limite à la définition de paramètres connus en sélectionnant des alternatives pour qu'elles puissent être poursuivies

INTEGRA fournit un environnement où tous les professionnels peuvent travailler à partir du même logiciel, et ce, même à distance, à l'aide d'un module permettant au logiciel de communiquer par Internet (Miles et coll., 2000). INTEGRA semble davantage spécialisé dans le domaine de l'architecture. Ainsi, des vérifications peuvent être faites sur la possibilité de respecter à la fois les contraintes émises par le donneur d'ouvrage et les différents codes ou normes dont ceux régissant la protection des occupants contre le feu. Cette vérification peut se faire dès les premières esquisses du projet (Miles et coll., 2003). Bien que les auteurs d'INTEGRA aient identifié que l'ingénieur en structure a un rôle important dans la conception préliminaire du bâtiment, il semble qu'il n'y a pas eu de traitement particulier pour la vérification de contraintes imposées par la structure, ce qui pourrait être bénéfique pour une conception préliminaire.

SEED (Software Environment to support the Early phases of building Design) est un environnement de travail dans lequel divers professionnels peuvent travailler. C'est à l'aide de trois modules (SEED-Pro, SEED-Layout et SEED-Config) développés concurremment que SEED facilite l'exploration de solutions. Chacun des modules s'efforce de faire les tâches routinières du concepteur (Flemming & Woodbury, 1995).

Plus particulièrement, le module SEED-Config s'occupe du volet structural, ce qu'INTEGRA ne semble pas avoir. Il est divisé en quatre sous-systèmes, ce qui fait que la représentation de la conception, les connaissances de conception, la classification et la géométrie sont toutes séparées. Ainsi, les données de chacun des sous-systèmes étant indépendantes, il est possible d'ajouter des connaissances sans avoir d'impacts sur les autres sous-systèmes (Fenves et coll., 2000). Contrairement à INTEGRA, SEED-Config, en intégrant l'architecte dans le processus de conception, ne néglige pas l'architecture au profit d'une simplification.

### **1.5.2. Systèmes experts**

Les systèmes experts sont des programmes informatiques utilisant des heuristiques et réalisant une tâche normalement faite par un expert ou un consultant. On parle d'heuristiques pour référer aux règles du pouce ou conseils qui sont habituellement basées sur l'expérience et qui ne sont pas certaines de fonctionner (Dym & Levitt, 1991). Les systèmes experts ont été utilisés dès les années 1970 et utilisent la représentation basée sur des règles (section 1.4.2). De tels programmes sont construits à partir de « faits » et de « règles » qui interagissent à partir d'un moteur d'inférence. C'est ce moteur d'inférence qui établit quelle règle s'exécute en fonction des faits disponibles.

Une grande quantité de prototypes ont été développés avec des systèmes experts. La revue de ces systèmes ne sera pas exhaustive. Ces prototypes sont cependant basés sur une base de connaissances qui peut fournir certaines connaissances sur différentes facettes de la conception préliminaire et de la conception définitive.

HI-RISE est un système expert pour la réalisation de la conception préliminaire de bâtiments rectangulaires commerciaux ou résidentiels (Adeli, 1988; Maher, 1985). HI-RISE assume que la planification des espaces est déjà réalisée, ce qui signifie que non seulement l'architecture doit être fixée, mais aussi que les baies structurales doivent aussi être définies ce qui fait pourtant partie de la conception préliminaire de structure. Les alternatives de systèmes structuraux possibles sont mises sous forme d'arbre montrant les différentes composantes de la structure du bâtiment. Ces alternatives

peuvent aussi être montrées graphiquement à l'utilisateur et celui-ci peut choisir parmi les alternatives définies. Le processus de conception, pour les bâtiments de grande hauteur, débute par la conception des éléments de résistance latérale 3D, suivi de celle des systèmes 2D dans le sens le plus étroit du bâtiment. Les systèmes 2D pour le sens le plus long sont définis de façon à être compatibles avec ceux étant choisis pour le côté étroit. Finalement, le système de résistance aux charges de gravité compatibles avec les systèmes de résistance latérale peut être sélectionné. Dans HI-RISE, les connaissances sont modélisées sous forme d'heuristiques organisées en différentes sous tâches de conception. Premièrement, une synthèse est faite pour définir l'ensemble des alternatives de systèmes structuraux et leurs configurations possibles. Une analyse est ensuite faite pour déterminer la faisabilité des alternatives générées. Suit la détermination des paramètres de conception qui consiste entre autres à définir la résistance des matériaux utilisés. Les connaissances sont regroupées par type de matériaux et certaines connaissances utilisent les principes premiers de la physique. Finalement, une évaluation des alternatives est faite en compilant les résultats d'évaluation pour différents facteurs (ayant différentes valeurs d'importance), dont le coût, la défexion, etc.. L'utilisateur peut difficilement interrompre HI-RISE. Les actions sont posées de façon automatique et l'utilisateur n'a qu'à choisir une des alternatives proposées. L'interaction avec l'utilisateur est au minimale, ce qui n'est pas souhaitable.

COKE (Fischer, 1991, 1993) est un système expert utilisant les connaissances de constructibilité dans la réalisation de la conception préliminaire et du prédimensionnement des éléments, lesquelles ne sont habituellement pas explicitement utilisées par les ingénieurs concepteurs. Suite à la considération de ces connaissances, la production au chantier peut être améliorée et la perte de matériau liée à la coupe de coffrage et le nombre d'avis de changement peuvent être réduits. Comme il peut être long et peu efficace d'entrer les données manuellement dans un système expert, « COKE » interagit avec un module de fonctions appelé « CIFECAD » (Kolountzakis & Fischer, 1991) ajoutées à AutoCAD<sup>MC</sup> et implémentées en AutoLISP. Ces deux systèmes communiquent à l'aide d'un fichier de transfert ASCII interprété par KAPPA<sup>MC</sup>, une coquille de système expert. L'utilisateur commence par modéliser la structure à l'aide de « CIFECAD » dans AutoCAD<sup>MC</sup> à l'aide de menus de fonctions

aidant à la modélisation de la structure et à la connexion des éléments structuraux. Ensuite, « COKE » donne une évaluation de la structure par rapport à la constructibilité. Ainsi, l'utilisateur peut, s'il le désire, corriger manuellement dans AUTOCAD<sup>MC</sup> sa conception en fonction des commentaires émis par « COKE » (Fischer, 1991). La version utilisée d'AutoCAD<sup>MC</sup> ne permettait pas un environnement multitâche et c'est pourquoi les commentaires sont émis après que l'utilisateur ait modélisé la structure. Il serait sûrement préférable que l'utilisateur puisse être guidé lorsqu'il modélise la structure assistant ainsi davantage son travail, plutôt que de le commenter après coup.

TALL-D est aussi un système expert qui s'adresse à la conception préliminaire de bâtiments rectangulaires de grande hauteur (Ravi, 1998). Il intègre des connaissances concernant l'architecture et la structure sous forme d'heuristiques. C'est l'utilisateur qui définit ses priorités concernant la flexibilité des zones locatives, les systèmes de résistances latérales, la distance de course entre le noyau technique, le degré de lumière naturelle, etc. En fonction des connaissances implémentées, TALL-D réalise plusieurs plans du bâtiment avec différentes configurations. Ces différentes configurations sont évaluées et ordonnées selon les priorités définies par l'utilisateur. Les coûts préliminaires sont basés sur des données historiques incluant aussi la mise en place. Toutefois, ces coûts ne tiennent pas compte des caractéristiques précises du système, tel que les dimensions des membrures. La conception structurale est réalisée à partir d'un plan choisi par l'utilisateur. La sélection des systèmes structuraux est faite automatiquement en fonction des connaissances. Les colonnes et poutres sont regroupées sur plusieurs étages, de façon à ce qu'elles soient de même dimension, diminuant ainsi les coûts de construction. Ensuite, un dimensionnement préliminaire est fait en fonction de graphiques donnant, par exemple, l'épaisseur d'une dalle de béton en fonction de sa portée et de codes. La définition des divers éléments structuraux et de leur emplacement, peut être considérée davantage automatique que dirigée par l'utilisateur.

Berrais (2005) a créé un système expert pour la conception des systèmes de résistances aux séismes pour les bâtiments de béton armé. Un tel système s'impose étant donné que les exigences pour les systèmes de résistance aux séismes

deviennent de plus en plus complexes et largement utilisés. Les méthodes simplifiées, telles la méthode des forces statiques équivalentes et le spectre de réponse modale, ne reflètent pas de façon exacte le comportement inélastique des structures pendant un séisme. Le prototype a pour but :

1. D'assister l'ingénieur dans la vérification des régularités de tout le bâtiment;
2. D'estimer les différents facteurs de conception (zone sismique, période, interaction sol-structure);
3. De modéliser et réaliser l'analyse élastique et inélastique d'un bâtiment basé sur les exigences de ductilité.

Le prototype aide l'utilisateur à créer un modèle d'analyse par éléments finis, analyse maintenant commune dans ce domaine quoique les concepteurs n'aient pas une grande facilité à utiliser des logiciels réalisant de telles analyses. Ce prototype présente à l'utilisateur différents systèmes applicables tout en lui fournissant leurs avantages et particularités. Cette façon de faire assiste réellement l'utilisateur dans sa tâche.

Golabchi (2005) a créé récemment un autre système expert qui assiste l'ingénieur pour la sélection du type de structure pour des grandes portées. Une centaine de projets ont été étudiés de façon à dégager des conclusions générales sur les relations entre la portée et le poids de la structure, l'aire couverte par la structure et le temps de construction ainsi que la portée et le coût de la structure. L'utilisateur est informé des étapes suivies et de la raison de l'activation des règles, mais le contrôle n'est pas donné réellement à l'utilisateur.

La popularité de ces systèmes semble avoir été freinée par la difficulté de faire interagir le savoir des humains avec les heuristiques présentes dans un système informatique (Rafiq et coll., 2003). L'approche usuelle de ces logiciels est basée sur la pratique de conception manuelle qui suit une *procédure ascendante*. Les dimensions des baies sont souvent déterminées avant de savoir quel système structural est choisi. La structure tridimensionnelle est souvent choisie à partir des systèmes structuraux bidimensionnels. Les éléments résistants aux charges de gravité sont donc considérés séparément des systèmes de résistance latérale. Cette façon de faire limite le nombre

de choix possibles, ce qui n'est pas souhaitable au stade de la conception préliminaire (Rafiq et coll., 2003).

### 1.5.3. Raisonnement à partir de cas

Une autre approche peut surmonter les difficultés reliées à l'implémentation de règles générales de conception préliminaire : le *raisonnement à partir de cas* passés. « Le *raisonnement à partir de cas* est le processus de se rappeler un cas, de le comparer et l'adapter au problème »<sup>3</sup> (Kolodner, 1993).

Les ingénieurs font souvent appel dans la pratique à des cas passés pour arriver à résoudre de nouveaux problèmes semblables à ceux déjà rencontrés. Ils peuvent toutefois oublier certains cas pertinents ou se souvenir d'un mauvais cas (Rivard & Fenves, 2000). En pratique, les projets passés sont emmagasinés dans les archives et deviennent ainsi souvent inutilisés et c'est pourquoi des ingénieurs praticiens ont trouvé qu'il pourrait être profitable de faciliter la consultation des anciens projets (Kumar & Raphael, 1997).

Le *raisonnement à partir de cas* ressemble grandement au processus cognitif humain utilisé lors de la résolution d'un problème. Un cas passé peut être réutilisé soit en adaptant un cas semblable ou en tirant des connaissances d'un cas pour générer un nouveau modèle. La plupart des recherches effectuées ont toutefois privilégié l'adaptation de cas à la génération d'un nouveau produit. La création d'un système de raisonnement à partir de cas doit considérer 4 aspects : la représentation des cas, l'addition des cas à la base de cas, la recherche de cas et l'adaptation de cas (Kolodner, 1993). Plusieurs recherches ont été faites, chacune donnant plus d'importance à l'un ou l'autre de ces aspects.

CADRE est un système de raisonnement par cas axé sur la représentation et l'addition de cas, l'indexation et la recherche de cas ayant été volontairement laissées de côté

---

<sup>3</sup> Traduction libre.

(Bailey & Smith, 1994). Les auteurs argumentent, qu'à l'intérieur d'un cas passé, les conflits, entre les différentes abstractions que peuvent avoir les différents intervenants du bâtiment, ont déjà été résolus et c'est pourquoi l'adaptation des cas passés est préférée à la génération d'un nouveau modèle. L'adaptation dimensionnelle est une méthode d'adaptation qui consiste à modifier les dimensions à l'intérieur des intervalles possibles de portées des systèmes utilisés. Si celle-ci ne s'avère pas possible, l'adaptation topologique est utilisée. Cette façon de faire suppose une modification de la trame structurale et/ou une réorganisation de l'espace qui avait déjà été effectuée par l'architecte. Au cours de ce processus, seuls les éléments de stabilité générale du bâtiment ne peuvent être modifiés.

Bien que la plupart des recherches utilisent un modèle physique, certains ont pensé que la réutilisation des méthodes de conception serait préférable. Ainsi, même lorsque la solution n'est pas décomposable due à une forte interaction entre chacune de ses parties, les tâches permettant d'arriver à cette solution sont quant à elles souvent décomposables. Ainsi, un cas indexé dans CADREM conserve les données suivantes : les conditions dans lesquelles la conception a été effectuée, la définition d'une tâche de conception et les méthodes utilisées pour arriver à faire la conception. CADREM réutilise les méthodes pour générer un nouveau modèle. Toutefois, alors que les auteurs de CADRE modifient l'architecture sans consultation de l'architecte, CADREM considère la structure comme indépendante de l'architecture aux fins d'une importante simplification (Kumar & Raphael, 1997).

Les précédents arguments amènent à penser qu'il peut être avantageux de conserver les méthodologies utilisées dans des cas précédents. Toutefois, le modèle du bâtiment peut aussi être réutilisé en partie et cette façon de faire est aussi pertinente. SEED-Config, présenté à la sous section 1.5.1, unit ces deux façons de faire en introduisant la notion de nœuds technologiques. Ces nœuds renferment individuellement les connaissances nécessaires à la conception structurale d'une entité propre aux bâtiments. Chaque entité est représentée par une représentation géométrique, une taxinomie, des propriétés, les relations avec les autres entités (inclusive ou spécifique au domaine), et des connaissances de conception (garde les références aux nœuds de

technologie nécessaire à la conception de l'entité). Les nœuds sont organisés en ordre hiérarchique allant des connaissances les plus générales aux plus spécifiques (Rivard & Fenves, 2000).

#### 1.5.4. Logique formelle

L'utilisation des heuristiques de conception dans les systèmes d'assistance à la conception préliminaire des structures peut parfois engendrer un manque d'innovation, ce qui est critiqué. Les systèmes tentant d'assister la conception préliminaire de structures peuvent parfois être critiqués pour le fait qu'en utilisant des heuristiques basées sur l'expérience ou des cas passés de conception, l'innovation peut devenir absente (Shea & Cagan, 1999). Raisonnant en termes de fonction, de forme et de comportement de système structural, les systèmes de *logique formelle* semblent conduire davantage vers l'innovation, car on ne fait que donner les possibilités fonctionnelles qu'un type d'élément peut accomplir et non ce qui est fait habituellement par cet élément. L'utilisation des principes premiers de structure est privilégiée à l'utilisation d'heuristiques. Ainsi, une connaissance telle qu'« un assemblage de poutres et poteaux seulement est instable » pourrait être incluse dans la banque de connaissances tandis que celle affirmant qu'« un système de résistance tubulaire est efficace seulement pour des bâtiments de plus de 30 étages » ne serait pas incluse dans la base de connaissance. Deux prototypes sont présentés ici.

FFG (floor framing generator) utilise le *langage des prédictats du premier ordre*, méthode qui est typique à la représentation des connaissances par la *logique formelle* (Jain et coll., 1991). FFG génère la structure de planchers en tenant compte des charges de gravité seulement. Le positionnement des éléments structuraux tels colonnes et poutres doit être fait en tenant compte des exigences imposées entre autres par l'architecture, la mécanique et les constructeurs. FFG réalise des schémas de structures d'acier orthogonales particulièrement pour des bâtiments de grande hauteur. Le système de plancher est restreint à un pontage métallique sur poutre avec une chape de béton. Les propriétés de sections profilées à chaud et des pontages métalliques, ainsi que leurs prix respectifs, sont inclus dans la base de connaissances. Plusieurs des contraintes structurales sont générées par les connaissances de FFG,

portant entre autres sur les portées économiques, l'espacement économique, la profondeur minimale et maximale des poutres, la résistance au feu requise et des axes structuraux générés en fonction des éléments porteurs. Il est intéressant de noter que l'évaluation des coûts est en fonction des coûts de matériaux, de fabrication, d'érection et des coûts auxiliaires tels les coûts de transport. Différents inconvénients ont été identifiés notamment le fait que l'on ne peut spécifier différentes valeurs de charges pour différentes aires d'un même plancher. De plus, les poutres doivent être disposées de façon orthogonale et le logiciel ne fait que le cheminement des charges de gravité. Finalement, le prototype n'assiste que pour la génération d'un type de plancher composé de poutres et pontage seulement.

Eisfeld & Scherer (2003) ont mis en place un prototype tentant d'assister la conception préliminaire à l'aide de la *logique formelle*. Le transfert des charges est une des préoccupations principales du prototype. Ainsi, on peut retrouver des règles, en langage SHI2D<sup>1</sup>, telles que dans l'exemple suivant où « une colonne ne peut être supportée par une dalle » :

$$\begin{aligned} \text{Colonne} \cap \exists_{n=1}^{\infty} \text{supporte.} (\text{DalleSansNervure} \cup \text{Colonne} \\ \cup \text{Poutre}) \subseteq \text{DesignPossible} \cap \exists_{n=1}^{\infty} \text{charges.} \\ ((\text{Colonne} \cup \text{Poutre}) \cap \text{Dalle}) \end{aligned}$$

L'ingénieur doit faire une structure initiale, et entrer les paramètres tels la résistance du béton et les charges à appliquer qui sont ensuite vérifiés par les algorithmes. Lorsque la conception est sans problème, le plan final de la structure est généré. On fait l'hypothèse, dans la vérification du cheminement des charges, que la dalle peut redistribuer la charge latérale aux murs de cisaillement (Eisfeld & Scherer, 2003). Cette façon de faire aide probablement l'ingénieur à vérifier le cheminement des charges, mais n'aide aucunement dans le choix des matériaux et des systèmes structuraux.

### **1.5.5. Système basé sur les lois de la physique**

Un système de *raisonnement basé sur les principes premiers de la physique* utilise les principes de la physique afin d'assister la conception préliminaire de structures. Les

auteurs prétendent ainsi pouvoir couvrir un plus grand champ d'application que les systèmes de conception préliminaire habituels.

BERT (Building Engineering and Reasonning Tool) est formalisé spécifiquement pour les bâtiments utilisant les cadres rigides pour résister aux charges latérales de séismes (Fuyama et coll., 1997). Plusieurs étapes sont utilisées afin d'arriver à une conception préliminaire de cadre rigide. Étape 0 : le système procède au prédimensionnement des éléments en itérant pour trouver la section de colonnes et poutres les plus légères, et ce, pour les charges de gravité seulement et en assumant que tous les éléments sont articulés. Étape 1 : la charge de séisme agissant à chacun des étages est établie à l'aide de la charge équivalente statique en considérant le poids des membrures trouvées à l'étape précédente. On redimensionne les membrures de façon à respecter la résistance des éléments et la flèche inter-étage, mais en utilisant toutefois une méthode d'analyse approximative qui néglige la rigidité des éléments structuraux. La flèche inter-étage utilisée est celle menant vers la structure la plus légère. Elle est trouvée à l'aide de graphiques tracés à partir de formules dérivées des lois de la physique. Étape 2 : la période fondamentale de vibration est calculée ainsi que la force dans les membrures, et ce, en utilisant les sections trouvées à l'étape 2 par la méthode des portiques (méthode tenant compte de la rigidité des éléments). Un tel système peut être très pratique pour faire la conception préliminaire d'un cadre, mais ne spécifie pas quand un cadre résistant doit être utilisé. Un logiciel de conception préliminaire doit aider à faire ce choix et peut ensuite utiliser des connaissances telles que décrites par Fuyama et coll. (1997) pour faire le prédimensionnement des éléments afin de continuer le raisonnement sur l'applicabilité des choix conceptuels effectués.

#### **1.5.6. Algorithme génétique**

Dans les années 1990, une méthode d'optimisation multipoint appelée algorithme génétique a fait des percées dans plusieurs branches d'ingénierie. On commence par des solutions initiales générées au hasard, qui, par un processus de reproduction, le principe de sélection, et la mutation permettent de trouver après plusieurs générations la solution la plus adaptée. Les gènes définissent les différentes valeurs possibles pour une solution. Les coûts sont souvent utilisés comme paramètres d'optimisation pour les

logiciels utilisant les algorithmes génétiques. Une recherche par Grierson & Khajehpour (2002) considère à la fois les revenus apportés par le bâtiment, le coût initial de la construction et les coûts d'opération. Des facteurs architecturaux tels que le type de revêtement extérieur, le type et le pourcentage de fenêtre ont aussi été utilisés.

Une variante de l'algorithme génétique est un algorithme génétique structuré. Ce système possède deux types de gênes. Le premier type, appelé gène paramétrique, représente les paramètres de conception et le deuxième type, appelé gène d'aiguillage, est utilisé pour activer ou désactiver différents segments d'un chromosome (chaîne de possibilités) (Rafiq et coll., 2003).

DPRO, un environnement de conception renfermant un algorithme génétique structuré, peut trouver quelle configuration serait la meilleure pour obtenir le profit le plus élevé en tenant compte de plusieurs paramètres (Rafiq et coll., 2003): l'aire au sol du bâtiment en fonction du prix du terrain, les coûts reliés à la surface de parement utilisé et la surface de location disponible. Cette dernière est calculée en tenant compte des pertes d'espaces fonctionnels reliées à la présence de colonnes. La relation homme-ordinateur est assurée à deux niveaux : l'utilisateur autorise certains types de systèmes structuraux à être considérés pour l'optimisation et peut aussi modifier les paramètres de conception de chacun des systèmes s'il le désire. Ici encore, l'optimisation des coûts est le facteur principal d'évaluation des solutions. La géométrie du bâtiment ne doit pas être fixée, car c'est ce que le logiciel peut proposer à l'utilisateur, une optimisation de la structure en fonction de la géométrie. L'architecture du bâtiment est donc faite en fonction de la structure. Dans une optique de processus de conception intégrée, où tous les professionnels essaient de travailler en étroite collaboration dès le départ du projet, le résultat d'une telle analyse pourrait peut-être influencer positivement la conception effectuée par l'architecte. Toutefois, le but principal d'un bâtiment n'est pas d'avoir une structure, mais bien d'abriter un usage.

BGRID tente d'assister les membres d'une équipe de conception au stade conceptuel de la création de bâtiments multi-étages (Sisk et coll., 2003). BGRID aide à développer une stratégie en termes de caractéristiques spatiales, de choix du type de structure et

d'intégration des services du bâtiment. Pour déterminer la justesse des solutions trouvées, BGRID vérifie que la hauteur totale du bâtiment soit plus petite que la hauteur permise, que le système structural soit compatible avec les portées générées et que la grille structurale soit uniforme. L'utilisateur peut aussi spécifier avec des facteurs, allant de 0 à 4, l'importance que le concepteur porte aux points suivants : grande portée libre, rentabilité du projet et utilisation minimale de ressources naturelles. Suite à l'évaluation de BGRID par les experts, plusieurs observations ont pu être tirées :

1. L'architecture et les services du bâtiment devraient avoir priorité sur la structure;
2. Un logiciel de conception préliminaire pourrait fournir à l'utilisateur des approximations plutôt que des calculs plus exacts qui devront de toute façon être revus;
3. Le contrôle doit être donné à l'utilisateur pour le choix des opérations;
4. Un logiciel de conception préliminaire devrait servir à explorer rapidement plusieurs possibilités.

#### **1.5.7. Design génératif**

Certains prototypes ont fait l'usage du design génératif. Cette technique consiste à générer une structure de façon automatique et peut être utilisée pour explorer des avenues qu'un ingénieur expérimenté n'aurait pas explorées.

Meyer (1995) utilise la grammaire spatiale afin de générer un bâtiment de grande hauteur, de moins de 30 étages. Pour ce faire, des éléments à zéro, une, deux et trois dimensions sont utilisés afin de créer le modèle géométrique. Les différentes dimensions tiennent compte du fait que l'élément à générer a un volume important, ou une dimension prédominante sur une autre comme une colonne qui serait de dimension un, car elle a une hauteur beaucoup plus importante que ses dimensions en plan (profondeur et largeur). En fonction du programme architectural, le bâtiment est généré en unité d'habitation répartie verticalement. Des configurations possibles selon les différents systèmes structuraux sont générées et une évaluation est faite selon plusieurs attributs, dont le degré d'ouverture possible sur le périmètre du bâtiment, l'espacement des colonnes, etc. L'utilisateur peut faire un choix selon les critères les plus importants et le système structural spécifique peut alors être généré. Assumant

que la grille architecturale est fixée, la grille structurale doit être un multiple entier de cette dernière.

Shea & Cagan (1999) ont appliqué le design génératif à la conception de poutrelles de toit en acier. Un ingénieur en structure essaie de contrôler les effets physiques ou forces, tandis que l'architecte recherche à contrôler l'espace. L'architecte peut avoir une évaluation de l'esthétique qui n'est pas fondée sur l'efficacité fonctionnelle de la structure conçue, contrairement à un ingénieur. Ainsi, l'architecte et l'ingénieur n'ont pas la même évaluation d'une structure. Le design génératif peut donc créer une structure optimisée structurallement tout en créant des designs différents qui peuvent être visuellement plus intéressants selon l'architecte, comme une poutrelle non symétrique. La méthode utilisée initialise la génération de la poutrelle d'acier en créant une structure minimale reliant les charges aux supports. Une analyse est effectuée par la suite avec les charges en place par la méthode des éléments finis. Le coût de la structure est évalué et la première conception est automatiquement acceptée puisqu'il ne peut être comparé avec un autre. Ensuite, selon des règles préétablies, des membrures sont ajoutées ou supprimées et le coût est réévalué. Si le nouveau coût est inférieur à la version précédente, la nouvelle conception est acceptée. Les règles préétablies ne considèrent pas le comportement physique de la structure (Shea & Cagan, 1999), donnant ainsi un espace solution beaucoup plus grand, ce qui peut mener à un temps de calcul très long pour une structure complète.

#### **1.5.8. Système hybride**

En tout, sept méthodes ont été présentées pour assister la conception en structure. Certains prototypes combinent certaines des méthodes décrites précédemment. Ainsi, une première méthode peut combler ses lacunes à l'aide d'une seconde.

M-RAM, créé par Soibelman & Pena-Mora (2000), génère plusieurs configurations de structure possibles principalement basées sur la géométrie, la distribution des charges de gravité et des charges latérales. Le modèle de M-RAM applique des agents pour développer des modules compétents qui sont chacun des experts dans une tâche spécifique. Ainsi, un problème complexe est divisé et transmis à différents modules de

raisonnement pour résoudre chacune des parties d'un problème de conception. Une interface, écrite en java, reçoit les données par Internet des différents modules pouvant être situés sur plusieurs ordinateurs, et lance le programme de gestion des opérations à réaliser. Un agent de classification choisit le système structural le plus approprié et fournit différents cas passés semblables. Ensuite, l'utilisation d'un algorithme génétique permet d'adapter le cas passé au cas présent. La population initiale est donc générée à partir de la base de cas. La librairie d'algorithme génétique GAlib, développée au MIT, est utilisée pour le module d'adaptation. M-RAM vérifie ensuite si l'intention (objectivité, contraintes et fonctions) a été respectée, et fait une recommandation à l'utilisateur justifiée à l'aide d'un cas puisé dans la banque de cas (Soibelman & Pena-Mora, 2000).

Dolmen combine un système expert avec la programmation orientée objet de façon à pouvoir profiter de l'héritage pour faire la conception préliminaire de la structure de bâtiments rectangulaires (Harty & Danaher, 1994). L'usage de nœuds technologiques semble avoir été fait, tel que décrit dans (Fenves et coll., 2000). Toutefois, l'utilisation en est différente dû au fait que la conception est réalisée de façon automatique. Dolmen procède par 3 étapes. La première est l'étape de spécification, durant laquelle l'utilisateur définit les charges, la géométrie du bâtiment, le degré de résistance au feu, l'usage du bâtiment (stationnement, hôtel, bureau et appartement), la situation géographique du bâtiment, le nombre d'escaliers par plancher et le nombre de conception à considérer. Pendant cette même étape, l'utilisateur doit déterminer une grande quantité de détails : tel que les recouvrements de béton sur les barres d'armature, le pourcentage d'acier dans la dalle, le poids du béton sur le pontage métallique, etc. La deuxième étape consiste à suggérer à l'utilisateur, différentes conceptions complètes de la structure du bâtiment. L'utilisateur fait donc face à plusieurs conceptions pour lesquelles il n'a eu qu'à spécifier ces intentions dans la première étape. Pour éviter l'explosion de solutions, des connaissances de bases sont utilisées. La dernière phase consiste en l'évaluation, par le logiciel, des options générées en fonction de critères qui ont un ordre d'importance défini par l'utilisateur soit la hauteur du bâtiment, la déflection latérale, le temps de construction, les espaces sans colonne, la grosseur des colonnes et le coût. L'interaction avec l'utilisateur est très minime considérant qu'une fois que l'utilisateur a réussi à entrer la quantité

impressionnante de détails, il ne lui reste qu'à choisir une conception qui a été réalisée automatiquement et qui est évaluée à partir d'une liste de critères qu'il a qualifié Dolmen, ainsi que tous les logiciels utilisant à profusion l'automatisation de la conception, n'assiste pas l'ingénieur dans ces décisions, c'est plutôt l'ingénieur qui assiste le logiciel.

#### **1.5.9. Conclusion sur les prototypes de recherche**

On peut remarquer que tous ces prototypes semblent prometteurs, mais qu'aucun n'assiste parfaitement l'ingénieur dans toutes ses tâches de conception. Les prototypes présentés offrent des pistes de solutions, mais on peut comprendre qu'il reste beaucoup à faire pour arriver à assister réellement l'ingénieur dans toutes les étapes de la conception préliminaire de structure. Aucun de ces prototypes n'est encore disponible commercialement ni n'est utilisé en génie des structures.

Plusieurs prototypes font l'évaluation des solutions générées par une évaluation des coûts. C'est souvent ainsi que l'on différencie une structure bien adaptée à l'une qui l'est moins. Toutefois, en pratique, ce n'est pas seulement les coûts qui doivent être pris en compte (Shaeffer, 1992) lors des choix structuraux. Aussi, on peut remarquer que les approches utilisées dans les recherches citées ne proposent pas de méthodes qui permettent de faire un choix entre toutes les solutions structurales. En général, les prototypes se concentrent sur l'assistance de simples parcelles des activités de conception préliminaire.

La qualité de la base de connaissances est un élément important de la performance d'un logiciel de conception préliminaire. Les connaissances représentent la base du jugement d'un logiciel de conception préliminaire ainsi que de la façon dont elles sont utilisées. De plus, la richesse des options couvertes ainsi que la difficulté des problèmes considérés influencent aussi grandement les résultats obtenus. La base de connaissances est rarement présentée dans les sources consultées et il est donc difficile de la qualifier.

## 1.6. État de l'art en matière de conception préliminaire de structures de bâtiment

### 1.6.1. Vue d'ensemble des méthodes de raisonnement

Les systèmes experts sont utiles, car ils peuvent renfermer le savoir des experts en conception structurale. Toutefois, le moteur d'inférence nécessaire rend le processus de raisonnement très difficile, voire impossible, à contrôler par l'utilisateur. De plus, le moteur d'inférence rend très difficile l'ajout de connaissances dans un tel système, ce qui n'est pas souhaitable, car chaque utilisateur ayant probablement ses propres connaissances à ajouter au système. Toutefois, le concept de *règle gauche et droite* pourrait être utile pour transformer les connaissances dans un langage compréhensible pour l'ordinateur.

Les ingénieurs praticiens ont trouvé le *raisonnement à partir de cas* pratique. On se doit donc de donner une importance à cette façon de faire. « Les règles du pouce, ou heuristiques, sont des connaissances de surface reliées à l'expérience provenant du grand nombre de problèmes similaires résolus.»<sup>4</sup> (Dym & Levitt, 1991) Ainsi, en considérant des connaissances basées sur des règles du pouce, on utilise la généralisation des règles de conception qui ont été utilisées pour la conception des cas passés.

Ensuite, plusieurs auteurs ont constaté que l'on peut arriver à utiliser un cas antérieur à l'aide des décisions qui ont été prises pour arriver à une conception (Kumar & Raphael, 1997; Rivard & Fenves, 2000). L'utilisation directe de cas passés, qui soulève des problèmes au niveau de la façon d'adapter le cas passé au cas présent, peut être contournée de cette façon. Par l'utilisation des nœuds technologiques, il est possible de réutiliser un cas passé, car il est possible de conserver la séquence d'application des nœuds.

---

<sup>4</sup> Traduction libre.

*La logique formelle* utilise les principes de bases de structure. Cette façon de faire n'utilise pas les règles du pouce et autres trucs que les experts utilisent pour réaliser leur conception préliminaire. En retournant aux principes de bases, il semble difficile d'aider l'utilisateur à faire des choix qui sont souvent faits en fonction de plusieurs paramètres, et ce, sans même considérer les facteurs extérieurs provenant des autres intervenants. De plus, un tel raisonnement ne ressemble pas à celui d'un ingénieur expert, il peut donc être difficile de donner le contrôle à l'utilisateur en tout temps.

Ces logiciels ressemblent, d'un certain point de vue, à certains logiciels structuraux commerciaux déjà utilisés en pratique. En fait, ces systèmes raisonnent à partir d'une configuration structurale établie afin de faire un prédimensionnement de la structure ce que des logiciels comme VisualDesign (CivilDesign inc., 2005) réalisent déjà tout en optimisant les sections utilisées (voir section 1.2). Les règles du pouce sont aussi laissées de côté ici et encore une fois on ne profite pas de l'expérience des experts. De plus, ces systèmes ne semblent pas permettre de faire un choix de systèmes structuraux et de configurations.

L'algorithme génétique est grandement utilisé pour l'optimisation de structures. On peut considérer que le but de réaliser une bonne conception préliminaire est d'arriver à un résultat qui serait optimum pour les conditions d'un projet. Le raisonnement effectué à partir de cette méthode est toutefois automatique, et converge vers une multitude de résultats en fonction de paramètres déterminés par l'utilisateur. Elle est souvent utilisée pour optimiser la structure d'un bâtiment complet, négligeant l'apport suggestif de l'architecture pour ne considérer que l'aspect fonctionnel souvent limité à l'aspect monétaire. L'utilisateur perd donc le contrôle des opérations effectuées par l'ordinateur et il choisit un ou des résultats qui sont générés. Peut-être que cette méthode pourrait être utilisée à plus petite échelle pour des sous-systèmes structuraux ou quand certaines décisions de haut niveau ont été prises telles : matériau, type de structure, axes structuraux, etc. Il est donc exclu de l'utiliser pour l'optimisation du bâtiment complet pour les deux raisons mentionnées plus haut soit le manque d'interaction avec l'ingénieur et la modification de l'architecture au gré de l'optimisation.

Le but du design génératif est d'explorer des avenues qu'un ingénieur expérimenté n'aurait peut-être pas explorées en réalisant une conception de façon automatique à l'aide de règles de grammaire spatiales. Toutefois, le caractère automatique ne donne pas à l'utilisateur le contrôle des opérations et l'espace solution est souvent très grand. Cette approche ne sera donc pas utilisée ici.

Les systèmes hybrides combinent deux ou plusieurs méthodes de raisonnement. La combinaison de systèmes apparaît comme une solution à long terme. Ainsi, on pourrait assister l'ingénieur en lui donnant le contrôle du processus et ajouter des outils qui pourraient explorer automatiquement un espace solution restreint.

Finalement, l'approche privilégiée est l'utilisation de règles avec partie gauche et droite, tel que fait avec les systèmes experts, avec une interaction améliorée. Pour ce faire, le moteur d'inférence est retiré et c'est l'utilisateur qui le remplace.

#### **1.6.2. Vue d'ensemble des prototypes et recherches sur la conception préliminaire de structures de bâtiments**

La conception préliminaire de structures est unanimement vue, dans la littérature, comme étant une étape de la conception qui gagnerait à être assistée à l'aide de l'ordinateur (Biedermann & Grierson, 1995; Eisfeld & Scherer, 2003; O'Sullivan, 2002). La conception préliminaire est aussi visée dans d'autres domaines du bâtiment (Korman et coll., 2003; Leclercq, 1999; Meniru et coll., 2003) et même déjà grandement assistée. Des logiciels assistant la conception préliminaire sont déjà utilisés commercialement dans d'autres domaines tel celui de la conception d'avion (Heisserman et coll., 2004). Toutefois, la définition de la conception préliminaire peut différer quelque peu d'un projet de recherche à un autre. En effet, parfois on parle d'assistance à la conception préliminaire lorsqu'une évaluation est faite de la conception préliminaire réalisée par le concepteur, alors qu'aucune aide n'est donnée lorsqu'il sélectionne les divers éléments structuraux possibles, les différents matériaux, etc. (Biedermann & Grierson, 1995; Eisfeld & Scherer, 2003; Fischer, 1991, 1993). Ces évaluations ne sont pas différentes des évaluations grossières que l'on pourrait faire

avec un logiciel d'analyse détaillée commercial. En effet, les professionnels ont déjà l'habitude d'utiliser ce genre de vérification pour leur conception préliminaire.

Trois lacunes principales peuvent être identifiées dans les logiciels commerciaux d'analyse structurale. Premièrement, ils n'assistent pas l'ingénieur dans les choix et positionnements des systèmes structuraux, des matériaux, et autres décisions à prendre lors de la conception préliminaire. Deuxièmement, tous les logiciels utilisent la modélisation de type ascendante, c'est-à-dire qu'il faut modéliser le bâtiment entité par entité contrairement à l'approche plus naturelle de type descendante. Cette dernière consiste à penser d'abord au bâtiment en son tout pour ensuite définir les systèmes, suivis des sous-systèmes structuraux, des entités, etc. Troisièmement, il est difficile de partir de l'architecture et faire une conception et analyse préliminaire de la structure tôt dans le processus avec les fonctionnalités de ces logiciels.

Certains prototypes ont ciblé la conception préliminaire telle que décrite dans le présent projet de recherche. Toutefois, lorsque l'on tente d'assister le concepteur lors de sa conception préliminaire, on tend souvent plus à le remplacer. En effet, des exemples de tels prototypes sont le générateur de plancher automatique FFG (Jain et coll., 1991), la génération automatique à partir de méthodes utilisées dans des cas passés (Kumar & Raphael, 1997) ou à partir de connaissances (Sacks & Warszawski, 1997). Parfois on donne la possibilité à l'utilisateur de faire des modifications suite à la génération automatique, mais encore là on n'assiste nullement l'utilisateur dans les choix qui s'offrent alors à lui, une simple liste déroulante est disponible.

Il est important que l'utilisateur sache quel est le cheminement fait par le logiciel pour arriver à certaines conclusions (O'Sullivan, 2002). Finalement, certains prototypes ont touché à ce que l'on puisse s'attendre d'un logiciel de conception préliminaire. Le prototype suggéré par Berrais (2005) assiste la conception préliminaire de murs de résistance aux séismes. Il suggère entre autres, différents moyens de construire les poutres entre les murs couplés en énumérant les avantages de chacun d'eux. Toutefois, le prototype ne vérifie pas quel cas est réellement applicable afin d'en aviser l'utilisateur. De plus, aucune aide n'est donnée à l'utilisateur pour choisir entre

l'utilisation de murs de cisaillement et un autre moyen de résistance latérale telle les contreventements en croix. On ne peut donc pas parler, à proprement dit, d'un prototype assistant la conception préliminaire d'un bâtiment puisque l'on cible seulement un système en particulier.

La présente recherche envisage donc de trouver une solution à ces lacunes identifiées dans la pratique de la conception préliminaire de structures de bâtiment. Ainsi, la présente recherche vise l'assistance de l'ingénieur dans la prise de décisions lors de la conception préliminaire d'un bâtiment telles le choix du matériau, le choix des systèmes structuraux, et leurs dispositions dans le bâtiment. L'exploration d'une vaste étendue de solutions doit aussi pouvoir être faite rapidement. Différents facteurs pouvant influencer le choix de ces éléments seront identifiés et seront traités de façon à aider le concepteur. La relation avec l'architecture est un facteur important et c'est pourquoi un lien étroit devra être tissé avec l'architecte du projet en question. StAr (Mora et coll., 2005), un projet de recherche qui sera expliqué dans le chapitre suivant, a considéré la relation étroite de l'ingénieur avec l'architecte. Contrairement à ce dernier, certains autres ont simplifié le problème de la conception préliminaire en ne tenant pas compte de l'architecture (Kumar & Raphael, 1997). Le prédimensionnement préliminaire est aussi une activité qui devra être réalisée, car elle apportera parfois des arguments amenant à choisir un système plutôt qu'un autre. Par exemple, un prédimensionnement des éléments pourra permettre une évaluation du coût de la structure par rapport à une autre, tel que fait pour le plancher avec FFG (Jain et coll., 1991), facteur à ne pas négliger lors des choix conceptuels. Les prochains chapitres expliqueront les moyens utilisés qui permettront de jeter les bases d'un logiciel qui permettra d'assister réellement la conception préliminaire de structures de bâtiments.

## CHAPITRE 2

### OBJECTIFS DU PROJET ET MÉTHODOLOGIE

Dans ce chapitre, la méthodologie utilisée pour réaliser la présente recherche est expliquée. L'objectif de la présente recherche est tout d'abord défini et suivi de chacune des étapes de développement du projet ainsi que de leur justification.

#### **2.1. Objectif**

L'informatique peut fournir aux ingénieurs un puissant outil centralisant les connaissances de conception préliminaire de bâtiment. Cette centralisation, alliée à l'implémentation des connaissances facilitant leur utilisation, permettrait de réaliser une conception préliminaire réfléchie, et ce, même avec une expérience peu avancée du domaine. L'outil pourrait fournir des arguments pour motiver le choix d'un système structural plutôt qu'un autre, des matériaux, et des emplacements des éléments structuraux. L'outil informatique, qui renfermerait les connaissances structurales acquises des ingénieurs experts, pourrait faciliter leur utilisation et leur transmission entre les générations d'ingénieurs.

À partir de la revue de la littérature effectuée, il a été trouvé que l'interaction entre l'utilisateur et l'informatique est souvent négligée. Une ligne directrice pour le projet a donc été établie soit donner à l'utilisateur le contrôle des opérations tout au long du processus de conception. **Le but du présent projet de recherche est d'assister l'ingénieur durant sa conception, sans tenter de le remplacer, d'une manière interactive en lui fournissant des règles du pouce, des conseils et des évaluations rapides.**

Dans le cadre d'une maîtrise, il est illusoire de penser que l'on peut concevoir un système informatique qui peut prendre en compte toutes les variables avec lesquelles l'ingénieur doit travailler. C'est pourquoi, tel qu'expliqué à la prochaine sous-section, le présent projet de recherche sera relié à d'autres recherches.

La présente recherche se limitera donc à la conception de planchers, et ce, pour quelques systèmes seulement de façon à démontrer la faisabilité et l'applicabilité de l'approche. Ainsi, la première phase d'implémentation, présentée dans ce mémoire, se limitera à quelques systèmes structuraux horizontaux pour des bâtiments de faible et moyenne hauteur. « Les statistiques de la construction indiquent que 60% de l'aire de planchers commerciaux en Amérique du Nord se trouve dans des bâtiments de quatre étages ou moins. » (Conseil canadien du bois, 2002) et 94% de tous les bâtiments ont entre 1 et 3 étages (D.A. Fanella & Ghosh, 1993). De plus, l'importance accordée aux systèmes structuraux horizontaux peut être appuyée par le fait que les systèmes de planchers sont l'activité de construction la plus coûteuse en temps et activités, spécialement pour un bâtiment avec cadres rigides (Idrus & Newman, 2003). Ils représentent environ 85% des coûts de la structure d'un projet de construction de bâtiment de hauteur faible à moyenne (D.A. Fanella & Ghosh, 1993) où le système de résistance latérale ne domine pas la conception de la structure.

## **2.2. Projets de recherches reliés**

Le présent projet de recherche est fortement relié à quatre autres projets : StAr, EsQUIsE, SEED-Config et celui de Ramachandran. Ces quatre projets de recherche seront décrits ainsi que leur lien au présent projet de recherche.

### **2.2.1. StAr**

Le prototype StAr permet à l'ingénieur en structure de mettre en place les systèmes structuraux à l'intérieur d'un modèle architectural en trois dimensions (Mora et coll., 2006). L'*approche descendante* est utilisée, c'est-à-dire que l'ingénieur divise le bâtiment en volumes structuraux indépendants, qui sont ensuite divisés en zones structurales. Les zones structurales permettent de regrouper les parties de la structure qui sont affectées par les mêmes conditions architecturales : mêmes charges d'utilisation, possibilités de mettre des colonnes ou non, etc. Chacun des systèmes structuraux est décomposé en trois sous-systèmes qui sont les systèmes horizontaux, les systèmes verticaux de résistance aux charges de gravité, et les systèmes verticaux de résistance aux charges latérales. Par la suite, les sous-systèmes structuraux sont

définis davantage par leurs assemblages de cadres et de plancher. Pour finir, ces assemblages sont décomposés en éléments structuraux de base et en connexions.

StAr comporte deux composantes, la représentation de l'architecture du bâtiment et du système structural, et les algorithmes de synthèse. L'ingénieur spécifie à StAr les sous-systèmes structuraux et assemblages tout en les positionnant dans le modèle du bâtiment. Des algorithmes ont été créés de façon à pouvoir connecter les éléments entre eux, faciliter l'inspection de l'architecture du bâtiment (exemple : vérifiez la continuité des murs pertinents à la structure), réaliser la configuration du système structural à même l'architecture (exemple : chercher des supports verticaux) et la vérification des solutions structurales (exemple : l'ensemble complet de la descente des charges latérales et de gravité) (Mora et coll., 2006).

La génération des éléments structuraux tels colonnes et poutres se fait de façon semi-automatique. L'ingénieur doit spécifier les lignes d'axes structuraux du bâtiment, et ce, dans les deux directions principales d'un même volume structural indépendant. Ensuite, les colonnes sont générées aux croisements des axes structuraux si cette rencontre n'est pas à l'intérieur d'une zone « sans colonne » spécifiée par l'architecte. Les poutres sont générées entre chacune des colonnes, façon de faire aussi utilisée par Jain et coll. (1991).

StAr utilise, jusqu'à maintenant, une quantité limitée de connaissances en conception préliminaire de structures de bâtiments. L'ingénieur n'est actuellement pas assisté lorsqu'il fait le choix des systèmes structuraux et aucun prédimensionnement n'est fait pour les dimensions des poutres, dalles et autres éléments structuraux.

### 2.2.2. EsQUIsE

Tout comme en conception structurale de bâtiment, le domaine de l'architecture est aussi pauvrement assisté lors de la conception préliminaire. EsQUIsE est un interpréteur géométrique d'une esquisse architecturale descriptive (Leclercq, 1999). L'interprétation se fait en temps réel afin de ne pas briser le flot de création de l'architecte. L'interaction homme-machine pour la réalisation d'esquisses a été trouvée

déiciente lorsqu'assurée par un clavier et une souris. C'est donc au moyen d'un crayon numérique que l'on trace des lignes sur une tablette numérique sur laquelle est projetée l'interface du prototype. L'esquisse étant une quantité impressionnante de points, une synthétisation des données est faite. Plusieurs modules, sont nécessaires pour reconnaître l'esquisse dont un dictionnaire permettant de reconnaître certaines annotations faites par l'architecte.

À l'aide de l'interprétation faite de l'esquisse, EsQULsE peut produire un modèle en deux dimensions et demie, car les murs sont générés par une extrusion du plan en deux dimensions. Ceci facilite la visualisation de la conception préliminaire du bâtiment autant pour l'architecte lui-même que pour le client. Le prototype produit une évaluation de l'efficacité énergétique de l'enveloppe du bâtiment donnant ainsi une indication rapide à l'architecte sur l'efficacité énergétique. Ceci permet au concepteur de faire immédiatement des changements s'ils s'imposent. D'autres modules d'analyse seront peut-être appelés à être ajoutés au prototype dans le but de fournir davantage d'informations préliminaires sur le bâtiment en conception (Leclercq, 1999).

### 2.2.3. SEED-Config

Les nœuds décisionnels qui sont utilisés dans le présent projet de recherche sont inspirés des nœuds technologiques développés pour SEED-Config.

Le besoin d'un moteur d'inférence (comme pour un système expert) est supprimé, car l'utilisateur contrôle quelles règles applicables sont sélectionnées pour les changements à la conception. Les relations inverses sont permises de façon à ce que l'utilisateur puisse spécifier un élément de la conception en aval sans avoir à spécifier les nœuds en amont menant à cet élément de la conception (Rivard & Fenves, 2000).

Un nœud technologique a trois fonctions principales :

1. Spécification des prédecesseurs : Indique quels nœuds doivent être actifs pour que le nœud actuel puisse être activé.
2. L'applicabilité du nœud : Cette fonction observe le contexte de conception et vérifie si le nœud est applicable dans une telle situation.

3. La spécification de l'action : Décrit et réalise l'action qui doit être prise lorsque les conditions 1 et 2 sont satisfaites.

Des efforts ont été consacrés afin que les nœuds soient dynamiquement définissables de manière à permettre à l'ingénieur utilisateur d'ajouter de nouvelles options.

Trois modes de conception sont possibles :

1. Mode sélectif : Le designer sélectionne un nœud technologique n'importe où dans la hiérarchie (utile lorsque l'utilisateur a une bonne idée de ce qu'il veut).
2. Mode itératif : Le designer est mis au courant des nœuds applicables au fur et à mesure que la conception avance.
3. Mode automatique : Tous les cheminements possibles sont créés à partir de restrictions données par le concepteur. Il choisit ensuite la conception la plus appropriée.

#### **2.2.4. Ramachandran**

Ramachandran (2004) a proposé un système expert qui n'aide pas à la conception préliminaire de structures, mais bien à celle de l'enveloppe d'un bâtiment. Préconisant l'élimination du moteur d'inférence, il donne à l'utilisateur tout le contrôle. Il a aussi développé une interface usager dont les idées directrices pourraient s'appliquer au domaine de la conception structurale. À l'aide d'un arbre de décision, la conception de l'enveloppe s'effectue en apportant à l'utilisateur une assistance qui, basée sur des connaissances et normes, donne des conseils sur l'utilisation de certaines composantes de l'enveloppe et évalue aussi la conception en fonction de paramètres tels la stabilité structurale, la valeur de déperdition de chaleur, etc. L'interface usager développée est intéressante dû au fait qu'elle regroupe, sous une même vue, la définition du problème, les suggestions basées sur les connaissances, l'arbre de décision, l'historique des décisions, la génération et l'évaluation d'alternatives, la configuration des couches de l'enveloppe et la spécification des matériaux, une vue graphique de la conception, l'évaluation de la conception, les propriétés des matériaux, et le modèle analytique. Cette façon de faire permet à l'utilisateur d'avoir bien en vue toutes les facettes de la conception et lui rend aussi le contrôle des activités de

conception. C'est pourquoi l'interface développée sera inspirée de celle présentée par Ramachandran.

### 2.3. Approche adoptée

Dans cette sous-section, l'approche adoptée pour le module de gestion des connaissances (DKM), principal objet de cette recherche, sera expliquée.

Une multitude de méthodes de raisonnement ont été mises de l'avant afin d'assister la conception préliminaire tel que vu à la section 1.5. Chacun des types de raisonnement utilise un type de connaissance particulier amenant à des résultats variables. De plus, un élément important à considérer est l'interaction avec l'usager, car cette facette de l'assistance à la conception préliminaire semble avoir été hautement négligée, souvent au profit d'une automatisation.

Tel que décrit à la sous-section 1.6, les systèmes experts utilisent les règles avec une *partie gauche et droite* pour l'implémentation des connaissances. L'utilisation de règles est adoptée pour ce prototype, mais cette fois sans le moteur d'inférence qui rend l'ajout de connaissances difficile et le processus de raisonnement pratiquement automatique. L'utilisation de règles avec *parties gauches et droites* facilite l'exploitation du savoir des experts. Lors de la conception préliminaire, plusieurs paramètres doivent être présumés afin de pouvoir évaluer une première solution de conception.

La représentation des connaissances est très importante pour un outil de conception préliminaire de structure. Il faut s'assurer que les connaissances utilisées sont transparentes pour l'utilisateur, de façon à ce qu'il puisse juger de la pertinence de l'application de celles-ci. La représentation des connaissances privilégiée dans la présente recherche s'inspire grandement des nœuds technologiques (ou options de conception) développés dans l'approche BENT, « Building Entity and Technology » (Fenves et coll., 2000; Gomez, 1998). Cette façon de faire permet le raisonnement à différents niveaux d'abstractions, soit les volumes structuraux indépendants (ISV), les zones structurales, les sous-systèmes structuraux, les assemblages structuraux et les éléments structuraux de base. L'*approche descendante* sera utilisée afin de respecter

le raisonnement à ces divers niveaux d'abstractions qui ressemble davantage au raisonnement effectué par les ingénieurs praticiens, contrairement à l'*approche ascendante* préconisée dans les logiciels d'analyse actuels.

Le raisonnement s'effectue en fonction des choix effectués par l'utilisateur, il a le contrôle sur toutes les étapes de conception. L'assistance est apportée à l'aide de suggestions et d'évaluations basées sur les connaissances. Cette façon de faire met le concepteur en confiance, lui laisse la possibilité de ne pas considérer les suggestions et évaluations effectuées. L'approche de l'arbre de nœuds technologiques (appelés ici nœuds décisionnels) facilite l'exploration rapide d'options. Il est aussi possible de tenir compte des connaissances qu'un ingénieur expert utilise, contrairement au raisonnement à l'aide de la *logique formelle*, raisonnement à partir des lois de la physique et l'algorithme génétique. Les connaissances implémentées dans les nœuds technologiques sont sous la forme de règles, méthode propre aux systèmes experts. Un nœud décisionnel contient l'information d'un élément structural, il est donc possible d'ajouter un élément sans faire de modifications aux autres nœuds, facilitant ainsi l'ajout de technologies et de connaissances.

L'assistance de l'ingénieur est possible à travers les décisions prises à chacun des niveaux d'abstraction du bâtiment. L'interaction avec l'utilisateur étant une facette très négligée dans les recherches précédentes, il faut établir comment l'utilisateur peut être assisté à travers chacune des étapes de conception. L'interaction avec l'architecture est assurée par le raisonnement géométrique fourni avec le modèle 3D, créé dans StAr (Mora et coll., 2006), regroupant le modèle architectural et le modèle structural tel qu'expliqué à la sous-section 2.2.1. L'utilisation de ces arbres de décision facilite le retour en arrière de façon à pouvoir faire de nouveaux choix de conception, tout en conservant les décisions prises à des niveaux supérieurs de l'arbre.

La conception intégrée est une nouvelle philosophie de conception qui vise à mettre en contact tous les intervenants d'un projet le plus tôt possible dans le processus de conception. Ainsi, la création d'un environnement de design intégré est essentielle si l'on veut pouvoir assister le travail de l'ingénieur en structure puisque c'est dans ce

nouveau contexte qu'il devra éventuellement évoluer. Toutefois, il ne sera pas possible de développer ici tous les modules d'un tel environnement. Cependant, le concept structural est défini tôt dans le processus de conception d'un bâtiment et la structure du bâtiment peut influencer la conception architecturale à plusieurs niveaux. Ainsi, il pourrait être préférable de fournir à l'architecte une évaluation des possibilités structurales du bâtiment afin qu'il puisse tenir compte des contraintes que pourrait imposer la structure.

Une interaction entre le prototype EsQUIsE (Leclercq & Juchmes, 2002) et StAr (Mora et coll., 2005) pourra offrir la base pour permettre une première interaction entre intervenants. Cette interaction pourrait être bénéfique autant pour l'architecte que pour l'ingénieur. En effet, le résultat final de la conception du bâtiment intégrerait probablement mieux la structure et l'ingénieur aurait peut-être moins de difficultés à réaliser la conception de la structure.

Finalement, le contexte global dans lequel le module de gestion des connaissances évolue, montré à la figure 7 peut être décrit ainsi : le modèle 3D est fourni à StAr à partir d'un outil de modélisation 3D ou à partir d'une esquisse qui serait interprétée par EsQUIsE qui en ferait un modèle 3D. Ensuite, StAr permet à l'ingénieur de définir les entités structurales et de raisonner géométriquement. StAr communique avec le module de gestion des connaissances (DKM) afin de fournir à l'ingénieur les connaissances en conception préliminaire. Finalement, le modèle 3D de la structure pourrait éventuellement être transféré aux logiciels d'analyses présentement utilisés sur le marché de façon à pouvoir analyser précisément la structure et l'optimiser.

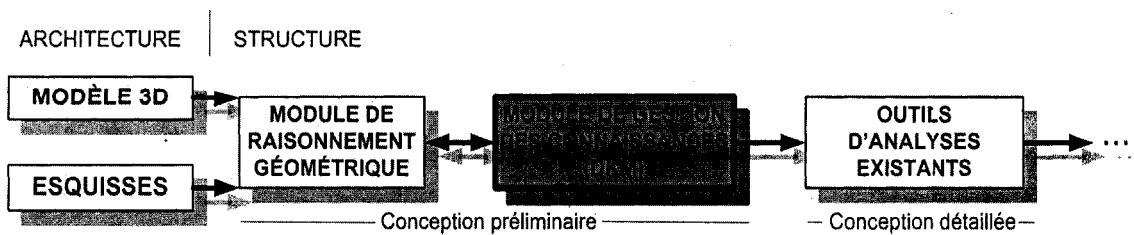


Figure 7 Contexte global de la recherche entourant le DKM

## **2.4. Étapes de développement du projet**

La présente recherche comporte les étapes suivantes : (1) développement de la base de connaissances, (2) modélisation des connaissances, (3) définition des caractéristiques du prototype en fonction du processus de conception, (4) implémentation des connaissances, (5) évaluation et tests du prototype. Toutes ces étapes seront expliquées ci-dessous.

### **2.4.1. Développement de la base de connaissance**

Le développement de la base de connaissance comporte deux volets. Premièrement, une recherche doit être faite pour obtenir les connaissances permettant le choix entre les différents types de structures mis à la disposition d'un concepteur. La base de connaissances en conception préliminaire de bâtiment pourra contenir des connaissances très diversifiées. Toutefois, dans le cadre d'un mémoire, il sera nécessaire de se limiter à une certaine partie seulement des étapes de la conception préliminaire. Ainsi, les connaissances sont recherchées pour les décisions structurales globales telles que le choix des matériaux, et la séparation du bâtiment en volumes structuraux indépendant. De plus, les connaissances nécessaires à la conception des sous-systèmes horizontaux (planchers) seront aussi visées.

Deuxièmement, les connaissances doivent être organisées de façon à faciliter leur implémentation tout en pouvant être présentées sous une forme acceptable dans un contexte de mise en forme officielle. Les connaissances doivent être regroupées en fonction des étapes de conception du processus de conception préliminaire qui sera expliqué à la sous-section 3.3.

### **2.4.2. Modélisation des connaissances**

Les connaissances doivent être modélisées de façon à permettre leur implémentation. Pour ce faire, une analyse des connaissances disponibles doit être faite. Ensuite, elles doivent être organisées de façon à pouvoir être utilisées par l'ingénieur de façon simple et rapide.

### **2.4.3. Définition des caractéristiques du prototype en fonction du processus de des conception**

L'assistance qui peut être apportée par le logiciel à l'ingénieur doit être définie en fonction de chacune des étapes du processus de design. Pour ce faire, une session de design typique peut être faite à l'aide d'un scénarimage<sup>5</sup>. Ainsi, pour chacune des étapes, l'assistance à l'ingénieur pourra être définie. Les caractéristiques du prototype découlent de l'assistance à l'ingénieur prévue.

### **2.4.4. Implémentation des connaissances**

« Il a souvent été dit qu'une personne ne comprend pas réellement quelque chose tant qu'elle ne l'a pas montré à quelqu'un d'autre. Maintenant, une personne ne comprend pas réellement tant qu'elle ne peut le montrer à un ordinateur. »<sup>6</sup> (Dym & Levitt, 1991)

Pour démontrer l'approche générale adoptée et pour s'assurer que des connaissances en conception préliminaire sont programmables et utiles à l'ingénieur, un prototype est développé.

Pour l'implémentation des connaissances, il est nécessaire de connaître un langage de programmation approprié. Le langage JAVA est utilisé pour cette recherche. L'architecture globale du système doit être définie. L'architecture devra tenir compte de l'interaction future avec le module de raisonnement géométrique. L'acquisition des moyens informatiques doit ensuite être faite. Une coquille de chacune des classes qui sera nécessaire à son implémentation doit être réalisée préalablement à son implémentation. Finalement, les connaissances pertinentes à la définition des sous-systèmes horizontaux sont implémentées à partir des classes initiales.

---

<sup>5</sup> Série de dessins comparable à une bande dessinée [...] Anglais : Storyboard (Office de la langue française, 2005).

<sup>6</sup> Traduction libre.

#### **2.4.5. Évaluation et tests du prototype**

Plusieurs alternatives pour la réalisation de tests et d'évaluation peuvent être envisagées. Toutefois, étant donné que le présent prototype contient un domaine d'application restreint aux connaissances implémentées, il est plus facile de simuler une conception de structures de bâtiment. Éventuellement, lorsque les connaissances implémentées couvriront la majorité des systèmes structuraux possibles, il sera envisageable de faire une validation par des praticiens en situation réelle de conception.

Dans cette recherche, l'évaluation sera réalisée à partir de l'avis de chercheurs externes au projet de recherche et de l'avis de praticiens ayant assisté à une démonstration. L'évaluation et les tests du prototype sont donc réalisés par la présentation de celui-ci à une conférence internationale et d'autres présentations non officielles, destinées aux chercheurs. De plus, afin de recueillir l'avis de praticiens, une autre présentation sera faite aux fins de discussions.

#### **2.5. Justification de la méthodologie**

La méthodologie adoptée et décrite dans la section précédente s'appuie sur une méthodologie bien établie en génie logiciel (Quatrani, 1998). Cette méthodologie comporte quatre étapes orientées sur le processus du projet. Chacune de ces étapes est liée à celles du développement du présent projet de recherche :

1. La capture des exigences : Une narration de ce que le système devrait pouvoir faire;
2. L'analyse et le design : Une description de la façon dont le système sera réalisé durant la phase d'implémentation;
3. Implémentation : La production de code qui résulte en un système exécutable;
4. Test : La vérification du système complet.

Chacune des quatre étapes mentionnées ci-haut correspond aux étapes de développement du présent projet de recherche (sous-section 2.4). La capture des exigences correspond à la définition des caractéristiques du prototype et est discutée dans le chapitre 4 intitulé « Spécifications et conception d'un outil d'aide à la

conception ». L'assistance envisagée y est présentée pour toutes les étapes du processus de conception préliminaire. L'analyse et le design ainsi que l'implémentation, correspondant à l'étape de l'implémentation des connaissances, sont présentés dans le chapitre 5 intitulé « Implémentation du prototype » suivi par les détails relatifs à l'implémentation. Le chapitre 6 présentera le manuel de l'utilisateur et une session de design typique. Les tests, correspondants à l'étape d'évaluation et tests du prototype, sont présentés dans le chapitre 7 intitulé « Validation du prototype » qui fera état de la validation effectuée sur le prototype. Le chapitre 8 présentera un sommaire du mémoire et identifiera clairement quelles sont les contributions apportées et indiquera quels pourraient être les travaux de recherche futurs pouvant faire suite à ceux réalisés au cours de ce mémoire.

## **CHAPITRE 3**

### **ACQUISITION DE CONNAISSANCES EN CONCEPTION PRÉLIMINAIRE DE STRUCTURES DE BÂTIMENTS**

Le présent chapitre présente les types de documents utilisés pour l'acquisition de connaissances ainsi que les moyens utilisés pour compléter la base de connaissances. Un diagramme représentant le processus de conception préliminaire de bâtiments est présenté et sa validation est aussi expliquée. Un extrait de la base de connaissance est présenté et fourni en annexe 2.

#### **3.1. But de l'acquisition de connaissances en conception préliminaire de bâtiments**

Les connaissances recherchées sont dispersées à travers de multiples documents qui abordent la conception préliminaire de bâtiments. Afin de permettre l'implémentation de ces connaissances, il est nécessaire de faire l'inventaire des connaissances qu'il est possible d'utiliser pour assister l'utilisateur à travers tout le processus de conception préliminaire. De même, il est nécessaire de regrouper les connaissances en fonction de leur implémentation.

Une base de connaissances complète, couvrant tous les aspects de la conception préliminaire, n'est toutefois pas disponible dans la littérature, quoique quelques ouvrages se soient démarqués par leur qualité. L'acquisition d'une base de connaissances en conception préliminaire de structures de bâtiments est donc nécessaire pour permettre la réalisation d'une étude sur l'assistance de l'ingénieur à travers les étapes de conception préliminaire de même que pour la réalisation d'un prototype en ce domaine.

#### **3.2. Sources utilisées pour l'acquisition de connaissances en conception préliminaire de bâtiments**

Les connaissances structurales recherchées sont celles permettant de réaliser la conception préliminaire d'une structure ainsi que le prédimensionnement des éléments structuraux. La conception préliminaire peut souvent être guidée par des principes

généraux tandis que le prédimensionnement des éléments structuraux utilise davantage les règles du pouce utilisées par les experts.

La recherche de connaissances en conception préliminaire est une tâche difficile par le fait que ces connaissances ne sont habituellement pas clairement définies et peu disponibles dans la littérature. Différents projets de recherche ont eu pour but de rechercher des connaissances utilisées tôt dans le processus de conception de structures. Toutefois, ces projets de recherche ont porté sur divers types de structures et sur différentes facettes de la conception préliminaire. Divers moyens ont été utilisés : revue de la littérature disponible sur la conception de structure, entrevues personnelles avec des experts du milieu, observation d'experts réalisant une conception préliminaire (Lecomte, 2003; Meniru et coll., 2003), expérience personnelle des auteurs (Dekker, 2000; Korman et coll., 2003), observation d'experts lors de réunion avec d'autres professionnels. Dans le cadre de cette recherche, seule l'observation d'experts lors de réunion avec d'autres professionnels n'a pas été réalisée faute d'opportunité.

Différentes sources documentaires ont dû être utilisées pour réaliser une base de connaissances qui soit la plus complète que possible. Divers ouvrages se sont particulièrement distingués pour leur grande qualité. Parmi ceux-ci, il est important de mentionner les livres « Structures » de Schodek (2004), « Structural concepts and systems for architects and engineers » de Lin et Stotesbury (1988), « Building structures » de Ambrose (1993) et « Reinforced concrete preliminary design for architects and builders » de Shaeffer (1992). Beaucoup d'autres livres ont été consultés pour constituer la base de connaissances et sont cités dans la liste des références.

Les différents manuels et codes fournis par les associations des différents matériaux tels bois (Conseil canadien du bois, 2001), acier (Institut canadien de la construction en acier, 2000) et béton (Association canadienne du ciment Portland, 1995) sont aussi une source d'informations importante. Des tableaux y donnant les résistances en flexion et en cisaillement pour différents types de sections disponibles sont présentés.

Outre les livres, il est possible d'accéder directement à partir de l'Internet à des documents divers rendus disponibles par différents auteurs. Il s'agit parfois de sites Internet d'associations vantant les mérites d'un matériau structural en particulier. Il est possible de retrouver sur ceux-ci des cas où le matériau a été utilisé avantageusement et aussi une série de critères qui pourraient faire pencher la balance pour l'utilisation de ce matériau. En d'autres occasions, il est possible d'accéder à des notes de cours en conception structurale réalisées par un ingénieur en structure. Ces notes de cours, souvent adressées à des étudiants en ingénierie, dressent parfois une série de règles du pouce qu'il est possible d'utiliser pour débuter un design structural. Plus rarement, il est possible d'accéder à des forums de discussions entre ingénieurs en structure desquels on peut tirer certaines connaissances en conception préliminaire (Biggs, 1996).

Des thèses sur le sujet de la conception préliminaire permettent d'extraire quelques connaissances. Toutefois, certaines thèses, telles que celle de Fischer (1991), fournissent une base de connaissances exhaustives. Divers rapports sont aussi commandés par des associations telles que celles de l'Association du ciment Portland donnant des lignes directrices pour le choix des sous-systèmes structuraux horizontaux (Association canadienne du ciment Portland, 2005; Fanella, 2000; Rogowsky & Gollcher, 2002).

Des documents audiovisuels peuvent aussi être utiles tels que celui consulté sur le choix des systèmes structuraux en acier réalisé par la Fondation pour la formation en charpente d'acier (1990).

Les fabricants publient aussi des documents qui peuvent servir à faire un choix entre plusieurs types de systèmes structuraux. C'est le cas notamment pour les fabricants d'éléments de béton préfabriqués (Consolis, 2003) ou encore pour les fabricants d'éléments d'acier (Canam - Poutrelles et tablier métallique, 2005; Canam - Solutions + Service, 2003).

Des revues professionnelles pertinentes à la conception de structures de bâtiments peuvent également été consultées. Elles renferment des connaissances qui peuvent être pertinentes à la conception préliminaire, notamment « Modern Steel Construction » (Fisher, 2005; Robert & David, 2006; Saunders, 2005).

Outre les documents précédemment décrits, il est possible de consulter des experts en conception structurale. Bien des connaissances sont utilisées par les experts de façon informelle. Ces experts, très occupés par leurs différents projets, n'ont souvent pas le temps et le désir de mettre toutes ces connaissances bout à bout afin d'en faire un recueil exhaustif. Divers moyens ont été utilisés par les chercheurs désirant formaliser les connaissances d'experts utilisées lors d'une conception préliminaire : questionnaires, entrevues et observation directe d'expert.

Les questionnaires sont souvent utilisés pour obtenir des informations du milieu des praticiens, entre autres pour réaliser des études dans le domaine de la gestion de projet ainsi que pour certaines études en conception préliminaire de structures. Avec l'usage de questionnaires, il est difficile d'avoir des connaissances de façon détaillée sans avoir à faire un questionnaire très long qui a peu de chances d'être complété par les experts. Il s'avère aussi que cette méthode a le désavantage de ne pas avoir de contact direct avec l'expert (Fischer, 1991).

La réalisation d'entrevue permet un contact direct avec l'expert. Cette façon de faire permet de répondre à des questions précises qui peuvent être identifiées suite à une revue de la littérature disponible. Les interviews peuvent être la meilleure méthode à utiliser (Fischer, 1991).

Il peut toutefois être possible, dû au fait que c'est le chercheur qui guide l'interview, de ne pas cibler certaines connaissances importantes qui auraient pu être identifiées à l'aide d'une autre méthode de recherche des connaissances. Ce type d'entrevue est parfois complété par une seconde partie consistant à faire l'observation directe d'expert. Le processus de conception préliminaire de la structure a été analysé lors d'une étude réalisée sur trois experts (Lecomte, 2003). L'utilisation d'observations

directes a aussi été faite pour la conception préliminaire de l'architecture (Meniru et coll., 2003). D'autres projets de recherches ont aussi utilisé ce type d'observation dont Shea & Cagan (1999).

### **3.3. Processus de conception préliminaire de structures de bâtiments**

Un processus de conception préliminaire a été établi et validé par l'observation d'experts en situation de design. Le processus et la validation sont l'objet des prochaines sous-sections.

#### **3.3.1. Explication du processus de conception préliminaire**

Le processus de conception montré à la figure 8 a été établi à l'aide de la littérature et de l'expérience des chercheurs impliqués. C'est le processus qui correspond le mieux à celui suivi par les ingénieurs tôt en conception. Le processus comprend toutes les décisions importantes concernant la conception de la structure.

La première étape consiste à recueillir les informations de base sur le projet soit la localisation du bâtiment et la restriction de hauteur et autres. On fait l'hypothèse ici, qu'un minimum d'information architecturale est disponible; soit une esquisse architecturale ou des plans préliminaires.

La deuxième étape consiste à créer des volumes structuraux indépendants (ISV) si nécessaires. Il se pourrait qu'un bâtiment puisse avoir à contenir deux parties de bâtiment que l'on veut dissocier, comme dans le cas d'un bâtiment en L dont l'on voudrait améliorer le comportement sismique en dissociant l'aile formant le haut du L.

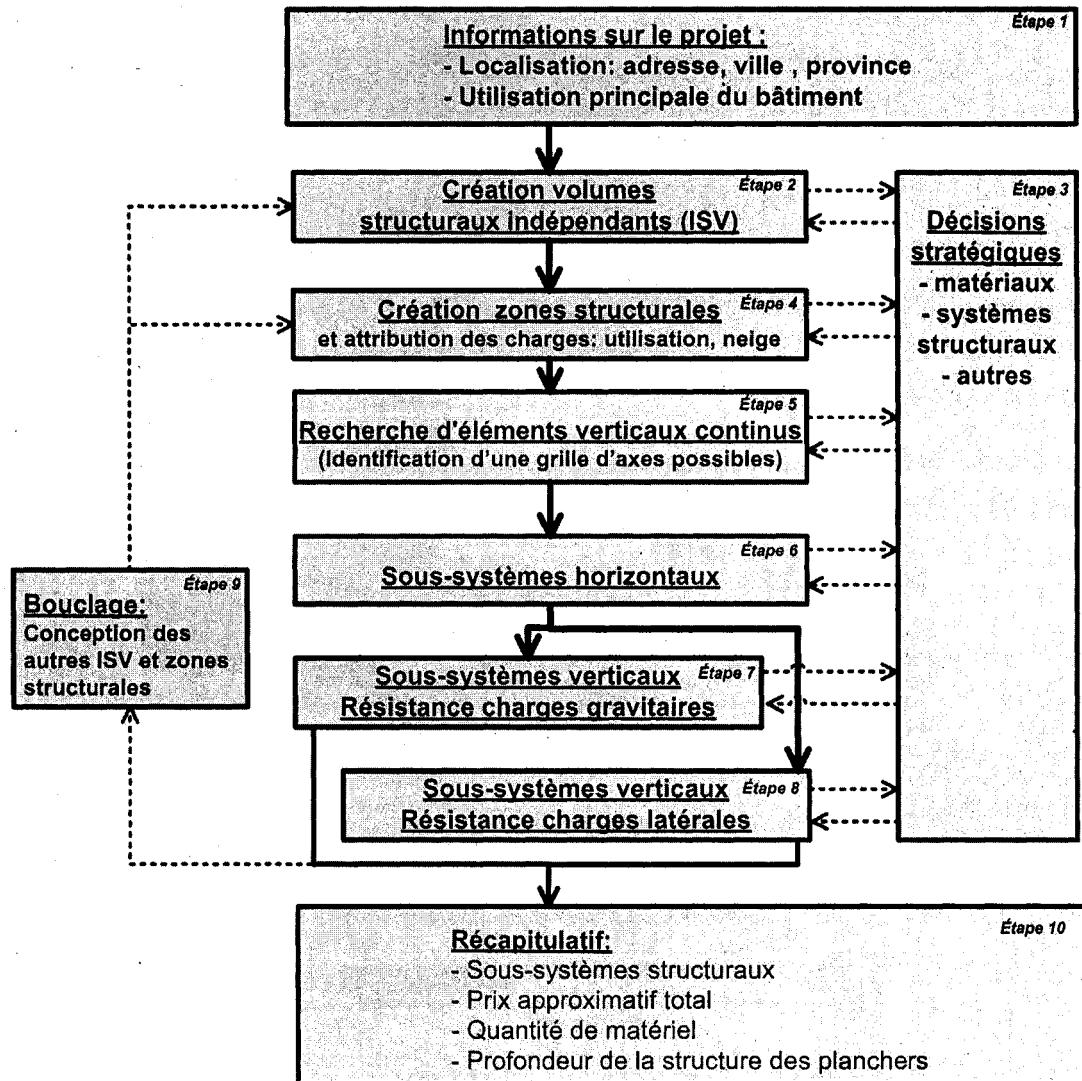


Figure 8 Processus de conception préliminaire de la structure

La troisième étape, en parallèle par rapport aux autres décisions, suppose qu'un ingénieur fait souvent des choix stratégiques, par rapport à : son expérience, ce qui est habituellement fait en fonction du type d'utilisation du bâtiment, la disponibilité des matériaux, la rapidité de construction, etc. Ainsi, à tout moment, l'ingénieur peut décider de faire des choix à un niveau stratégique, limitant ainsi l'espace solution.

La quatrième étape est la création de zones structurales incluant l'attribution des charges vives pour chacune des zones. Ces zones visent à former un regroupement

d'espaces architecturaux affectés des mêmes conditions telles charge vive, dimensions semblables de baies, profondeur de structure possible, etc.

La cinquième étape consiste en la recherche d'éléments verticaux continus à travers les étages de manière à assurer la descente des charges jusqu'aux fondations. En ayant en tête les éléments continus d'un étage à l'autre, et les successions d'espaces pouvant accueillir un élément structural vertical, l'ingénieur identifie des axes structuraux.

La sixième étape concerne le design des éléments horizontaux. Sur la base de la trame structurale identifiée, l'ingénieur peut évaluer plusieurs solutions, et ce, pour une même trame structurale.

Vient ensuite le design des éléments verticaux, à la septième et huitième étape, qui dépend grandement du poids propre des éléments horizontaux. Pour compléter la conception préliminaire du bâtiment, un bouclage doit être fait pour les autres zones structurales et ISV.

Finalement, la dixième étape consiste à faire le compte rendu du prix approximatif total, du poids sur chacune des colonnes (pour permettre la conception des fondations) ainsi que les profondeurs de structure nécessaires pour chacun des étages.

### **3.3.2. Validation du processus de conception préliminaire avec l'observation d'experts**

Une validation a été effectuée à l'aide d'interviews réalisées avec des experts lors d'un stage fait par l'auteur à l'été 2004. Les interviews avaient deux parties : l'observation de l'expert en situation de conception (45 minutes) et des questions directes (15 minutes). Durant la période de conception préliminaire, des plans préliminaires d'un futur pavillon universitaire, sur lesquels aucun ingénieur n'avait eu d'influence, ont été soumis à deux experts. Ils ont été filmés pendant qu'ils réalisaient la conception préliminaire et il leur a été demandé de dire tout haut ce à quoi ils pensaient, selon la méthode « Think

Aloud » (Atman et coll., 1999; Meniru et coll., 2003), de façon à pouvoir suivre leurs raisonnements.

Bien qu'il faudrait réaliser une multitude d'interviews avec différents types de bâtiments pour valider complètement le processus de conception préliminaire décrit, les observations faites durant la période de conception préliminaire ont permis de valider, d'une manière préliminaire, la plupart des étapes du processus telles que décrites dans le processus montré en figure 8.

À la demande des concepteurs, les interviews ont débuté par spécifier où était situé le bâtiment et quelle était sa vocation (Étape 1). Pour les bâtiments institutionnels, l'ingénieur s'attend à un bâtiment de bonne qualité et ils se sont ensuite questionnés sur les restrictions de hauteur. Dès lors, les concepteurs avaient une idée du type de structure à concevoir (Étape 3). Pour un bâtiment institutionnel, le béton est souvent utilisé, et en considérant les charges vives en fonction de l'usage, le système pour lequel les concepteurs optaient déjà à ce moment était une dalle de béton avec abques. Ils voulaient toutefois évaluer d'autres possibilités afin de s'assurer d'avoir la structure la moins coûteuse et/ou la mieux adaptée. Le bâtiment présenté ne semblait pas requérir une division du bâtiment en ISV, et probablement pour cette raison, aucun commentaire n'a été fait à ce sujet (Étape 2). Le concept de zones structurales a d'abord été soulevé par le marquage, sur les plans, des zones se poursuivant sur plusieurs étages (Étape 4). Les charges ont été définies par la suite pour les zones qui n'étaient pas des zones de cours, soit la mécanique, gymnase, etc. Les étages supérieurs, affectés par plusieurs zones continues d'un étage à l'autre, ont été mis à part, ils auraient probablement une structure différente du reste du bâtiment. La recherche d'éléments verticaux continus (Étape 5) s'est faite en considérant tout d'abord les cages d'escalier et d'ascenseurs, pour se poursuivre avec les colonnes partant du sous-sol jusqu'aux étages supérieurs. Cette recherche s'est faite à l'aide de feuilles de papier-calque superposées alternativement sur les plans de chaque étage. La conception des éléments horizontaux s'est faite sur la base de la grille d'axe établie par l'architecte, et rapidement approuvée par l'ingénieur : une trame de 6 mètres par 9 mètres (Étape 6). Le concepteur débute par un dimensionnement rapide avec règles du

pouce pour établir la faisabilité d'une solution et poursuit ensuite avec une analyse plus précise avec un logiciel. Pour la conception des éléments verticaux, mis à part le positionnement approximatif des colonnes et l'identification des cages d'escaliers et ascenseurs comme dispositifs de résistance latérale, le concepteur n'en a pas fait le détail, par manque de temps et par le niveau d'avancement des plans qui ne le justifiait pas.

Toutes ces observations amènent à croire que le processus établi pourrait servir à assister l'utilisateur selon sa méthode habituelle de raisonnement et le processus établi est donc utilisé dans le cadre de cette recherche.

Il est important de noter qu'il peut être parfois difficile de s'assurer que les conditions de l'observation n'influent pas sur les résultats. En effet, le fait de filmer le professionnel, de le mettre dans un contexte artificiel, de lui demander de dire tout haut ce qu'il pense, de supposer que l'interviewer peut jouer un rôle tel que d'être le client, peut probablement perturber la façon de faire habituelle du professionnel. Similairement, si l'on voulait réaliser la même chose pour le processus suivi par un ingénieur, il pourrait être plus difficile pour l'interviewer d'être considéré comme l'architecte du projet. En effet, l'architecte a une certaine idée en tête qui peut ne pas être clairement définie sur des dessins préliminaires. Cette mise en vase clos de l'ingénieur, pour réaliser sa conception préliminaire, n'est peut-être pas souhaitable. Aussi, l'échelle des plans présentés peut aussi influencer le concepteur, car ils semblent utiliser habituellement une échelle de 1:100. S'ajoutant à cela, en fonction du degré de définition de la conception préliminaire voulue, les plans doivent être suffisamment détaillés pour montrer l'arrangement des cloisons afin de pouvoir disposer les colonnes et murs structuraux. Finalement, une vue en élévation de chacune des façades est préférable, car l'ingénieur les utilise pour déterminer les emplacements possibles de murs de contreventements dans les murs extérieurs (Parent, 2004).

### **3.4. Base de connaissances en conception préliminaire de structures de bâtiments**

Un extrait de la base de connaissance constituée dans le cadre de cette recherche est présenté en annexe 2. Les sources utilisées sont celles décrites à la sous-section 3.2. Plusieurs documents non cités dans cette sous-section sont aussi utilisés et sont indiqués à chacune des connaissances présentées.

Les connaissances contiennent des règles du pouce ainsi qu'une grande quantité de lignes directrices et conseils concernant la conception préliminaire. Elles ont été retrouvées à travers toutes les sources utilisées. Les connaissances sont numérotées de façon à ce qu'il soit plus facile d'y référer dans les chapitres suivants.

Un exemple de règle du pouce et de conseil peut être présenté. Ainsi, une règle du pouce qui pourrait être utilisée pour la détermination de la profondeur approximative d'une poutrelle serait de diviser la portée de la poutrelle par 20. Cette valeur peut être retrouvée à partir d'un tableau de Schodek (2004) montré au Tableau VIII, page 167. Un conseil qui pourrait être fourni à l'ingénieur serait de considérer des baies de  $9 \times 12$  mètres pour l'utilisation d'un système de poutrelles d'acier, car c'est ce qui est trouvé comme étant le plus économique selon Newman (1997).

Les connaissances sont présentées dans l'annexe 2 en fonction des étapes du processus de conception préliminaire de la figure 8. L'extrait de la base de connaissance présenté couvre les étapes 2 à 6. L'étape 6, concernant la conception des sous-systèmes horizontaux, est couverte partiellement. Seuls quelques sous-systèmes sont présentés. Ainsi, des connaissances donnent des conseils sur les stratégies à adopter en ce qui concerne les volumes structuraux indépendants, les zones structurales, les choix stratégiques, la recherche d'éléments verticaux continus et finalement la conception des éléments horizontaux. Les connaissances sont donc trouvées pour différents niveaux d'abstraction du modèle de bâtiment.

Les connaissances recueillies ont permis d'avoir une vue d'ensemble des connaissances qu'il pourrait être possible d'utiliser dans un logiciel visant à assister

l'ingénieur dans ses tâches de conception préliminaire. Dans le prochain chapitre, l'organisation de certaines des connaissances recueillies sous forme d'arbres de décisions est présentée.

## CHAPITRE 4

### SPÉCIFICATIONS ET CONCEPTION D'UN OUTIL D'AIDE À LA CONCEPTION

#### 4.1. Introduction

Dans les recherches précédentes, l'assistance variait énormément. Parfois l'assistance à la conception était une simple validation d'une conception que l'utilisateur réalisait seul. D'autres fois la conception était majoritairement faite de façon automatique. Il a rarement été décrit, dans la littérature, comment il serait possible d'assister un ingénieur réalisant une conception préliminaire tout en lui donnant le contrôle. Ainsi, rares sont les interfaces présentées qui considéraient une interaction constante avec l'utilisateur. Ce chapitre décrit comment il est possible de raisonner à partir des connaissances du type règle du pouce, de l'information provenant de fabricants d'éléments structuraux, des conseils généraux pour le choix des sous-systèmes structuraux et de leurs emplacements, etc. Une proposition d'interface est aussi présentée.

#### 4.2. Éléments essentiels à l'assistance apportée à l'utilisateur

Afin d'assister adéquatement l'utilisateur et de lui donner le contrôle lors de la conception, cinq moyens sont nécessaires :

1. Les connaissances doivent être modélisées de façon à être transparentes à l'utilisateur. Ceci explique l'utilisation des nœuds technologiques tels qu'expliqués à la sous-section 2.2.3 qui sont appelés ici nœuds décisionnels.
2. Les conseils généraux, très présents dans la littérature, doivent être présentés à l'utilisateur au moment opportun tout au long de la réalisation de la conception préliminaire.
3. Il doit être possible de guider l'utilisateur à travers les différentes étapes du processus et d'obtenir de l'information de sa part.
4. Il faut fournir la possibilité de revenir sur des décisions prises antérieurement, de changer ces décisions et de consulter les conseils qui avaient pu influencer sa décision à ce moment.
5. L'utilisateur doit aussi avoir une référence visuelle (3D) des éléments qu'il conçoit de façon à prendre des décisions réfléchies.

#### **4.3. Type d'interaction souhaitée**

L'interaction entre l'utilisateur et le prototype doit être constante tout au long des étapes de conception de manière à ce que l'utilisateur ait vraiment le contrôle des opérations faites par le prototype. Ainsi, l'interaction doit être définie pour toutes les étapes du processus de conception préliminaire que l'ingénieur doit suivre pour arriver à réaliser une conception préliminaire.

#### **4.4. Outils utilisés pour l'interaction avec l'utilisateur**

Afin de pouvoir donner le contrôle des opérations à l'utilisateur, les fonctions fournies doivent respecter le processus habituellement suivi par un ingénieur. Pour ce faire, différents diagrammes et arbres de décisions interactifs sont mis à la disposition de l'utilisateur.

##### **4.4.1. Processus de conception préliminaire**

Le processus expliqué à la sous-section 3.2 (Voir figure 8) pourrait être utilisé pour interagir avec l'utilisateur. Ainsi, l'ingénieur pourrait avoir accès à chacune des étapes nécessaires pour compléter les étapes de conception préliminaire à partir de ce seul diagramme.

##### **4.4.2. Utilisation des arbres de décisions**

L'utilisation des arbres de décisions, inspirés de Fenves et coll. (2000), permet de donner le contrôle à l'utilisateur tout en l'assistant à travers chacune des étapes de conception. De plus, la conception est une série d'itérations menant à trouver une gamme de solutions possibles. Ainsi, il est nécessaire de pouvoir permettre le retour en arrière sur des décisions prises à des niveaux d'abstractions différents, ce que permettent les arbres de décisions.

Les arbres de décisions développés par Gomez et Fenves ont essentiellement le même aspect (Voir figure 9). Ils rappellent grandement un arbre allant de ses racines à ses feuilles.

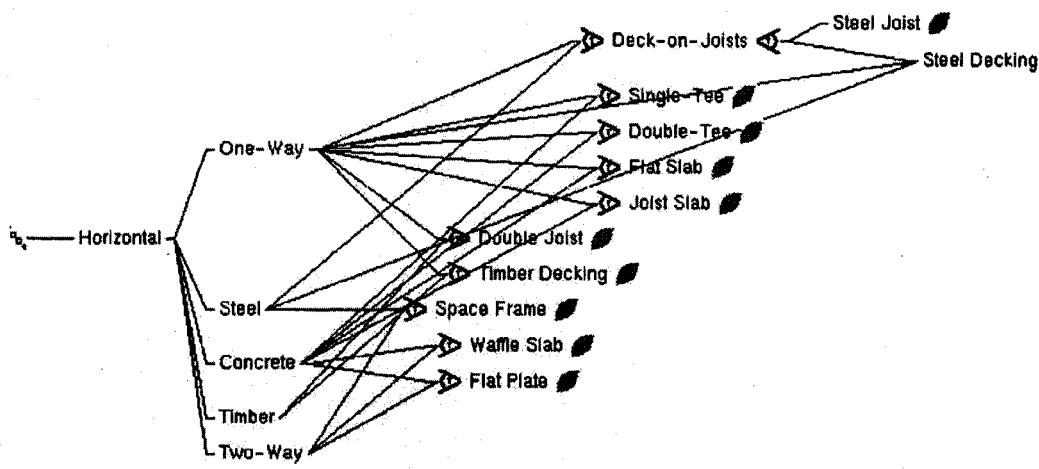


Figure 9 Arbre de décision développé par Gomez (1998) pour le choix des sous-systèmes structuraux horizontaux

La façon de disposer les éléments composants l'arbre de décision peut parfois s'avérer peu efficace lorsque plusieurs choix simultanés sont possibles. De plus, l'utilisation d'images pour chacun des sous-systèmes facilite l'utilisation du logiciel, mais rend encore plus difficile l'affichage de tous les sous-systèmes horizontaux. Les premiers essais de réalisation d'arbre de décisions ont montré qu'il n'était pas possible d'afficher clairement tous les types de sous-systèmes avec un arbre de décision conventionnel. Ainsi, après avoir essayé par divers moyens de tout montrer les sous-systèmes clairement par l'approche de l'arbre conventionnel, une nouvelle disposition circulaire a été adoptée.

Un exemple d'arbre de décisions sous forme de cercle a été élaboré pour permettre le choix des sous-systèmes structuraux. Des images de chacun des sous-systèmes ont été recueillies de différentes sources et adaptées de manière à ce que la présentation soit semblable. Cet arbre de décision est présenté à la figure 10 et en agrandi à l'annexe 3. De cette façon, les sous-systèmes structuraux peuvent être montrés en un clin d'œil.

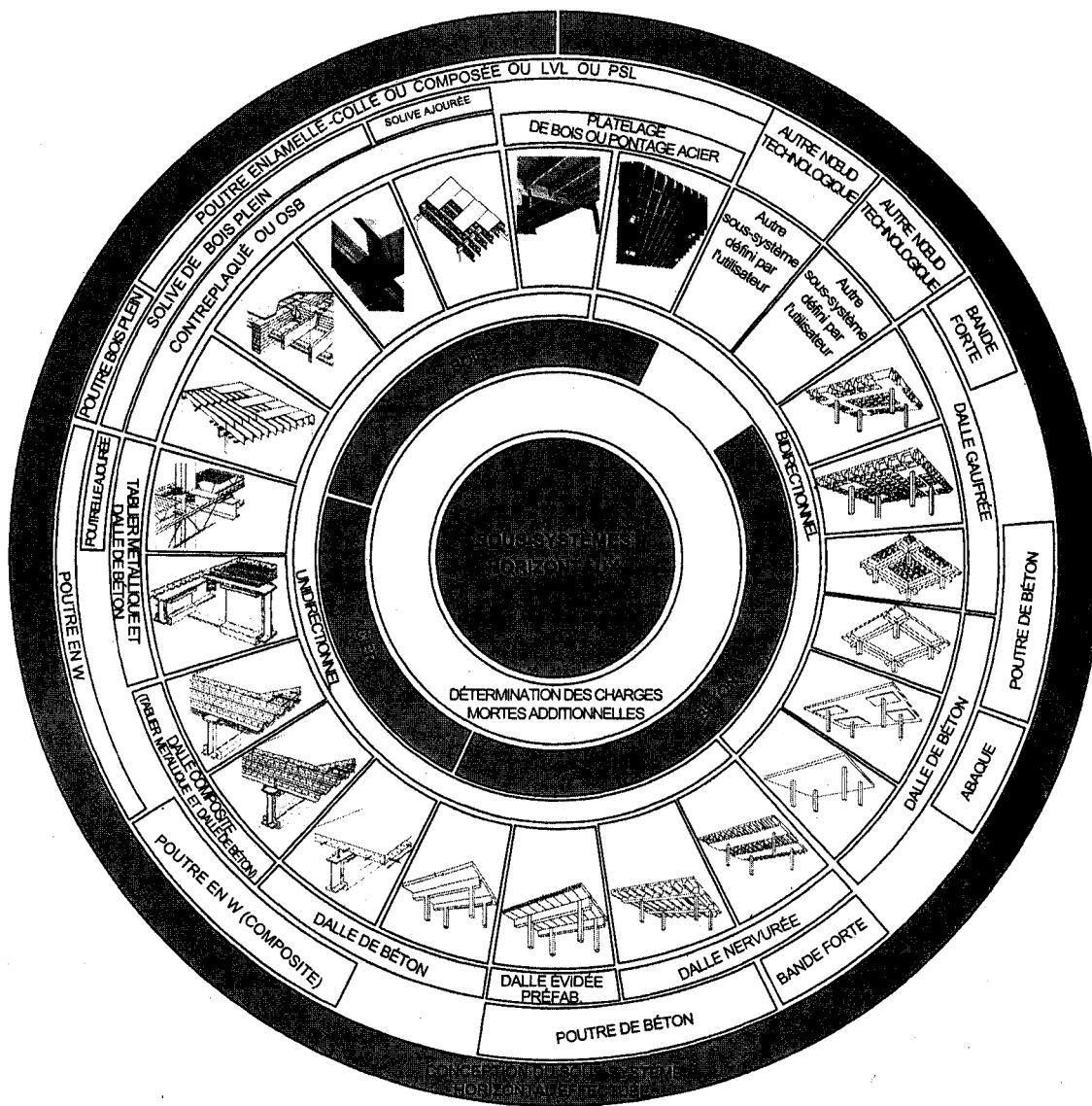


Figure 10 Arbre circulaire de décision amenant au choix des sous-systèmes horizontaux<sup>7</sup>

L'utilisateur peut utiliser cet arbre de décision sous forme de cercle afin de faire des choix préliminaires sur les sous-systèmes structuraux horizontaux. Chaque nœud

---

<sup>7</sup> Images des sous-systèmes tirées de R.S. Means Company (2005), Goodchild (1997) et Conseil Canadien du bois (2001)

décisionnel encapsule les connaissances et attributs relatifs à la structure du bâtiment. En partant du centre vers l'extérieur, l'utilisateur est appelé à définir tout d'abord les charges mortes du bâtiment. Il doit déterminer vers quels matériaux il désire orienter sa recherche. Finalement, le choix du type de redistribution de la charge doit être préalablement fait pour choisir quel est le type de système qu'il voudra ensuite détailler (c.-à-d. unidirectionnel vs bidirectionnel). Il sera expliqué plus loin comment ces arbres de décisions seront intégrés pour assister l'ingénieur dans sa conception.

Un autre exemple d'arbre de décisions peut être utilisé pour le choix du système de résistance aux charges de gravité et aux charges latérales. Premièrement, il faut spécifier quel type de résistance est recherché (une solution doit être trouvée pour chacune des résistances, soit de gravité et latérale). En fonction du matériau principal utilisé pour les systèmes horizontaux (afin d'assurer la compatibilité des systèmes structuraux horizontaux et verticaux), les différents sous-systèmes verticaux sont présentés. Ensuite, il est nécessaire de calculer la charge sur les éléments horizontaux afin de pouvoir réaliser le prédimensionnement. Finalement, il faut vérifier que le diaphragme nécessaire pour la transmission des charges latérales aux éléments de résistance latérale, est suffisant.

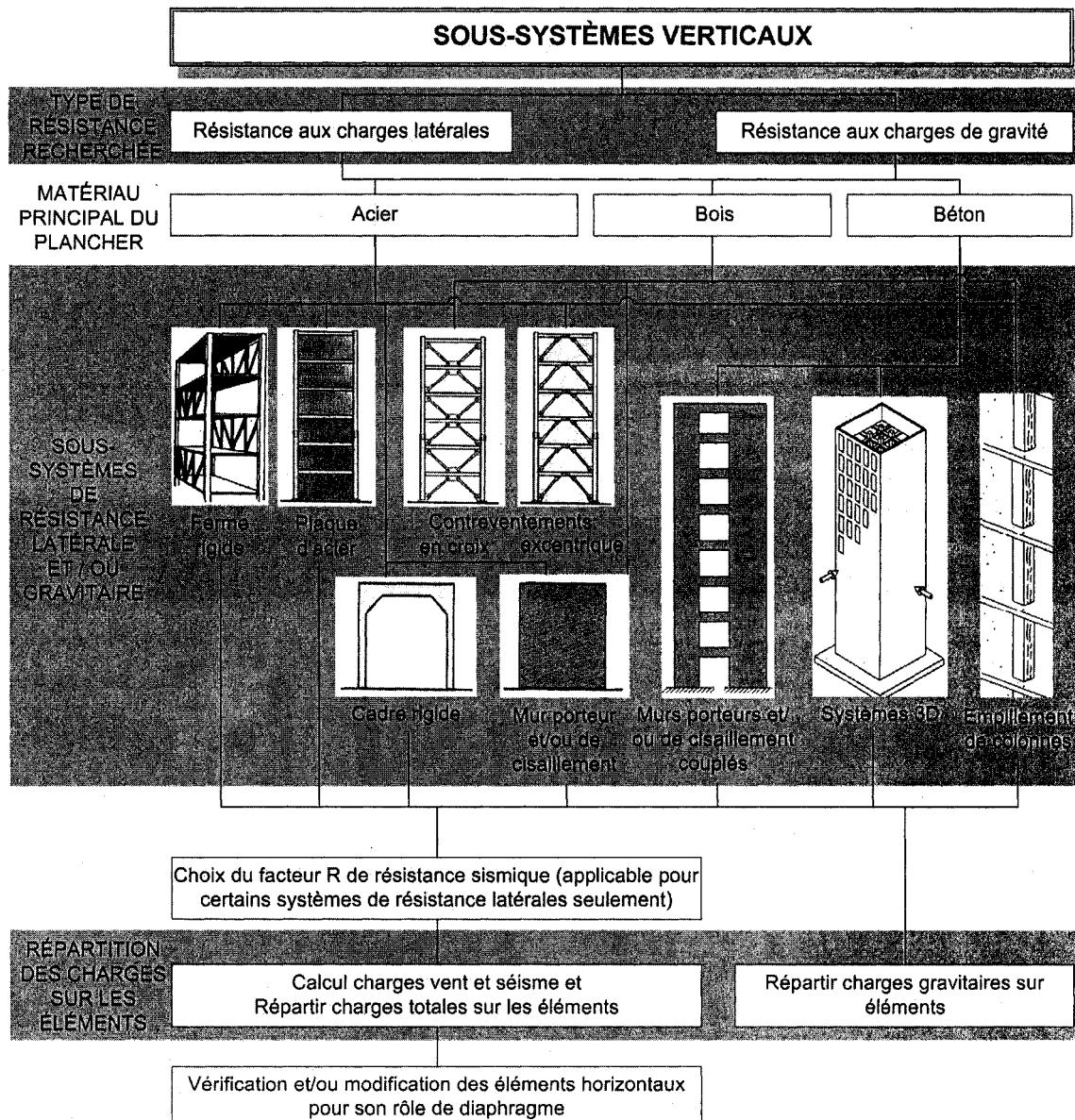


Figure 11 Arbre de décisions pour le choix des sous-systèmes verticaux<sup>8</sup>

Ensuite, pour concevoir les détails relatifs à chacun des types de systèmes structuraux de plancher, un autre arbre de décisions, composé d'une série de nœuds décisionnels,

<sup>8</sup> Images des sous-systèmes tirées de Tremblay et Mitchell (2005), Schodek (2004) et Scalzi (1971).

sert à définir chacun des éléments de base du sous-système horizontal (Voir figures 12, 13 et 14). Ces arbres de décision ont été construits en se basant sur les connaissances acquises présentées dans l'annexe 2. Chacune des décisions présentées est nécessaire pour la définition complète du système.

Pour le sous-système de dalle de béton reposant sur un tablier métallique supporté par des poutrelles ajourées d'acier et des poutres en I, il est possible d'identifier le type de béton, la profondeur et l'épaisseur du tablier métallique, l'épaisseur de la dalle de béton, l'espacement des poutrelles, le treillis, et finalement la profondeur de la poutrelle. Tout au long du processus, l'utilisateur est assisté par des conseils et chaque nœud vérifie s'il est applicable en fonction des choix précédents. L'ordre des décisions prises est important puisque certaines servent aux autres décisions prises subséquemment. Par exemple, il n'est pas possible d'utiliser du béton de faible densité, selon les tables de Canam (2005) avec une profondeur de tablier de 14 mm. De plus, quoique les décisions pourraient être prises en parallèle, il est plus logique de sélectionner la résistance finale du couple dalle de béton/tablier métallique après avoir déterminé l'espacement des poutrelles. Cette façon de faire permet de ne pas utiliser un treillis métallique donnant un surplus de résistance non nécessaire.

Pour le sous-système de dalle plate de béton avec abaque, un nombre plus limité de décisions sont nécessaires. Les connaissances pouvant être consultées à ce sujet relèvent davantage de règles du pouce que de valeurs exactes de résistance. Pour obtenir une estimation du coût pour un système en acier, il est nécessaire d'avoir le poids d'acier utilisé, ce qui n'est possible qu'en consultant des tables, donnant les résistances précises des éléments d'acier, telles que celles fournies par Canam. Toutefois, pour ce sous-système de béton, il est possible d'estimer les coûts à partir des règles du pouce disponibles sans avoir les valeurs de résistance exactes. Les règles du pouce utilisées ne reposant que sur les portées de la baie, il est possible d'obtenir les estimations de l'épaisseur de la dalle ainsi que celle de l'abaque, des dimensions de l'abaque et du poids d'acier d'armature. Conséquemment, si l'on ne considérait que les règles du pouce trouvées, ces décisions pourraient toutes être faites parallèlement. Pour justifier le fait qu'elles sont présentées en deux séries de décisions

parallèles, il faut considérer le fait que l'épaisseur de l'abaque est habituellement déterminée en pratique en tenant compte de l'épaisseur de la dalle et que cette dernière est fixée entre autres par la résistance du béton. De même, le choix de la limite élastique de l'acier est réalisé indépendamment de la résistance du béton. Le choix du poids d'acier d'armature par mètre carré est lié quant à lui à l'épaisseur de la dalle au niveau du calcul de la résistance. L'ordonnancement des décisions vient davantage de l'ordre des décisions habituellement utilisé pour la conception. Les nœuds montrés en gris foncé, à la figure 13 indiquent qu'aucune connaissance en conception préliminaire n'a été trouvée couvrant l'utilisation de ces paramètres.

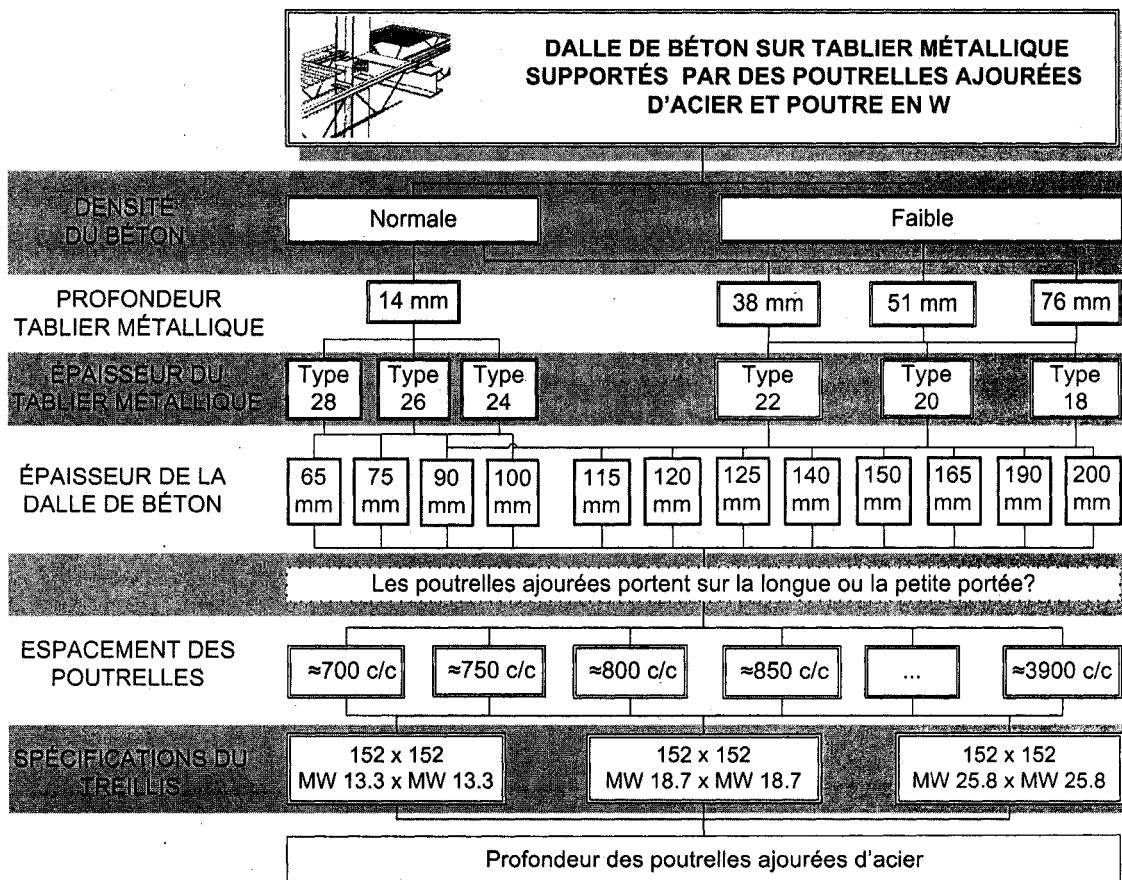


Figure 12 Arbre de décision pour un système de dalle de béton reposant sur un tablier métallique supporté par des poutrelles ajourées d'acier

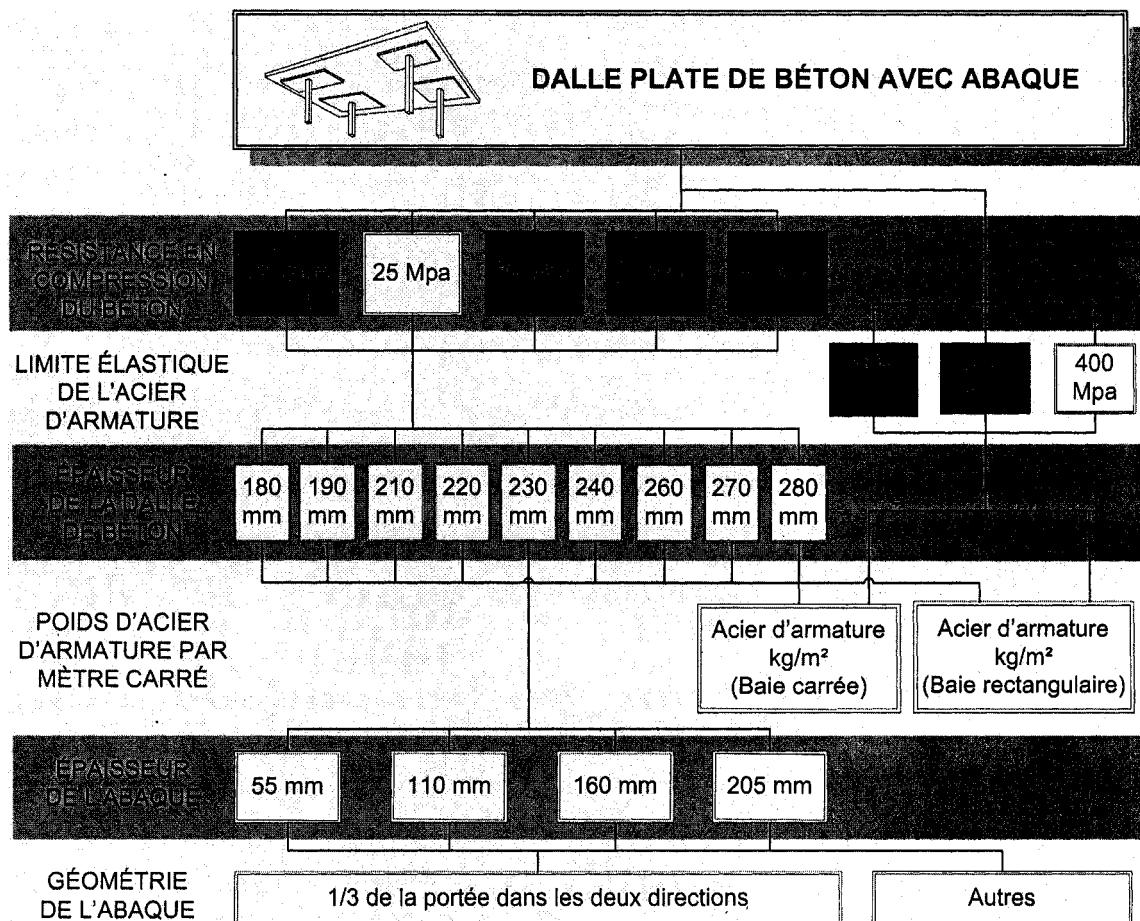


Figure 13 Arbre de décision pour définir un système de dalle plate de béton avec abaque<sup>9</sup>

Pour le sous-système de plafond de bois sur poutres de bois, plusieurs décisions sont nécessaires puisque plusieurs caractéristiques des poutres doivent être définies. Le processus ressemble essentiellement à celui du sous-système de dalle de béton sur tablier métallique supporté par des poutrelles d'acier ajourées. Ainsi, le processus commence par le choix des caractéristiques du plafond de bois suivi par le choix du sens des poutres répétitives de bois. L'espacement des poutres est ensuite nécessaire

<sup>9</sup> Les nœuds colorés en gris foncés indiquent qu'il n'y a pas de connaissance qui a été trouvée spécifiquement pour des sous-systèmes utilisant ces technologies.

de façon à permettre le calcul de la charge sur chacune d'elles. Le choix du type de poutre est ensuite nécessaire de façon à pouvoir obtenir les largeurs de poutres disponibles. Finalement, il est nécessaire de choisir la classe de propriétés mécaniques et l'essence de bois afin de pouvoir fixer la profondeur de poutre requise.

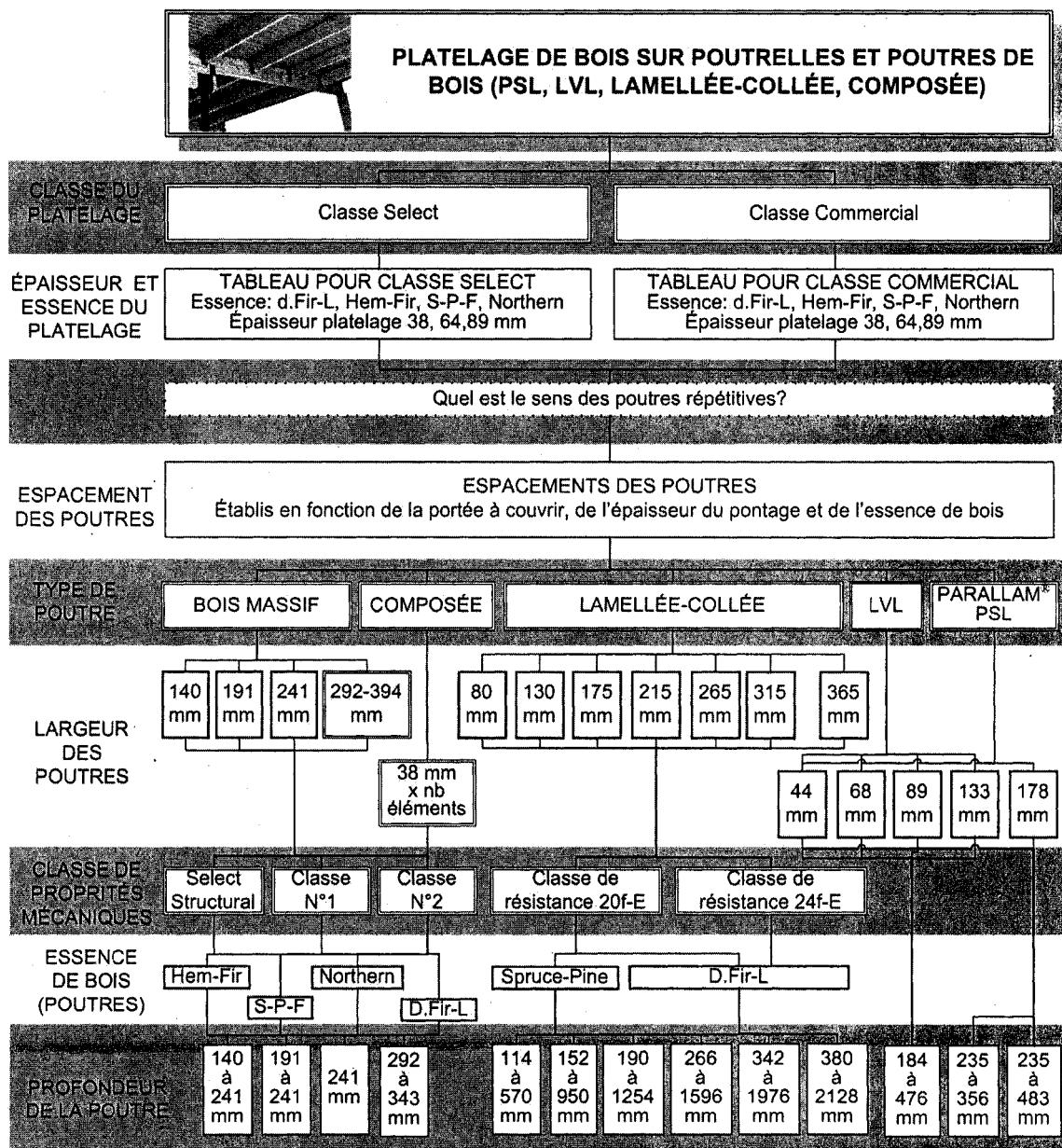


Figure 14 Arbre de décision pour un système de platelage de bois supporté par des poutres de bois

Les arbres de décisions développés pour le choix des sous-systèmes montrent plus efficacement les choix possibles de sous-systèmes à l'utilisateur que les arbres développés dans les recherches précédentes présentées. De plus, les arbres de décisions pour la définition des éléments de base des sous-systèmes n'ont pas été développés dans ces mêmes recherches. Toutefois, pour qu'il soit possible de comparer diverses solutions de sous-systèmes structuraux, il est nécessaire d'avoir une solution dont les éléments de base sont définis afin de faire un choix plus éclairé quant au prix et à la profondeur de structure nécessaire.

#### **4.4.3. Présentation de l'interface utilisée**

L'interface utilisée est inspirée des interfaces présentées dans le cadre des recherches de Boulanger (1997) pour la conception préliminaire de ponts et Ramachandran (2004) pour la conception préliminaire d'enveloppes de bâtiments. Ces interfaces ont la particularité d'offrir une assistance à l'usager sans le remplacer et en couvrant les exigences expliquées à la sous-section 4.2.

Deux modules généraux sont utilisés soit le module de raisonnement géométrique « StAr » (Mora et coll., 2006) et le module de gestion des connaissances, appelé ici DKM pour « Design knowledge Manager ». Le premier module n'est pas défini ici, mais il faut savoir que c'est par ce module que l'esquisse architecturale ou le modèle de bâtiment 3D, sont introduits. De plus, c'est par ce module que l'ingénieur peut naviguer au travers du bâtiment 3D et faire l'inspection de l'architecture pour disposer les sous-systèmes structuraux. Une assistance est toutefois apportée par le DKM pour certaines étapes d'inspection. Cette assistance est apportée par une fenêtre qui sera présente indépendamment du module sélectionné.

L'interface générale renfermant les deux modules est présentée à la figure 15. L'interface est détaillée seulement pour le module de gestion des connaissances. Différentes fenêtres sont utilisées afin de couvrir les exigences relatives à l'assistance de l'utilisateur. L'interface du module de gestion des connaissances contient 5 fenêtres principales. Elles sont décrites dans les prochains paragraphes.

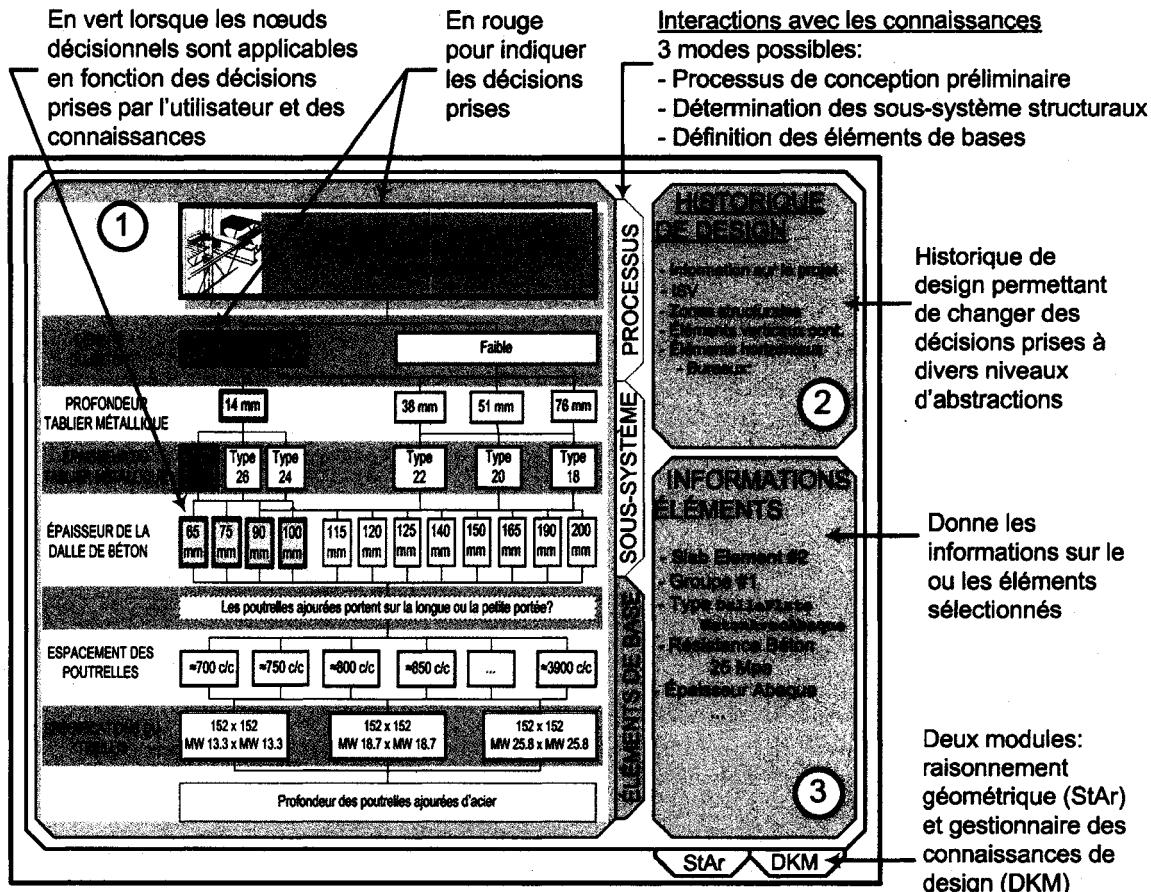


Figure 15 Interface générale envisagée de l'espace de travail

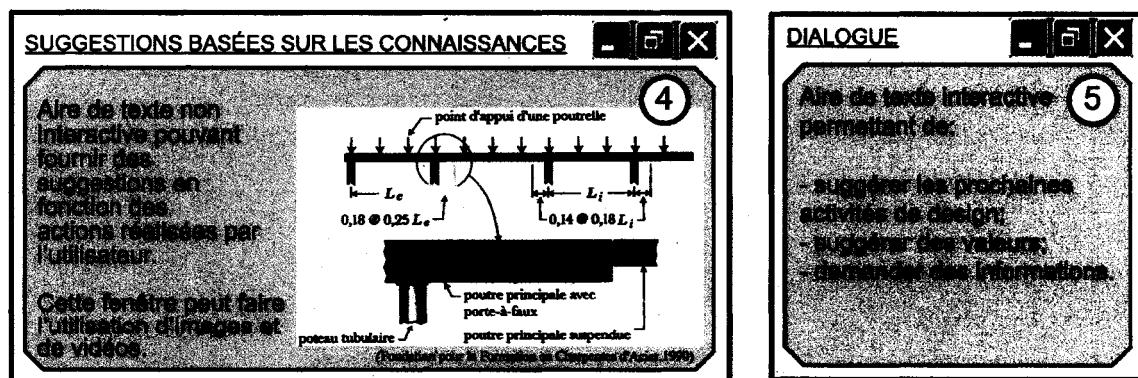


Figure 16 Fenêtres pop-up complémentaires à l'interface principale

L'interface est définie par cinq fenêtres principales :

1. **La fenêtre de conception** assiste l'utilisateur dans les décisions de conception préliminaire de structure. Elle est interactive et permet à l'utilisateur d'obtenir de l'assistance pour différents niveaux d'abstraction du bâtiment. Ainsi, elle comporte 3 modes différents (accessibles par des onglets situés à la droite de cette fenêtre) correspondant aux 3 niveaux d'abstraction différents. Le mode « processus » présente le processus de conception préliminaire montré à la figure 8. C'est par ce processus que l'utilisateur peut passer d'une étape de conception à une autre. Le mode « sous-système » fait l'utilisation d'un arbre de décision afin de déterminer un sous-système horizontal ou vertical à développer. L'exemple de l'arbre de conception utilisé pour les sous-systèmes horizontaux est montré à la figure 10. Finalement, le mode « éléments de base » fait l'usage d'arbres de décisions détaillés tel que les exemples montrés aux figures 12, 13 et 14.
2. **L'historique de design** contient toutes les décisions prises. Elles sont en ordre chronologique. Cette fenêtre est utile pour aider le concepteur à voir la progression des décisions prises et pourra être utilisée pour le retour en arrière sur des décisions déjà prises que le concepteur voudrait changer. Les dialogues et suggestions utilisés pour prendre une décision sont aussi consultables à partir de cette fenêtre.
3. **Les informations des éléments** contiennent les caractéristiques des éléments sélectionnés à l'aide du modèle numérique du bâtiment contenu dans le module StAr. Aussitôt qu'une décision est prise, les changements se rapportant à cette décision y sont aussi indiqués par un changement de valeur à un attribut ou par l'ajout d'un attribut.
4. **Les suggestions basées sur les connaissances** permettent de faire des suggestions sur les étapes de conception en cours. C'est donc avec cette fenêtre qu'il est possible de fournir à l'utilisateur tous les conseils pertinents à la conception en cours. Cette fenêtre permet aussi de montrer des images ou des

animations vidéo pour bien expliquer une suggestion. Cette fenêtre doit apparaître au moment opportun, là où il serait pertinent de la consulter pour prendre une décision.

5. **Le dialogue** permet d'interagir avec l'utilisateur. Ce dernier peut y entrer ou modifier des valeurs qui y sont proposées. Cette fenêtre peut aussi être utilisée pour demander des informations nécessaires à la poursuite du processus de conception.

#### **4.5. Assistance envisagée de l'utilisateur à travers tout le processus de conception préliminaire**

Les différentes étapes de conception préliminaire sont identifiées et ordonnées dans le processus montré à la figure 8. L'assistance envisagée tout au long du processus est décrite ici. L'assistance à l'utilisateur sera présentée en fonction des deux modules identifiés sur la figure 15, c'est-à-dire le module de raisonnement géométrique et le module de gestion des connaissances. L'interaction entre les deux modules est essentielle puisqu'un module assure le raisonnement géométrique tandis que l'autre fournit à l'utilisateur les connaissances nécessaires pour l'assister. L'intensité de l'interaction varie toutefois en fonction des étapes de conception en réalisation. Les deux modules sont placés à un même niveau, c'est-à-dire que les deux modules peuvent contrôler la conception. Ainsi, l'utilisateur peut réaliser dans StAr certaines étapes de la conception et lorsqu'il désire passer au module de gestion des connaissances, le module s'adapte en fonction des étapes déjà réalisées. L'assistance apportée est décrite en fonction des étapes du processus de conception préliminaire identifié. Ces étapes ont été décrites à la sous-section 3.3.1.

Il a été identifié que le module de raisonnement géométrique est davantage utilisé dans les premières étapes de conception (Étapes 1 à 5) tandis que le module de gestion des connaissances est de plus en plus utile dans les étapes plus détaillées du processus (Étapes 6 à 11).

Le modèle architectural peut provenir soit de l'interpréteur d'esquisses nommé EsQUIsE ou d'un logiciel de dessin informatique 3D en architecture. Toutefois, le module de connaissances complet qui est envisagé peut être utilisable seul, sans avoir d'interactions avec un modèle architectural. Par exemple, il peut être utilisé pour requérir une aide en fonction de critères généraux considérant l'utilisation du bâtiment ou encore pour consulter les tables des portées optimales en fonction du type de structure et des charges appliquées. Ce type de fonctionnement pourrait faciliter les rencontres de début de projet entre un architecte et un ingénieur.

L'assistance à l'utilisateur est décrite en présumant que l'architecte a une conception du bâtiment suffisamment avancée permettant d'avoir une vue globale du bâtiment, de connaître l'usage des espaces, et de savoir où il est possible d'implanter des éléments structuraux. Les esquisses d'une caserne de pompier sont présentées à la figure 17. L'assistance est présentée en fonction des esquisses de ce bâtiment comportant un étage de bureau superposé à un garage réservé aux camions de pompier. Le toit est utilisé en tant que terrasse.

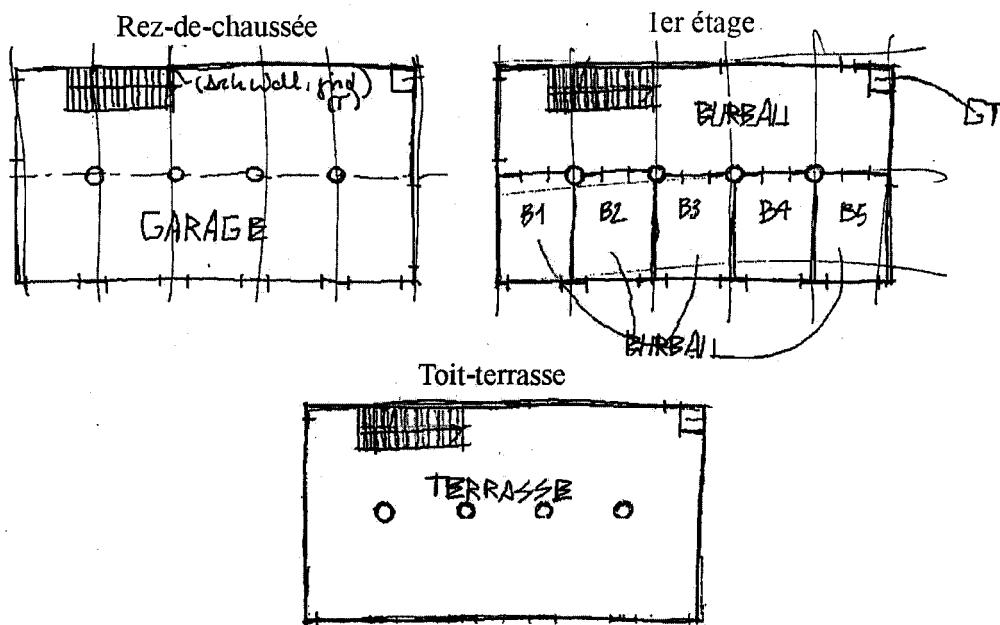


Figure 17      Esquisses architecturales d'une caserne de pompiers  
(Dessinées par Pierre Leclercq)

#### 4.5.1. Information sur le projet (Étape 1)

Lorsque l'utilisateur passe en mode DKM, si l'utilisateur n'a pas encore entré les informations de base du projet, le DKM, à l'aide de la fenêtre de dialogue, demande le nom du projet, la localisation et le budget prévu pour la structure.

Une fois confirmées (OK), les informations sont reportées dans la fenêtre « historique de design » et l'interface indique en vert les nouveaux noeuds applicables du processus de conception (Voir figure 19).

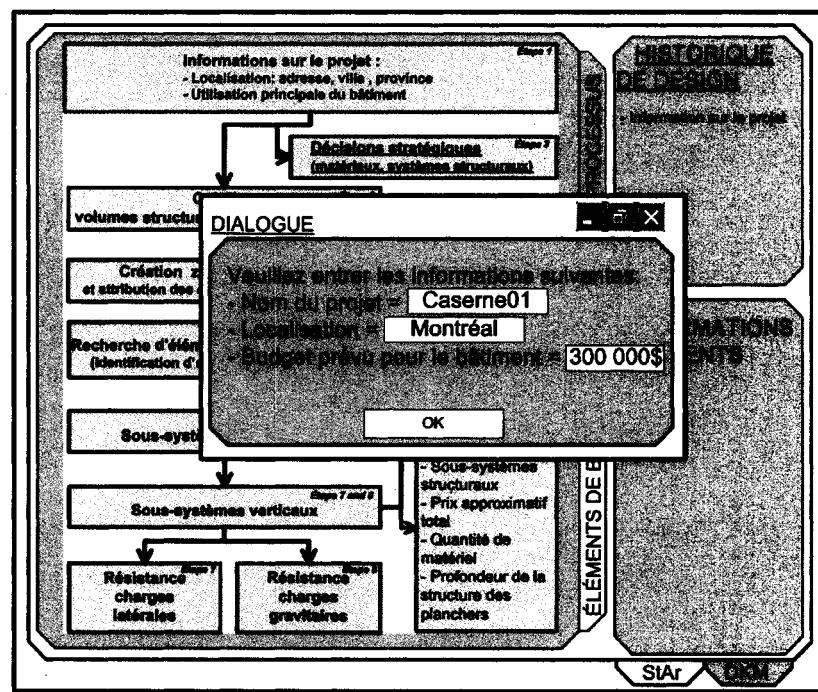


Figure 18      Demande d'informations nécessaires à la conception préliminaire

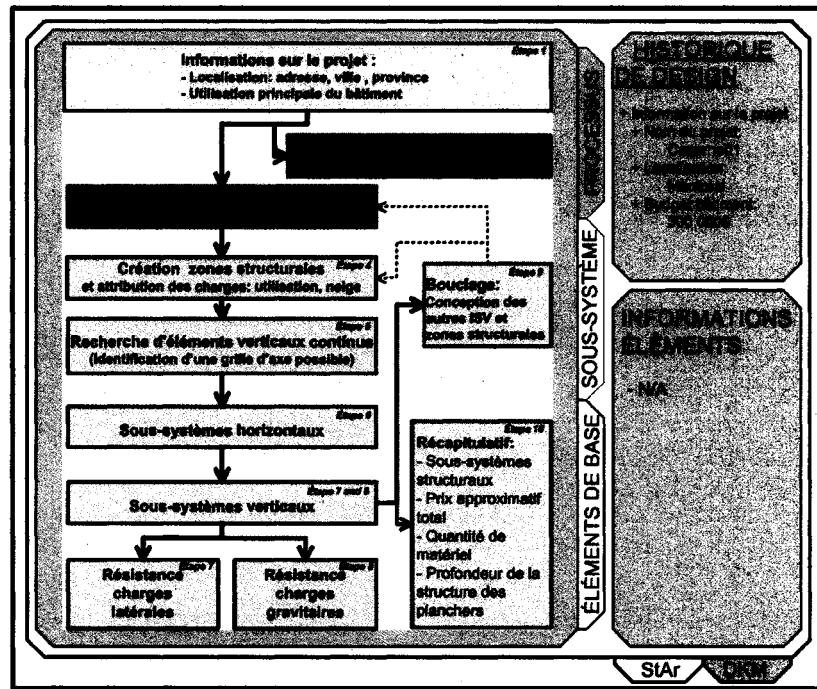


Figure 19 Rafraîchissement après l'étape 1

#### **4.5.2. Création des volumes structuraux independants (tape 2)**

La création de ces volumes se fait à partir de StAr car l'ingénieur peut prendre des décisions par rapport à la volumétrie globale du bâtiment. Le DKM peut fournir des suggestions relatives à la longueur maximale d'un bâtiment ne nécessitant pas de joint de dilatation en fonction de la forme générale du bâtiment, des différences de températures que pourraient subir le bâtiment, et du matériau structural (American Institute of Steel Construction, 2005). Ces suggestions basées sur les connaissances pourraient utiliser la fenêtre de type numéro 4 et ainsi fournir l'information au même temps que l'utilisateur créé les volumes structuraux indépendants dans StAr.

Pour l'exemple de la caserne, considérant que le bâtiment n'a que cinq baies de trois mètres de largeur, pour un total de quinze mètres (environ 50 pieds < 200 pieds), et que le bâtiment a une forme rectangulaire, les connaissances suggèrent de ne pas faire de joint de dilation pour ces motifs (Voir annexe 2, connaissance 5).

#### **4.5.3. Décisions stratégiques (Étape 3)**

Les décisions stratégiques peuvent être faites à tous les niveaux d'abstraction en parallèle par rapport aux autres étapes. Ainsi, l'ingénieur peut déterminer des choix stratégiques allant des matériaux jusqu'aux éléments de base. L'utilisateur peut faire ces choix à l'aide des arbres de nœuds décisionnels disponibles (Voir figures 10 à 14) pour les différents niveaux d'abstraction. Étant en mode décisions stratégiques, les décisions prises s'appliqueront à la conception générale du bâtiment. Ainsi, si l'ingénieur sélectionne l'acier et le béton pour le présent exemple, seuls ces matériaux pourront être utilisés subséquemment (Voir figure 20). De la même manière, l'ingénieur pourrait décider dès le départ quel type de système de plancher il désire utiliser. L'assistance par les connaissances devrait pouvoir s'ajuster en fonction des décisions prises.

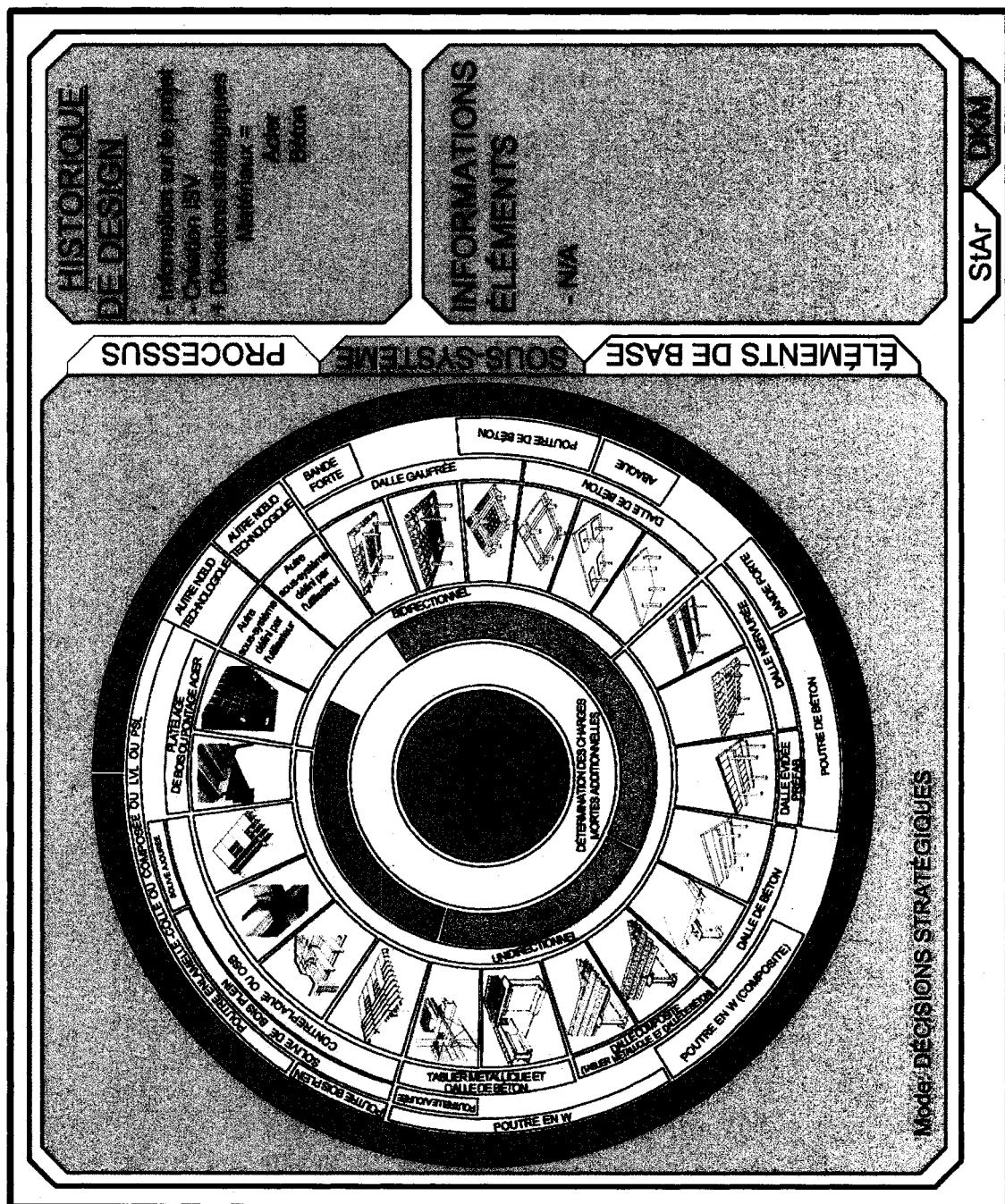


Figure 20 Prise de décisions stratégiques: choix de l'acier et du béton comme matériau structural

#### 4.5.4. Création des zones structurales (Étape 4)

La création des zones structurales se fait essentiellement dans le module de raisonnement géométrique. Un regroupement automatique est réalisé en fonction des

espaces ayant un usage, une hauteur de structure possible et des portées relativement semblables. Ce regroupement peut être changé par l'utilisateur selon ses préférences. Il sert seulement à accélérer le processus de création des zones structurales.

Dans l'exemple de la caserne, l'utilisateur pourrait créer une première zone structurale pour le 1<sup>er</sup> étage (en jaune sur la figure 21), une autre pour le deuxième étage groupant ainsi les bureaux (en mauve sur la figure 21) et une dernière zone structurale pour la terrasse (en rouge sur la figure 21). L'utilisateur pourrait décider de modifier le regroupement effectué après coup ou l'accepter tel quel.

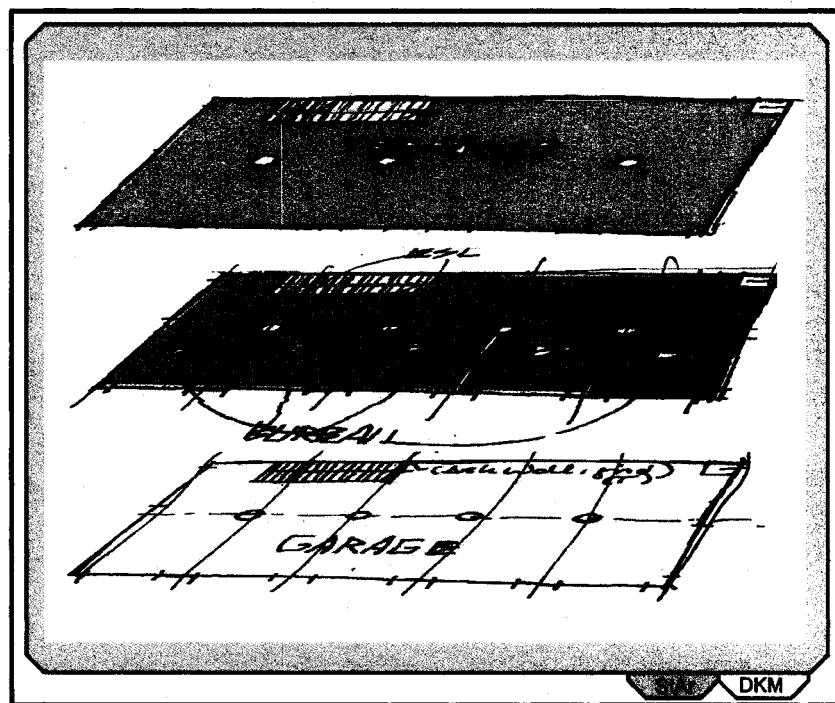


Figure 21      Regroupement de baies semblables formant des zones structurales

Une fois les zones structurales acceptées par l'utilisateur, le DKM assiste l'utilisateur pour assigner une charge à chacune des zones structurales. Le DKM suggère des valeurs par défaut provenant du code national du bâtiment en se basant sur l'usage le plus restrictif des espaces dans une zone (Conseil national de recherches du Canada &

Québec (Province). Régie du bâtiment du Québec, 2001). L'utilisateur peut accepter ou changer les valeurs par défaut fournies en fonction des spécificités du projet en cours.

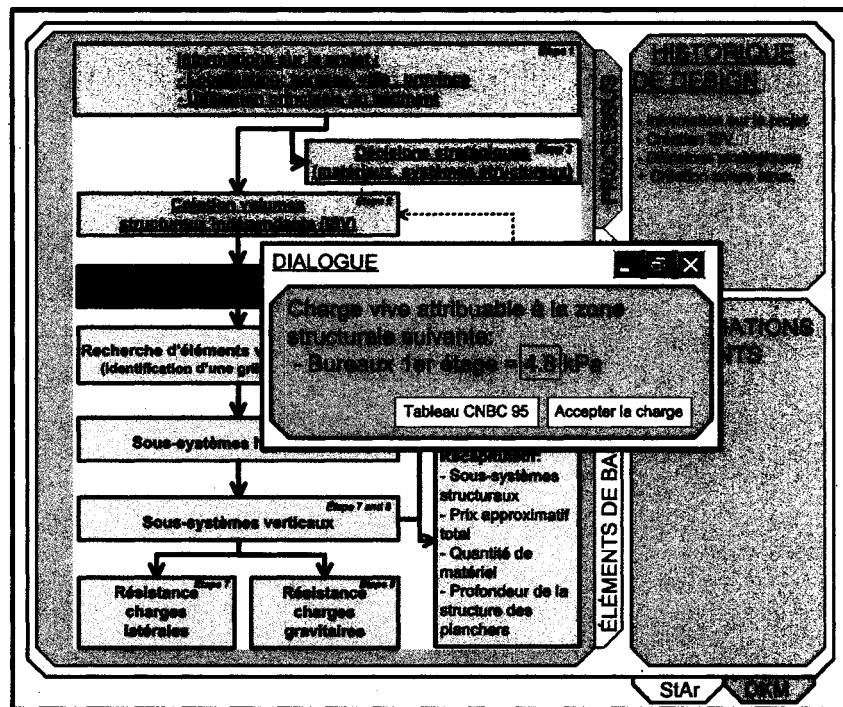


Figure 22

Fenêtre de dialogue permettant de déterminer la charge vive de la zone structurale

#### 4.5.5. Recherche d'éléments verticaux continus (Étape 5)

La recherche d'éléments verticaux continus s'effectue à l'aide de StAr (Mora, 2005). Ce module recherche quels éléments sont continus d'un étage à l'autre et les indiquent en rouge au concepteur. Ainsi, il n'a pas à chercher sur tous les plans, en les superposant plus ou moins correctement pour déterminer si des continuités sont présentes dans l'architecture. La notion de tolérance est présente afin que le concepteur, suite à une recherche infructueuse ou incomplète, puisse rechercher des continuités imparfaites. Ainsi, une tolérance latérale et des discontinuités ponctuelles sur un étage ou un groupe d'étages pourraient être déterminées par l'utilisateur permettant une recherche plus large et menant vers des propositions de changements à l'architecture permettant de réaliser la structure.

Ce que le module de gestion des connaissances (DKM) peut offrir à ce point concerne notamment les dimensions de trames structurales optimales pour chacun des matériaux ou encore en fonction des choix stratégiques effectués.

En ayant bien en vue les différents éléments continus et les suggestions du DKM, l'utilisateur peut établir une trame préliminaire de la structure et faire une première itération de cette manière. Si une trame architecturale avait déjà été établie, la trame structurale peut se baser sur celle-ci. Toutefois, dans la présente recherche, puisque le modèle architectural préliminaire provient du traitement d'une esquisse (réalisée dans EsQUIsE) ou d'un modèle 3D, la trame architecturale y est souvent absente.

Dans le cas de la caserne, en fonction des choix stratégiques effectués qui restreignaient les matériaux à utiliser au béton et à l'acier, le module de gestion des connaissances propose les portées optimums montrées en figure 23 pour ces deux matériaux seulement (Voir annexe 2, connaissances 21 et 31). L'utilisateur peut conserver la fenêtre même lorsqu'il passe en mode StAr. Toutefois, l'utilisateur peut faire ne pas considérer les informations suggérées et utiliser, comme le présent exemple, une trame structurale suggérée par l'architecture de  $4 \times 3$  mètres, composant ainsi cinq baies d'égales dimensions.

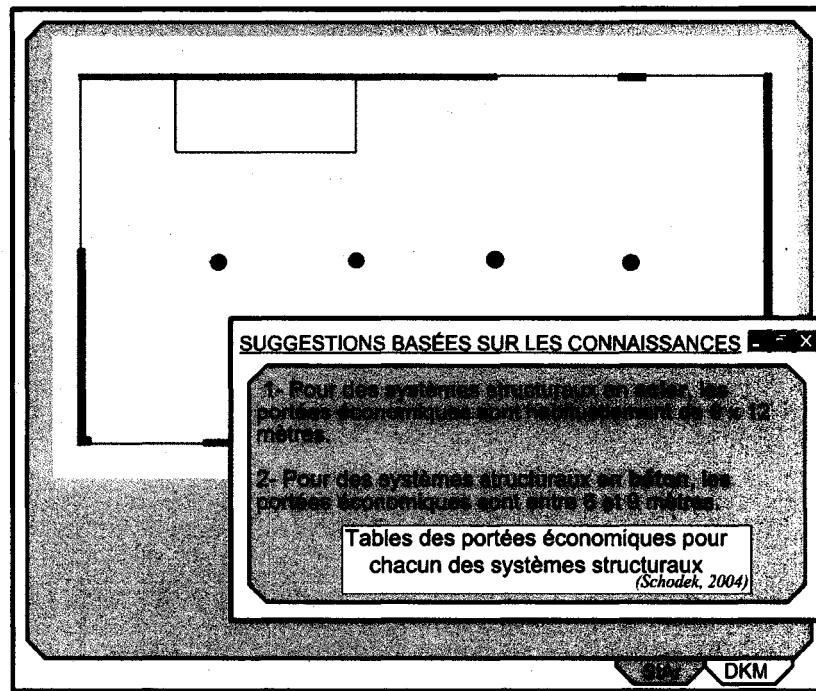


Figure 23

Mise en évidence des éléments verticaux dans StAr et suggestions basées sur les connaissances

#### 4.5.6. Éléments horizontaux (Étape 6)

La conception des éléments horizontaux débute par la sélection d'un élément de dalle à partir du module StAr. L'utilisateur peut sélectionner un ensemble d'éléments semblables (dimensions de la baie, ouvertures, etc.) d'une même zone structurale, pour être conçus en même temps.

Considérer plusieurs options structurales pour les planchers est particulièrement important puisque les coûts d'un projet proviennent essentiellement des éléments de plancher. Suite à la sélection, à partir de StAr, des éléments de dalle à concevoir, il est possible de passer au module de gestion des connaissances pour obtenir une assistance du module de connaissances. La conception du groupe d'éléments de dalle se fait à l'aide d'un arbre de nœuds décisionnels montré à la figure 10. Toutefois, contrairement à l'interface montrée à la figure 24, l'arbre montré à l'utilisateur pourrait contenir seulement les solutions applicables. Il faudrait cependant fournir l'option de voir tous les systèmes, incluant ceux qui ne sont pas applicables, car l'utilisateur

pourrait vouloir savoir pourquoi ils ne sont pas applicables. Il faudrait alors fournir la règle qui a rendu le système non applicable.

La première décision consiste à déterminer les charges mortes additionnelles qui affecteront la structure : cloisons, mécanique du bâtiment, etc. Des charges, tirées du code applicable, (Conseil national de recherches du Canada & Québec (Province). Régie du bâtiment du Québec, 2001) sont proposées à l'utilisateur, à l'aide d'une boîte de dialogue, et il peut en modifier la valeur et/ou ajouter de nouvelles charges. Pour l'exemple de la caserne, le dialogue pourrait être celui montré à la figure 24.

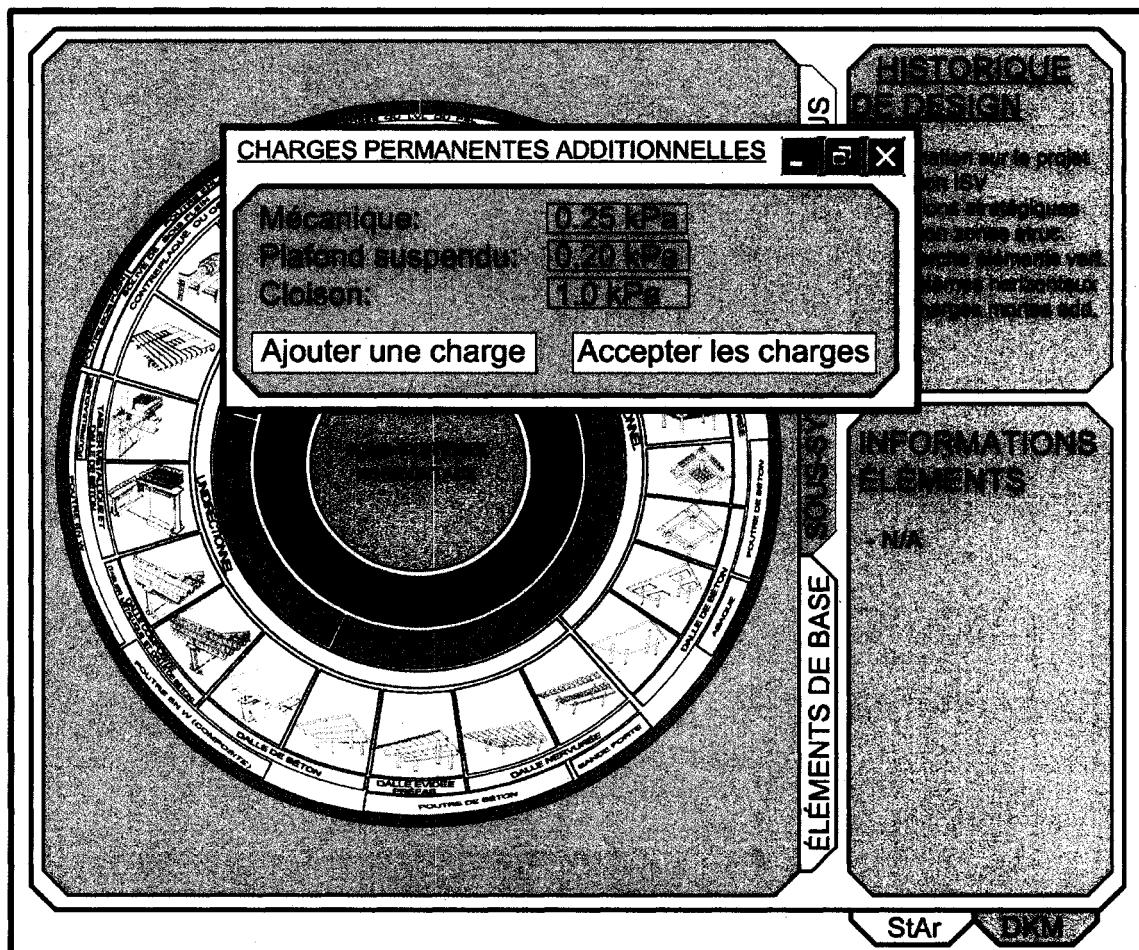
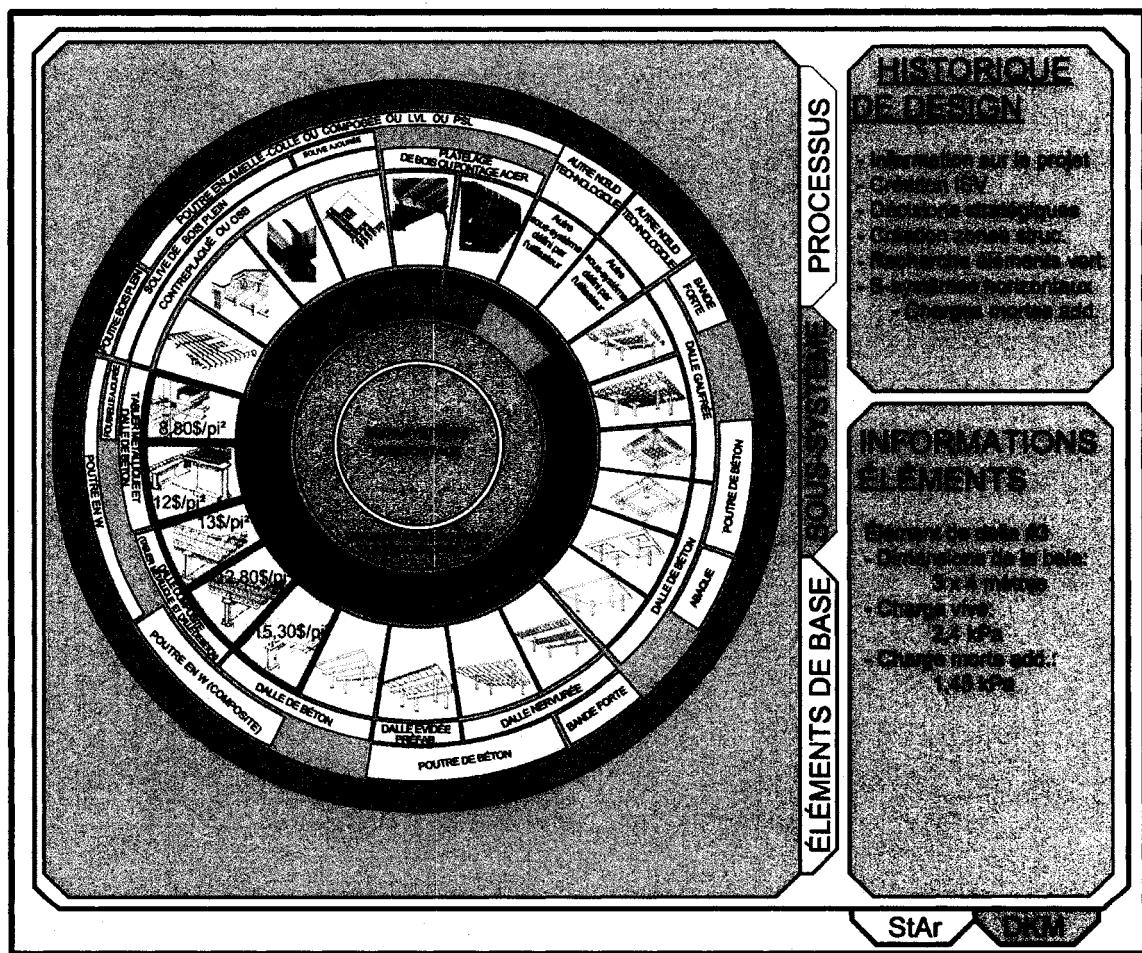


Figure 24 Boîte de dialogue pour déterminer les charges permanentes additionnelles

Une fois que les charges additionnelles sont déterminées, il est possible de montrer à l'utilisateur toutes les possibilités qui s'offrent à lui. C'est-à-dire, qu'en fonction des choix stratégiques qu'il a faits, et des connaissances, tous les nœuds décisionnels qui mènent à des décisions applicables sont présentés en vert. L'utilisateur peut alors appliquer les décisions les unes après les autres selon leur ordonnancement à l'intérieur de l'arbre de décision afin d'arriver au choix du sous-système horizontal ou pourrait passer directement au choix du sous-système horizontal sans avoir à définir les décisions préalables (Voir figure 25).



**Figure 25** Nœuds décisionnels applicables en fonction des décisions déjà prises et évaluation rapide du coût au pied carré

Bien que les deux matériaux sélectionnés à l'étape de décisions stratégiques soient applicables (matériaux disponibles localement ou autre), l'utilisateur peut remarquer que de faire ce choix ne le mènerait pas à un choix d'un sous-système. Ceux-ci ne sont pas applicables étant donné que les portées des baies de la caserne ne permettent pas aux systèmes de béton d'être économiquement viables selon les connaissances acquises (annexe 2, Tableau IX et Tableau X). Les sous-systèmes horizontaux en acier sont toutefois applicables et sont donc montrés en vert. L'utilisateur décide donc de sélectionner l'acier comme matériau. Il est aussi possible de consulter une page d'informations sur chacun des matériaux. Ces pages pourraient contenir des liens vers les associations de chacun des matériaux et de l'information pouvant fournir des arguments de choix tels les avantages et inconvénients liés à l'utilisation du matériau.

Une fois l'acier désigné comme matériau structural, le cheminement des charges est limité à l'unidirectionnel puisque les systèmes structuraux en acier n'utilisent que rarement des structures bidirectionnelles entre autres pour des structures à très grande portée. Si le béton avait été sélectionné, les deux types de cheminement de charges auraient pu être applicables, car le rapport de la grande portée sur la petite portée est plus petit que 2. De plus, d'autres connaissances peuvent être fournies sous forme de « suggestions » telles que les intervalles de portées pour lesquels chacun des cheminements de charge est efficace (Voir annexe 2, connaissance 58).

L'utilisateur en arrive ensuite à choisir le sous-système horizontal à développer. Les sous-systèmes applicables sont montrés en vert, tel que mentionné plus tôt. Il est possible de passer le pointeur sur les systèmes qui sont non applicables et la raison de la non-applicabilité est fournie à l'utilisateur.

« Les bonnes conceptions sont jugées par leurs coûts globaux. Au stade de conception préliminaire, c'est un des critères primordiaux pour comparer différentes options »<sup>10</sup> (Ravi, 1998). Ainsi, une évaluation grossière du prix au pied carré en fonction du sous-

---

<sup>10</sup> Traduction libre.

système peut être fournie à l'utilisateur (Voir figure 25). Ce prix tient compte des dimensions de la baie, des charges surimposées au sous-système structural, du prix de la main d'œuvre et des matériaux. Un exemple des tables utilisées pour évaluer ce prix est montré en annexe 2, Tableau XI.

De plus, une estimation de la profondeur requise de structure peut être fournie en passant le curseur sur les sous-systèmes provenant de R.S. Means Company (2005) et de tables réalisées par Schodek (2004) . Bien que les évaluations soient seulement une estimation, elles peuvent servir à identifier quelles options de systèmes de plancher doivent être examinées de plus près. Pour la caserne, l'ingénieur pourrait décider de choisir l'option du sous-système constitué d'une dalle de béton, sur tablier métallique, poutrelles d'acier ajourées et poutre en I.

Ainsi, une fois que l'ingénieur a sélectionné un type de système en particulier, l'arbre de décisions relatif au sous-système s'ouvre et l'ingénieur est invité à détailler les éléments de base du sous-système structural s'il désire pousser plus loin l'évaluation préliminaire déjà effectuée. À chaque décision prise par l'ingénieur, les nœuds décisionnels qui ne sont plus applicables retournent à un état inactif (non sélectionnés et non applicables) (Voir figure 26). Ainsi, l'interface évolue en indiquant les décisions possibles en vert et celles qui sont prises en rouge. L'historique de design se met aussi à jour au fil des décisions. Tout au long du processus, des conseils peuvent être fournis à l'utilisateur afin de le guider dans ces choix. Lorsqu'un nœud décisionnel est appliqué, tous les autres nœuds de l'arbre de décision vérifient s'ils peuvent être appliqués en fonction des décisions déjà prises. De cette manière, l'utilisateur peut rapidement voir quelles sont les implications de la décision qu'il vient de prendre. En tout point du processus de décision, il est possible de faire marche arrière.

Pour le cas de la caserne, les éléments de base pourraient être définis en fonction des valeurs minimales applicables de chacun des éléments de base. Ainsi, la dalle de béton peut être de densité normale et reposer sur un tablier métallique d'une profondeur de 14 mm de type 22. L'épaisseur de la dalle de béton peut être de 65 mm d'épaisseur. Les poutrelles peuvent être disposées, tel que suggéré par les connaissances, soit

dans le sens de la plus longue portée de la baie. L'espacement des poutrelles peut être fixé à 700 mm c/c et le treillis de la dalle de béton, conséquemment à l'espacement des poutrelles, peut être défini par un treillis de  $152 \times 152$  MW13.3 × MW13.3. Finalement, la profondeur des poutrelles, étant donné leur portée et la charge qu'elles supportent, pourrait être de 200 mm.

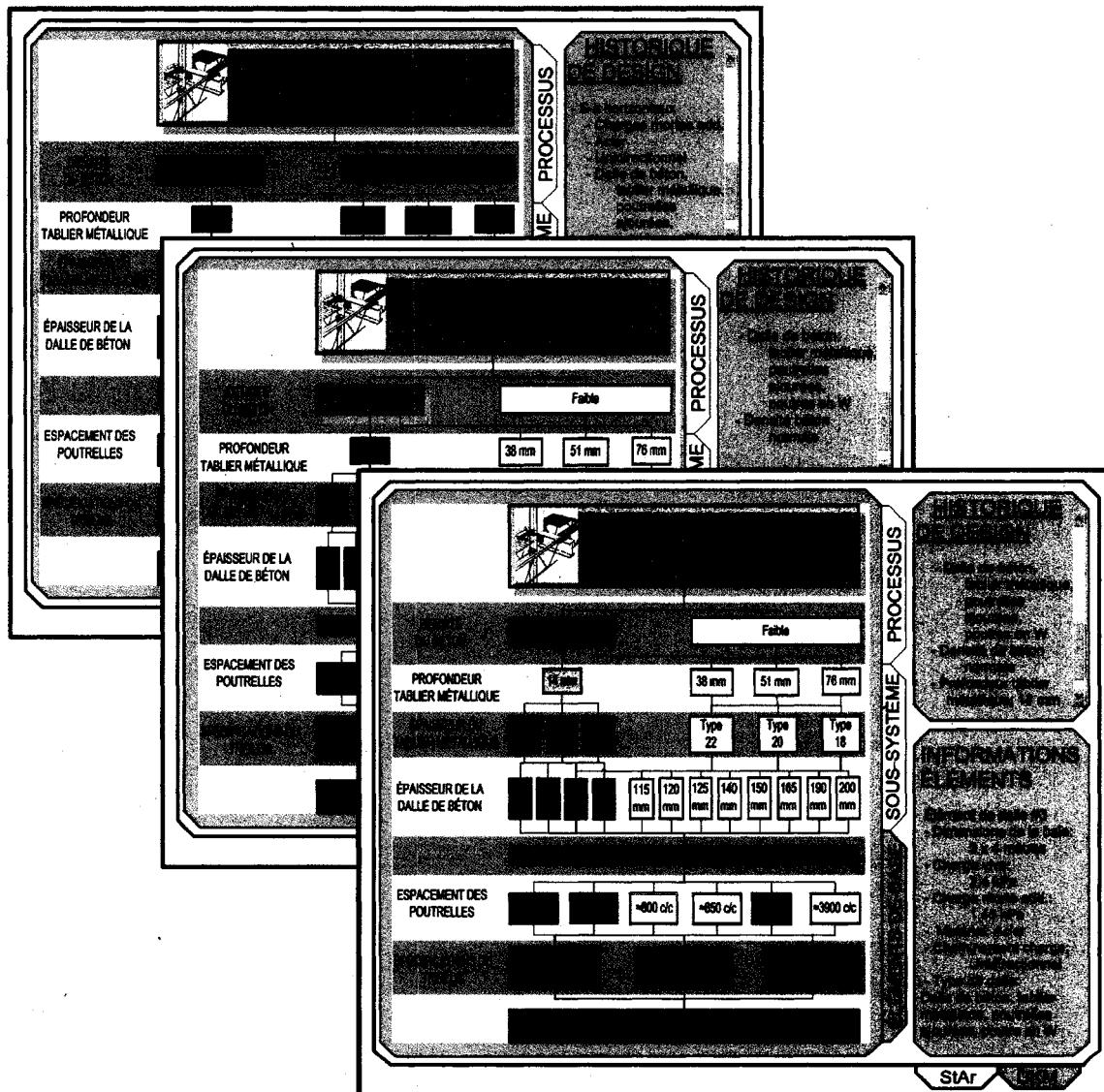


Figure 26 Évolution de l'interface en fonction des décisions prises

Une fois tous les éléments de base déterminés, une autre évaluation du prix au pied carré peut être faite. Celle-ci est plus précise que celle faite au niveau d'abstraction

dans le sens de la plus longue portée de la baie. L'espacement des poutrelles peut être fixé à 700 mm c/c et le treillis de la dalle de béton, conséquemment à l'espacement des poutrelles, peut être défini par un treillis de  $152 \times 152$  MW13.3 × MW13.3. Finalement, la profondeur des poutrelles, étant donné leur portée et la charge qu'elles supportent, pourrait être de 200 mm.

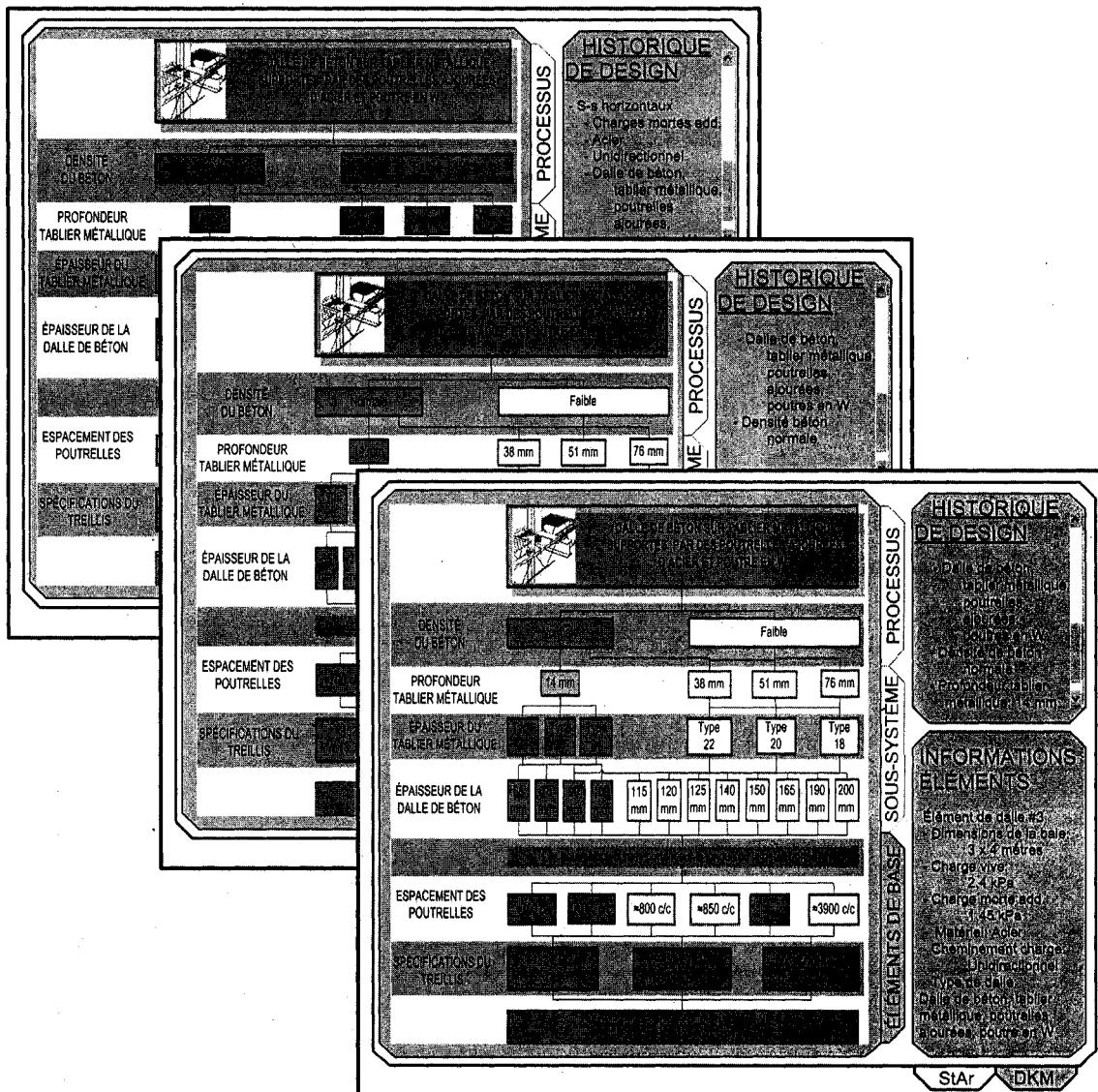


Figure 26 Évolution de l'interface en fonction des décisions prises

Une fois tous les éléments de base déterminés, une autre évaluation du prix au pied carré peut être faite. Celle-ci est plus précise que celle faite au niveau d'abstraction

plus haut, soit celui du sous-système. De même, la profondeur du système structural est aussi évaluée et plus précise.

Finalement, si l'ingénieur voulait détailler davantage la solution, le modèle pourrait être transféré à un logiciel commercial d'analyse. L'ingénieur peut décider d'observer de nouvelles possibilités en revenant en arrière dans les décisions prises ou encore appliquer la conception réalisée au modèle 3D au sein de StAr.

#### **4.5.7. Éléments verticaux (Étape 7 et 8)**

La façon dont pourrait être effectuée la conception des éléments verticaux a été rapidement explorée. Les efforts ont été concentrés davantage sur la conception des éléments horizontaux, car tel que mentionné, ces éléments constituent la majorité des coûts de la structure de bâtiments de faible et moyenne hauteur.

Les systèmes de résistance aux charges de gravité peuvent être définis selon trois systèmes qui sont parfois partagés par les systèmes de résistance latérale. L'utilisateur peut choisir à l'aide de StAr quels sous-systèmes de résistance appliquer. Les connaissances peuvent suggérer à l'utilisateur quel système est habituellement utilisé pour le type de bâtiment en cours de conception. Pour la caserne, étant donné que le garage du rez-de-chaussée requiert un espace ouvert, les murs porteurs ne sont donc pas possibles. L'utilisation de colonnes est donc préconisée.

La conception des sous-systèmes structuraux verticaux pourrait toujours se faire de pair avec StAr. Ce que StAr peut actuellement déceler, ce sont les discontinuités d'un étage à l'autre et aussi un problème d'instabilité liée au nombre insuffisant de dispositifs de résistance aux lignes d'action concourantes de ces derniers. En ce qui concerne le module de gestion des connaissances, bien qu'un nombre limité de connaissances sont actuellement disponibles comparativement à celles ayant été identifiées pour les sous-systèmes structuraux, il est toutefois possible d'indiquer à l'utilisateur des conseils directeurs tels que pour l'emplacement des sous-systèmes de résistance latérale. Ainsi, il est possible de rappeler à l'utilisateur qu'il est préférable de situer ces éléments de résistance sur les extrémités du bâtiment et de façon symétrique (pour limiter la torsion

dans le bâtiment) (Schodek, 2004) et d'utiliser les cages d'escaliers et d'ascenseurs pour leur excellente continuité sur toute la hauteur du bâtiment (Parent, 2004).

Toutefois, les règles du pouce sont plutôt rares dans la littérature pour déterminer des dimensions préliminaires et il ne semble pas que les ingénieurs praticiens aient de ces règles (Parent, 2004). Pour une région située en zone sismique, un point intéressant pour un logiciel de conception préliminaire serait de pouvoir vérifier rapidement l'impact de l'utilisation d'un système à faible ductilité par rapport à un système à ductilité élevée. Ainsi, il pourrait être évalué plus rapidement s'il en vaut la peine de payer les frais supplémentaires reliés à la haute ductilité de la structure par rapport aux économies liées à la réduction de la force sismique. Ainsi, ce qui pourrait être envisageable, ce serait de fournir à l'utilisateur un arbre de décision dans lequel l'ingénieur pourrait avoir des conseils relatifs à ce qui est habituellement utilisé pour un type particulier de bâtiment ainsi qu'une évaluation rapide des efforts sismiques et ensuite assurer un lien rapide vers un logiciel d'analyse 3D qui permettrait d'établir la répartition des forces sur les systèmes de résistance latérale et de vérifier si les dimensions des éléments sont suffisantes.

Dans le cas de la caserne, un bâtiment de faible hauteur en acier, il attire peu de charges sismiques étant donné son poids relativement faible. Ce qui pourrait être proposé comme solution habituellement adoptée serait d'utiliser des contreventements en croix. Les fermes rigides ne sont pas utilisées pour des bâtiments de faible hauteur et c'est pourquoi ils ne sont pas applicables pour le type de bâtiment de la caserne. Pour ce type de contreventement, il a été établi dans Parent (2004) que l'angle des contreventements seraient entre 30 et 60 degrés pour un angle optimal se situant à 45 degrés. Ce genre d'information pourrait se retrouver dans une fenêtre de type « Suggestions basées sur les connaissances ».

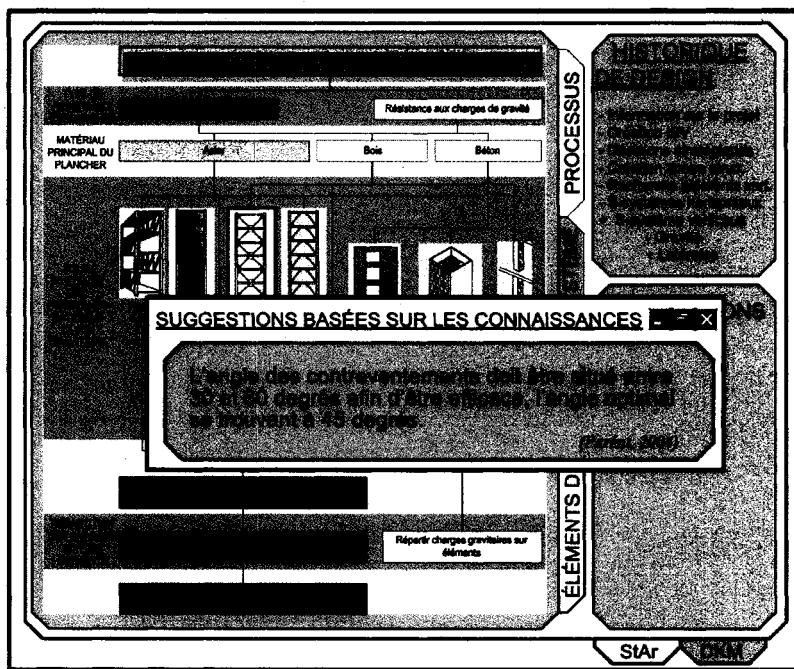


Figure 27      Suggestions pouvant affecter le choix de l'emplacement des contreventements

Une fois que l'utilisateur aurait choisi un système de résistance latérale, il serait appelé à le positionner dans StAr. Le prédimensionnement et le nombre de ces éléments pourraient se faire à l'aide de l'expérience de l'ingénieur et de connaissances non formellement identifiées à ce jour dans la littérature.

#### 4.5.8. Étapes finales de conception

L'étape 9 consiste à faire la conception des autres zones structurales ainsi que des autres volumes structuraux. Pour la conception des autres éléments, le processus est essentiellement le même que celui qui a été décrit dans les étapes 2 à 8 sauf que les systèmes qui ont été utilisés précédemment devraient être réutilisés le plus possible.

L'étape 10 consiste en un compte rendu de toutes les étapes de conception. Ce compte rendu peut être efficacement consulté à l'aide du modèle 3D dans StAr et à l'aide de différentes options permettant de savoir qu'elle est la hauteur totale du bâtiment, la quantité de matériau, etc.

Normalement, le concept final serait transféré à un logiciel d'analyse existant et pourrait initier le processus présentement utilisé par les ingénieurs en structure.

#### **4.6. Conclusion**

Au cours de ce chapitre, l'assistance envisagée à l'aide du module de gestion des connaissances (DKM) et du module StAr a été présentée. Cette façon de faire pourrait être une façon idéale qui pourrait mener à un outil utile à la conception préliminaire d'un bâtiment. Pour les étapes 1 à 5, le D KM est moins utilisé que le module StAr. Toutefois, le D KM est utile pour donner des conseils pertinents à l'étape de conception en cours. Pour les étapes 6 à 8, le D KM est très utile pour explorer différentes solutions afin de trouver une solution optimale.

Dans le prochain chapitre, l'implémentation d'un prototype limité à la conception des éléments horizontaux faisant état de preuve de concept est expliquée. Les détails de l'implémentation et les éléments n'ayant pu être faits tels que prévus y seront aussi présentés.

## CHAPITRE 5

### IMPLÉMENTATION DU PROTOTYPE

L'implémentation d'un prototype a pour but de clarifier davantage comment le logiciel envisagé pourrait fonctionner et aussi et surtout de servir de preuve de concept. Le prototype présenté ne couvre par toutes les étapes de conception, mais représente une des plus importantes dans la conception d'un bâtiment soit celle de la conception des sous-systèmes horizontaux. Celle-ci sera faite en fonction de baies dont les dimensions sont établies. Une partie seulement des connaissances seront donc modélisées.

L'implémentation générale a été faite en collaboration avec le finissant en génie logiciel, Dominic Fortin. L'auteur de ce mémoire a collaboré à la définition des besoins et à la mise en place des éléments du prototype. L'auteur a aussi modélisé et implémenté les connaissances de conception préliminaire. Pour davantage d'informations sur l'implémentation générale, veuillez consulter Fortin (2006).

Dans ce chapitre, l'architecture générale du prototype global est expliquée, ce dernier incluant le module de raisonnement géométrique, la base de données et le DKM. Le module de gestion des connaissances (DKM) est expliqué en détail. De plus, son architecture y est décrite ainsi que chacun des *paquetages* utilisés. Par la suite, l'utilisation des nœuds décisionnels par le DKM est expliquée. Pour finir, l'interface utilisée est présentée et l'annexe 7 présentant des extraits du code du prototype est introduite.

#### **5.1. Architecture générale du prototype complet**

Le module de gestion des connaissances (DKM) implanté au cours de cette recherche doit communiquer avec un module de raisonnement géométrique (StAr) afin de permettre des analyses en fonction du modèle de bâtiment (c.-à-d. une analyse en fonction des relations entre chacune des entités). De plus, il est pertinent de pouvoir raisonner géométriquement tôt dans le processus.

Plusieurs problèmes devaient être résolus pour permettre l'interaction entre StAr et le DKM :

1. Un modèle doit pouvoir être partagé par StAr et le DKM;
2. Étant donné que chacune des applications est appelée à modifier les données de manière concurrente, il est nécessaire d'implémenter un suivi de ces modifications et préserver le modèle dans son état le plus récent.
3. StAr n'a pas un modèle de bâtiment persistant, c'est-à-dire que tout le bâtiment est généré à chaque fois que l'on compile le programme. Toutefois, le processus de conception se fait habituellement sur plusieurs sessions de conception. Ainsi, le modèle de bâtiment doit pouvoir persister d'une session de conception à l'autre.
4. Les deux prototypes utilisent un langage différent. En effet, StAr utilise le C++ tandis que le DKM est programmé en Java. Un élément devait donc faire le pont entre ces deux langages.

La solution adoptée est l'utilisation de la base de données « Caché » (Alcade, 2006).

Cette base de données permet :

1. L'utilisation du modèle objet, accélérant le développement d'applications;
2. Les données y sont persistantes
3. La communication avec les deux langages utilisés ici, soit le C++ et le Java.

Ainsi, le prototype complet utilisant les deux modules (StAr et DKM) comporte un troisième élément soit une base de données commune maintenue par « Caché ». Les deux modules communiquent avec Caché afin d'accéder aux données du bâtiment (Voir figure 28). Cette façon de faire facilite aussi l'implémentation individuelle des deux modules puisqu'ils peuvent être développés en parallèle.

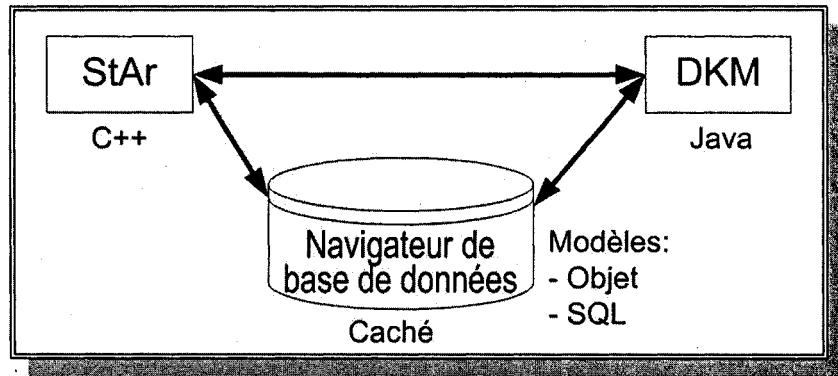


Figure 28      Architecture du prototype complet assistant la conception préliminaire de structures de bâtiments

L'implémentation du prototype du module de gestion des connaissances, réalisée à ce jour, s'est limitée à l'utilisation des éléments présents dans la base de données sans requérir d'analyses géométriques réalisées par StAr. La façon de traiter ces interactions n'a donc pas été abordée. Toutefois, pour ce genre d'interactions, il sera peut-être nécessaire de faire un lien direct entre les modules StAr et DKM.

StAr est déjà implémenté tel qu'expliqué à la sous-section 2.2.1 et continue à être amélioré. Ce module n'est pas l'objet de la présente recherche. Pour de plus amples informations sur l'implémentation de ce module, veuillez consulter Mora (2005). Le module DKM est expliqué en détail dans les sections suivantes faisant l'objet de cette recherche.

## 5.2. Structure des données

Les données sont structurées selon l'*approche descendante*. Ainsi, chacune des classes hérite de la classe générale **BuildingEntity** pour être subdivisée ensuite en classes plus spécialisées telles que la classe **HorizontalSubsystem**. C'est de cette dernière qu'héritent la classe **SlabElement** et les autres classes de sous-systèmes horizontaux spécifiques tels que ceux qui ont été implémentés dans le présent prototype (Voir figure 29).

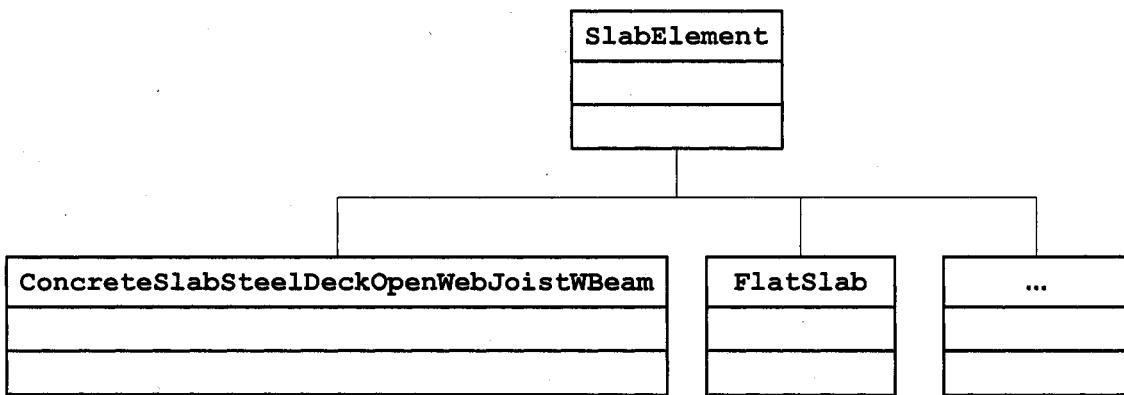


Figure 29 Hiérarchie des classes des entités structurales

Les classes de décisions héritent toutes de la classe abstraite **AbstractDecisionNode**. On y retrouve les méthodes abstraites **IsApplicable** et **Apply** ainsi que toutes les autres méthodes qui sont utilisées par tous les nœuds tels que la méthode **rollBack**. Ces dernières seront expliquées plus loin. Les classes de décisions spécifiques à chacun des sous-systèmes structuraux héritent de cette classe, chacune des méthodes abstraites y étant redéfinies. **Dec\_FlatSlab** et **Dec\_ConcreteSlabSteelDeckOpenWebJoistWBeam** sont deux exemples de ces classes spécifiques (Voir figure 30).

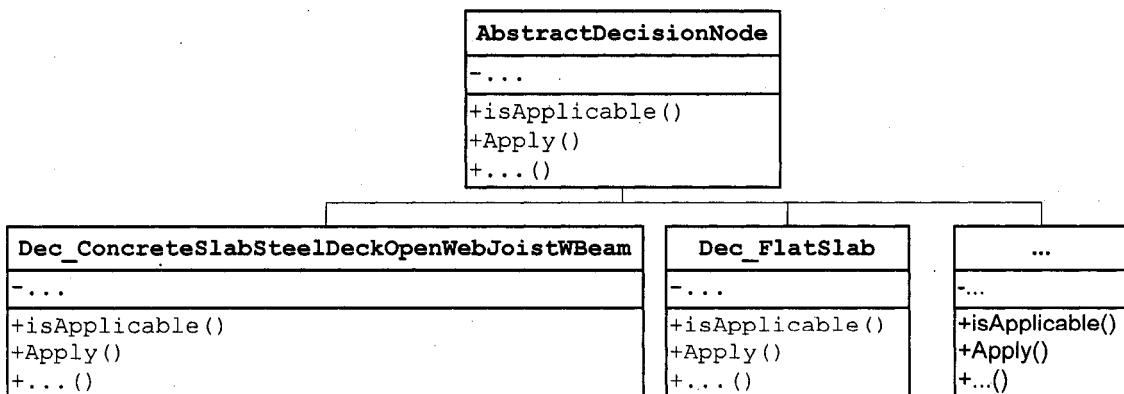


Figure 30 Hiérarchie des classes de décision.

### 5.3. Module de gestion des connaissances « DKM »

Ce module est le principal élément dont traitera le présent chapitre. En effet, l'implémentation du prototype visé par cette recherche concerne particulièrement le module de gestion des connaissances.

#### 5.3.1. Utilisation du Java comme langage de programmation

La programmation Java est un langage de haut niveau qui utilise uniquement la programmation orientée objet. La programmation orientée objet est importante, car elle permet à la programmation de coller à la réalité.

« La conception orientée objet modélise les objets du monde réel, en d'autres termes crée un modèle à partir de la réalité. [...] et offre une manière plus naturelle et plus intuitive de visualiser le processus de conceptualisation, à savoir : la modélisation d'objets réels, de leurs attributs et de leurs comportements. » (Deitel & Deitel, 2002)

Le Java facilite l'interaction avec l'utilisateur notamment par l'exploitation de graphismes, d'images, d'animation, de l'audio et de la vidéo (Deitel & Deitel, 2002). Comme il a été expliqué au cours du chapitre 3, le volet de l'interaction avec l'utilisateur est très important dans ce projet de recherche. Le Java peut faciliter cette interaction.

Les logiciels conçus à partir de ce langage « s'accompagnent d'une portabilité complète permettant aux applications de fonctionner sans modification sur [...] différents types d'ordinateurs équipés de systèmes d'exploitation différents » (Deitel & Deitel, 2002). Cette qualité des programmes Java facilitera probablement certaines étapes futures de notre recherche. En effet, fonctionnant sous l'environnement Windows de Microsoft, il pourrait être plus facile de communiquer avec EsQUIsE (Voir sous-section 2.2.2), l'interpréteur d'esquisses architecturales, fonctionnant sous l'environnement Mac OS de Apple.

« Ce langage est certain de devenir le langage de premier choix dans l'implantation des applications destinées à l'Internet, l'intranet et aux logiciels pour appareils devant communiquer par l'entremise d'un réseau » (Deitel & Deitel, 2002). Il est envisageable

que dans une autre phase de développement, le prototype puisse fonctionner à partir d'Internet et être accessible par les bureaux voulant en faire l'utilisation.

Finalement, le Java est disponible gratuitement à partir du site Internet de la compagnie « Sun ». Ceci représente un attrait majeur pour les projets universitaires.

### 5.3.2. Architecture spécifique au DKM

L'architecture spécifique au DKM est composée d'une architecture en couche, c'est-à-dire que l'utilisateur n'a pas à interagir directement avec la base de données. Il interagit avec l'interface et le visualiseur seulement. Ces derniers activent les contrôles qui commandent les actions à prendre sur les entités. Ces entités sont ensuite conservées dans la base de données « Caché » (Voir figure 31).

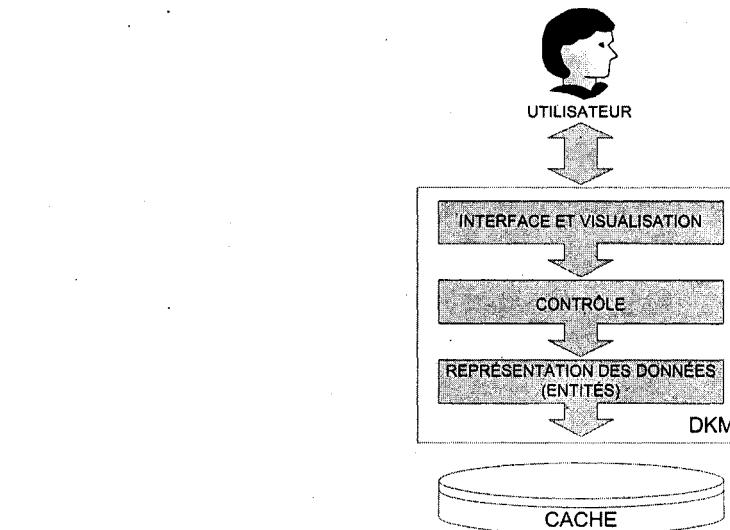


Figure 31      Architecture du module DKM

### 5.3.3. Paquetages utilisés

Trois *paquetages*<sup>11</sup> principaux et cinq autres spécifiques aux sous-systèmes structuraux horizontaux sont utilisés pour l'implémentation du prototype DKM. Il s'agit

---

<sup>11</sup> En programmation, conteneur qui, au moyen d'un mot-clé commun, regroupe des classes partageant des relations logiques (Office de la langue française, 2005).

d'un premier *paquetage*, appelé **CacheEntities** qui sert à interagir avec les entités dans « Caché ». Le deuxième, appelé **dkmApplication**, contient toutes les fonctions destinées au traitement de l'interface ainsi qu'une classe globale (**Globals**) qui permet d'y insérer des fonctions qui peuvent être utilisées par plusieurs autres classes. Finalement, les *paquetages* dont le nom débute par **knowledge** contiennent les classes spécifiques à chacun des nœuds des arbres de nœuds décisionnels. On peut ainsi retrouver le *paquetage* principal **knowledge** qui contient les connaissances pour les nœuds appartenant à tous les sous-systèmes horizontaux et d'autres *paquetages* spécifiques tels que **knowledge\_ConcreteSlabSteelDeckOpenWebJoistWBeam** (Sous-système horizontal défini par une dalle de béton sur tablier métallique supporté par des poutrelles d'acier ajourées et poutre en W) contiennent les connaissances spécifiques pour un sous-système en particulier.

Tous les attributs utilisés pour l'implémentation sont présentés en annexe 5. Chacun des attributs pour un élément de dalle ainsi que ceux des classes de connaissances spécialisées des sous-systèmes horizontaux y est détaillé en français avec sa traduction anglophone.

#### 5.3.4. Utilisation des nœuds décisionnels

Les nœuds décisionnels sont inspirés du modèle BENT (Fenves et coll., 2000; Gomez, 1998). Un nœud décisionnel représente les connaissances requises pour implémenter une étape de conception. L'application d'un nœud décisionnel peut être vue comme étant une décision menant à une solution de conception. Ces nœuds utilisent les heuristiques, tels que les systèmes experts (Voir les sous-sections 1.4.2 et 1.5.2) mais sans l'utilisation du moteur d'inférence. De plus, les nœuds décisionnels permettent le raisonnement à différents niveaux d'abstraction. Différentes fonctionnalités sont nécessaires pour satisfaire toutes les décisions à prendre. Certains nœuds décisionnels n'utilisent que les heuristiques tandis que d'autres nécessitent aussi

l'utilisation de dialogue, de tableaux (nombreux dans les connaissances recueillies), d'*infobulles*<sup>12</sup> et de pages HTML.

Tous les nœuds utilisent le principe de règle avec *partie gauche* et *droite* provenant des systèmes basés sur les règles utilisés entre autres par les systèmes experts. Afin de déterminer l'applicabilité d'un nœud, la fonction **IsApplicable** (Voir exemple dans la prochaine sous-section) vérifie si le nœud est applicable (équivalent de la *partie gauche* de la règle). Si le nœud est applicable, le nœud est montré en vert. Ensuite, si l'utilisateur décide d'appliquer la décision, en cliquant deux fois sur le nœud lorsqu'il est vert, la fonction **Apply** (équivalent de la règle droite) détermine les changements à réaliser sur l'entité et peut commander aussi différentes fonctionnalités qui seront expliquées dans les prochains paragraphes. Il est à noter que l'utilisateur remplace le moteur d'inférence utilisé en système expert. Une fois appliqué, le nœud devient rouge. Voici un exemple d'une règle **Apply** (voir autres exemples à l'annexe 7), en pseudo-code, appartenant au nœud #8 (sous-système horizontal du type dalle de béton sur tablier métallique supporté par des poutrelles d'acier ajourées, voir figure 39) :

```

Apply Dec_ConcreteSlabSteelDeckOpenWebJoistWBeam
{
    Si l'entité de bâtiment sélectionnée est un élément de dalle
        Conserver la version actuelle de l'entité
        Créer une nouvelle entité de dalle qui sera la version
        actualisée;
        Copier les valeurs de l'ancienne entité dans la nouvelle;
        Définir le type de l'entité à :
            "ConcreteSlabSteelDeckOpenWebJoistWBeam"
        Actualiser l'interface avec la nouvelle entité
    Retourner l'élément de bâtiment modifié en fonction de la
    décision}

```

La fonction **Apply** conserve l'ancienne version de l'entité pour permettre le retour en arrière sur les décisions prises. Ainsi, si l'utilisateur désire retourner en arrière sur une

---

<sup>12</sup> Élément d'un système d'aide contextuelle qui, à la demande de l'utilisateur, affiche de l'information sur les différentes parties d'une fenêtre, sous une forme qui rappelle un peu celle des bulles des bandes dessinées (Office de la langue française, 2005).

décision prise, il clique deux fois sur le nœud appliqué et la fonction **rollback** est appelée ramenant ainsi l'ancienne version de l'entité à l'état de version actuelle. Suivra dans les prochains paragraphes, une description de chacune des particularités des nœuds.

Les heuristiques sont très présentes dans la littérature sous forme de règles du pouce. Il est possible de décortiquer ces heuristiques sous la forme d'une *partie gauche* (**IsApplicable**) et d'une *partie droite* (**Apply**) tel que décrit précédemment.

Un exemple d'heuristique recueillie à partir des tables de Schodek (2004) (Voir annexe 2) permet de déterminer si les portées à couvrir peuvent l'être et ce de façon économique avec le sous-système horizontal inclus dans le nœud. Voici un exemple de pseudo-code représentant la fonction **IsApplicable** pour le nœud #8 (sous-système horizontal du type dalle de béton sur tablier métallique supporté par des poutrelles d'acier ajourées, voir figure 39):

```
IsApplicable Dec_ConcreteSlabSteelDeckOpenWebJoistWBeam
{
    Si l'entité de bâtiment sélectionnée est un élément de dalle;
    Si le cheminement des charges est « Unidirectionnel »;
    Si la longue portée est entre 3000 mm et 36000mm;
    Si la courte portée est entre 3000mm et 21000mm;
    Retourner « Vrai »;
}
```

La fonction **IsApplicable** retourne « vrai » si toutes les conditions préalables sont respectées. Ceci rend alors le nœud applicable et donc sélectionnable par l'utilisateur.

Il n'est pas nécessaire d'indiquer dans la fonction **IsApplicable** que lorsqu'un sous-système est déjà sélectionné (groupe #4) les autres sous-systèmes ne sont plus applicables. Cette vérification est faite au niveau de la gestion de l'interface. Deux classes provenant du paquetage **dkmApplication** s'occupent de faire cette vérification. La classe **EntityColorFunction** vérifie s'il y a un nœud du groupe qui

est rouge (nœud appliqué) et si c'est le cas, colore les autres nœuds du groupe en gris. Ensuite, la classe `EntityPickPlugin` s'assure que les autres nœuds, qui ne sont plus applicables, ne sont pas sélectionnables par l'utilisateur.

Des dialogues sont souvent nécessaires afin de proposer des valeurs à utiliser à l'utilisateur ou tout simplement pour lui poser des questions nécessaires à la poursuite des décisions. Ces dialogues ont été implémentés tel que prévu dans le chapitre 3. Par exemple, pour déterminer le sens des poutrelles, il faut demander à l'utilisateur dans quel sens il désire les disposer. Il est toutefois possible de lui donner des conseils basés sur les connaissances à même cette fenêtre de dialogue. Pour ce genre d'interaction, une boîte de dialogue de type `JOptionPane.showInputDialog` est utilisée (Voir figure 32).

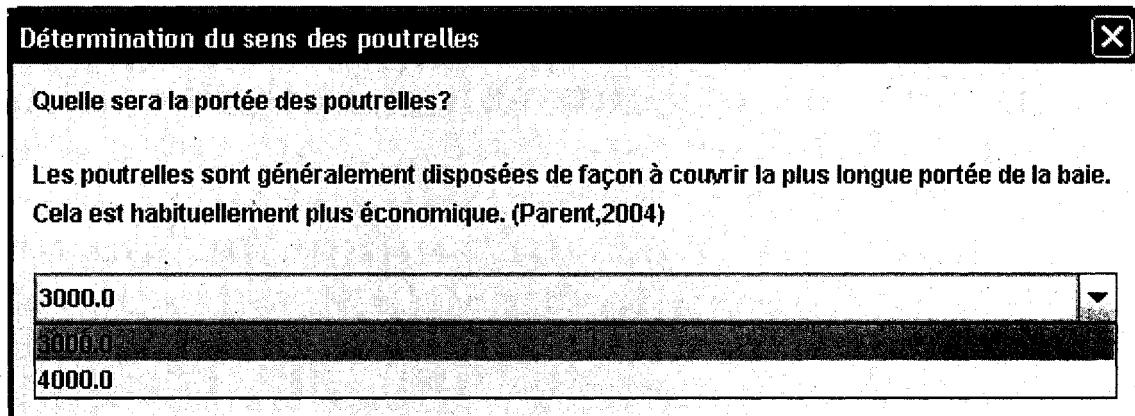


Figure 32 Exemple d'une boîte de dialogue utilisée pour déterminer le sens des poutrelles

Énormément de tableaux sont présents dans les connaissances en conception préliminaire de structures de bâtiments. Ces tableaux se trouvent dans différentes sources. Il est intéressant de pouvoir fournir à l'utilisateur, au temps opportun, les tableaux pertinents aux décisions à prendre. De plus, il est possible de faire un traitement de ces tableaux et de ne montrer que ce qui est pertinent en fonction du cas à résoudre. Un exemple de tableau pouvant être utilisé pour la conception préliminaire est montré au Tableau IV.

Tableau IV

**Masse des poutrelles (en kg/m) en fonction de la charge pondérée et de la charge de service pour les poutrelles d'une portée de 4 mètres**

Portée (m)	Profondeur de la poutrelle (mm)	Charge pondérée (kN/m) Charge de service (kN/m)											
		4,5 3,0	6,0 4,0	7,5 5,0	9,0 6,0	10,5 7,0	12,0 8,0	13,5 9,0	15,0 10,0	16,5 11,0	18,0 12,0	19,5 13,0	21,0 14,0
4	200	7,8 105	7,8 79	8,4 73	8,8 64	10,3 65	11,5 64	12,8 65	14,4 65	15,8 65	17,3 64	18,8 64	20,4 65
	250	8,0 170	8,0 128	8,0 102	8,0 85	8,2 73	8,8 74	9,7 68	11,3 75	12,0 72	12,6 69	13,5 67	13,9 66
	300	9,6 200	9,6 200	9,6 183	9,6 153	9,6 131	9,6 115	9,6 102	10,3 96	10,6 90	12,4 98	13,4 95	13,4 88
	350	9,8 200	9,8 200	9,8 200	9,8 181	9,8 159	10,1 141	10,1 127	10,5 121	10,5 111	11,8 112	12,9 116	13,6 114
	400	9,9 200	9,9 200	9,9 200	9,9 200	9,9 200	10,3 187	10,3 168	10,3 153	10,4 140	10,9 135	10,9 128	12,0 128
	450	10,1 200	10,1 200	10,1 200	10,1 200	10,4 200	10,5 200	10,5 195	10,5 179	10,7 165	11,1 153	11,2 150	11,2 150
	500	10,3 200	10,3 200	10,3 200	10,3 200	10,6 200	10,6 200	10,7 200	10,7 200	10,9 200	10,9 200	11,3 200	11,3 191

(Canam - Solutions + Service, 2003)

Trois différentes solutions pour la présentation des tableaux à l'utilisateur ont été évaluées. Les exemples de traitement de tableaux seront faits à partir du Tableau IV.

1. Présenter les tableaux sous forme de nœuds; le meilleur choix pourrait être hachuré et les autres choix possibles en vert. Ici, pour le choix de la profondeur de la poutrelle, celle ayant la masse la moins élevée en fonction de la résistance de la poutrelle pourrait être celle qui serait hachurée (Voir figure 33).
2. Présenter à l'utilisateur des tableaux dynamiques avec lesquels il peut interagir; le tableau initial pourrait être traité de façon à ne pas montrer les parties de tableau inutiles. De plus, l'utilisateur pourrait prendre sa décision directement en sélectionnant son choix en cliquant sur la case appropriée dans le tableau. Le (ou les) meilleur choix pourrait être montré en rouge ou avec une autre façon mettant l'emphase sur les meilleurs choix (Voir figure 34).

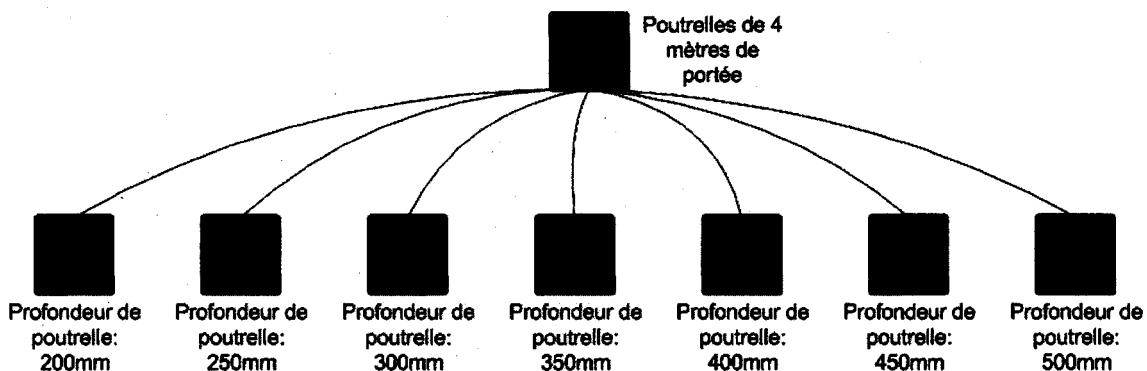


Figure 33 Présentation d'un tableau sous forme de nœuds

Déterminez la profondeur des poutrelles

Charge pondérée sur la poutrelle = 7.02 kNm

Portée (m)	Profondeur de la poutrelle (mm)	Charge pondérée (kNm/m)			
		4,0	6,0	7,5	9,0
2,0	200	7,8	7,8	8,4	8,8
	100	7,3	7,3	7,3	6,4
	170	8,0	8,0	8,0	8,6
	200	128	128	128	128
3,0	200	9,6	9,6	9,6	9,6
	200	200	200	183	153
3,50	200	9,8	9,8	9,8	9,8
	200	200	200	200	200
4,00	200	9,9	9,9	9,9	9,9
	200	200	200	200	200
4,50	200	10,1	10,1	10,1	10,1
	200	200	200	200	200
5,00	200	10,3	10,3	10,3	10,3
	200	200	200	200	200

OK Annuler

Figure 34 Exemple d'un tableau traitant dynamiquement les informations

- Présenter à l'utilisateur les données tirées d'un tableau dans une boîte de dialogue avec un menu déroulant offrant les choix possibles. Les résultats peuvent être ordonnés de façon à rendre les choix les plus intéressants plus accessibles (Voir figure 35).

Chaque solution comporte des avantages et inconvénients. Il faut notamment considérer le temps d'implémentation nécessaire pour rendre possible l'utilisation des tableaux dans le prototype et la convivialité de l'interface dans la sélection des choix. Les avantages, inconvénients et temps approximatif pour l'implémentation de ces solutions sont détaillés dans le Tableau V.

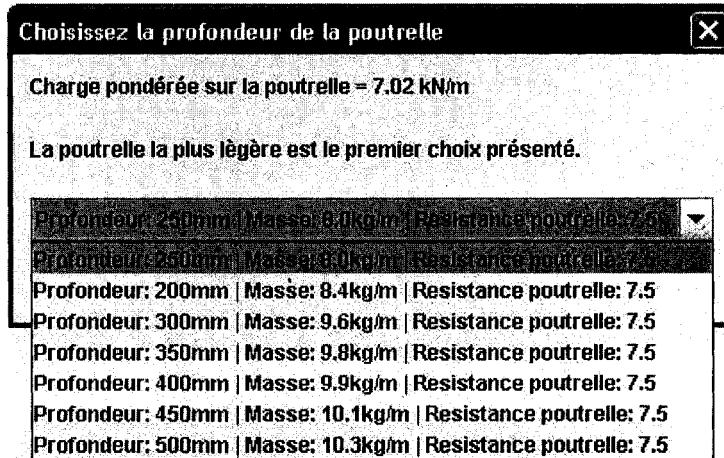


Figure 35 Dialogue présentant les éléments d'un tableau sous forme de menu déroulant

La troisième solution a été adoptée notamment pour son temps d'implémentation plus court que pour la solution #2. La solution #1 a été écartée étant donné le trop grand nombre d'options qui se présenteraient à l'utilisateur. De plus, il a été trouvé qu'il est possible d'implémenter les tableaux dans la base de données « Caché » et de faire par la suite des requêtes SQL sur ces tableaux. Cette façon de faire facilite grandement l'insertion des connaissances sous forme de tableaux puisqu'à partir d'un tableau en format Excel (ou autre), il est possible d'importer directement les données.

La personne qui modélise les connaissances a toutefois le choix entre la solution numéro 1 et 3. En effet, il est possible de créer autant de nœuds que souhaité pour un même niveau de décision ce qui correspondrait à tous les choix possibles présentés dans le menu déroulant de la solution numéro 3. Il faudrait noter cependant que le choix entre les deux solutions peut se baser sur le nombre de choix offerts à l'utilisateur. En effet, si le nombre de choix possibles est très élevé, étant donné que les nœuds non-applicables sont montrés en gris sur l'interface, trop de nœuds pourraient être montrés à l'utilisateur si la solution 1 est adoptée. Ainsi, tel que montré pour le choix des poutrelles, puisque 7 choix sont disponibles pour chaque longueur de poutrelles, il est préférable de présenter les poutrelles avec la solution 3.

Tableau V

Avantages, inconvénients et temps approximatif pour l'implémentation pour chacune des trois solutions pour le traitement des tableaux

IDENTIFICATION DE LA SOLUTION	- SOLUTION 1 -	- SOLUTION 2 -	- SOLUTION 3 -
TEMPS POUR IMPLÉMENTER	0 jour	Très long (durée indéterminée)	1.5 jours (approximatif)
AVANTAGES	Plus intuitif pour l'utilisateur du prototype étant donné que le reste du prototype utilise en majeure partie les nœuds.	Tableau bien organisé;	Facile à implémenter; Boîte de dialogue existante en Java ( <b>OptionPane</b> , librairie swing, Java); Possibilité de classer les solutions.
INCONVÉNIENTS	Énormément de classes à implémenter; Pas intuitif pour les ingénieurs comparativement aux tableaux. Peut y avoir trop de nœuds; difficile à lire	Difficulté d'implémentation liée à la création d'une nouvelle interface qui permettrait l'interaction entre l'utilisateur et le tableau.	Moins bien organisé qu'un tableau; Les titres de colonnes doivent être répétés; Ce n'est pas possible de montrer le tableau lui-même.

Les *infobulles* servent à dispenser des évaluations rapides en fonction des décisions prises. Elles sont consultables en passant la souris par-dessus le nœud, cela appelle

alors la classe **KnowledgeTooltip**, présente dans le paquetage dkmApplication qui demande à la classe du nœud les informations à écrire dans l'*infobulle*. Si aucune information n'a été entrée dans la classe du nœud, la méthode de la classe **AbstractDecisionNode** donne des informations de base sur le nœud tel son nom (Voir exemple d'*infobulle* à la figure 36).

#### Évaluations

Name : DALLE DE BÉTON/TABLIER MÉTALLIQUE/POUTRELLES ACIER/POUTRE W

Coût : 12.51\$ /pied carré

N.B. Coût basé sur une baie de 4572.0mm x 6096.0mm avec une charge surimposée de 5.99kPa

Profondeur de structure estimée:

- RSMeans: 482mm

- Schodek: min 261mm et max 355mm

Figure 36 Exemple d'*infobulle* utilisée pour fournir une évaluation

Des pages HTML, équivalentes aux fenêtres pop-up présentées au chapitre 4, sont utilisées pour donner des conseils d'une façon plus complète que ceux qui peuvent être donnés par des *infobulles*. Ces pages HTML sont consultables en cliquant à droite avec la souris sur le nœud. Si une page HTML y est attachée, la classe **KnowledgePickPlugin** appelle la méthode **getInfoURL**. La page HTML s'ouvre alors. Plusieurs exemples de ces pages HTML sont présentés en annexe 8.

L'implémentation des nœuds sous forme d'arbres a été faite avec la librairie logicielle JUNG (JUNG: Java Universal Network/Graph Framework, 2006), une librairie existante. Cette librairie est extensible et disponible en *code source libre* pour la modélisation, l'analyse et la visualisation de données qui peuvent être représentées graphiquement sous forme d'arbres ou de graphes. Écrite en Java, la librairie JUNG augmente les capacités d'interface utilisateur du langage Java (Java API). Deux exemples d'utilisation de la librairie JUNG sont présentés aux figures 37 et 38. Le premier exemple est le logiciel Grape aidant à visualiser et explorer le graphique d'importation d'un programme. Le deuxième exemple est une application pour la gestion et l'analyse

de réseaux sociaux (contacts, relations, ressources, compétence et autres informations).

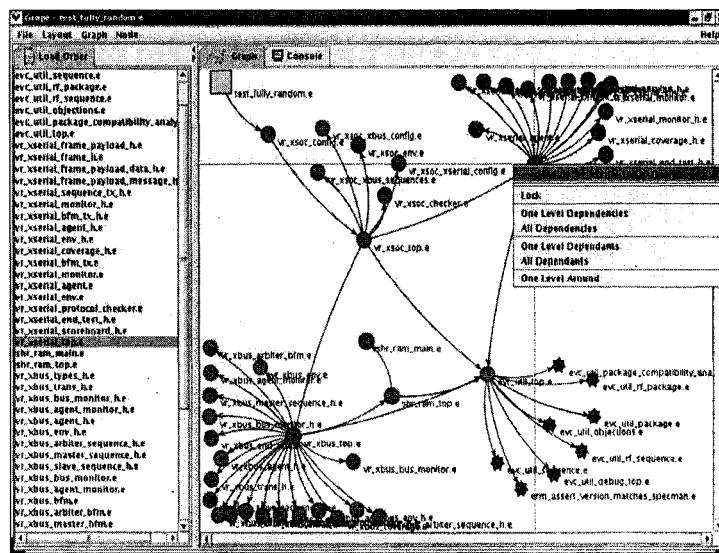


Figure 37 Utilisation de la librairie JUNG pour le logiciel « Grape »  
(AMIQ Consulting, 2005)

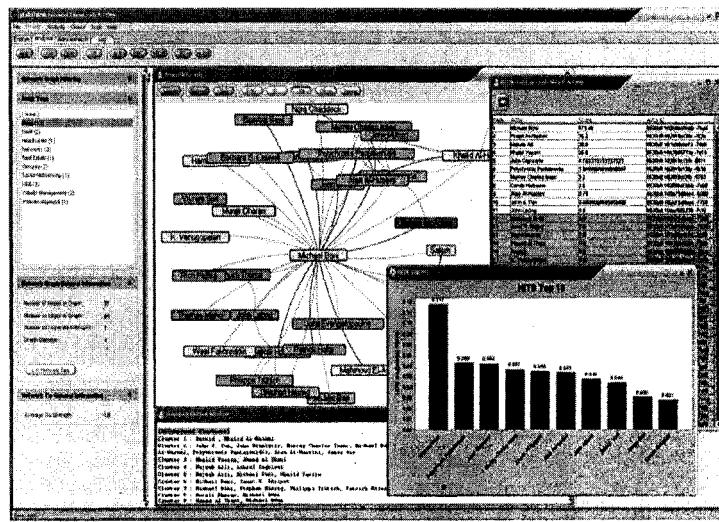


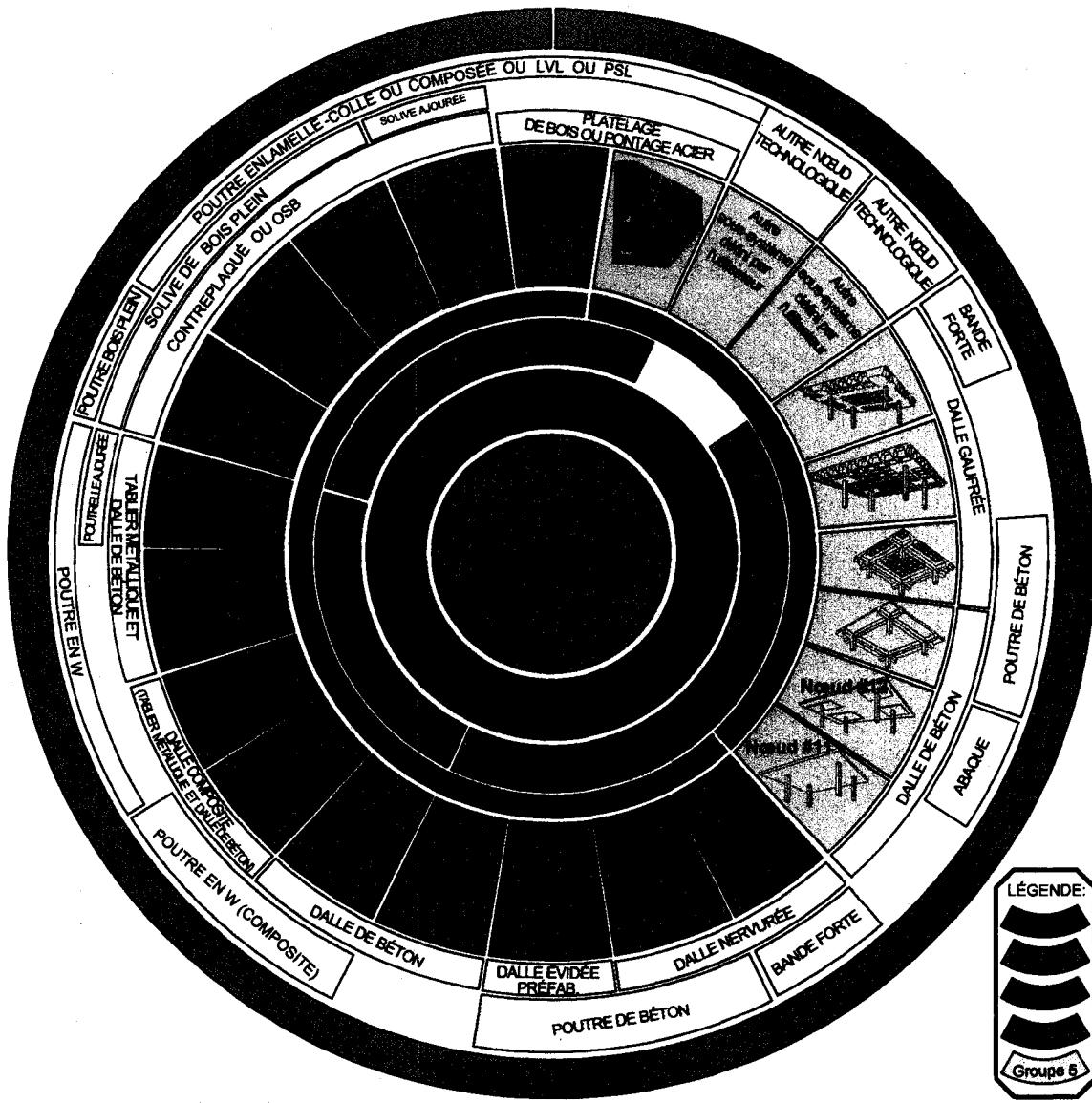
Figure 38 Utilisation de la librairie JUNG pour l'application « shiftTHINK Connect »  
 (shiftTHINK, 2006)

Pour ajouter une connaissance, une classe d'un nœud standard existe recueillant les principales composantes qui peuvent être nécessaires à l'implémentation du nœud. En copiant le nœud standard, on obtient une nouvelle classe contenant les méthodes **Apply** et **isApplicable** déjà amorcées. Il faut y ajouter les conditions d'applications du nœud dans la méthode **isApplicable** et les impacts de la décision (changements aux attributs, demande d'informations à l'utilisateur et autres) dans la méthode **Apply**.

En résumé, les étapes logicielles pour la génération d'un nœud décisionnel sont les suivantes :

1. Créer un nœud "JUNG" vide;
2. Implémenter les méthodes nécessaires aux nœuds (**Apply**, **isApplicable** et autres)
3. Encapsuler le nœud décisionnel qu'on désire représenter à l'intérieur du nœud "JUNG";
4. Répéter l'opération pour chacun des nœuds décisionnels.

Une fois que chacun des nœuds est créé, pour constituer l'arbre décisionnel, il faut lier chacun des nœuds à leurs prédecesseurs et successeurs. Afin de faciliter cette opération, chacun des niveaux de décisions compose un groupe de nœuds, ou plusieurs sous-groupes. Par exemple, tous les sous-systèmes horizontaux unidirectionnels (représentés par plusieurs nœuds), font partie du groupe numéro 4 (Voir figure 39), tandis que les sous-systèmes horizontaux bidirectionnels composent le groupe numéro 5. Ainsi, s'il faut créer un lien entre un nœud et un groupe de nœuds, cela peut se faire beaucoup plus rapidement que s'il avait fallu créer les liens individuellement. Chacun des numéros de groupe utilisés pour l'implémentation des éléments de base est défini à l'annexe 4.



**Figure 39** Définition des groupes et numéros de nœuds utilisés pour l'implémentation des liens entre les nœuds

En plus de faciliter la définition des liens entre les nœuds, cela facilite aussi la vérification de l'applicabilité des nœuds lorsqu'il n'y a qu'un groupe pour un niveau de décision. Cette notion sera expliquée davantage plus loin.

Quatre différents types de liens peuvent être définis de façon à pouvoir pallier à toutes les situations que l'on peut rencontrer dans les arbres de nœuds décisionnels développés soit :

1. Un nœud vers un nœud :

Par exemple: Acier (nœud #3) à Unidirectionnel (nœud #6);

2. Un nœud vers un groupe de nœuds :

Par exemple : Unidirectionnel (nœud #6) aux sous-systèmes unidirectionnels (gr.#4) ;

3. Un groupe de nœuds vers un nœud :

Par exemple : Épaisseur de dalle de béton de 115 à 200mm (Groupe #15) vers « Détermination du sens des poutrelles » (nœud # 124);

4. Un groupe de nœuds vers un groupe de nœuds :

Par exemple : Profondeur de tablier métallique de 38 à 76 mm (groupe #10) aux types de tablier métallique 22 à 18 (groupe#12).

Les liens peuvent être définis à l'aide des fonctions « **addFollowingNode** » pour indiquer quel nœud suit un autre nœud ou groupe de nœuds et similairement, « **addFollowingGroup** » pour indiquer quel groupe suit le nœud ou le groupe de nœuds.

### **5.3.5. Présentation de l'interface du prototype**

L'interface graphique des arbres de connaissances tels que représentés dans le chapitre 4 n'a pas été possible pour ce prototype, car l'implémentation de l'interaction entre l'utilisateur et ces graphiques aurait été trop longue et compliquée à réaliser. De plus, il était souhaité de ne montrer à l'utilisateur que les nœuds applicables, afin de clarifier les choix possibles. Ainsi, il devénait encore plus complexe de traiter l'interaction avec l'utilisateur.

#### **5.3.5.1. Apparence de l'Interface**

L'interface utilisée pour le prototype est basée sur l'interface envisagée. À ce niveau, le seul grand changement apporté a été le repositionnement des fenêtres « Historique de design » et « Informations sur l'élément » à l'horizontale, dans le bas de l'interface

(Voir figure 40). Cela a été fait pour laisser davantage de place à l'arbre de décisions qui a tendance à s'étendre horizontalement.

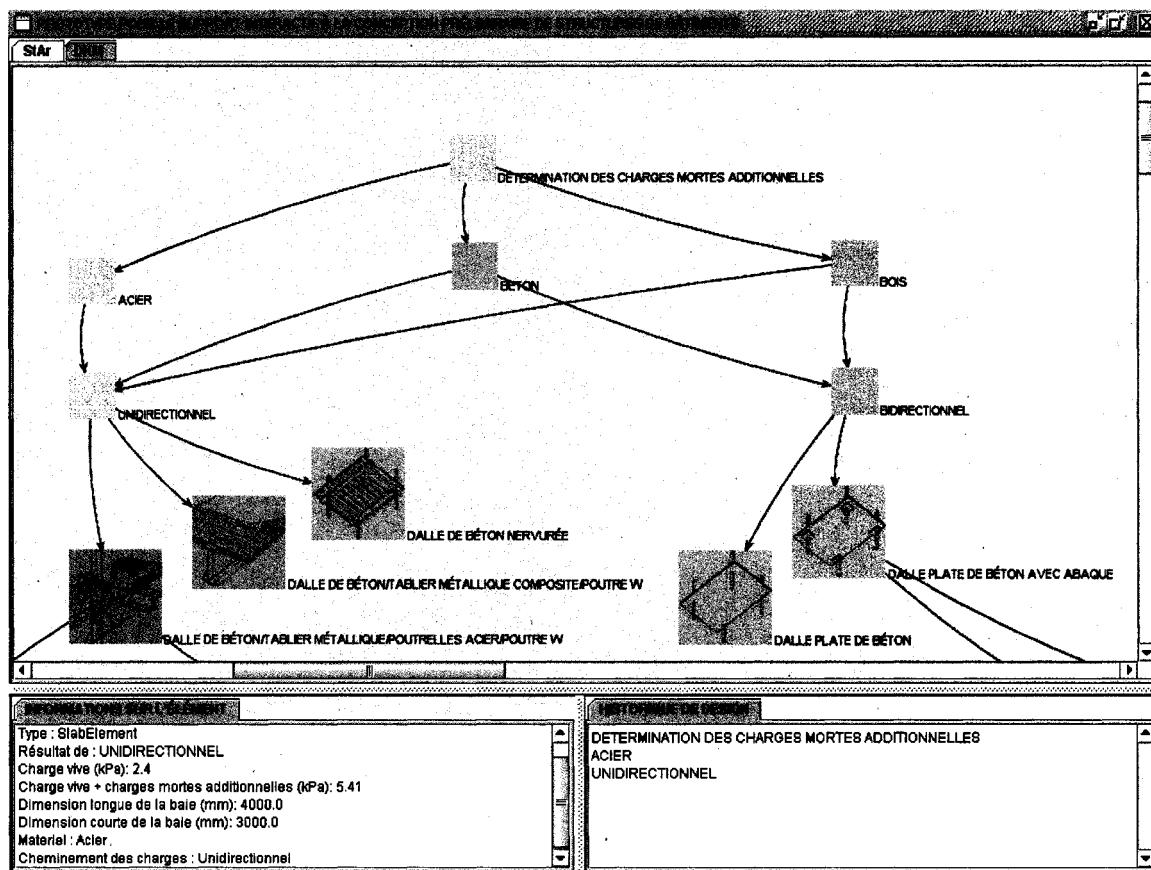


Figure 40 Interface générale implémentée de l'espace de travail en mode DKM

### 5.3.6. Détails de l'implémentation partielle du prototype

Les attributs qui ont été utilisés pour l'implémentation des sous-systèmes se retrouvent à l'annexe 5. Chacun des attributs y est indiqué en français et en anglais. L'implémentation s'est toutefois faite en anglais.

Deux exemples de classes qui ont été implémentées sont montrés en annexe 7. Le code présent dans ces deux exemples montre l'utilisation des méthodes **isApplicable** et **Apply**, l'utilisation de dialogues et des requêtes SQL.

### 5.3.7. Changements effectués au fonctionnement envisagé

Plusieurs fonctionnalités ont dû être simplifiées afin d'avoir un prototype fonctionnel dans le temps voulu :

1. Les arbres de connaissances développés n'ont pu être directement utilisés étant donné la difficulté d'implémentation de l'interaction avec l'utilisateur avec une telle interface;
2. Il était souhaité que les arbres de connaissances ne montrent que les nœuds décisionnels qui sont applicables pour ainsi permettre de montrer plus clairement toutes les possibilités qui s'offrent à l'utilisateur. Ainsi, les nœuds qui deviennent inapplicables au cas de conception, sont tout simplement supprimés de l'interface. Ce n'est pas le cas dans cette version du prototype encore une fois pour permettre d'avoir un prototype fonctionnel dans le temps voulu, mais il pourrait être possible d'ajouter cette fonctionnalité dans une itération subséquente.
3. Il était envisagé que l'utilisateur puisse voir les conséquences d'une décision sur tous les autres niveaux de décision de l'arbre de nœuds décisionnels. Ainsi, tous les nœuds qui peuvent être appliqués en fonction des décisions déjà prises, peu importe les décisions futures de l'ingénieur, sont montrés en vert. Cela pourrait accélérer l'exploration de solutions.
4. Les conseils fournis à l'ingénieur soit par l'intermédiaire d'*infobulles* ou par la consultation de pages HTML ne sont pas reportés dans l'historique de design de manière à ce que l'ingénieur puisse reconstituer la raison pour laquelle il aurait pris certaines décisions. Cela pourrait être une fonctionnalité ajoutée subséquemment.
5. Pour le retour en arrière sur des décisions déjà prises, il avait été prévu que cela puisse se faire directement en cliquant au niveau de la décision à partir de laquelle on voulait changer le cours des décisions. Toutefois, cela s'est avéré trop complexe pour cette première version du prototype.

## CHAPITRE 6

### PRÉSENTATION DU PROTOTYPE ET EXEMPLE D'UNE SESSION DE CONCEPTION

Dans ce chapitre seront présentées les instructions pour pouvoir utiliser le prototype. Ce prototype est limité à la conception des éléments structuraux horizontaux ayant été implémentés au cours de cette recherche. Tel que mentionné dans le chapitre précédent, une session de conception typique sera réalisée en fonction des sous-systèmes horizontaux implémentés.

#### **6.1. Manuel de l'utilisateur**

Le manuel permet de mieux comprendre les fonctionnalités du prototype et devrait faciliter la tâche des chercheurs qui auront à travailler à l'amélioration de celui-ci lors de prochaines itérations menant à une version améliorée du prototype. De plus, ce manuel pourrait servir à l'évaluation par des professionnels lors d'étapes futures de développement. Dans les prochains paragraphes, la façon d'initialiser la base de données, les fonctionnalités de l'interface ainsi que les connaissances incluses dans le prototype seront expliquées.

##### **6.1.1. Mesures temporaires d'initialisation du modèle**

Le module de gestion des connaissances (DKM) communique avec la base de données « Caché » pour obtenir les informations provenant de StAr, tel qu'expliqué dans le chapitre 5. Toutefois, au présent stade de développement, seul le DKM communique avec Caché. La communication de StAr à Caché devrait être réalisée sous peu.

Avant de générer de nouvelles entités de dalles, il est nécessaire d'effacer les entités qui pourraient y être déjà présentes. Pour ce faire, il est nécessaire de suivre les cinq étapes suivantes :

1. Ouvrir le « Portail d'administration système » de Caché;
2. Sélectionnez « SQL »;
3. Sélectionnez « DKM » ;

4. Sélectionnez « Exécuter instruction SQL »
5. Incrire la requête suivante : Delete from CachéEntities.buildingEntity;
6. Appuyez sur « Exécuter requête » et l'on devrait obtenir une fenêtre telle que montrée à la figure 41.

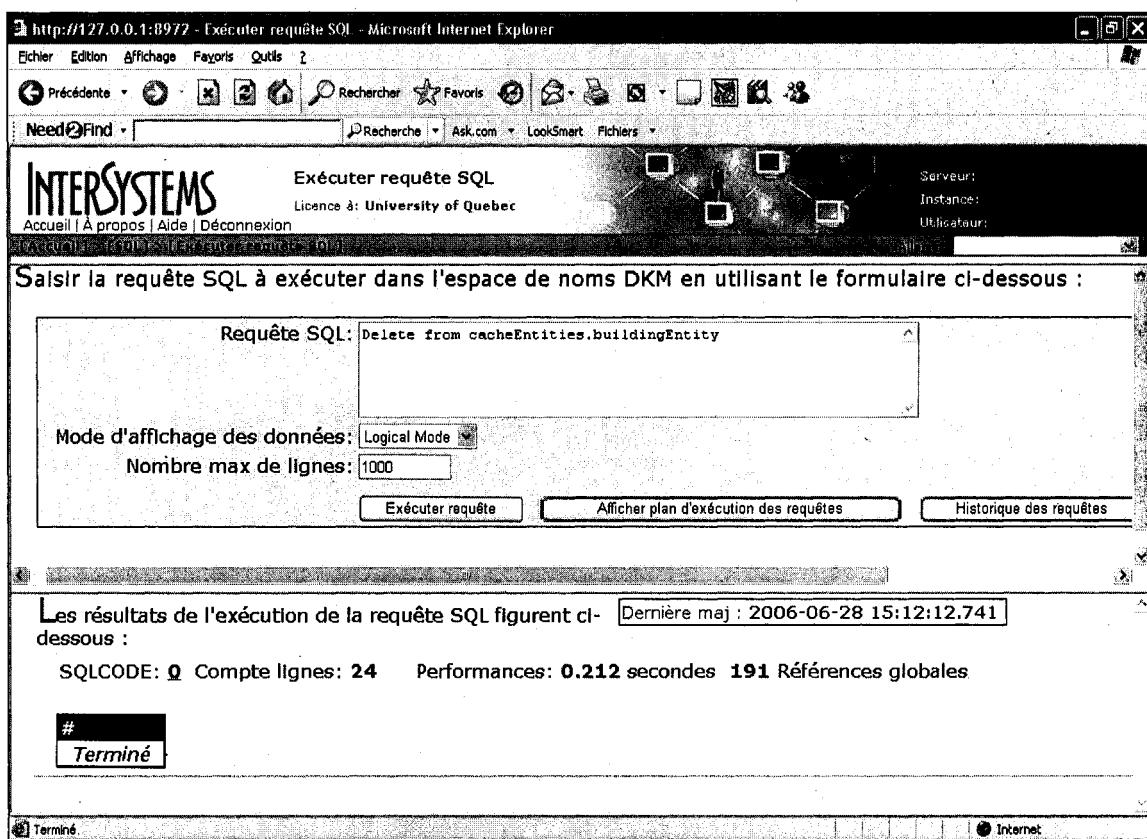


Figure 41 Fenêtre après la réinitialisation des entités de la base de données de « Caché »

Pour générer de nouvelles entités, étant donné que la communication avec StAr n'est pas complétée, il faut le faire à l'aide d'un *paquetage* indépendant à celui du DKM nommé « **PrototypeBuilder** ». C'est à l'intérieur de ce *paquetage*, à même la classe « **Main** », qu'il est possible de fixer les dimensions de la baie et l'intensité de la charge vive applicable sur l'élément de dalle. Il faut compiler ce *paquetage* avant celui du DKM afin de créer les entités avec lesquelles il sera possible d'interagir.

### 6.1.2. Fonctionnalités de l'interface

L'interface contient 3 fenêtres principales et deux modes tels que décrits dans le chapitre 4. Pour l'instant, le mode StAr présente les entités sous forme d'arbres. Chacune des relations entre les entités est générée à partir du « PrototypeBuilder ». Cette fenêtre sera appelée à être remplacée par celle de StAr, utilisant un modèle de bâtiment beaucoup plus convivial. Pour l'instant, il est nécessaire de cliquer sur un des nœuds appelés « Dalle ». Ensuite, afin de faire la conception de l'élément de dalle sélectionné, il faut passer au mode DKM, onglet présent au haut de l'interface près de celui de StAr.

Les nœuds applicables sont montrés en vert. L'applicabilité du nœud est déterminée en fonction des conditions des règles disponibles. Ainsi, si des conditions ne permettent pas l'utilisation d'une technologie, le nœud reste gris.

Pour prendre une décision, il faut cliquer deux fois avec le bouton gauche de la souris sur le nœud représentant la technologie sélectionnée. Une fois que la décision est enregistrée, le nœud devient rouge, l'historique de design ajoute la décision prise à la liste déjà initialisée et des attributs sont ajoutés ou modifiés en fonction de la décision prise.

Afin de retourner en arrière sur les décisions prises, il est nécessaire d'annuler chacune des décisions non voulues. Ainsi, il faut cliquer deux fois sur le dernier nœud appliqué (en rouge), et ainsi de suite jusqu'au niveau désiré.

Afin d'avoir une meilleure vue d'ensemble de l'arbre de décision, il est possible d'avoir un zoom différent en appuyant sur la touche « Ctrl » du clavier tout en tournant la roulette de la souris vers l'avant.

Il peut parfois être nécessaire de repositionner les nœuds de décisions afin de mieux visualiser les liens entre les nœuds. Il est possible de le faire en suivant les étapes suivantes :

1. Cliquer une fois sur le nœud à déplacer, il devient alors sélectionné (il est aussi possible de déplacer un groupe de nœuds en maintenant enfoncée la touche « Ctrl » en répétant l'étape 1);
2. Placer le curseur sur le (ou les) nœud(s) sélectionné(s), appuyez et maintenez enfoncé le bouton gauche de la souris;
3. Glisser la souris à l'endroit où le nœud, ou le groupe de nœuds, à la position voulue.

Certaines évaluations peuvent être consultées lors de la conception des éléments horizontaux. Au niveau d'abstraction des sous-systèmes horizontaux, il est possible de consulter une évaluation du prix au pied carré pour chacun des sous-systèmes en positionnant le curseur sur le nœud du sous-système en question. Après une seconde, une évaluation du prix est fournie dans une *infobulle*, basée sur les données de R.S. Means Company (2005), en fonction des portées de la baie et des charges surimposées<sup>13</sup>.

La profondeur de la structure estimée pour chacun des systèmes est fournie en plus de l'évaluation du prix. Deux valeurs sont fournies provenant de deux sources différentes soit la valeur obtenue de R.S. Means Company (2005) et les valeurs maximales et minimales obtenues à partir des tables disponibles dans Schodek (2004) et présentées en annexe 2.

Les suggestions sont fournies à l'aide de pages HTML qui sont consultables à partir de certains nœuds. Il est possible de consulter cette page en tout temps en cliquant sur le nœud avec le bouton droit de la souris. Cette page s'ouvre dans le fureteur par défaut (par exemple, Explorer ou Firefox) dans une fenêtre indépendante de celle du DKM et peut être conservée tout en prenant de nouvelles décisions ou même en passant en mode StAr.

---

<sup>13</sup> Charge vive et charges mortes additionnelles (systèmes mécaniques, revêtements de plancher, etc.)

### 6.1.3. Connaissances implémentées

Trois étapes préalables au choix du sous-système horizontal ont été implémentées soit :

1. Détermination de charges mortes additionnelles à celle des charges de la structure elle-même.
2. Le choix du matériau (Acier, Bois et Béton)
3. Le choix du cheminement des charges vers les appuis (Unidirectionnel et bidirectionnel)

Trois sous-systèmes ont été implémentés partiellement. Ces sous-systèmes ont une méthode leur permettant de savoir s'ils peuvent être applicables en fonction des portées de la baie. Une évaluation du coût au pied carré est disponible pour ces sous-systèmes. Ceux-ci sont les suivants :

1. Dalle plate de béton (sans abaque);
2. Dalle nervurée de béton;
3. Dalle de béton sur tablier métallique composite supporté par des poutres en W.

Deux autres sous-systèmes ont été implémentés complètement. Pour ces sous-systèmes, il est possible de déterminer tous les éléments de base qui le composent et obtenir de l'assistance pour chacune de ces étapes. À la fin, une évaluation plus précise que celle effectuée au niveau d'abstraction du sous-système, du prix au pied carré est fournie. Cette évaluation est basée sur les prix individuels de chacun des éléments de base trouvé dans R.S. Means Company (2006)

1. Dalle de béton sur tablier métallique, supporté par des poutrelles d'acier ajourées et poutres en W;
2. Dalle plate de béton avec abaque.

Des pages HTML servant à fournir des informations et conseils sur les décisions à prendre ont été implémentées. Les pages concernent principalement le choix du matériau principal de la structure et le choix du sous-système horizontal. Voici les titres des pages HTML qui ont été implémentées et intégrées au prototype :

1. STRUCTURES UNIDIRECTIONNELLES VERSUS BIDIRECTIONNELLES;
2. STRUCTURES D'ACIER;
3. STRUCTURES DE BÉTON;
4. STRUCTURES DE BOIS;
5. DALLE DE BÉTON NERVURÉE;
6. DALLE DE BÉTON SUR TABLIER MÉTALLIQUE SUPPORTÉ PAR DES POUTRELLES AJOURÉES D'ACIER ET POUTRE EN I;
7. DALLE DE BÉTON ET TABLIER MÉTALLIQUE COMPOSITE SUR POUTRES EN I.
8. DALLE PLATE DE BÉTON;
9. DALLE PLATE DE BÉTON AVEC ABAQUE;
10. PLATELAGE DE BOIS SUR POUTRELLES ET POUTRES DE BOIS;

Deux autres pages HTML ont été réalisées pour montrer des graphiques sur lesquels une évaluation a été faite. Cette évaluation est celle de la masse d'acier (kg) d'armature au mètre carré. Ainsi, l'utilisateur peut évaluer lui-même la valeur à partir du graphique s'il ne fait pas confiance à la valeur qui a été retenue par le prototype lui-même. Les titres de ces pages sont ceux-ci :

11. ACIER D'ARMATURE : BAIE CARRÉE;
12. ACIER D'ARMATURE : BAIE RECTANGULAIRE.

Chacune de ces douze pages HTML est disponible en annexe 8.

#### **6.2. Exemple d'une session de conception pour les sous-systèmes horizontaux**

Dans cette sous-section, un exemple d'une session de conception utilisant les systèmes implémentés jusqu'à maintenant est présenté. Il est important de voir le potentiel que peut avoir une telle approche et ne pas se limiter aux seules connaissances qui y sont implémentées.

### **6.2.1. Conditions initiales**

L'exemple se base encore ici sur le bâtiment abritant une caserne de pompier dont les esquisses ont été présentées au chapitre 4, page 79. Dans cet exemple, l'ingénieur tente de trouver une solution efficace pour un groupe de baies du 2e étage, là où se trouvent les bureaux et le hall. Préalablement aux étapes qui sont montrées dans l'exemple de cette session de conception, les charges vives du plancher ont été définies selon le CNB 1995 (Conseil national de recherches du Canada & Québec (Province). Régie du bâtiment du Québec, 2001). Ainsi, selon ce code, l'article 2.1.3.1.1)d) spécifie que le bâtiment est visé par la partie 9 du code. Ensuite, l'article 9.4.1.1.1) spécifie que les éléments structuraux doivent respecter la partie 4. Finalement, selon la partie 4, le tableau 4.1.6.3 spécifie la charge applicable pour les bureaux au dessus du premier étage soit une charge d'utilisation applicable de 2.4 kPa.

### **6.2.2. Première exploration avec des baies de 3000 × 4000 mm**

L'ingénieur définit des dimensions de baies en fonction de ce que l'architecte a laissé transparaître sur les plans de la caserne soit des baies de 3000 × 4000 mm. Une première exploration de solutions est faite à partir de ces dimensions.

La première étape consiste à déterminer les charges permanentes additionnelles qui affecteront les baies à concevoir. Ces charges excluent le poids propre de la structure elle-même. Dans la présente version, une charge par défaut est proposée à l'utilisateur. Il peut l'accepter ou la modifier. Il pourrait facilement être possible que chacune des charges, composant la charge permanente additionnelle totale, soit montrée séparément à l'utilisateur et qu'il puisse modifier leur valeur et ajouter des charges au besoin. Les charges montrées à l'utilisateur pourraient aussi être définies en fonction du type de bâtiment. Ce n'est toutefois pas le cas dans la présente version du prototype. Ainsi, pour la présente session, des charges additionnelles totalisant 1.45 kPa sont proposées par défaut et acceptées par la suite par l'utilisateur (Voir figure 42).

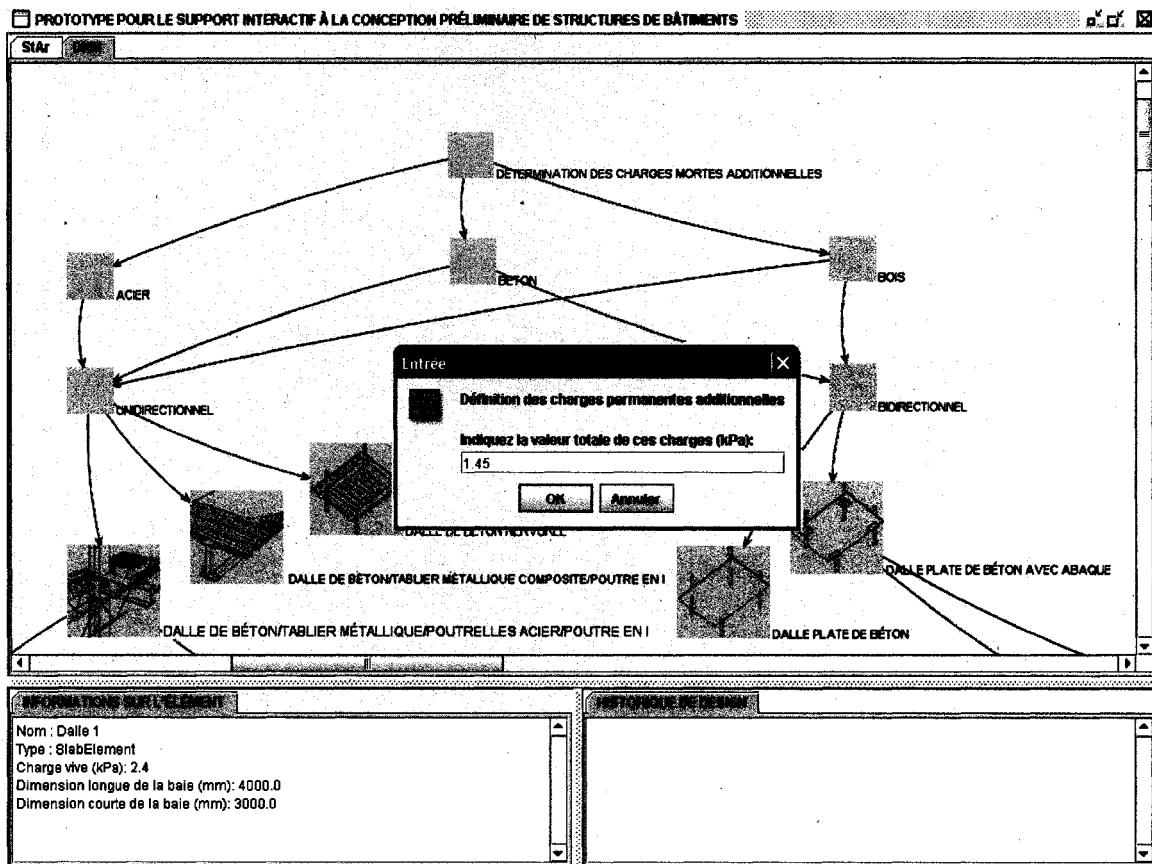


Figure 42 Session de conception : Détermination des charges permanentes additionnelles

L'utilisateur est appelé à choisir le matériau structural. En raison de la disponibilité des matériaux ou encore de la préférence du client ou de lui-même, l'ingénieur décide d'explorer seulement les sous-systèmes structuraux en béton et en acier. Il peut aussi consulter les pages HTML attachées aux nœuds décisionnels de chacun des matériaux pour consulter les informations disponibles au sujet de chacun des matériaux. Chacune de ces pages HTML est montrée en annexe 8 (figures 59 à 68). Dans un premier temps, l'ingénieur tente l'utilisation du béton. Par la suite, il choisit d'explorer les systèmes unidirectionnels ou bidirectionnels. Il peut décider de consulter la page HTML et conclure que les deux types de cheminement de charges sont possibles, car le rapport des portées est plus petit que 2. De plus, il est spécifié dans la page HTML que les deux sont économiques puisque la portée maximale de nos baies s'approche de 4.6 mètres (Voir annexe 8, figure 59). Toutefois, peu importe pour quel cheminement de

charges l'ingénieur décide de continuer l'exploration dans l'arbre de décision, aucun sous-système n'est possible puisque les sous-systèmes implémentés, qu'ils soient bidirectionnels ou unidirectionnels, sont économiques pour des portées excédant 6 mètres de portées (Voir figure 43).

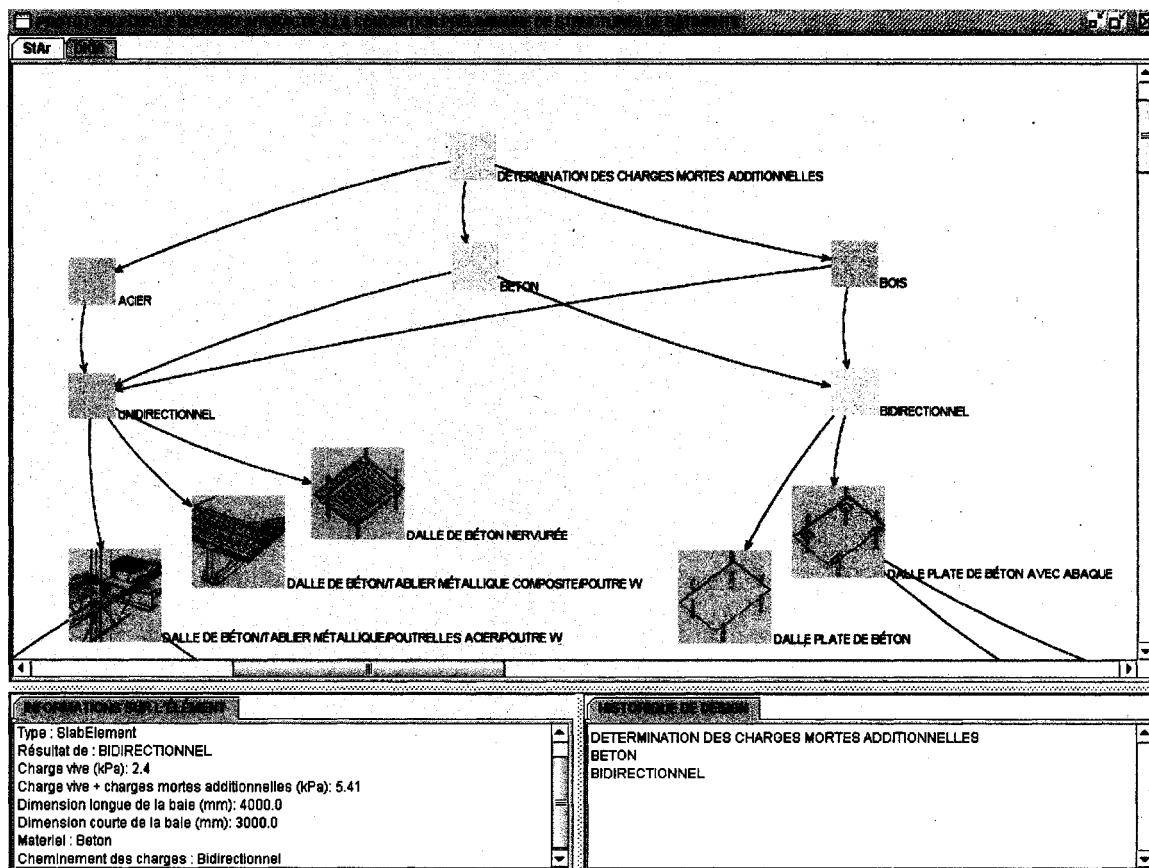


Figure 43 Session de conception : Aucun sous-système bidirectionnel (ou unidirectionnel) n'est possible pour une portée de 3 × 4 mètres

L'ingénieur décide donc de revenir en arrière sur sa décision d'utiliser du béton comme matériau structural. En double cliquant sur les décisions prises, il annule ses décisions prises et décide d'explorer les systèmes structuraux en acier.

Les sous-systèmes structuraux en acier utilisent rarement un cheminement bidirectionnel des charges, l'ingénieur choisit donc le nœud décisionnel

« Unidirectionnel » qui est le seul disponible. Il se retrouve devant les choix montrés en vert sur la figure 44.

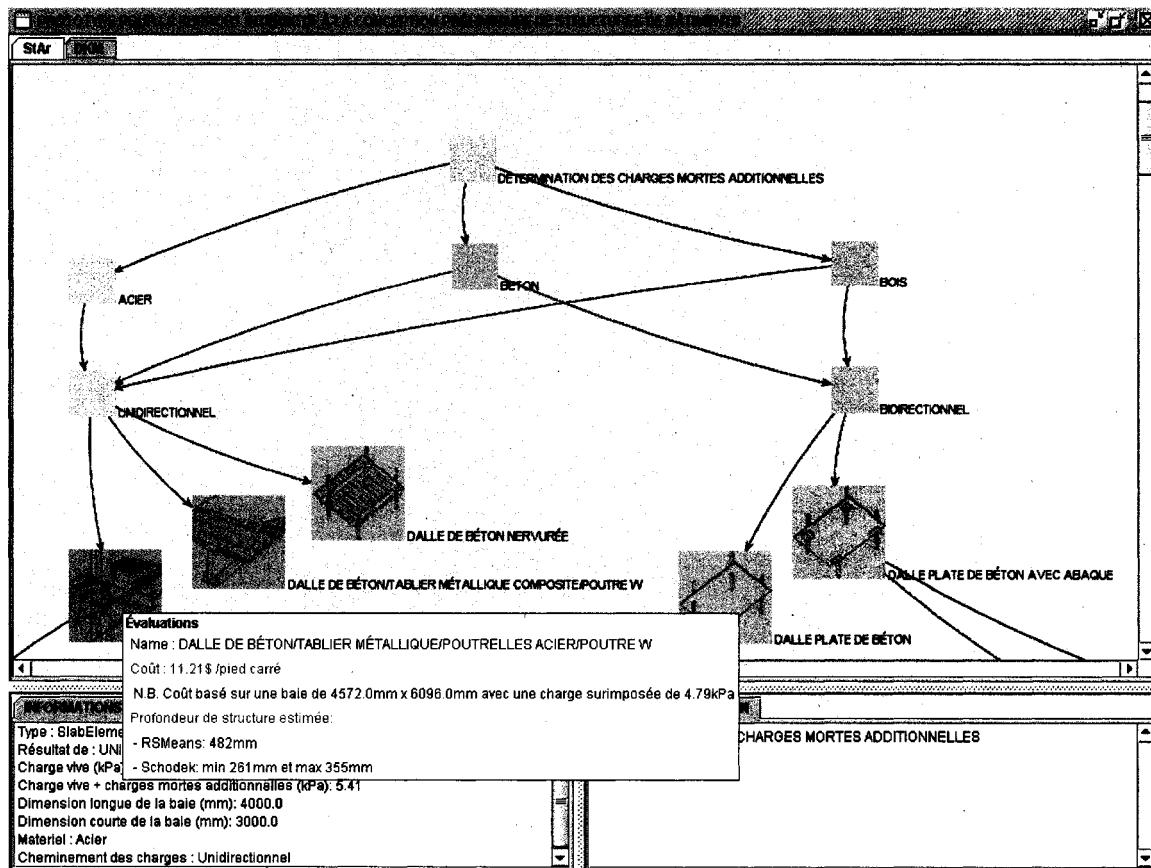


Figure 44 Session de conception : Deux choix possibles et évaluations dans une infobulle

Il est possible de consulter les évaluations du prix au pied carré en fonction des charges et des portées ainsi que l'évaluation de la profondeur estimée de la structure en passant le pointeur sur les nœuds décisionnels des sous-systèmes. Ainsi, un sous-système de dalle de béton sur tablier métallique supporté par des poutrelles d'acier ajourées et poutres en W fournit les évaluations montrées à la figure 44. De même, les évaluations fournies pour le sous-système de dalle de béton sur tablier métallique composite supporté par des poutres W sont montrées à la figure 45. Une différence importante peut être identifiée dans les profondeurs de structure estimées. Cette

différence est attribuable au fait que les sources de connaissances en conception préliminaire de structure ne sont pas toujours concordantes. Toutefois, une piste de solutions pouvant expliquer la différence peut être le fait que Schodek ne considère pas directement les charges puisque l'évaluation n'est basée que sur les portées de la baie, contrairement à RSMeans. Il est aussi important de noter que les évaluations fournies donnent les conditions pour lesquelles le prix a été fourni puisque les connaissances ne permettent pas d'avoir un prix pour toutes les combinaisons possibles de portées et de charges.

Évaluations	
Name :	DALLE DE BÉTON/TABLIER MÉTALLIQUE COMPOSITE/POUTRE W
Coût :	16.6\$ /pied carré
	N.B. Coût basé sur une baie de 4572.0mm x 6096.0mm avec une charge surimposée de 5.98kPa
Profondeur de structure estimée:	
RSMeans:	Dalle 584mm
Schodek:	min 222mm et max 355mm

Figure 45 Session de conception : Évaluations pour le second sous-système (prix et profondeur du sous-système)

En fonction de ces deux évaluations, l'ingénieur peut sélectionner une première solution plus économique avec une profondeur de structure plus importante et/ou une deuxième beaucoup plus coûteuse, mais ayant une profondeur de structure relativement plus petite. L'ingénieur décide ici de développer le système le moins coûteux puisque c'est souvent le prix qui est un facteur déterminant du choix du sous-système.

Ainsi, afin de détailler davantage la solution, une série de décisions peuvent être prises concernant notamment le type de béton à utiliser : densité normale ou faible. Des conseils simples peuvent être consultés, sous forme d'*infobulle*, en passant le curseur sur le nœud décisionnel tel que celui rattaché au nœud décisionnel « béton de densité faible ».

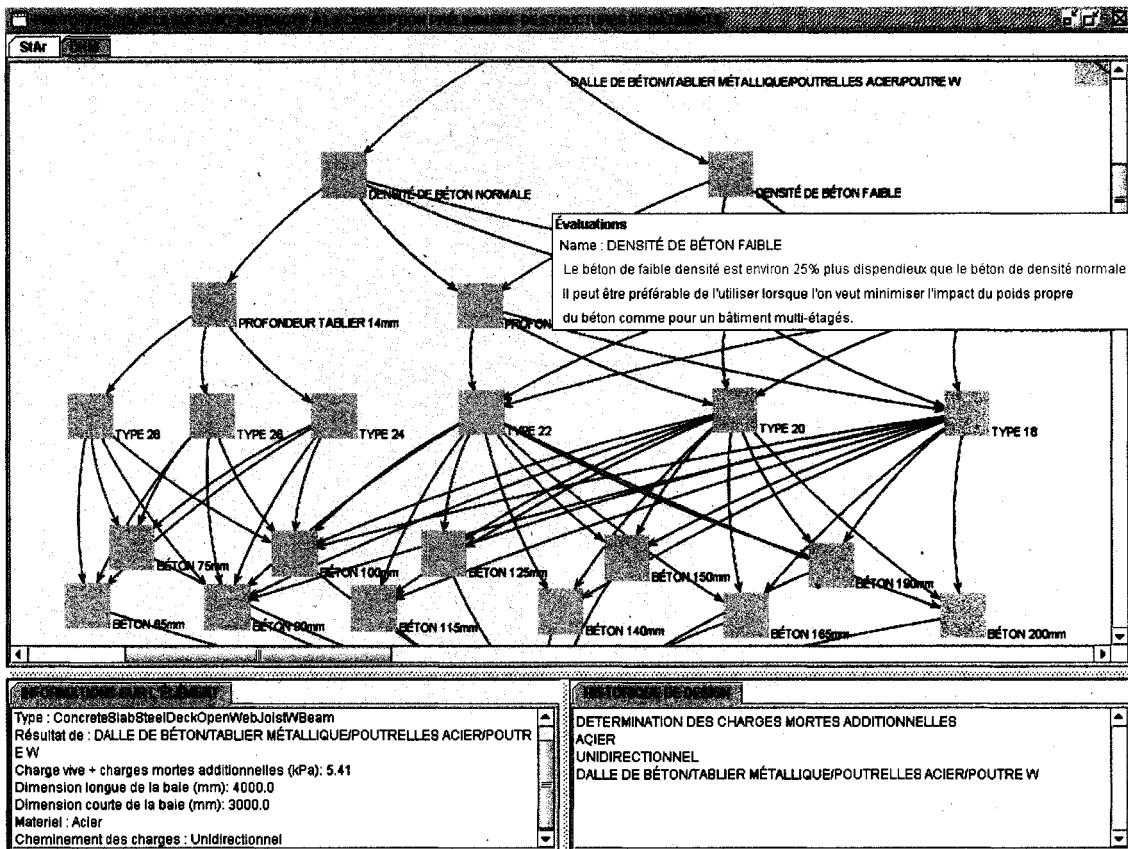


Figure 46 Session de conception : Conseil fourni à l'ingénieur à l'aide d'une *infobulle* pour le nœud décisionnel « Densité de béton faible »

L'ingénieur décide de tenter une solution qui utilise le béton de densité normale puisqu'il s'agit d'un bâtiment de faible hauteur, le poids propre ne devrait pas avoir une grande incidence. Toutes les profondeurs de tablier métallique s'offrent maintenant à lui. Comme première solution, il choisit de sélectionner un tablier métallique de 38 mm de profondeur, ce qui est le standard dans l'industrie. Ce type de connaissance n'est actuellement pas inclus dans la base de connaissance faute d'expérience pratique de l'auteur. Toutefois, ces connaissances pourraient être facilement ajoutées. Les solutions standards pourraient être montrées à l'utilisateur avec un chemin de décision mis en évidence. Vient ensuite le choix du type de tablier (épaisseur du tablier). Le type 22 correspond aussi au standard de l'industrie.

S'offrent ensuite à lui des épaisseurs de dalle qui respectent les choix faits précédemment soit la profondeur et le type du tablier (Voir figure 47). L'épaisseur de béton standard étant de 100 mm, il la sélectionne.

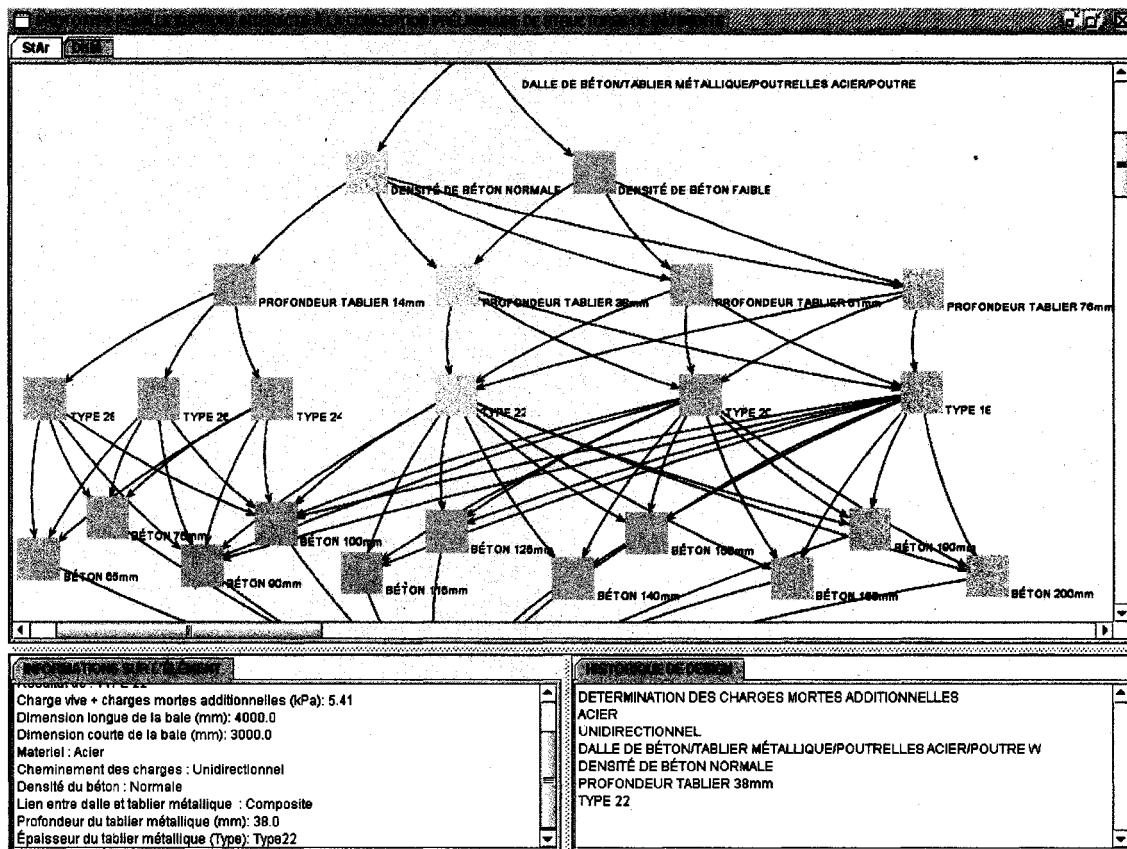


Figure 47 Session de conception : Choix d'épaisseur de dalle de béton en fonction des décisions déjà prise pour le tablier métallique

Vient ensuite le choix du sens des poutrelles. Un conseil peut être fourni à l'ingénieur directement dans la fenêtre de dialogue lui demandant d'effectuer un choix entre les deux portées de la baie soit: 3000 mm ou 4000 mm. Le conseil stipule qu'habituellement, il est plus économique de disposer les poutrelles sur le sens de la longue portée. Suivant le conseil fourni, l'ingénieur décide d'utiliser des portées de poutrelles de 4000 mm (Voir figure 48).

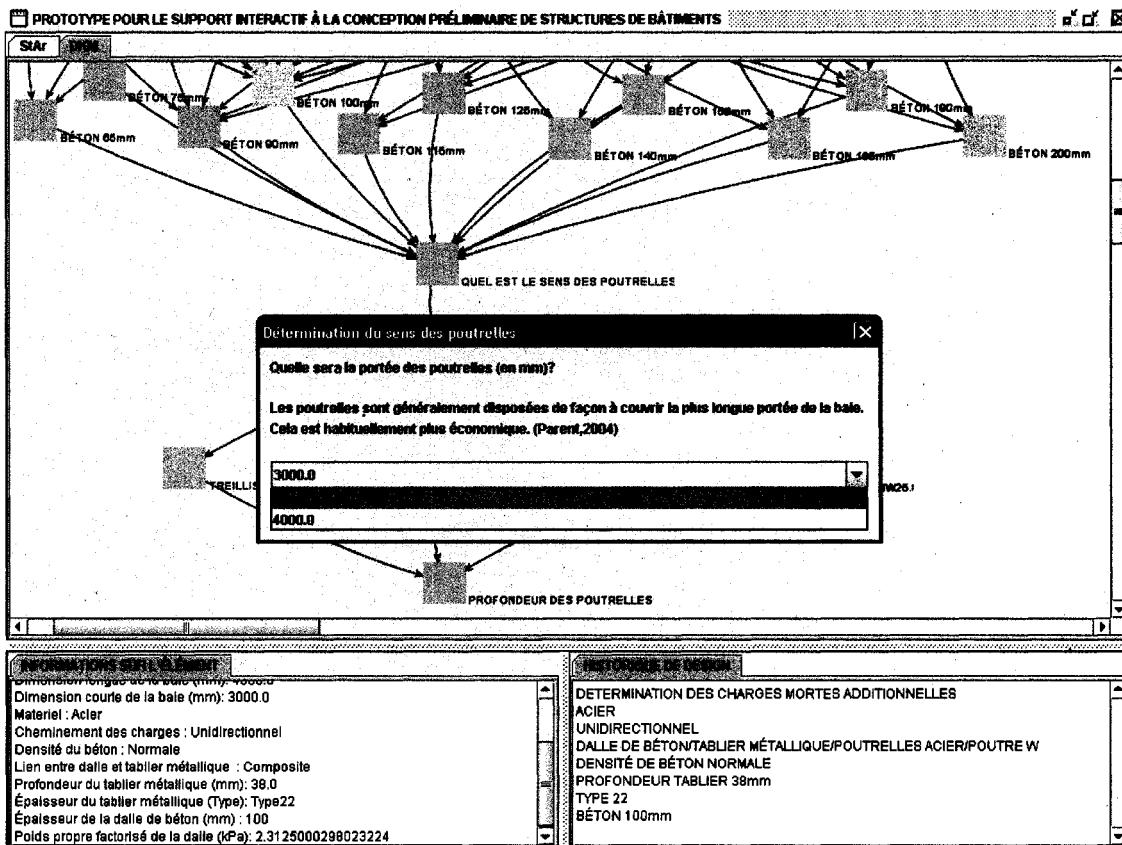


Figure 48 Session de conception : Choix du sens de la portée des poutrelles

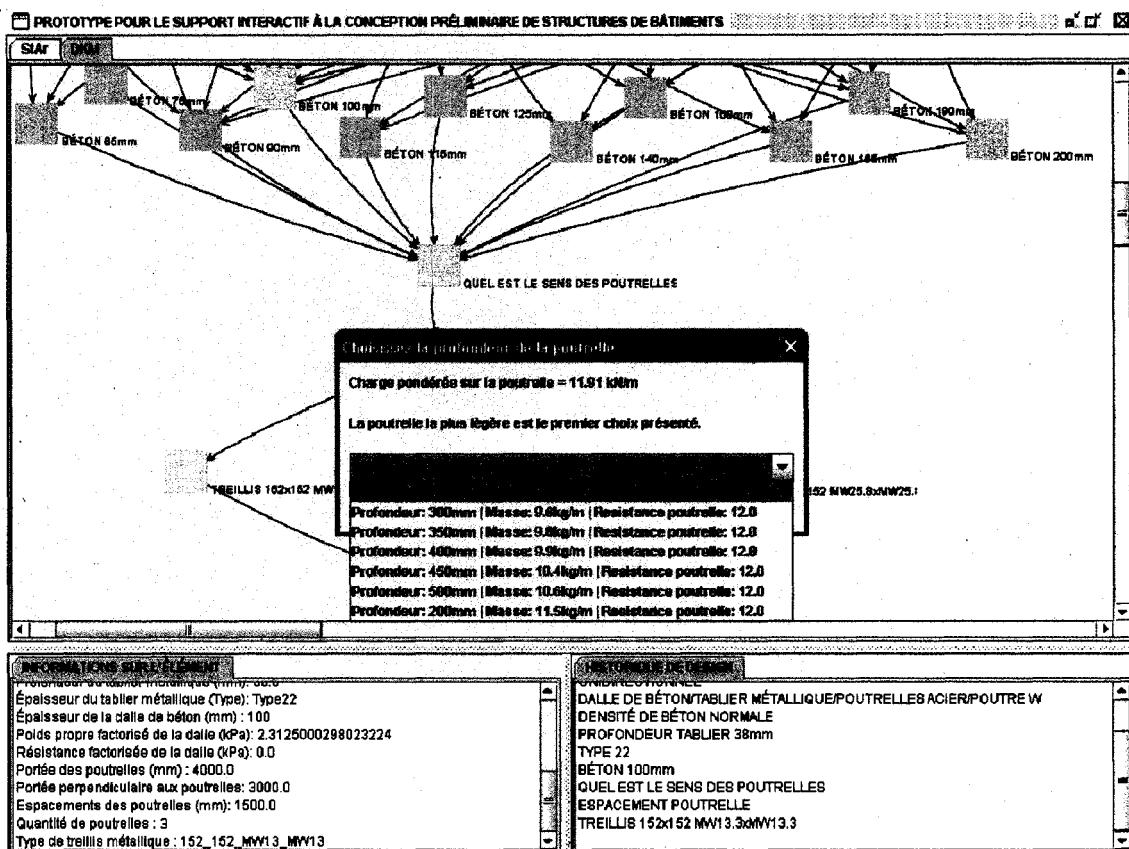
Le nœud décisionnel suivant propose les espacements de poutrelles disponibles en fonction de l'épaisseur de la dalle, de la charge (en kPa) sur la dalle, de la dimension de la baie<sup>14</sup> et de la charge maximale pouvant être reportée sur une poutrelle (22,5 kN/m). Ainsi, l'utilisateur a, pour le cas présent, un seul choix d'espacement. Ce choix est offert en fonction des possibilités réelles qu'il a. Ensuite, le choix du treillis vient déterminer la résistance finale de la dalle. Les types de treillis possibles à utiliser sont

<sup>14</sup> Une baie doit être divisée en un nombre entier d'espaces qui doivent être près d'une valeur pour laquelle la résistance de la dalle est fournie (Voir annexe 2, Tableau XVIII). Ainsi, pour le cas présent, une valeur de 800 mm n'est pas possible puisque  $3000 / 800 = 3.75$ , donc 4 espaces. Mais  $3000 / 4$  espaces = 750. C'est donc pour cette raison que 750 mm est possible et non 800 mm.

montrés en vert. Puisque le treillis utilisant le moins d'acier est disponible, il est plus économique de l'utiliser.

Finalement, arrive le choix de la profondeur des poutrelles. Préalablement au choix d'une profondeur de poutrelle, une requête SQL, effectuée dans un tableau d'une base de données donnant le poids propre approximatif des poutrelles en fonction du ratio de la baie et de la portée à couvrir, permet de proposer une valeur à utiliser à l'ingénieur. Il peut accepter cette valeur ou la modifier. Ici, un poids propre de 0,22 kPa est proposé à l'utilisateur, ce qu'il accepte. La charge ainsi reportée sur la poutrelle, en fonction de toutes les charges du sous-système structural et de l'espacement s'établit à 11,91 kN/m. Des poutrelles d'une portée de 4 mètres et pouvant résister à cette charge sont proposées à l'utilisateur en ordre croissant de masse (kg) par mètre. Le choix le plus économique se retrouve donc en tête de liste (Voir figure 49).

Une première solution est finalisée. Une nouvelle évaluation du prix au pied/carré est calculée pour cette solution. Toutefois, les poutres en W sont définies dans une étape subséquente, étant vues comme un support à l'élément de dalle à concevoir, car elles font partie d'un autre type d'entités dans StAr. L'évaluation donnée calcule en détail le coût pour chacun des éléments choisis, mais ne peut fournir qu'une estimation du coût pour les poutres en W. L'estimation est réalisée en fonction de la profondeur estimée pour ce type de poutre donnée par Schodek. Cette évaluation ne considère pas les charges en jeu, seulement la portée. Un prix approximatif est ensuite associé pour une poutre de cette profondeur. Une évaluation plus juste pourrait être disponible une fois que ces poutres sont déterminées. Le prix excluant celui des poutres en W est de 6,39\$ / pied carré et le prix approximatif des poutres en W est évalué à 4,71\$ / pied carré pour un prix approximatif total égal à 11,10\$ / pied carré.



**Figure 49 Session de conception : Choix de la profondeur des poutrelles à utiliser**

L'ingénieur décide d'explorer de nouvelles solutions avec des dimensions de baies plus importantes, conseil qu'il aurait reçu au moyen d'une page HTML lorsqu'il fixait les dimensions des baies à une étape antérieure. Cette page HTML stipule qu'une structure d'acier constituée de poutrelles est optimale pour des portées de  $9 \times 12$  mètres (Voir exemple à la figure 23, page 87). Ainsi, voici une nouvelle solution de conception:

### **6.2.3. Nouvelle solution avec une baie de 8000 × 9000 mm**

L'ingénieur détermine de nouvelles dimensions de baies soit une baie de 8 par 9 mètres, le choix des dimensions étant limité car le bâtiment est très petit. Tous les sous-systèmes sont possibles à utiliser mis à part le sous-système de dalle plate de béton qui n'est pas applicable, car l'intervalle des portées économiques s'étend de 4572 mm à 7620 mm ce qui est donc inférieur à 8000 mm (Voir figures 50 et 51).

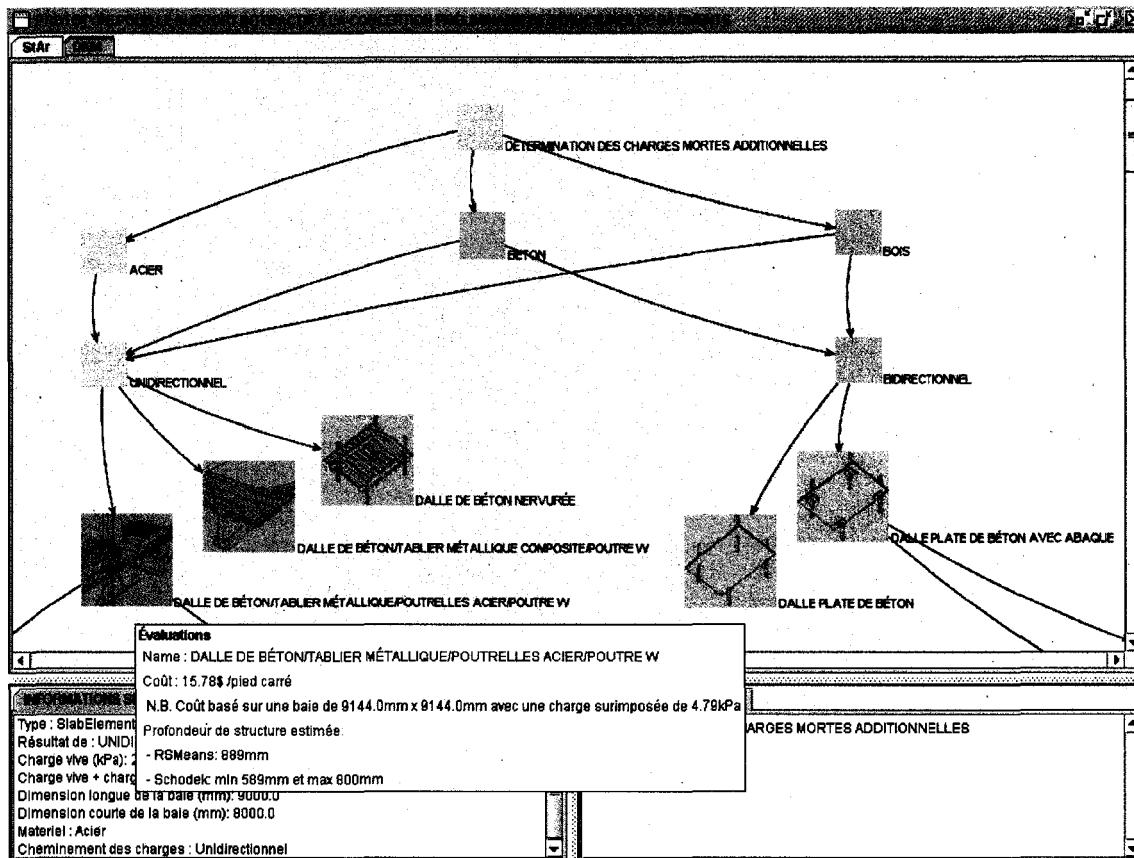


Figure 50 Session de conception : Évaluations pour une baie de  $8000 \times 9000$  mm

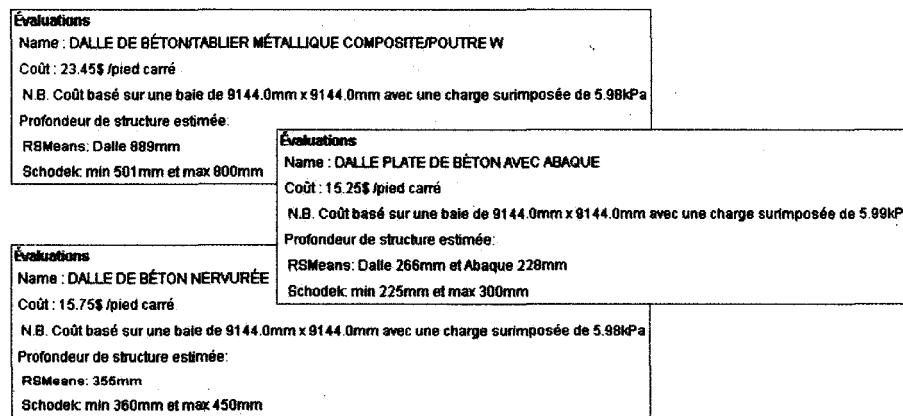


Figure 51 Session de conception : Évaluations des trois autres systèmes applicables

Toutefois, après avoir exploré ces solutions seulement au niveau d'abstraction des sous-systèmes, l'ingénieur se rend vite compte que le coût au pied carré est plus élevé

que précédemment. Toutefois, les prix montrés à ce niveau de détails ne peuvent servir que d'indication générale pour savoir quel système pourrait être préférable de développer. Ainsi l'ingénieur peut se rendre compte que les sous-systèmes de poutre composite (23,45\$ / pied carré) est beaucoup plus cher que celui de dalle de béton sur tablier métallique supporté par des poutrelles (15,78\$ / pied carré).

Il pourrait décider de détailler davantage une seconde solution avec le même sous-système que pour la baie de 3 mètres par 4 mètres. Ainsi, en réalisant encore des choix standards, densité de béton normale, un tablier métallique de 38 mm, type 22 et une dalle de béton de 100 mm d'épaisseur, différents choix d'espacements de poutrelles pourraient être proposés à l'utilisateur (Voir figure 52).

L'ingénieur pourrait choisir l'espacement le plus grand (2700 mm c/c), ce qui facilite habituellement le positionnement des systèmes mécaniques. Finalement, les poutrelles choisies pourraient être d'une profondeur de 750 mm et l'évaluation finale du coût s'élèverait à 11,11\$ ce qui est très acceptable.

#### **6.2.4. Solution adoptée**

La deuxième option explorée, soit celle utilisant une baie de 8000 × 9000 mm, est préférée car les coûts de construction de plancher, bien que préliminaires, sont similaires à l'option 1 correspondant à la baie de 3000 × 4000. De plus, d'autres avantages peuvent être notés soit l'absence de colonnes dans le garage, ce qui augmentera la flexibilité de l'espace, une diminution des coûts de matériaux et de construction pour les colonnes et fondations et une réduction du nombre d'assemblages requis, ce qui diminue aussi les coûts de construction.

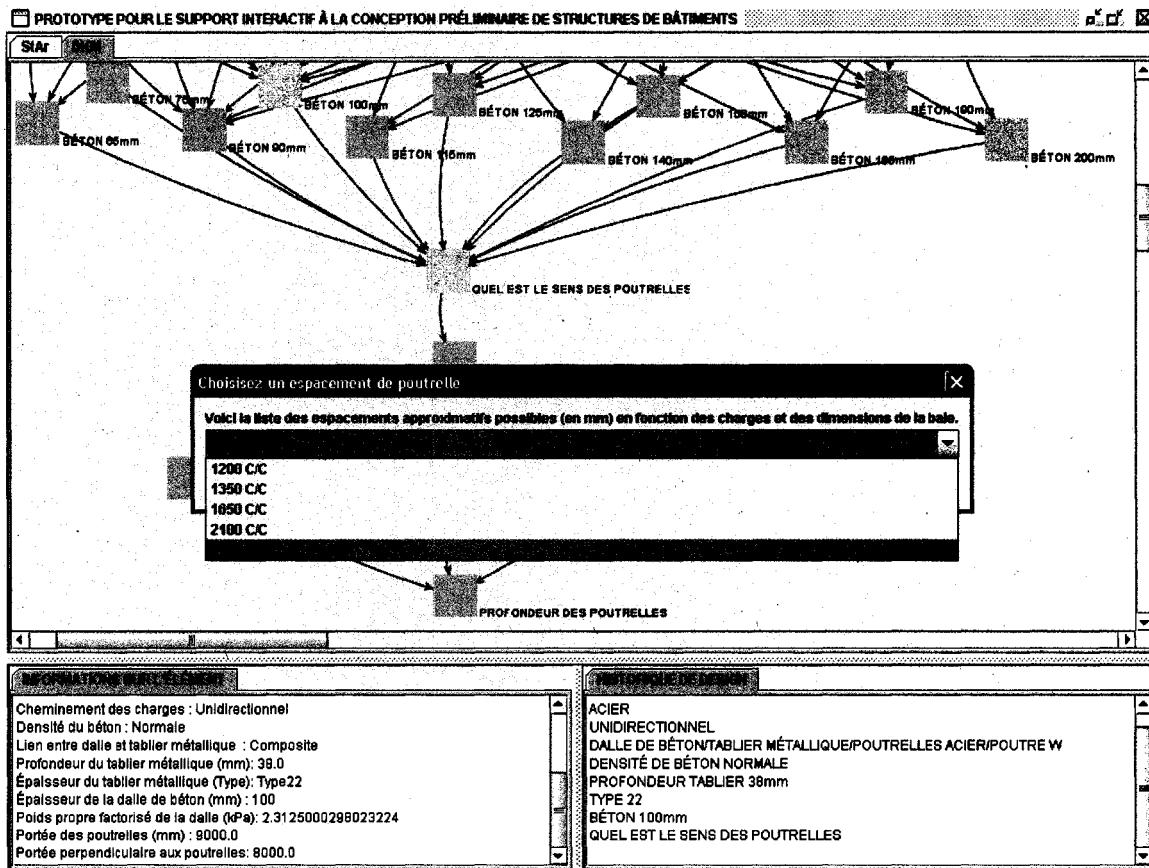


Figure 52 Session de conception : Choix de l'espacement des poutrelles

La solution finale adoptée par l'ingénieur est donc d'aller de l'avant avec une solution d'une dalle de béton de 100 mm d'épaisseur dont la densité est normale, avec un tablier métallique d'une profondeur de 38 mm et de type 22. Ensuite, les 4 poutrelles, également espacées, auraient une portée de 9 mètres et une profondeur de 750 mm.

## **CHAPITRE 7**

### **VALIDATION DU PROTOTYPE**

Une validation du prototype permet d'évaluer l'approche proposée et d'orienter les prochaines itérations de son développement qui émergeront de recherches futures. Ainsi, il est possible de savoir si l'approche utilisée pourrait être profitable pour l'industrie et quels sont les éléments à améliorer et/ou modifier.

Ce chapitre présente la validation du prototype de gestion des connaissances. La validation a été faite en deux temps soit premièrement avec d'autres chercheurs et deuxièmement avec des ingénieurs praticiens en conception préliminaire de structures de bâtiment.

#### **7.1. Validation auprès de chercheurs**

Une présentation du prototype a été faite au cours de la conférence internationale « Building on IT, Joint International Conference on Computing and Decision Making in Civil and Building Engineering » qui eut lieu à Montréal du 14 au 16 juin 2006. La présentation, intitulée « Aquisition and modeling of conceptual structural design knowledge » a suscité beaucoup d'intérêt parmi une audience d'une trentaine de chercheurs (Parent et coll., 2006). Plusieurs questions et commentaires portent à croire que le prototype présenté aurait un potentiel intéressant. Notamment, il a été dit que l'approche semblait prometteuse, car plusieurs possibilités pouvaient être envisagées. Un autre commentaire d'un ingénieur débutant dans la profession de concepteur a dit qu'il apprécierait grandement avoir un tel système pour l'aider dans ses conceptions préliminaires.

Une des possibilités qui ont été soulevées est l'utilisation du prototype à partir d'Internet. Le prototype pourrait ainsi être consultable par les bureaux locaux. L'utilisation du Java pourrait effectivement permettre dans le futur l'utilisation du prototype sur Internet et créer une banque de connaissances centralisée qui profiterait aux bureaux locaux.

Une question a porté sur l'extensibilité du prototype afin de permettre une personnalisation du prototype en fonction des habitudes locales, des données géographiques, etc. La personnalisation pourrait être faite en rendant l'ajout des connaissances facile pour des ingénieurs qui ne connaissent pas le langage de programmation Java. Si les connaissances peuvent être modifiées et entrées par les ingénieurs utilisateurs, le prototype serait facile à personnaliser. Cette façon de faire est envisageable et souhaitable, mais n'est pas possible pour le moment il est encore nécessaire de connaître le langage de programmation pour implémenter de nouvelles connaissances.

Il a été demandé s'il serait possible d'explorer les sous-systèmes horizontaux en utilisant des valeurs par défaut pour les dimensions des baies. Toutefois, le but du prototype n'est pas de prendre des décisions à la place de l'ingénieur, mais bien de l'assister. Ainsi, il est prévu de proposer à l'utilisateur des dimensions de baies optimales en fonction de celles qui sont habituellement utilisées dans un bâtiment semblable et du matériau structural à utiliser. De cette façon, l'ingénieur avisé peut tenter des dimensions de baies sur le modèle de bâtiment dans StAr qui sont près des valeurs optimales.

Finalement, comme pour la majorité des systèmes basés sur les heuristiques, un chercheur a souligné que le prototype n'aide pas à la création de structures innovantes. Il est vrai que ce genre de système ne permet pas d'innover. Toutefois, le type de structure visé par le prototype est davantage pour la conception de bâtiments de faible et moyenne hauteur régulièrement rencontrés dans la pratique.

## **7.2. Validation avec des professionnels praticiens**

Les validations effectuées avec deux professionnels praticiens ont consisté en une présentation d'environ 30 minutes suivie d'une discussion d'une trentaine de minutes. La présentation contenait une première partie expliquant le contexte et l'implémentation du prototype. Ensuite, une démonstration en direct du prototype a été faite par le présentateur consistant en la session de conception présentée au chapitre 6.

### 7.2.1. Hélène Brisebois, SDKLBB

Selon madame Brisebois, ingénieure ayant une vingtaine d'années d'expérience et associée au sein de la firme Saïa Deslauriers Kadanoff Leconte Brisebois Blais, l'approche de modélisation selon *l'approche descendante* représente réellement la façon de travailler de l'ingénieur praticien. Le lien indirect du présent projet de recherche avec l'interpréteur d'esquisses architecturales permettant à l'ingénieur d'obtenir un modèle 3D à partir de celles-ci a été vu comme pouvant être très bénéfique à la communication des informations tôt dans le processus de conception.

Toutefois, bien des discussions s'effectuent de façon plus générale et peuvent parfois ne se baser que sur une esquisse imprécise, une utilisation prévue du bâtiment, etc.. C'est donc dire que le modèle 3D du bâtiment est rarement disponible au début des discussions. Il faudrait donc que le DKM puisse fonctionner aussi, pour certaines fonctionnalités, sans le modèle de bâtiment 3D, ce qui pourrait être possible.

Il est difficile pour quelqu'un qui a en tête la productivité d'une entreprise de voir le potentiel d'une recherche qui en est encore à ses débuts. Beaucoup de commentaires ont souvent porté sur le fait que le prototype n'est pas complet. En effet, il a été soulevé que les fondations vont influencer le choix de la structure, que beaucoup d'alternatives seraient à ajouter et que l'outil n'est pas utile tel qu'il est présentement puisqu'il n'y a pas assez de connaissances. Les standards de l'industrie devraient aussi être inclus dans les connaissances.

Présentement, pour un projet de 30 millions, elle affirme qu'une modélisation structurale 3D peut être faite en deux jours par des analyses avec un logiciel d'analyse structurale habituel. Après une semaine, avec des discussions avec l'architecte et diverses modélisations, il est possible de connaître l'épaisseur des planchers, des murs, etc. Donc, la conception préliminaire est faite par essai erreur avec un logiciel d'analyse détaillée. Le temps de conception est vu comme extrêmement court étant réalisée de cette façon et il est donc difficile de croire qu'il pourrait être plus profitable de procéder différemment.

Le prototype envisagé ne permet pas de faire la conception de structures innovantes. Bien que beaucoup de bâtiments soient standards, il y a aussi une bonne quantité de projets dont l'architecture est plus recherchée. En effet, le prototype envisagé n'est pas destiné à ce dernier type de bâtiment.

La conception d'une baie peut être influencée par les conditions des autres baies (portées, charges, etc.) adjacentes notamment pour les systèmes de béton. Les règles du pouce considèrent implicitement l'influence des autres baies, car elles ont été formulées en fonction des situations habituelles dans lesquelles le sous-système structural est utilisé.

Les évaluations du prix au pied carré semblent trop précises pour le niveau de détail de la conception. Une évaluation de la quantité de matériau serait préférable. De cette façon, l'ingénieur peut calculer lui-même le coût équivalent en fonction des variations de prix du marché (temps de l'année, quantité commandée, contexte économique, etc.).

La séquence des décisions présentées semblait ne pas être celle qu'elle aurait préférée notamment en ce qui concerne le choix de la profondeur du tablier et de l'espacement des poutrelles. Ce choix devrait se faire en parallèle selon elle. Toutefois, il y a bel et bien une décision qui doit être prise avant l'une ou l'autre puisque ce sont deux variables qui dépendent l'une de l'autre.

La personnalisation du DKM est envisagée dans le futur afin que les ingénieurs puissent entrer eux-mêmes des connaissances ou en modifier le contenu. Toutefois, elle a questionné la rentabilité d'une telle opération, car elle considère que le temps nécessaire à l'implémentation de nouvelles connaissances serait probablement plus important que le temps qui pourrait être sauvé par l'utilisation des nouvelles connaissances implémentées.

L'utilisation de règles du pouce peut être questionnable dans le contexte informatique d'aujourd'hui, selon madame Brisebois. En effet, les règles du pouce étaient utilisées

auparavant (il y a une dizaine d'années) à l'aide de divers tableaux qui pouvaient accélérer la conception. Aujourd'hui, madame Brisebois croit que les logiciels effectuent suffisamment rapidement diverses analyses pour réduire le recours aux règles du pouce. Toutefois, selon l'équipe de recherche, les règles du pouce restent très utiles lors de rencontres avec l'architecte, où l'ingénieur n'a pas nécessairement le temps de faire une modélisation 3D pendant une réunion. De plus, l'outil proposé permet de naviguer plus rapidement à travers les règles du pouce, par rapport à la consultation de celles-ci, lorsque dispersées à travers divers documents papiers.

Finalement, elle croit qu'il pourrait être difficile pour un logiciel informatique de prendre en compte tous les éléments avec lesquels l'ingénieur compose pour faire un choix de conception préliminaire. Elle sait déjà, lorsqu'un projet débute, quelles sont les solutions à explorer. Un tel système pourrait peut-être finir par être bénéfique, mais énormément de travail reste à faire.

### **7.2.2. Sylvie Boulanger, ICCA-Québec**

Madame Boulanger, directrice générale de l'Institut de la construction en acier du Québec, a commencé avec une réflexion sur les raisons qui font que les logiciels ne couvrent actuellement pas la conception préliminaire. Selon elle, il est difficile de gérer l'imprécision présente au début de la conception versus la précision nécessaire pour un modèle 3D habituel. De plus, les ingénieurs ne croient pas vraiment aux possibilités que de tels systèmes peuvent apporter.

Selon elle, une façon d'aborder le marché avec un tel système d'assistance à la conception devrait principalement viser les ingénieurs qui commencent à faire de la conception préliminaire. Une autre avenue à explorer pourrait être l'utilisation du prototype à des fins d'apprentissages. Bien sûr, plusieurs autres fonctionnalités seraient à prévoir pour ces fins.

La personnalisation est une fonction importante et intéressante selon elle. Par exemple, si l'ingénieur décide que les portées économiques d'un sous-système ne sont pas celles qu'il désire, il devrait pouvoir les modifier.

Suite à la réalisation de plusieurs solutions de conception, il serait intéressant de pouvoir comparer les solutions entre elles de façon à dégager celle qui est la meilleure. L'enregistrement de différentes solutions de conception n'est actuellement pas possible, mais il avait été prévu que cela puisse se faire puisqu'il est évidemment préférable de pouvoir consulter toutes les solutions explorées pour choisir la plus appropriée.

Une connaissance qui devrait être ajoutée lors du choix du tablier métallique est la possibilité d'utiliser un tablier métallique plus profond, donc plus cher, mais qui permettrait probablement d'économiser sur la protection incendie.

Madame Boulanger a aussi émis des réserves quant à l'utilisation des prix au pied carré. Il faut tout autant considérer les disponibilités du marché et la facilité de l'assemblage. Ces facteurs sont tout aussi importants que le coût de revient au pied carré.

Les raisons pour lesquelles un nœud n'est pas appliqué devraient pouvoir être consultables par l'ingénieur. Il n'est pas toujours évident de savoir ce pour quoi le nœud n'est pas applicable. En effet l'auteur constate que cette fonctionnalité serait appréciée lorsque l'on recherche une solution optimale à travers l'arbre de décision.

Finalement, le point fort d'un tel système est qu'il permet l'exploration rapide de solutions correctes, pouvant être construites et économiques.

### **7.3. Retour sur les évaluations**

Les chercheurs présents lors de la présentation effectuée se sont montrés très intéressés au potentiel de l'approche qui leur était proposée. Les ingénieurs praticiens, quant à eux, voient difficilement le potentiel de l'assistance par l'informatique lors des choix conceptuels, tel que souligné par madame Boulanger. L'évaluation reçue par madame Brisebois est principalement orientée vers la productivité d'un tel système. Il est difficile de parler de productivité lorsque l'on a sous les yeux un prototype qui sert de preuve de concept.

Tandis que les chercheurs ont proposé diverses avenues offertes pour les recherches futures, les ingénieurs praticiens ont plutôt souligné des points précis qui leur semblaient non appropriés dans le prototype qui leur était présenté. Ces commentaires pourront être considérés pour la suite du développement du prototype, mais concernent peu l'approche globale utilisée.

Finalement, il reste énormément de travail à faire afin de pouvoir assister adéquatement l'ingénieur lors de la conception préliminaire. Toutefois, nous croyons, tout comme les autres chercheurs présents pour l'évaluation, que l'approche est prometteuse. Les ingénieurs praticiens ont tout à fait raison de croire qu'un tel outil n'est pas rentable au niveau de développement actuel. Toutefois, bien qu'ils voient difficilement comment ces outils pourraient les assister en apportant une plus-value, deux points sont importants à considérer. Premièrement, beaucoup de temps est nécessaire pour transmettre les connaissances d'un ingénieur expert à un ingénieur junior avant qu'il puisse faire de la conception préliminaire. Il est nécessaire de répéter les connaissances à chaque ingénieur qui commence à faire de la conception préliminaire. Peut-être qu'un outil d'assistance à la conception préliminaire pourrait accélérer le transfert des connaissances. Deuxièmement, il faut se rappeler que l'industrie a été réticente lorsque le dessin assisté par ordinateur a fait son apparition. Peu de gens ont pensé qu'un tel outil pourrait éventuellement faciliter et améliorer leur travail. Pourtant, aujourd'hui l'industrie ne jure que par le dessin assisté par ordinateur. Peut-être en sera-t-il ainsi avec les systèmes informatiques d'assistance à la conception préliminaire de structures.

## CHAPITRE 8

### SOMMAIRE, CONTRIBUTIONS ET RECOMMANDATIONS

La conclusion de ce mémoire est organisée en trois sections. Dans la première, un résumé des points importants du mémoire est présenté. Ensuite, les contributions apportées par les présents travaux de recherche sont soulignées. Finalement, les recommandations pour le développement futur de la recherche pouvant faire suite à ce travail sont élaborées.

#### 8.1. Sommaire

Suite à la revue de littérature effectuée, la phase de la conception préliminaire consistant à choisir les systèmes structuraux, leurs emplacements et leur dimensionnement préliminaire a été vue comme étant encore faiblement assistée par ordinateur. Malgré toutes ces années de recherche tentant d'assister la conception préliminaire de structures de bâtiments, les logiciels commerciaux disponibles aux ingénieurs praticiens n'assistent que faiblement l'ingénieur à travers les premières prises de décisions :

- Aucun conseil n'est fourni à l'utilisateur lors de la prise de décision concernant la conception préliminaire;
- L'*approche ascendante*, modélisation consistant à créer les entités du bâtiment une par une jusqu'à ce que le bâtiment complet soit modélisé, est utilisée au lieu de l'*approche descendante*. Cette dernière, consiste à modéliser d'abord le volume du bâtiment en le définissant ensuite par des volumes structuraux indépendants qui sont eux-mêmes divisés en zones structurales qui contiennent des systèmes structuraux horizontaux et verticaux, etc. La dernière approche a été vue comme étant plus naturelle pour l'ingénieur.
- L'interaction entre l'architecte et l'ingénieur n'est pas réellement assistée. En effet, aucun logiciel informatique n'aide l'ingénieur à apporter rapidement une évaluation pour une conception architecturale. L'ingénieur ne doit se baser que sur son expérience personnelle.

Plusieurs types de raisonnement ont été utilisés afin de tenter d'assister l'ingénieur dans la conception préliminaire. Parmi ceux-ci, on peut souligner les systèmes experts qui utilisent les heuristiques basées sur des règles du pouce qui sont activées par un moteur d'inférence. Aucun des prototypes développés dans le domaine de l'assistance à la conception préliminaire n'est encore utilisé par les ingénieurs praticiens. Souvent, les prototypes développés ont tenté davantage de remplacer l'ingénieur que de l'assister en négligeant l'interaction essentielle entre l'ingénieur et le prototype. Parfois, seule une évaluation de la conception réalisée par l'ingénieur était faite à postérieur. Cela n'est pas considéré ici comme une assistance à la conception préliminaire.

L'objectif du présent mémoire est de fournir les bases d'un outil qui pourrait centraliser les connaissances et faciliter leur utilisation lors d'une conception préliminaire. Cet outil est appelé « module de gestion des connaissances (DKM : Design Knowledge Manager) ». Le présent projet de recherche est relié à deux autres projets : le prototype de module de raisonnement géométrique StAr (Mora et coll., 2006) et l'interpréteur d'esquisses architecturales EsQUIsE (Leclercq, 1999). Cette combinaison de modules vise l'assistance à l'ingénieur à travers les étapes de conception préliminaire. La méthodologie utilisée dans la présente recherche est basée sur le processus de développement habituel d'applications informatiques. La modélisation du raisonnement est basée sur les règles comme cela est fait dans les systèmes experts, mais sans le moteur d'inférence. Ce dernier est remplacé par l'ingénieur lui-même, lui laissant ainsi tout le contrôle du processus de conception.

Une importante base de connaissances a été constituée de façon à avoir un échantillon représentatif de connaissances qui pourraient être utilisées dans l'outil envisagé. Les connaissances sont organisées en fonction des étapes de conception préliminaire qui ont été identifiées et partiellement validées. Les connaissances ont été recueillies à partir de la littérature et vidéos disponibles (livres, articles scientifiques, magazine spécialisé en structure, sites Internet, etc.) et par la réalisation d'entrevues avec des experts en conception préliminaire de structures de bâtiments.

Plusieurs arbres de connaissances ont été développés pour permettre l'interaction avec l'utilisateur. Ces arbres de connaissances sont basés sur les connaissances recueillies en conception préliminaire de structures de bâtiments. Des arbres ont notamment été développés pour la définition des sous-systèmes horizontaux et verticaux. De plus, afin de définir davantage les sous-systèmes horizontaux, trois autres arbres de connaissances ont été développés pour les éléments de base des sous-systèmes suivants :

- Dalle de béton sur tablier métallique supporté par des poutrelles d'acier ajourées et poutres en W;
- Dalle plate de béton avec abaque;
- Platelage de bois supporté par des poutres de bois (plein, composées, LVL, PSL, Parallam).

L'interface envisagée a aussi été élaborée pour contenir le tout.

L'assistance envisagée à l'utilisateur à travers tout le processus a été décrite à l'aide d'un exemple de session de conception complète de conception préliminaire de structures de bâtiments. La description couvre, pour toutes les étapes identifiées dans le processus de conception préliminaire, l'interaction qui pourrait avoir lieu entre l'ingénieur et les outils informatiques de façon à l'assister durant la conception préliminaire de structures de bâtiments.

Les détails relatifs à l'implémentation du prototype complet et ceux spécifiques au module de gestion des connaissances ont été définis dans ce mémoire. Celui-ci couvre les détails relatifs au module de gestion des connaissances : l'architecture en couche, le langage de programmation utilisé, les *paquetages* utilisés, l'utilisation des nœuds décisionnels et l'interface développée.

La section du manuel de l'utilisateur définit chacune des fonctionnalités du prototype ainsi que la manière de l'utiliser. De plus, un exemple d'une session de conception réalisée à l'aide de l'assistance du prototype a été présenté.

La validation du prototype s'est effectuée en deux parties. Les premières évaluations ont été faites par des chercheurs du domaine lors d'une présentation faite à une conférence internationale à Montréal et par d'autres présentations informelles. Ces chercheurs semblent dire que l'approche est prometteuse et pourrait être utile entre autres par l'utilisation de l'Internet et la personnalisation du prototype en fonction des habitudes régionales ou tout simplement du bureau. Le deuxième type d'évaluations, est l'évaluation par des professionnels praticiens dans le domaine de la conception préliminaire. Ces évaluations ont permis de mettre en relief les bons points et les points à améliorer dans les itérations subséquentes du prototype. Ces évaluations ont aussi montré que l'intégration d'outils d'assistance à la conception préliminaire de bâtiment dans le travail des ingénieurs praticiens n'est pas chose faite.

## **8.2. Contributions principales de la recherche**

Les contributions de cette recherche sont significatives et pourront aider à l'avancement de l'assistance à la conception préliminaire de structures de bâtiments. Ces contributions sont regroupées sous cinq thèmes ci-dessous.

### **8.2.1. Revue de littérature**

Une revue de littérature à jour sur les recherches effectuées en conception préliminaire de structures de bâtiments a été faite. Ainsi, les différentes approches de raisonnement ont été couvertes. Les lacunes des différents logiciels d'analyses ont été identifiées et expliquées. Une tendance au recours à la modélisation 3D dans tout le domaine de la construction a aussi été soulignée. Cette revue de littérature peut servir comme point de départ pour des recherches futures. Les références pertinentes et résumées peuvent être très utiles pour accélérer une recherche qui porterait sur l'assistance de la conception préliminaire de structures de bâtiments.

### **8.2.2. Acquisition de connaissances en conception préliminaire de structures de bâtiments**

Les connaissances en conception préliminaire sont très éparpillées dans diverses sources d'informations et pas toujours faciles à trouver. Des livres couvrent plus particulièrement la conception préliminaire de structures de bâtiments, mais ne

couvrent toujours pas toutes les connaissances qui sont nécessaires durant cette étape. Une recherche exhaustive de la littérature sur le sujet de la conception préliminaire a été faite à travers les livres, articles, documentation vidéo, Internet, etc. Les connaissances recueillies ont été organisées de façon à ce qu'elles puissent être implémentées dans un système d'assistance à la conception préliminaire de structure. De plus, comme la littérature ne couvre pas tous les aspects de la conception préliminaire, des entrevues avec des ingénieurs en structures de bâtiments ont été réalisées pour identifier les connaissances manquantes. Cette importante base de connaissances pourra être utile pour les recherches dans ce domaine et pourrait être augmentée par d'autres chercheurs et experts en conception préliminaire.

#### **8.2.3. Définition de l'interaction entre l'ingénieur et un outil informatique**

Peu de chercheurs se sont penchés sur l'interaction que pourrait avoir l'ingénieur avec l'informatique de façon à bien l'assister à travers toutes les étapes de conception préliminaire de structures de bâtiments. Les prototypes présentés dans la littérature automatisent souvent les étapes de conception sans considérer l'interaction avec l'ingénieur ou se concentrent sur des étapes particulières. Dans le présent mémoire, l'interaction entre un outil informatique et l'ingénieur a été décrite pour tout le processus de conception préliminaire de structures de bâtiments. L'assistance envisagée comprend un module de gestion des connaissances (DKM) et un module de raisonnement géométrique (StAr). Les outils apportés par chacun des deux modules ont été décrits de façon à montrer la pertinence des deux modules.

#### **8.2.4. Élaboration d'arbres de décisions pour la conception préliminaire des sous-systèmes horizontaux de la structure d'un bâtiment**

Basés sur les connaissances identifiées et organisées dans la base de connaissances de ce mémoire, les arbres de décisions consistent en une synthèse des connaissances pertinentes à chacune des étapes décisionnelles du processus de conception préliminaire de la structure d'un bâtiment. Les arbres de décisions sont la base du module de gestion des connaissances. Deux arbres de décisions ont été faits au niveau des sous-systèmes soit ceux nécessaires à la définition des sous-systèmes horizontaux

et verticaux. Au niveau plus détaillé de la définition des éléments de base pour les sous-systèmes horizontaux, trois arbres décisionnels ont été élaborés :

1. Dalle de béton sur tablier métallique supportée par des poutrelles d'acier ajourées et poutres en W;
2. Dalle plate de béton avec abaque;
3. Platelage de bois supporté par des poutres (bois plein, LVL, PSL, lamellé-collé ou Parallam).

#### **8.2.5. Réalisation d'un prototype**

Un prototype de module de gestion des connaissances (DKM) communiquant avec une base de données orientée objet a été créée. L'implémentation générale a été faite par un étudiant en génie logiciel lors d'un stage de fin d'étude (Fortin, 2006). L'auteur du présent mémoire, en plus de contribuer à la définition des besoins du prototype, a implémenté les connaissances requises pour la prise de décisions menant à la définition complète de deux sous-systèmes horizontaux. Trois autres sous-systèmes horizontaux ont été implémentés pour un niveau d'abstraction ne permettant pas de définir leurs éléments de bases. Le but d'implémenter ces derniers était de montrer la possibilité de choisir à un haut niveau d'abstraction entre plusieurs sous-systèmes horizontaux.

Le prototype réalisé pourra servir à l'exploration d'une solution complète visant l'assistance à la conception préliminaire de structures de bâtiments. Ce prototype renfermerait le module de gestion des connaissances lui-même, mais aussi le module de raisonnement géométrique (StAr) ainsi qu'un interpréteur d'esquisses architecturales (EsQUIsE).

#### **8.3. Recommandations pour les travaux futurs**

Quatre avenues de recherches futures sont envisagées afin de poursuivre l'objectif d'assister l'ingénieur à travers les tâches de conception préliminaire de structures de bâtiments.

### **8.3.1. Développement en collaboration avec un bureau d'ingénieurs**

La base de connaissances actuelles est principalement basée sur la littérature disponible sur la conception préliminaire de structures de bâtiments. Cependant, il a été vu, lors d'entrevues, que les ingénieurs praticiens possèdent et utilisent beaucoup plus de connaissances afin de réaliser leurs conceptions préliminaires. Pour ce faire, il semble même que certains réunissent les connaissances pertinentes dans un ou plusieurs documents consultables par les ingénieurs du bureau (Parent, 2004).

La prochaine étape de développement devrait être réalisée en étroite collaboration avec un bureau d'ingénieurs qui soit prêt à utiliser l'approche envisagée dans le présent mémoire pour pouvoir modéliser leur base de connaissances. Des chercheurs pourraient implémenter ces connaissances afin que le bureau d'ingénieurs puisse utiliser un prototype de l'outil. Les chercheurs pourraient ainsi savoir quels sont les bons et mauvais aspects de l'approche envisagée.

### **8.3.2. Élargissement de l'assistance**

Présentement, le prototype est limité à la conception préliminaire de la structure de seulement quelques-uns des sous-systèmes horizontaux possibles. Il serait intéressant de poursuivre le développement du prototype pour couvrir davantage d'étapes du processus de conception pour confirmer que la méthode envisagée peut être utilisée pour ces autres étapes.

### **8.3.3. Interaction améliorée avec StAr**

De plus, l'interaction entre StAr et le DKM se fait actuellement par l'intermédiaire de la base de données. Aucun raisonnement géométrique qui aurait pu être fourni par StAr n'a été nécessaire pour les étapes de conception implémentées. Cependant, il sera nécessaire pour l'implémentation d'un prototype assistant toutes les étapes de conception préliminaire de structures de bâtiments de recourir à des analyses géométriques. Peut-être serait-il nécessaire de communiquer directement avec StAr pour commander ces analyses géométriques plutôt que d'utiliser la base de données comme cela est fait actuellement pour les données sur les entités elles-mêmes. Par exemple, pour l'implémentation des sous-systèmes verticaux, il est souvent nécessaire

de raisonner en termes de géométrie globale du bâtiment afin de choisir et positionner ces sous-systèmes. Cette interaction devrait donc probablement être développée.

#### **8.3.4. Personnalisation du DKM par l'ingénieur praticien**

La plupart des ingénieurs ont leurs connaissances propres basées sur des projets antérieurs. Ainsi, s'ils voulaient faire bénéficier de leur savoir aux autres ingénieurs de leur bureau (ou encore mieux à la communauté d'ingénieurs en structures), ils devraient pouvoir entrer eux-mêmes leurs propres connaissances sans avoir à connaître le langage de programmation, tel le Java. La modélisation des connaissances, sous forme de règles, tel que cela a été fait dans le présent mémoire, pourrait sûrement faciliter l'implémentation d'une telle fonctionnalité. Ainsi, utiliser un langage très simplifié, ou encore une interface qui demanderait à l'ingénieur d'entrer la règle gauche (condition d'application) et la règle droite (action à réaliser lorsque la règle gauche est vraie), pourrait être une des voies à suivre.

## **ANNEXE 1**

### **Traduction française des termes anglophones utilisés dans la littérature**

Tableau VI

Traduction française des termes anglophones utilisés dans la littérature

Traduction française	Termes anglophones utilisé habituellement
Approche ascendante*	Bottom-up approach
Approche descendante*	Top-down approach
Chaînage arrière*	Backward chaining
Chaînage avant*	Forward chaining
Code source libre*	Open source
Éléments composés avec surfaces sous contrainte	Stressed-skin panels
Guidé par les données*	Data-driven
Infobulle*	Tooltip
Langage des prédictats du premier ordre*	First-order predicate logic
Logique formelle	Formal logic
Logique propositionnelle	Propositional logic
Paquetage*	Package
Partie droite*	Right-hand side
Partie gauche*	Left-hand side
Raisonnement à partir de cas	Case-based reasonning
Raisonnement à partir d'un modèle	Model-based reasonning
Raisonnement basé sur les lois de la physique	First-principles reasonning
Recherche en largeur d'abord*	Breadth-first search
Recherche en profondeur*	Depth-first search
Représentation à partir d'un cadre	Frame-based représentation
Système de tableau noir*	Blackboard system

\* (Office de la langue française, 2005)

## **ANNEXE 2**

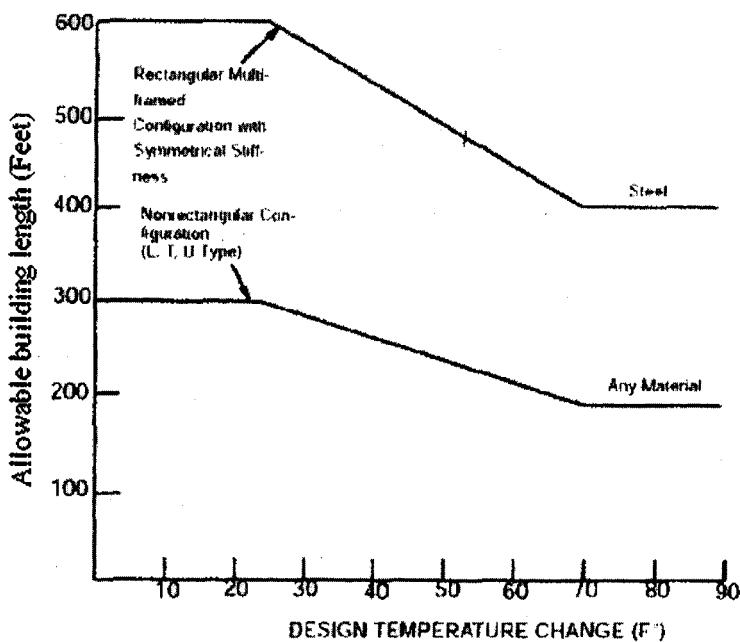
### **Recueil des connaissances en conception préliminaire de structures de bâtiments**

Cette annexe consiste en un recueil des connaissances trouvées pour les premières étapes de conception préliminaires de bâtiments. Elles sont regroupées en fonction des étapes du processus de conception préliminaire expliquées à la sous-section 3.3.1 page 58. Ainsi, on peut retrouver des connaissances pour les étapes 2 à 7. De plus, chaque connaissance est numérotée afin de pouvoir y référer plus facilement à partir du texte de ce mémoire.

### A 2.1. Étape 2 : Création des volumes structuraux indépendants

Diverses connaissances générales peuvent être considérées lorsque vient le temps de considérer la division du bâtiment en volumes structuraux indépendants :

1. Advenant un bâtiment ayant une géométrie générale en forme de L, T, H ou une autre forme géométrique inhabituelle, il serait préférable de diviser les parties en formes simples rectangulaires ou circulaires (Schodek, 2004, p. 511).
2. Les bâtiments allongés ne sont pas à privilégier, car les efforts sismiques diffèrent d'un endroit à l'autre. En ayant un bâtiment allongé, il devient possible d'avoir des efforts différents. Il est alors préférable de diviser le bâtiment en longueurs plus petites avec des joints sismiques (Schodek, 2004, p. 511).
3. Des volumes structuraux indépendants peuvent être créés comme disposition spéciale afin de réduire les vibrations d'un plancher. Un exemple est le centre James H.Clark, à l'université Stanford en Californie. Ce bâtiment destiné à recevoir des laboratoires contenant des instruments de hautes précisions ne pouvait tolérer que de très faibles vibrations. Ainsi, des dispositions ont été prises telles qu'isoler les passages où les gens marchent (en créant une structure indépendante pour ces passages) afin qu'ils n'affectent pas toute la structure (American Institute of Steel Construction, 2004).
4. Parfois, pour répondre aux critères de protection incendie du CNB 1995, il peut être préférable de diviser le bâtiment en volumes structuraux indépendants pour éviter des restrictions supplémentaires. En divisant le bâtiment, l'aire de plancher peut ainsi être réduite, ce qui constitue l'un des critères établissant la restriction sur l'utilisation de matériaux combustibles. Souvent, on fait coïncider ces séparations avec les murs porteurs de maçonnerie (Schodek, 2004).
5. Les joints de dilatation devraient être prévus lorsque la longueur du bâtiment est plus grande que la valeur que l'on peut retrouver dans le graphique 1. La valeur de changement de température habituellement utilisée par les ingénieurs se trouve entre 50 et 70 degrés Fahrenheit (27 à 39 degrés Celcius). Cette valeur correspond à la différence entre la température la plus haute et la plus basse que la structure pourrait subir (Federal Construction Council, 1974).



Graphique 1 Longueur maximale de bâtiment en fonction des changements de température prévus dans le bâtiment  
(Fisher, 2005)

### A 2.2. Étape 3 : Décisions stratégiques

Diverses connaissances peuvent servir à l'ingénieur lorsqu'il fait des choix stratégiques qui affecteront tout le bâtiment. Souvent il se base sur son expérience provenant de projets qu'il a déjà réalisés. Ainsi, les connaissances qui suivent traitent de décisions touchant l'ensemble du bâtiment qui sont justement basées sur l'expérience d'ingénieurs en structures ayant mis sur papier leurs connaissances :

6. Il serait faux de dire que le concepteur doit rechercher la structure la moins dispendieuse de toutes pour arrêter son choix sur un système plutôt qu'un autre. Pour des bâtiments, qui ne comportent pas de longues portées tels un gymnase ou une salle de concert, la structure correspond habituellement à 15 ou 20 % du coût total du bâtiment. Ce montant est habituellement plus faible que celui de la mécanique et de l'électricité. C'est pourquoi, pour une majorité de bâtiments, le système devrait être choisi pour d'autres raisons que le coût (Shaeffer, 1992, p. 32).
7. Sans dire que la fonction doit influencer le choix du système structural, il est probable que l'on ne mettra pas un dôme pour le toit d'un centre de bowling ou un système de dalle nervurée unidirectionnelle au dessus d'un immense espace libre (Shaeffer, 1992, p. 32).

8. Le concepteur devrait tenir compte des systèmes mécaniques et des systèmes de circulation horizontale et verticale. On pense souvent que les systèmes mécaniques doivent s'ajuster à la structure présente. Cependant, une bonne planification de ces deux systèmes peut parfois établir le sens des poutrelles et des poutres. Pour les systèmes de circulation, le système structural ne devrait pas nuire à sa clarté (Shaeffer, 1992, p. 32).
9. Les éléments préfabriqués sont le plus souvent simplement appuyés. Il est préférable de les utiliser pour des situations répétitives (Schodek, 2004).

#### **A 2.2.1. Développement durable**

Le développement durable consiste à tenir compte des répercussions sur l'environnement, l'économie et la durée de vie utile dans la conception d'un ouvrage. Il faut tenir compte de chacune des différentes étapes d'un projet : production, construction, conditions de service, démolition, recyclage, réutilisation, destruction (Fukushima, 2002).

10. Les principaux éléments à prendre en considération seraient : une longue vie utile, facilité de réaménagement pour changement d'utilisation, facilité de faire des extensions, réparations, rénovation et facilité de recycler les matériaux utilisés dans le bâtiment. Ces éléments doivent être pris en considération dès la conception préliminaire (Kott & Kunzel, 2003).
11. Aussi, on devrait utiliser des matériaux performants avec des résistances élevées et/ou utiliser des matériaux recyclés de façon à utiliser le moins de ressources possible (Fukushima, 2002).
12. Un squelette structural (structure primaire) indépendant des structures secondaires rend plus flexible l'utilisation des surfaces de bâtiments. Les changements nécessaires à la structure pourront ainsi se faire plus aisément (Kott & Kunzel, 2003).

#### **A 2.2.2. Choix des matériaux**

##### **A 2.2.2.1. Général**

Le choix des matériaux peut parfois être influencé par des habitudes régionales, mais aussi par de multiples facteurs dont certains sont mentionnés dans les connaissances qui suivent :

13. Pour des petites constructions, le bois est souvent utilisé ainsi que l'acier non protégé. Pour des constructions moyennes, des murs porteurs de maçonnerie (de 5 à 6 étages) sont fréquents et la construction lourde (plus de 5 à 6 étages) est caractérisée par des structures d'acier protégées et des structures de béton armé (Schodek, 2004).

14. Le code national du bâtiment (CNB) donne une multitude de restrictions et conditions réglant l'usage de matériaux combustibles. Ces restrictions sont en fonction des usages décrits au tableau 3.1.2.1 et détaillés à l'annexe A.3.1.2.1 du CNB 1995. En général, on peut dire qu'un bâtiment de 5 étages et plus ne peut être de construction combustible et la plupart des usages permettant qu'un bâtiment de 4 étages puisse être en construction combustible exige une protection par gicleurs. Il est permis, la plupart du temps, de construire un toit en gros bois d'œuvre pour des bâtiments d'au plus 2 étages entièrement protégés par gicleurs. Pour toutes les spécifications, voir le CNB 1995, articles 3.2.2.16 à 3.2.2.83 (Conseil national de recherches du Canada & Québec (Province). Régie du bâtiment du Québec, 2001).

#### **A 2.2.2.2. Bois**

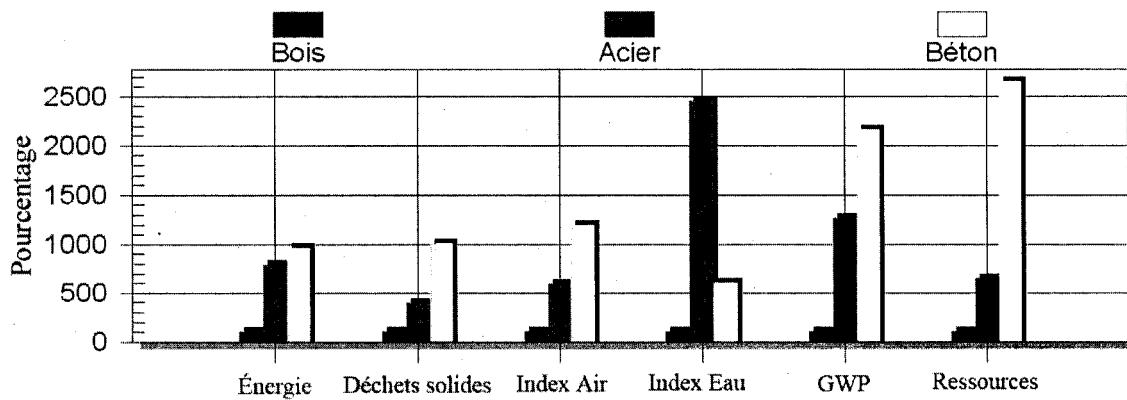
15. Plusieurs espèces de bois sont disponibles. Habituellement le plus économique est de choisir le grade le moins élevé possible, qui correspond à l'usage qui devra en être fait. Le bois est utilisé massivement pour les constructions temporaires : échafaudages, contreventement et coffrage de béton (Ambrose, 1993, p. 23).
16. Les charpentes légères sont utilisées habituellement pour des bâtiments allant jusqu'à 3 ou 4 étages (Schodek, 2004, p. 524).
17. Avec les bois d'ingénierie, on peut maintenant franchir de plus grandes portées qu'auparavant. Aux fins de comparaison, si on prend une poutre composée avec les dimensions limites de  $38 \times 286$  avec 5 éléments, (donc  $190 \times 286$ ) le moment résistant s'élève à près de 42.3 kN.m et un effort tranchant résistant près de 35.9 kN. Pour une poutre de dimensions pratiquement équivalentes ( $178 \times 286$ ) en Parallam® (TrusJoist, 2000b), le moment résistant s'élève maintenant à 81.06 kN.m (presque que le double) et un effort tranchant de 113 kN (2.5 fois plus élevé). Aussi, les dimensions de la poutre n'étant pas limitées à la grosseur des arbres coupés, on peut avoir une poutre Parallam de dimensions allant jusqu'à  $178 \times 483$  mm résultant en un moment résistant pouvant s'élever à 218 kN.m et un effort tranchant de 192 kN.
18. Une étude du conseil canadien du bois a déterminé que 52 % de la construction non résidentielle pourrait être construite en bois et que seulement 15 % l'est (Timber Systems Limited, 2003).

#### **Avantages**

19. Le bois est le seul matériau structurel renouvelable (Timber Systems Limited, 2003).
20. Le logiciel Athéna est un logiciel qui sert à évaluer l'impact environnemental d'un projet en bois comparativement aux autres matériaux tel l'acier ou le béton.

Trois projets ont été réalisés avec les trois principaux matériaux que sont le bois, l'acier et le béton, sur une même base, c'est-à-dire qu'ils avaient tous la même superficie de plancher, mêmes portées, etc.

Selon de multiples simulations avec le logiciel Athéna, pour des bâtiments allant de bâtiment résidentiel jusqu'à des bâtiments de grandes superficies de plancher, les résultats étaient très semblables. Ils sont présentés au graphique 2. Pour chacune des catégories concernant le développement durable, on peut voir, en pourcentage, l'énergie consommée par rapport aux autres projets. Le projet de base étant celui étant fait en bois, toutes les catégories sont à 100% pour ce projet. L'une des conclusions que l'on peut en tirer, c'est que le bois semble meilleur à tous les points de vue si on tient compte du développement durable.



Graphique 2 Évaluation de l'impact environnemental d'une construction avec le logiciel Athéna  
 (ATHENA'S Environmental Impact Estimator, 2004)

#### A 2.2.2.3. Béton

21. La portée conventionnelle pour un système structural en béton est de 18 pieds (5.5 mètres) (Withson, 2002).
22. Les principaux coûts du béton proviennent du fait qu'il faut le former et en faire la finition (Comité mixte international sur la conception et l'étude des immeubles de grande hauteur & Journées francophones "Urbanisme vertical" Paris, 1973, p. 187).
23. Dans les structures de béton, la durée de vie utile de la structure est déterminée par l'avancement de la carbonatation du béton et de la corrosion des barres d'armatures. Pour assurer une durée de service maximale, on devrait s'assurer de la qualité des travaux de construction et de faire des maintenances régulières et les réparations nécessaires (Fukushima, 2002).
24. L'utilisation de béton préfabriqué peut être préférable puisqu'il permet la réutilisation des pièces. Toutefois, il ne faudrait pas appliquer une chape de béton

par-dessus ces éléments, ce qui compliquerait le démantèlement et la réutilisation des pièces préfabriqués. La conception d'éléments spéciaux spécifiques à certaines conditions devrait être évitée, car les seules méthodes écologiques pouvant être utilisées ici seraient d'utiliser le bâtiment tel qu'il est le plus longtemps possible ou de recycler ses matériaux (Kott & Kunzel, 2003).

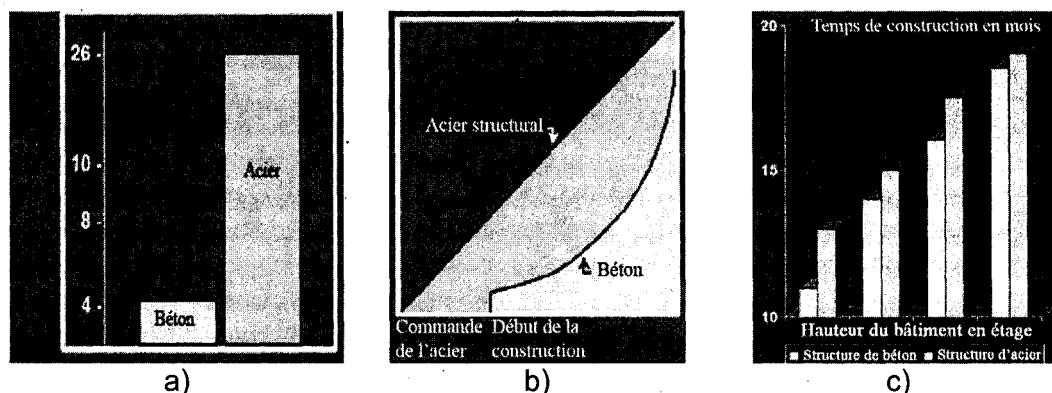
25. La précontrainte peut non seulement permettre d'atteindre de plus grandes portées, mais peut aussi permettre de sauver de l'argent par la diminution de la distance plancher plafond. Pour un bâtiment de 40 étages, par exemple, de grandes économies pourraient en résulter. Les porte-à-faux doivent être limités, car ce type de structure réagit mal dans ces conditions. La précontrainte n'est pas appropriée pour des charges concentrées ou des charges uniformes inhabituellement élevées (Lin & Stotesbury, 1988).

#### Avantages

26. Quoique les murs de cisaillements de béton posent des problèmes pour la possibilité de démantèlement, ils aident à former de grands espaces de planchers qui pourraient être facilement réaménagés. (Kott et Kunzel. 2003)
27. Pour le cas particulier d'un laboratoire dans un environnement contrôlé, il peut être non approprié d'utiliser une structure d'acier qui doit souvent être protégée par un enduit relativement friable afin d'avoir le degré de résistance au feu requis. Une structure de béton serait plus appropriée (Datum Engineers Inc., 2003).
28. Divers avantages sont soulignés par l'Association canadienne du ciment Portland (Association canadienne du ciment Portland, 2004) :
  - La flexibilité des formes en fait un attrait majeur;
  - Le béton est disponible localement dans la plupart des régions ainsi que le matériau de base. (Ciments, agrégats, etc.);
  - C'est un matériau qui a une bonne résistance au feu et c'est pourquoi des compagnies d'assurances préfèrent les structures de béton;
  - Le matériau résiste très bien à la moisissure, aux insectes et à la rouille;
  - Étant donné que la capacité d'isolation acoustique dépend entre autres de la masse du matériau, le béton est un matériau idéal;
  - Les ajustements sur le site dus à des changements en cours de chantier sont faciles à faire;
  - Habituellement, une construction en béton, due à sa faible profondeur de structure nécessaire, va permettre de faire un étage de plus qu'avec les autres matériaux pour la même hauteur de bâtiment totale;
  - Étant donné que les colonnes peuvent reprendre une plus grande charge axiale, on peut réduire le nombre de colonnes;
  - Il n'y a pas de délai de livraison pour les composantes de la structure;
  - Étant donné la proximité des usines à béton, moins d'énergie est consommée pour le transport;
  - Le béton peut agir à titre de masse thermique, c'est-à-dire qu'il peut « emmagasiner de l'énergie thermique pour ensuite l'émettre par radiation et

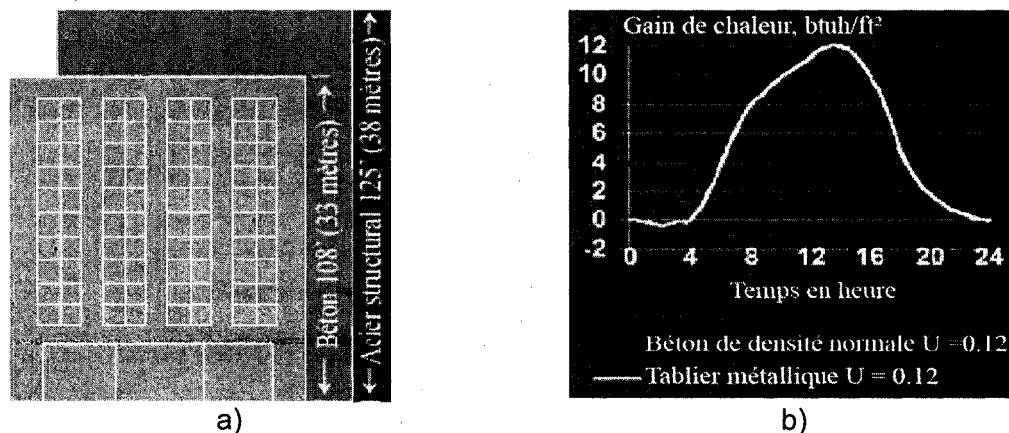
par convection» (Office québécois de la langue française, 2004). Les coûts de chauffage et de climatisation pourront donc être réduits à l'aide de ce phénomène (Voir graphique 4).

29. Même si l'on peut croire que les constructions d'acier sont plus rapidement érigées, les données de l'industrie montrent qu'il y a 13% moins de délais rapportés pour les constructions de béton comparativement à celles d'acier. Le temps de construction peut être réduit par le fait qu'il est plus facile de trouver des équipes pour les structures de béton que pour les structures d'acier (Reinforced concrete construction committee, 2004) (Voir graphique 3).



Graphique 3 Construction d'une structure en béton comparativement à une structure en acier : (a) temps pour démarrer le projet, (b) comparaison des flux monétaires en dollars, (c) temps de construction en mois en fonction du nombre d'étages pour des édifices à bureaux

(Adapté de Reinforced concrete construction committee, 2004)



Graphique 4 Comparaison d'un bâtiment en acier et en béton : (a) hauteur totale d'un bâtiment de 10 étages, (b) effet de masse thermique des structures de béton comparées à celles en acier

(Adapté de Reinforced concrete construction committee, 2004)

### Désavantages

30. Le coulage par temps froid nécessite des précautions importantes lors de la coulée. Il faut notamment maintenir la température à l'intérieur du bâtiment au dessus du point de congélation. Cela peut être possible en chauffant le bâtiment et en le protégeant à l'aide de bâches (Comité mixte international sur la conception et l'étude des immeubles de grande hauteur & Journées francophones "Urbanisme vertical" Paris, 1973, p. 187).

#### A 2.2.2.4. Acier

31. La portée conventionnelle d'un système de poteaux et poutres en acier est de 25 à 30 pieds (7.5 à 9 mètres) (Withson, 2002).

### Avantages

32. Divers avantages sont soulignés par l'association « Pacific Northwest steel fabricators association » (2004) :
- L'acier offre facilement et économiquement de grandes portées (Voir Tableau VIII, page 167), ce qui donne une plus grande flexibilité et efficacité d'aménagement des espaces et des voies de circulation;
  - Un bâtiment existant en structure d'acier peut facilement être agrandi dans n'importe quelle direction;
  - Si le bâtiment change d'usage au cours de sa vie utile, une structure d'acier peut facilement être renforcée;
  - La conception des structures d'acier est plus facile que les autres types de structures. Elles peuvent aussi être analysées plus facilement lors d'inspections futures, car leurs propriétés géométriques et les propriétés intrinsèques du matériau sont facilement identifiables;
  - L'utilisation de l'acier réduit le temps de construction : conception, achat et érection rapide, pas de temps de cure ou étayage. Facilite la construction de style « fast track »;
  - Réduction des coûts de financement due à l'occupation plus rapide du bâtiment;
  - Meilleure performance sismique : un propriétaire devrait considérer la sécurité des occupants et la réhabilitation du bâtiment après un séisme. Les structures d'acier maximisent ces deux facteurs, car l'analyse structurale pour une structure d'acier est plus précise et les pièces structurales sont facilement remplaçables;
  - Grande valeur de revente due à la facilité d'expansion des structures d'acier;
  - Les structures d'acier peuvent être entièrement recyclées et en partie réutilisées. Conséquemment, une réduction des coûts due à la démolition du bâtiment, réduction des déchets, réduction des coûts reliés au transport des déchets et aide à préserver l'environnement.
33. L'acier offre l'avantage de pouvoir se construire rapidement quelles que soient les conditions climatiques. Les planchers sont montés de pair avec l'ossature (Comité

mixte international sur la conception et l'étude des immeubles de grande hauteur & Journées francophones "Urbanisme vertical" Paris, 1973)

34. Selon le logiciel Athéna et les multiples simulations effectuées pour différents matériaux, l'acier aurait moins d'impact environnemental que le béton. Pour la plupart des catégories, l'acier est préférable au béton sauf pour la consommation en eau (Voir graphique 2).

#### Désavantages

35. Certaines structures sont portées à vibrer plus facilement que d'autres telles les structures d'acier soudées, dû à leur faible capacité d'amortissement (Smith, 1988)
36. Les vibrations affectent la structure et le dimensionnement des éléments. Aussi, les vibrations d'une structure doivent parfois être limitées pour l'utilisation d'appareils de précisions tels microscopes, télescopes, microélectronique, etc. Toutefois, c'est souvent la limitation due au confort des gens qui définit les limites (Smith, 1988, p. 285).
37. L'homme est particulièrement inconfortable lorsqu'exposé à des fréquences allant de 2 à 30 Hz. La perception des vibrations est plus grande pour un sujet qui est debout que s'il est couché (Smith, 1988, p. 288). Ainsi, les structures d'acier vibrant relativement facilement, il est nécessaire d'en tenir compte.
38. Des problèmes de vibrations sont à prévoir dans les portées extrêmement longues où le plancher est supporté par des poutrelles identiques, faiblement espacées avec un espacement constant (ex : 30 pouces c/c) (American Institute of Steel Construction & Institut canadien de la construction en acier, 1997, p.59).
39. Les connexions utilisées devraient être préféablement boulonnées de façon à faciliter le démontage (Kott & Kunzel, 2003).
40. L'acier est un matériau coûteux qui présente comme désavantage qu'il prend rapidement de la chaleur lors d'un feu et est fortement propice à rouiller en milieu humide. Des dispositions doivent donc être prises à ce sujet. Il était courant de mettre les composantes d'acier dans le béton afin de les protéger. Maintenant, on peut utiliser seulement un enduit protecteur, du gypse ou autre. On recherche habituellement à limiter le coût en recherchant les sections les plus légères. (Ambrose, 1993).

#### A 2.3. Étape 4 : Création des zones structurales

##### A 2.3.1. Groupement d'espaces architecturaux

41. Les zones structurales peuvent être déterminées notamment par la profondeur de structure disponible. Cette profondeur peut varier selon la hauteur libre nécessaire

dans chacune des pièces. Chaque utilisation d'une aire de plancher nécessite une hauteur libre minimum qui est déterminée par l'architecte (Schodek, 2004, p. 470).

42. Une nouvelle zone structurale devrait être créée pour chacune des parties de bâtiment nécessitant une affectation de charge d'utilisation différente.
43. Dans les premières étapes de conception, il serait bien de cibler les utilisations qui pourraient créer des problèmes de vibration telles plancher de danse, concert rock ou semblable, événements sportifs, aérobie, exercices où l'on saute. Ainsi, à cette étape on peut limiter les coûts dus aux vibrations en les limitant à une certaine région (American Institute of Steel Construction & Institut canadien de la construction en acier, 1997, p. 39).

#### **A 2.3.2. Attribution des charges d'utilisation et de neige**

44. Toutes les charges doivent être calculées en conformité avec le Code National du Bâtiment (Conseil national de recherches du Canada & Québec (Province). Régie du bâtiment du Québec, 2001). Pour les charges d'utilisation, il faut se référer à la section 4, article 4.1.6.3. du CNB 1995 tandis que pour les charges de neige, c'est la sous-section 4.1.7 du CNB 1995 qui doit être consultée.

#### **A 2.4. Étape 5 : Recherche d'éléments verticaux continus**

45. Habituellement, il est plus économique d'espacer les supports verticaux de 10 à 15 pieds afin de minimiser les portées horizontales. Toutefois, ce sont les besoins architecturaux qui requièrent souvent de plus grandes portées (Lin & Stotesbury, 1988).
46. Il faut noter que les coûts sont plus affectés par l'augmentation des portées que par l'augmentation des charges puisque que les efforts de flexion évoluent au carré de la portée (Lin & Stotesbury, 1988, p. 497)
47. Pour trouver l'espacement des éléments verticaux, il faut considérer l'espacement critique pour l'utilisation de l'espace. L'espacement choisi devra être un multiple de cet espacement critique (Schodek, 2004, p. 470).
48. Aux premières étapes de conception, il serait important d'identifier un patron général pour contrer les forces latérales (Schodek, 2004, p. 498).
49. Les systèmes mécaniques peuvent influencer la structure lorsqu'ils sont omniprésents comme dans des laboratoires ou encore dans un hôpital. Pour faire traverser les conduits mécaniques d'un étage à un autre, il est préférable de les regrouper et de porter une attention particulière à cet endroit et de ne pas affecter le restant de la structure. Une façon intéressante de palier au problème d'un grand nombre de conduits passant d'un étage à l'autre est de doubler les colonnes sur

un axe en laissant un espace suffisant entre elles afin de passer les conduits (Schodek, 2004).

50. Il est généralement économique, lorsqu'une grande portée de plancher est présente (12 mètres ou plus), de limiter la portée dans l'autre sens (Comité mixte international sur la conception et l'étude des immeubles de grande hauteur & Journées francophones "Urbanisme vertical" Paris, 1973, p.108).

## A 2.5. Étape 6 : Éléments horizontaux

### A 2.5.1. Général

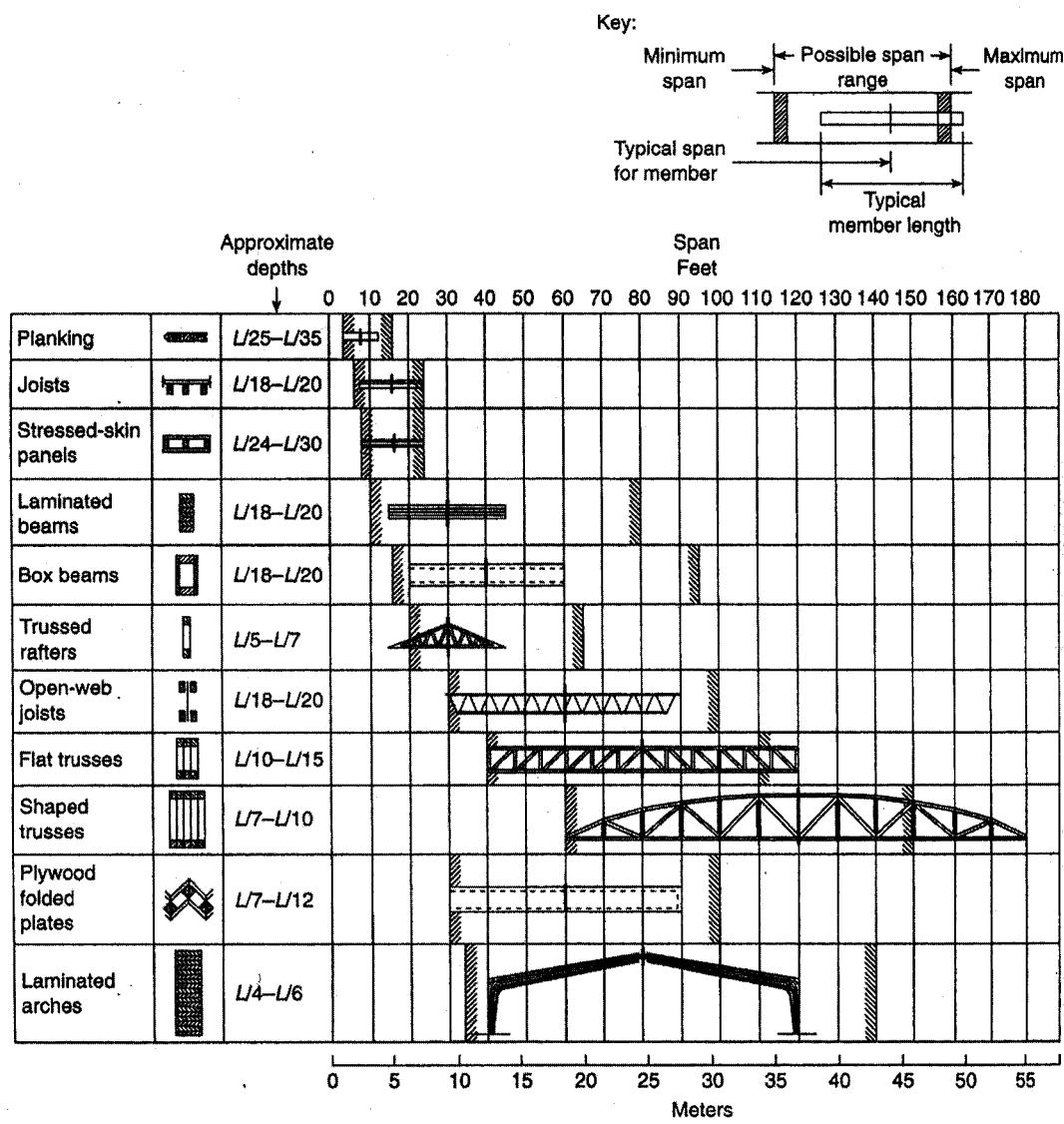
51. Pour des trames structurales où les appuis sont disposés de façon irrégulière, un système d'éléments préfabriqués devient coûteux et peu approprié. Dans cette situation, il pourrait être préférable d'utiliser du béton coulé en place pour des portées allant de 16 à 20 pieds (Schodek, 2004).
52. Deux approches possibles concernant l'espacement des éléments porteurs :
  - Structure concentrée composée d'éléments porteurs peu nombreux, mais importants;
  - Structure distribuée qui utilise un grand nombre de petits éléments.

Ces types d'approches sont valides pour les membrures sollicitées en flexion. Le choix de l'une ou l'autre des approches concerne un grand nombre de paramètres. Toutefois, pour des charges concentrées, la structure concentrée réagit mieux (Schodek, 2004).

53. L'intervalle des portées économiques, pour chacun des types de sous-système horizontaux, peut être retrouvé dans trois tableaux présentés dans Schodek (2004). En même temps, il est possible d'avoir une évaluation de la profondeur nécessaire (maximale et minimale) pour chacun des éléments en fonction de leur portée. Le trait foncé vertical représente la portée la plus courante. D'autres tableaux peuvent être trouvés donnant aussi les portées économiques en fonction des types de sous-systèmes structuraux, mais on y ajoute parfois d'autres paramètres tel le ratio des portées de la baie (Voir Tableau X).

Tableau VII

Portées économiques des systèmes structuraux en bois et estimation de la profondeur de structure nécessaire



(Schodek, 2004)

Tableau VIII

Portées économiques des systèmes structuraux en acier et estimation de la profondeur de structure nécessaire

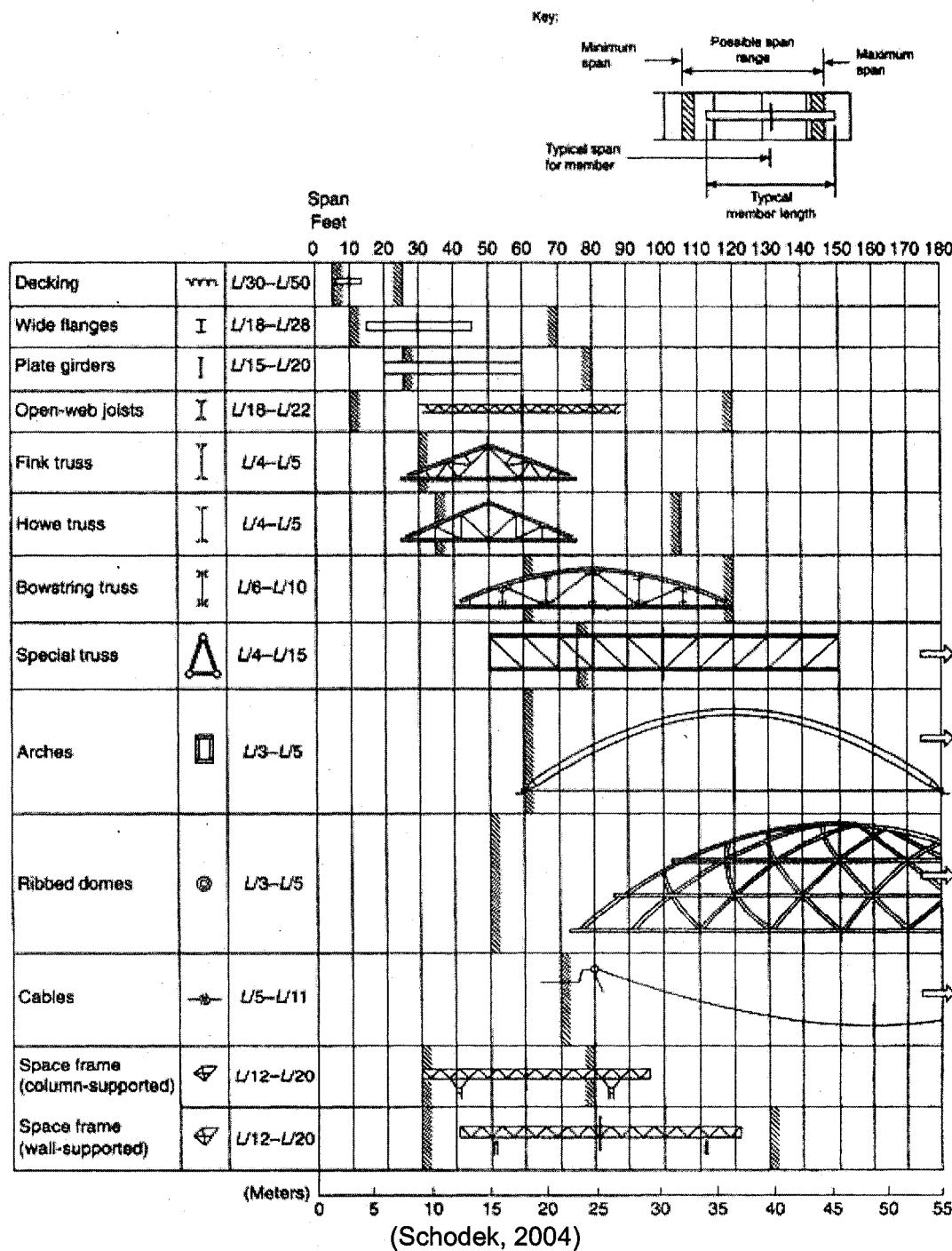


Tableau IX

Portées économiques des systèmes structuraux en béton et estimation de la profondeur de structure nécessaire selon Schodek (2004)

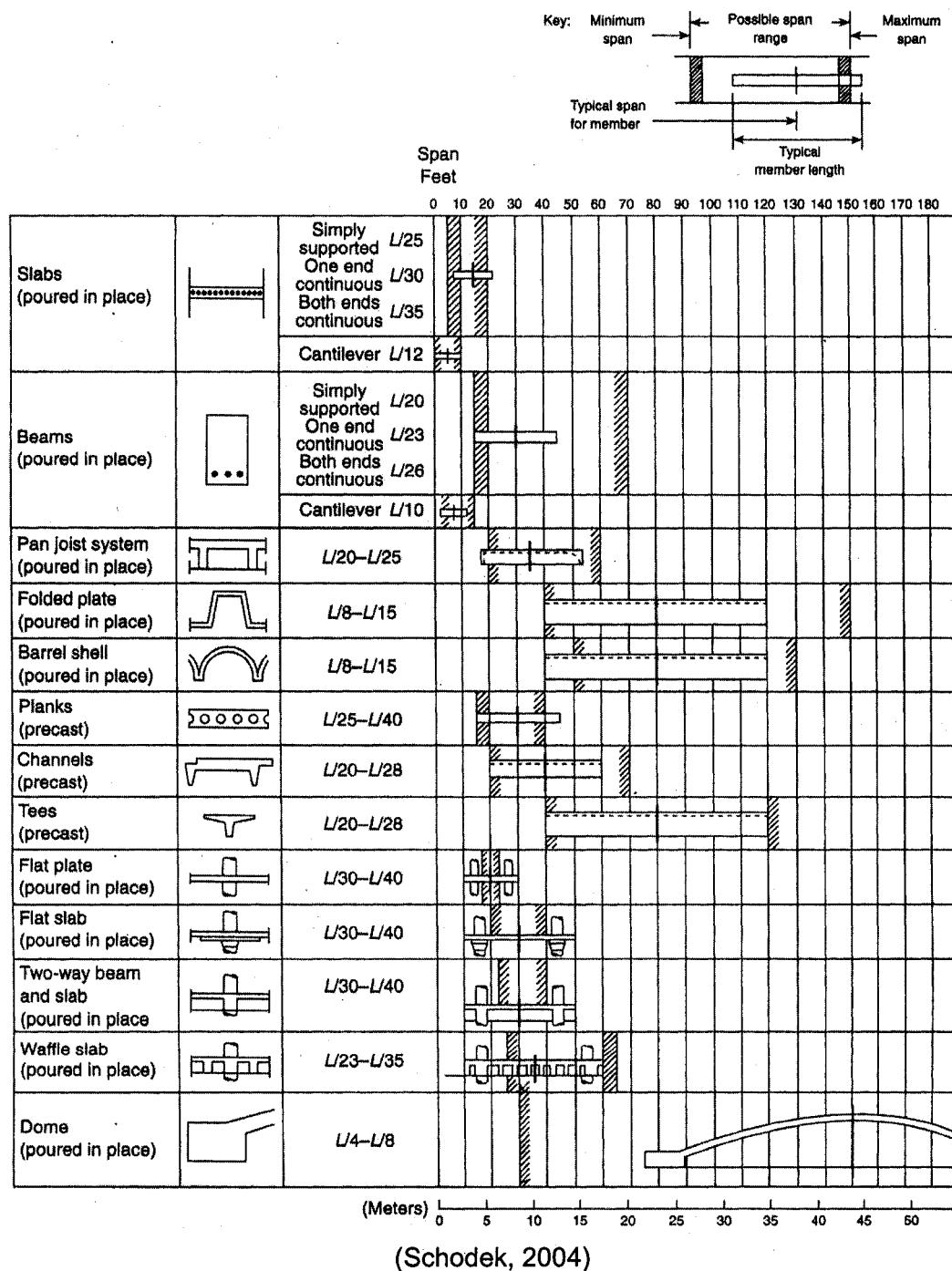
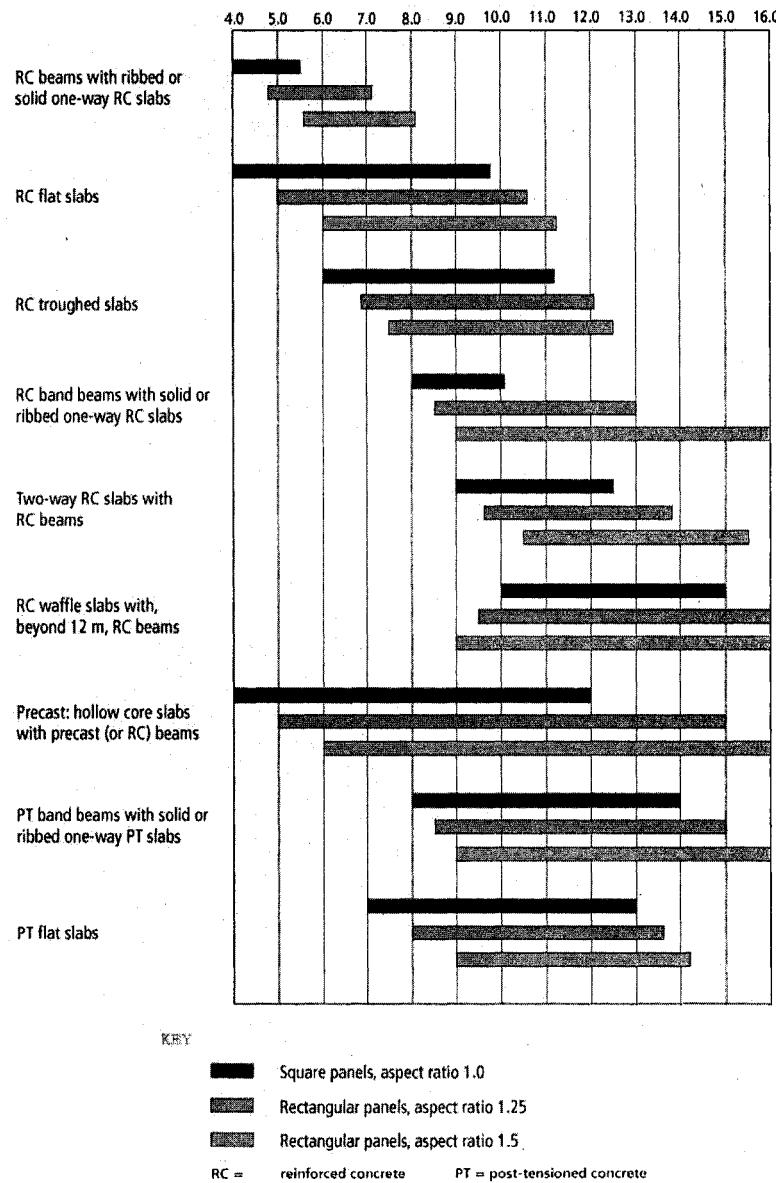


Tableau X  
Portées économiques des systèmes structuraux en béton

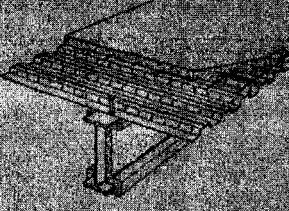


(Goodchild, 1997)

54. Il est possible d'avoir une estimation du prix des sous-systèmes structuraux en fonction de leur portée et des charges qui leur sont surimposées. Ainsi, on peut retrouver des tables telles que celle montrée au Tableau XI, et ce, pour une majorité de sous-systèmes structuraux (R.S. Means Company, 2005).

Tableau XI

**Exemple de tables permettant d'évaluer le prix au pied carré d'un système structural en fonction des dimensions de la baie et des charges surimposées**

B1010 Floor Construction						
		Description		Cost Breakdown		
		Dimensions	Materials	Material Cost	Labor Cost	Total Cost
			Description: This is a composite system designed for a floor system using steel joists, concrete, and steel deck. The joists are 10" wide by 10' long and have a 1-1/2" thick top flange. The joists are spaced at 16" on center and are supported by a 10" wide by 10' long steel deck. The concrete slab is 4" thick and reinforced with #4 bars. Price includes dry-gated floor framing on steel beams.	Steel Deck required: W10E-3 x 10 - W10E-10 x 10 Concrete slab 4" thick Steel joists 10" wide by 10' long Flooring is assumed to be 1/2" thick as shown.		
			Design and Pricing Assumptions:			
			Structure steel is A36, 60k strength painted.			
			Composite steel deck varies from 22 gauge to 18 gauge, galvanized.			
			Spandrels are assumed the same as interior beams, 16" on center to allow for easier wall form removal and easier mortar connections.			
System Components				QUANTITY	UNIT	COST BREAKDOWN
					MATERIAL	LABOR
SYSTEM B1010-254						TOTAL
2002 DAY 40 PSF + LOAD 5-1/2" SLAB 17-1/2" TOTAL THICKNESS						
Structural Steel				4,226	LB	2.00
Welded steel joists 10" wide by 10' long				163	CS	.00
Welded steel joists 10" wide by 10' long 16" on center				1,650	SF	1.00
Sheet metal supports 10" x 12" x 1/2" thick 10' long				648	LF	.00
Webbing 1/2" wide 10' long 10" wide by 10' long 21.5 lbs/sf				1,000	SF	.00
Concrete 3000 psi, 4" thick 10,000 psf				300	CF	1.00
Floor and ceiling insulation 1" thick 16" on center 16" on center				331	SF	.00
Finishing floor material 1/2" thick 16" on center				1,000	SF	.00
Compliance overhead 1/2" thick 16" on center				640	CSF	.00
Stairs and ramps 10' wide 10' long				600	LF	.00
Structural support 10' wide 10' long 17-1/2" on center				400	SF	.00
				709		4.00
						4.00
						10.00
B1010-256		Composite Beam, Deck & Slab				
	BAY SIZE (FT)	SUPERIMPOSED LOAD (PSF)	SLAB THICKNESS (IN)	TOTAL DEPTH (IN - IN)	TOTAL LOAD (PSF)	COST BREAKDOWN
						MATERIAL LABOR
400	2x25	40	5-1/2	1-9/16	60	1.00 1.00
2500		75	5-1/2	1-9/16	115	6.00 1.00
2750		125	5-1/2	1-9/16	167	7.00 1.00
3000		200	6-1/4	11-1/8	261	11.00 1.00
300	2x25	40	5-1/2	1-9/16	62	1.00 1.00
3100		75	5-1/2	1-9/16	118	6.00 1.00
3200		125	5-1/2	1-9/16	169	6.00 1.00
3300		200	6-1/4	11-1/8	262	11.00 1.00
400	2x37	40	5-1/2	11-1/2	81	5.00 1.00
3600		75	5-1/2	11-1/2	119	10.00 1.00
3900		125	5-1/2	11-1/2	170	12.00 1.00
4000		200	6-1/4	11-1/2	262	14.00 1.00
4000	2x35	40	5-1/2	11-1/2	81	5.00 1.00
4400		75	5-1/2	11-1/2	116	8.00 1.00
4500		125	5-1/2	11-1/2	166	10.00 1.00
4700		200	6-1/4	11-1/2	266	12.00 1.00
4900	3x35	40	5-1/2	2-2-1/2	82	6.25 4.25
5100		75	5-1/2	2-2-1/2	117	6.85 4.37
5300		125	5-1/2	2-2-1/2	169	8.40 4.37
5500		200	6-1/4	2-2-1/2	269	10.00 4.37

(Balboni, 2001)

### A 2.5.2. Détermination du cheminement des charges (Unidirectionnel vs Bidirectionnel)

55. Condition pour obtenir l'effet bidirectionnel: le rapport grande portée/petite portée doit être inférieur à environ 1,5 et tout le pourtour de la baie doit être supporté (Schodek, 2004, p. 478).
56. Les structures à ossature de bois sont unidirectionnelles (Schodek, 2004, p. 524).
57. Dans les structures d'acier en général, les systèmes sont unidirectionnels. Il est relativement facile de faire des connexions rigides et ainsi résister aux charges latérales de cette façon (Schodek, 2004, p. 534).
58. Ces deux types de cheminement de charges ont des intervalles de portées dans lesquels ils sont optimisés et souvent utilisés :
  - 15 à 35 pieds (4,5 à 10,7 mètres), les deux types de systèmes sont utilisés;
  - 50 à 60 pieds (15,2 à 18,3 mètres), c'est autour de ce point que le système bidirectionnel commence à être moins efficace;
  - 80 à 100 pieds (24,4 à 30,5 mètres), le système unidirectionnel est prédominant (Schodek, 2004, p. 467)
59. Un cheminement de charge unidirectionnel est souvent recherché pour ces deux situations :
  - Toits supportant de faibles charges avec des portées de 50 à 60 pieds (15 à 18 mètres), avec des poutrelles peu espacées;
  - Éléments de béton préfabriqué et précontraints (Schodek, 2004).
60. Pour une structure en « L », les coins deviennent gênants pour une structure unidirectionnelle, une attention particulière doit y être portée. Pour résoudre le problème, on peut introduire une partie de structure bidirectionnelle. Les structures bidirectionnelles ne sont habituellement pas problématiques. (Schodek. 2004. p-479)
61. En présence d'un certain « glissement entre unités » un système bidirectionnel n'est pas souhaitable. Une multitude de coins problématiques se forment. Il peut être préférable d'utiliser un système avec murs porteurs (Voir figure 53, a). De cette façon, le facteur de glissement peut être de n'importe quelle valeur. Si cette technique n'est pas utilisée, le glissement devrait être égal à l'espacement des colonnes. En utilisant un système de poutres et colonnes, le glissement peut être aussi long que désiré tant que la portée ou les porte-à-faux ne sont pas trop importants (Voir figure 53, b et c) (Schodek. 2004. p-481).

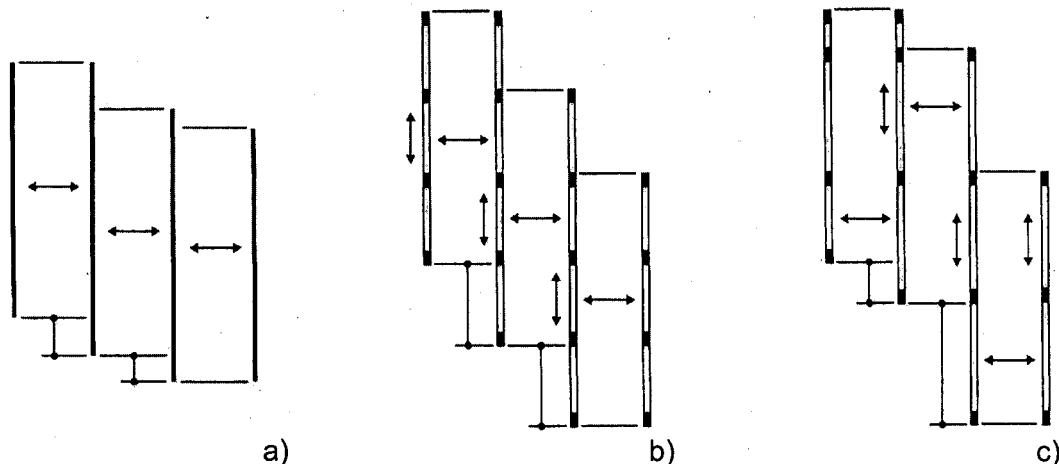


Figure 53 Exemple de technique pouvant être utilisée en présence de glissements entre unités  
(Schodek, 2004, p. 481)

#### A 2.5.3. Détermination du sens de la portée des éléments

62. Mettre l'axe porteur de l'élément de surface dans le sens de la portée la plus courte. De plus, lorsque que la charge est uniformément répartie, tous les efforts devraient être pris pour optimiser l'élément premier qui reprend la charge. Pour des charges concentrées, les éléments tels pontages et autres qui forment la surface de charges sont inappropriés (Schodek, 2004).
63. La direction du système unidirectionnel devrait être optimisée selon des paramètres précis. L'un des paramètres consisterait à respecter ou à atteindre le dégagement minimum pour l'utilisation. Le deuxième élément à considérer serait le volume de matériau nécessaire. Ainsi, l'ingénieur a le choix de prendre la solution nécessitant le moins de matériau et/ou celle qui a la moins grande profondeur (Schodek, 2004).
64. Dans les appartements, pour régler le problème de hauteur libre sous les poutres, on peut disposer les éléments porteurs dans l'alignement des cloisons. Dans les immeubles à bureaux, les poutres peuvent venir affleurer le plafond. (Comité Mixte International, 1973, p-36)

#### A 2.5.4. Sous-systèmes structuraux de bois

##### A 2.5.4.1. Platelage de bois (combustible)

65. Portées possibles 1,5 à 4,5 mètres (5 à 15 pieds), longueur d'élément typique 1,5 à 3,7 mètres (5 à 12 pieds), portées typique 2,4 mètres (8 pieds);

66. Lorsque que le contreplaqué (ou OSB) a besoin d'être plus épais que  $\frac{3}{4}$  pouces, il est préférable d'utiliser le platelage de bois. Cela peut aussi être nécessaire dans les conditions suivantes :
- Si l'on veut laisser à la vue la surface recevant la charge de plancher;
  - Si un degré de résistance au feu supérieur est requis;
  - La portée peut excéder la longueur possible d'une planche de contreplaqué ou d'un contreplaqué (ou OSB);
  - Si des charges concentrées comme des véhicules ou des équipements sont présentes. (Ambrose .1993.p-162)
67. Pour l'épaisseur du platelage, utilisez le Tableau XII (classe commerciale aussi disponible, utilisée lorsque le platelage n'est pas visible) pour déterminer l'épaisseur du platelage :

Tableau XII

Sélection de l'épaisseur et de l'essence de bois du platelage pour la classe Select

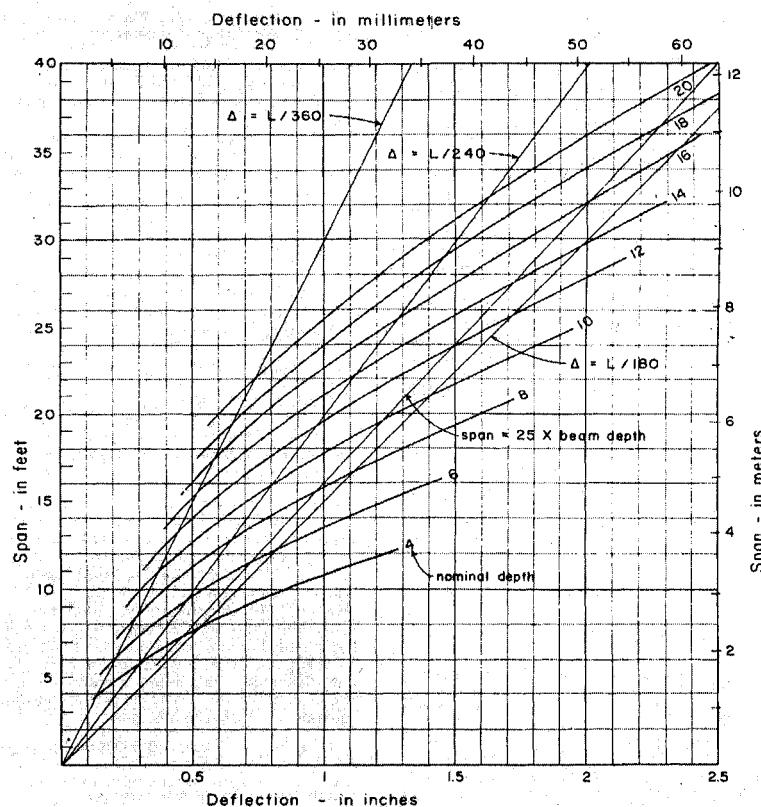
Classe Select										Sel					
	W <sub>FR</sub> Charge uniforme pondérée maximale W <sub>FR</sub> (kPa)			D.Fir-L			Hem-Fir			S-P-F			Northern		
Portée m	Épaisseur (mm) 38* 64 89			Épaisseur (mm) 38* 64 89			Épaisseur (mm) 38* 64 89			Épaisseur (mm) 38* 64 89			Épaisseur (mm) 38* 64 89		
1.0	39.5			38.3			39.5			25.4					
1.2	27.4			26.6			27.4			17.6					
1.4	20.2			19.6			20.2			13.0					
1.6	15.4			15.0			15.4			9.92	31.3				
1.8	12.2			11.8			12.2	38.5		7.84	24.8				
2.0	9.88	31.2		9.58	30.3		9.88	31.2		6.63	20.3				
2.2	8.16	25.8		7.92	25.0		8.16	25.8		5.26	16.6				
2.4	6.66	21.7		6.35	21.0		6.66	21.7		4.00	13.9	28.9			
2.6	5.85	18.5		5.56	17.9		5.85	18.5	38.3	3.19	11.9	24.6			
2.8	5.04	15.9	33.0	4.89	15.4	32.0	5.04	15.9	33.0	1.02	10.2	21.2			
3.0	4.39	13.9	28.8		13.5	27.9			13.9	28.8		8.92	18.5		
3.2		12.2	25.3		11.8	24.5			12.2	25.3		7.84	16.2		
3.4		10.8	22.4		10.5	21.7			10.8	22.4		6.94	14.4		
3.6		9.64	20.0		9.34	19.4			9.64	20.0		6.19	12.8		
3.8		8.65	17.9		8.39	17.4			8.65	17.9		5.56	11.5		
4.0		7.81	16.2		7.57	15.7				16.2					
4.2		7.14	14.7		6.92	14.2				14.2					
4.4		6.54	13.4		6.30	13.0				13.4					
4.6		6.02	12.2		5.79	11.9				12.2					
4.8		5.59	11.2		5.36	10.9				11.2					
5.0		10.4			10.0					10.4			6.65		
5.2		9.57			9.28					9.57			6.15		
5.4		8.87			8.61					8.87			5.70		
5.6		8.25			8.00					8.25			5.30		
5.8		7.69			7.46					7.69			4.94		

(Conseil canadien du bois, 2001, p.27-28)

#### A 2.5.4.2. Poutre bois plein

68. On peut approximer la profondeur nécessaire d'une poutre de bois plein avec le graphique 5. Le graphique présente les déflections estimées en fonction de la portée et de la profondeur de l'élément. Les limites de flèches pour la charge totale ( $L/240$ ) et pour la charge vive ( $L/360$ ) sont montrées. Toutefois, il faut savoir que même si les flèches sont acceptables au-delà du ratio portée/profondeur = 25, on ne va habituellement pas au-delà de cette limite. La flèche peut être trouvée pour des valeurs de  $f_b$  et  $E$  différentes de celles assumées:

$$\Delta = (f_b \text{ utilisé} / 1500) \times (1\ 500\ 000 / E_{\text{utilisé}}(\text{psi})) \times \Delta_{\text{(graphique)}}$$



Graphique 5    Estimation de la profondeur d'une poutre de bois plein en fonction de la portée<sup>15</sup>  
 (Ambrose, 1993, p. 160)

<sup>15</sup> Conditions supposées : maximum  $f_b = 10.3 \text{ MPa}$  (1500 psi) et  $E = 10.3 \text{ GPa}$  (1500 ksi)

#### A 2.5.4.3. Poutre composée

69. Les poutres composées sont formées de plusieurs poutres de bois plein. Leur nombre ne dépasse habituellement pas cinq éléments. Les résistances de ces éléments en fonction de l'essence de bois utilisée peuvent être retrouvées dans le Tableau XIII. De tels tableaux peuvent être retrouvés pour des qualités inférieures de bois (No1 et No2).

Tableau XIII  
Résistance pondérée de poutres composées

38 mm		Bois de sciage											
Essence	Dim. (b × d) mm	2 éléments			3 éléments			4 éléments			5 éléments		
		M <sub>r</sub>	V <sub>r</sub>	E <sub>sI</sub> ×10 <sup>9</sup> kN·m/kN	M <sub>r</sub>	V <sub>r</sub>	E <sub>sI</sub> ×10 <sup>9</sup> kN·m/kN	M <sub>r</sub>	V <sub>r</sub>	E <sub>sI</sub> ×10 <sup>9</sup> kN·m/kN	M <sub>r</sub>	V <sub>r</sub>	E <sub>sI</sub> ×10 <sup>9</sup> kN·m/kN
<b>Select Structural</b>													
D.Fir-L	38 × 140	5.68	10.8	217	8.52	16.2	326	11.4	21.6	434	14.2	27.0	543
	38 × 184	8.41	12.2	493	12.6	18.3	740	16.8	24.4	986	21.0	30.5	1230
	38 × 235	12.6	14.3	1030	18.9	21.4	1550	25.1	28.5	2060	31.4	35.7	2580
	38 × 286	16.9	15.8	1850	25.4	23.7	2780	33.8	31.6	3700	42.3	39.5	4630
Hem-Pir	38 × 140	5.51	9.65	209	8.26	13.3	613	11.0	17.7	417	13.8	22.1	587
	38 × 184	8.15	9.7	473	12.3	16.0	210	16.3	19.9	947	20.4	24.9	1180
	38 × 235	12.2	11.7	986	18.3	17.9	1480	24.6	23.3	1970	30.5	29.2	2470
	38 × 286	16.4	12.9	1780	24.3	19.4	2670	32.8	25.8	3560	41.0	32.8	4450
S-P-F	38 × 140	5.68	9.83	182	8.52	14.7	274	11.4	19.7	365	14.2	24.6	456
	38 × 184	8.41	11.1	414	12.6	16.6	621	16.8	22.2	829	21.0	27.7	1040
	38 × 235	12.6	13.0	863	18.9	19.4	1290	25.1	25.9	1730	31.4	32.4	2160
	38 × 286	16.9	14.3	1560	25.4	21.5	2340	33.8	28.7	3120	42.3	35.9	3900
Northern	38 × 140	5.65	8.85	190	8.47	13.3	196	7.28	17.7	261	9.12	22.1	526
	38 × 184	8.40	8.87	298	12.0	16.0	444	10.8	19.9	592	13.5	24.9	1140
	38 × 235	12.0	11.7	616	17.1	17.6	925	19.1	23.3	1200	20.2	29.2	1540
	38 × 286	16.9	12.9	1170	18.3	19.4	1670	21.7	23.3	2220	27.2	32.3	2780

(Conseil canadien du bois, 2001, p.72)

#### A 2.5.4.4. Poutre lamellé-collé (bois)

70. Ce type de poutre couvre une grande gamme de portée puisque l'on peut ajouter des lamelles presque autant que requis (Schodek, 2004, p.524). Les résistances pondérées de ces éléments peuvent être retrouvées au Tableau XIV. Ce type de tableau est disponible pour des épaisseurs de 130, 175, 215, 265, 315, et 365 mm.

Tableau XIV

## Résistances pondérées de poutre lamellé-collé

**Lamellé-collé****80 mm**

Dim. (b × d) mm	Spruce-Pine Classe de résistance 20f-E				D.Fir-L Classe de résistance 20f-E				D.Fir-L Classe de résistance 24f-E			
	M' <sub>r</sub>	V <sub>r</sub>	W <sub>r</sub> L <sup>0.18</sup>	E <sub>s</sub> I ×10 <sup>9</sup> N·mm <sup>2</sup>	M' <sub>r</sub>	V <sub>r</sub>	W <sub>r</sub> L <sup>0.18</sup>	E <sub>s</sub> I ×10 <sup>9</sup> N·mm <sup>2</sup>	M' <sub>r</sub>	V <sub>r</sub>	W <sub>r</sub> L <sup>0.18</sup>	E <sub>s</sub> I ×10 <sup>9</sup> N·mm <sup>2</sup>
	kN·m	kN	kN·m <sup>0.18</sup>		kN·m	kN	kN·m <sup>0.18</sup>		kN·m	kN	kN·m <sup>0.18</sup>	
80 × 114	3.99	9.58	59.3	102	3.99	10.9	67.7	122	4.77	10.9	67.7	129
80 × 152	7.10	12.8	75.0	241	7.10	14.6	85.7	290	8.48	14.6	85.7	307
80 × 190	11.1	16.0	90.1	471	11.1	18.2	103	567	13.3	18.2	103	599
80 × 228	16.0	19.2	105	814	16.0	21.9	120	980	19.1	21.9	120	1040
80 × 266	21.7	22.3	119	1290	21.7	25.5	136	1560	26.0	25.5	136	1640
80 × 304	28.4	25.5	132	1930	28.4	29.2	151	2320	33.9	29.2	151	2450
80 × 342	35.9	28.7	146	2750	35.9	32.8	167	3310	42.9	32.8	167	3490
80 × 380	44.4	31.9	159	3770	44.4	36.5	182	4540	53.0	36.5	182	4790
80 × 418	53.7	35.1	172	5020	53.7	40.1	197	6040	64.2	40.1	197	6380
80 × 456	63.9	38.3	185	6510	63.9	43.8	211	7840	76.4	43.8	211	8280
80 × 494	75.0	41.5	197	8280	75.0	47.4	225	9970	89.6	47.4	225	10500
80 × 532	86.9	44.7	210	10300	86.9	51.1	240	12400	104	51.1	240	13100
80 × 570	99.8	47.9	222	12700	99.8	54.7	253	15300	119	54.7	253	16200

(Conseil canadien du bois, 2001, p.27-28)

**A 2.5.4.5. Poutre Parallam**

71. Les poutres Parallam sont du bois d'ingénierie, permettant l'utilisation du bois pour de plus grandes portées. De plus, la qualité et la fiabilité de ces poutres sont supérieures à celles des poutres de bois plein.
72. Ces poutres sont disponibles pour les dimensions maximales suivantes : 20 pouces de hauteur, par 11 pouces de large, et 66 pieds de long. Les résistances pondérées de ces poutres peuvent être retrouvées au Tableau XV (TrusJoist, 2000b)

Tableau XV

## Résistances pondérées pour poutre Parallam

**PARALLAM® PSL 2.0E - 1 $\frac{3}{4}$ "**

CRITÈRES DE CALCUL	PROFONDEUR					
	9 1/4"	9 3/8"	11 1/4"	11 5/8"	14"	16"
RÉSISTANCE PONDÉRÉE AU MOMENT (lb/in)	10,325	10,860	14,945	16,555	22,590	
RÉSISTANCE PONDÉRÉE AU CISAILEMENT (lb)	5,245	5,385	6,380	6,735	7,940	
MOMENT D'INERTIE (in <sup>4</sup> )	115	125	208	244	400	
POIDS (lb/pftm)	5.1	5.2	6.2	6.5	7.7	

**PARALLAM® PSL 2.0E - 3 $\frac{1}{2}$ "**

CRITÈRES DE CALCUL	PROFONDEUR					
	9 1/4"	9 3/8"	11 1/4"	11 5/8"	14"	16"
RÉSISTANCE PONDÉRÉE AU MOMENT (lb/in)	20,655	21,720	29,890	33,105	45,180	58,145
RÉSISTANCE PONDÉRÉE AU CISAILEMENT (lb)	10,490	10,775	12,760	13,465	15,875	18,145
MOMENT D'INERTIE (in <sup>4</sup> )	231	250	415	488	800	1195
POIDS (lb/pftm)	10.1	10.4	12.3	13.0	15.3	17.5
						20.8

**PARALLAM® PSL 2.0E - 2 $\frac{11}{16}$ "**

CRITÈRES DE CALCUL	PROFONDEUR					
	9 1/4"	9 3/8"	11 1/4"	11 5/8"	14"	16"
RÉSISTANCE PONDÉRÉE AU MOMENT (lb/in)	15,860	16,680	22,955	25,420	34,695	44,645
RÉSISTANCE PONDÉRÉE AU CISAILEMENT (lb)	8,055	8,270	9,795	10,340	12,190	13,930
MOMENT D'INERTIE (in <sup>4</sup> )	177	192	319	375	615	917
POIDS (lb/pftm)	7.8	8.0	9.4	10.0	11.8	13.4
						16.0

**PARALLAM® PSL 2.0E - 5 $\frac{1}{4}$ "**

CRITÈRES DE CALCUL	PROFONDEUR					
	9 1/4"	9 3/8"	11 1/4"	11 5/8"	14"	16"
RÉSISTANCE PONDÉRÉE AU MOMENT (lb/in)	30,980	32,580	44,840	49,660	67,775	87,220
RÉSISTANCE PONDÉRÉE AU CISAILEMENT (lb)	15,735	16,160	19,135	20,200	23,815	27,215
MOMENT D'INERTIE (in <sup>4</sup> )	346	375	623	733	1,201	1,792
POIDS (lb/pftm)	15.2	15.6	18.5	19.5	23.0	26.3
						31.2

**PARALLAM® PSL 2.0E - 7"**

CRITÈRES DE CALCUL	PROFONDEUR					
	9 1/4"	9 3/8"	11 1/4"	11 5/8"	14"	16"
RÉSISTANCE PONDÉRÉE AU MOMENT (lb/in)	41,305	43,440	59,785	66,215	90,365	116,290
RÉSISTANCE PONDÉRÉE AU CISAILEMENT (lb)	20,980	21,545	25,515	26,935	31,750	36,290
MOMENT D'INERTIE (in <sup>4</sup> )	462	500	831	977	1,601	2,389
POIDS (lb/pftm)	20.2	20.8	24.6	26.0	30.6	35.0
						41.6

(TrusJoist, 2000b, p.8)

**A 2.5.4.6. Poutre LVL**

73. Les poutres LVL sont aussi des produits de bois d'ingénierie. Elles sont fournies en une seule épaisseur, mais peuvent constituer des poutres composées de manière à augmenter leur résistance. Les résistances pondérées de ces éléments peuvent être retrouvées au Tableau XVI.

Tableau XVI  
Résistances pondérées pour poutre LVL

**MICROLLAM™ LVL 1.9E - 1<sup>3/4</sup>"  
RÉSISTANCES PONDÉRÉES (DURÉE STANDARD)**

CRITERES DE CALCUL	PROFONDEUR								
	7 <sup>1/4</sup> "	9 <sup>1/4</sup> "	9 <sup>1/2</sup> "	11 <sup>1/4</sup> "	11 <sup>7/8</sup> "	14"	16"	18"	18 <sup>3/4</sup> "
RÉSISTANCE PONDÉRÉE AU MOMENT (lb/in)	5,915	9,315	9,790	13,420	14,845	20,175	25,875	32,230	34,775
RÉSISTANCE PONDÉRÉE AU CISAILLEMENT (lb)	4,035	5,150	5,285	6,260	6,610	7,790	8,905	10,015	10,435
MOMENT D'INERTIE (in <sup>4</sup> )	56	115	125	208	244	400	597	851	961
POIDS (lb/pf lin)	3.7	4.7	4.8	5.7	6.1	7.1	8.2	9.2	9.6

(TrusJoist, 2000a)

### A 2.5.5. Sous-systèmes structuraux d'acier

#### A 2.5.5.1. Tablier métallique (sans dalle de béton)

- 74. Les tabliers métalliques existent en une multitude de profondeurs et sont de longueurs variables. Ils peuvent donc être faits sur mesure pour le chantier en cours. Souvent, le tablier à lui seul n'est pas suffisant pour assurer l'effet de diaphragme. Il faudrait plutôt contreventer les poutrelles situées au dessous. (Fondation pour la formation en charpentes d'acier, 1990).
- 75. Les tabliers métalliques utilisés sans dalle de béton servent souvent de surface de chargement pour les toits. Le Tableau XVII donne la résistance en kPa en fonction de la portée du tablier métallique. Un autre tableau est disponible pour un tablier d'une profondeur de 76 mm.

Tableau XVII

Résistance pondérée du tablier métallique (38 mm de profondeur) sans dalle de béton en fonction de son épaisseur et de la portée

<b>Épaisseur (mm)</b>	<b>PORTEE (mm)</b>												
	<b>PORTEE SIMPLE</b>												
	1200	1350	1500	1650	1800	1950	2100	2250	2400	2550	2700	2850	3000
0,76	F	10,93	8,63	6,99	5,78	4,86	4,14						
	D	8,05	5,65	4,12	3,10	2,38	1,88						
0,91	F	12,57	9,93	8,05	6,65	5,59	4,76	4,10					
	D	9,69	6,81	4,96	3,73	2,87	2,26	1,81					
1,21	F	17,22	13,61	11,02	9,11	7,65	6,62	5,62	4,90				
	D	13,51	9,49	6,92	5,20	4,00	3,15	2,52	2,05				
1,52	F	21,63	17,09	13,84	11,44	9,61	8,19	7,06	6,15	5,41			
	D	16,74	11,76	8,57	6,44	4,96	3,90	3,12	2,54	2,09			
	<b>PORTEE DOUBLE</b>												
	1200	1350	1500	1650	1800	1950	2100	2250	2400	2550	2700	2850	3000
0,76	F	11,20	8,91	7,25	6,02	5,07	4,33	3,74					
	D	19,16	13,46	9,81	7,37	5,68	4,46	3,57					
0,91	F	12,70	10,11	8,23	6,83	5,75	4,91	4,24	3,70				
	D	23,08	16,21	11,82	8,88	6,84	5,38	4,31	3,50				
1,21	F	16,92	13,47	10,96	9,10	7,67	6,55	5,66	4,93	4,34	3,85		
	D	32,17	22,59	16,47	12,38	9,53	7,50	6,00	4,88	4,02	3,35		
1,52	F	20,91	16,64	13,55	11,24	9,47	8,09	6,99	6,10	5,37	4,76	4,25	3,81
	D	39,86	28,00	20,41	15,33	11,81	9,29	7,44	6,05	4,98	4,15	3,50	2,98
	<b>PORTEE TRIPLE</b>												
	1200	1350	1500	1650	1800	1950	2100	2250	2400	2550	2700	2850	3000
0,76	F	13,90	11,07	9,03	7,49	6,32	5,40	4,67	4,07	3,58			
	D	15,18	10,66	7,77	5,84	4,50	3,54	2,83	2,30	1,90			
0,91	F	15,77	12,57	10,24	8,50	7,17	6,12	5,29	4,62	4,06	3,60		
	D	18,29	12,85	9,37	7,04	5,42	4,28	3,41	2,77	2,29	1,91		
1,21	F	21,01	16,74	13,84	11,33	9,55	8,16	7,05	6,15	5,42	4,80	4,29	3,85
	D	25,49	17,90	13,05	9,81	7,55	5,94	4,76	3,87	3,19	2,66	2,24	1,90
1,52	F	25,95	20,68	16,96	14,00	11,80	10,08	8,71	7,81	6,69	5,94	5,30	4,76
	D	31,59	22,19	16,17	12,15	9,36	7,36	5,89	4,79	3,95	3,29	2,77	2,36

(Canam - Poutrelles et tablier métallique, 2005)

#### A 2.5.6. Tablier métallique (avec dalle de béton)

76. Il est habituellement avantageux d'utiliser les sections composites acier/béton lorsqu'une dalle de béton est requise pour une raison ou pour une autre. Elles permettent de franchir de plus grandes portées tout en utilisant la même quantité de matériau (Lin & Stotesbury, 1988). Le tablier métallique doit toutefois être conçu de façon à obtenir un effet composite important.
77. Souvent, on néglige l'effet composite (tablier métallique non conçu pour l'effet composite) entre le pontage métallique et la dalle de béton. Les portées entre les poutrelles sont d'environ 6 à 8 pieds (effet composite négligé) (Lin & Stotesbury, 1988, p.186).
78. Le Tableau XVIII montre la résistance pondérée du tablier métallique d'une profondeur de 14 mm en fonction de l'épaisseur de dalle, du treillis et de la portée utilisée. Ces tableaux sont aussi disponibles pour des profondeurs de tablier métallique de 38, 51 et 76mm et ce pour du béton de densité normale et faible.

Tableau XVIII

Résistance pondérée du tablier métallique d'une profondeur de 14 mm en fonction de l'épaisseur de dalle, du treillis et de la portée

Épais. dalle (mm)	Poids propre (kPa)	Treillis métallique	Diam. des fils (mm)	Aire treillis (mm <sup>2</sup> /m)	PORTÉE (mm)						
					700	750	800	850	900	950	1 000
65	1,47	152 x 152 MW 13,3 x MW 13,3	4,10	88,7*	11,85	10,32	9,07	8,03	7,17	6,49	5,80
		152 x 152 MW 18,7 x MW 18,7	4,88	124,5	20,00	18,61	16,36	14,49	12,93	11,80	10,47
		152 x 152 MW 25,8 x MW 25,8	5,74	171,5	20,00	18,75	17,58	16,55	15,63	14,81	13,71
75	1,71	152 x 152 MW 13,3 x MW 13,3	4,10	88,7*	14,22	12,38	10,88	9,64	8,60	7,72	6,97
		152 x 152 MW 18,7 x MW 18,7	4,88	124,5*	19,35	16,86	14,82	13,13	11,71	10,51	9,48
		152 x 152 MW 25,8 x MW 25,8	5,74	171,5	20,00	20,00	20,00	19,09	18,03	17,08	16,23
90	2,06	152 x 152 MW 18,7 x MW 18,7	4,88	124,5*	20,00	20,00	18,84	16,51	14,73	13,22	11,93
		152 x 152 MW 25,8 x MW 25,8	5,74	171,5	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	19,48
100	2,30	152 x 152 MW 18,7 x MW 18,7	4,88	124,5*	20,00	20,00	20,00	18,77	16,74	15,02	13,56
		152 x 152 MW 25,8 x MW 25,8	5,74	171,5*	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	18,14

(Canam - Poutrelles et tablier métallique, 2005)

#### A 2.5.7. Poutrelle ajourée

79. Ce système est très économique pour des charges relativement faibles et uniformément distribuées (Schodex. 2004. p.534).
80. Il sera souvent plus économique, lorsqu'une partie de la structure est plus chargée, de seulement réduire l'espacement des poutrelles au lieu d'augmenter la section (Fondation pour la formation en charpentes d'acier, 1990).
81. Il est courant d'allonger la semelle inférieure de la poutrelle se connectant à une colonne afin de donner la stabilité à la colonne.
82. Des tableaux tels le Tableau XIX sont disponibles pour des portées de poutrelles allant de 3 à 46 mètres. Ce tableau fournit la masse par mètre des poutrelles en fonction de leur portée, de leur profondeur et de leur résistance.

Tableau XIX

Masse (en kg/m) des poutrelles d'acier ajourées en fonction de leur portée, de leur profondeur et de leur résistance

Portée (m)	Profondeur de la poutrelle (mm)	Charge pondérée (kN/m) Charge de service (kN/m)												
		4,5 3,0	6,0 4,0	7,5 5,0	9,0 6,0	10,5 7,0	12,0 8,0	13,5 9,0	15,0 10,0	16,5 11,0	18,0 12,0	19,5 13,0	21,0 14,0	
4	200	7,8 105	7,8 79	8,4 73	8,8 64	10,3 65	11,5 64	12,8 65	14,4 65	15,8 65	17,3 64	18,8 64	20,4 65	22,1 64
	250	8,0 170	8,0 128	8,0 102	8,0 85	8,2 73	8,8 74	9,7 68	11,3 75	12,0 72	12,6 69	13,5 67	13,9 66	14,4 66
	300	9,6 200	9,6 200	9,6 183	9,6 153	9,6 131	9,6 115	9,6 102	10,3 96	10,6 90	12,4 98	13,4 95	13,4 88	13,7 86
	350	9,8 200	9,8 200	9,8 200	9,8 181	9,8 159	10,1 141	10,1 127	10,5 121	10,5 111	11,8 112	12,9 116	13,6 114	
	400	9,9 200	9,9 200	9,9 200	9,9 200	9,9 200	10,3 187	10,3 168	10,3 153	10,4 140	10,9 135	10,9 128	10,9 120	
	450	10,1 200	10,1 200	10,1 200	10,1 200	10,4 200	10,5 200	10,5 195	10,5 179	10,7 165	11,1 153	11,2 153	11,2 150	
	500	10,3 200	10,3 200	10,3 200	10,3 200	10,6 200	10,6 200	10,7 200	10,7 200	10,9 200	10,9 200	11,3 200	11,3 191	11,6 178

(Canam - Solutions + Service, 2003)

#### A 2.5.8. Poutre en I

83. Ces poutres sont largement utilisées dans les constructions d'acier. Un système fréquemment utilisé avec ces poutres est le système Gerber (Voir figure 54). Avec un minimum de 3 baies disponibles, ce système consiste à faire continuer en porte-à-faux des poutres de deux baies vers une baie centrale commune. On ajoute ensuite une poutre en portée simple aux extrémités des deux poutres en porte-à-faux. Les avantages sont les suivants :

- o Simplifie les connexions;
- o Facilite le montage;
- o Quantité de matériau réduite

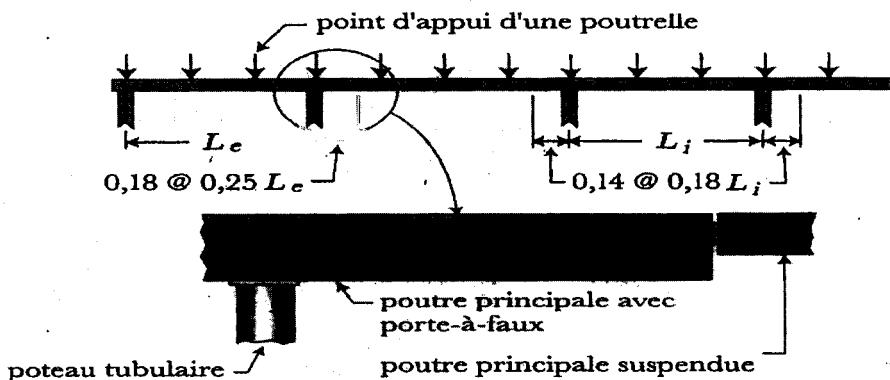


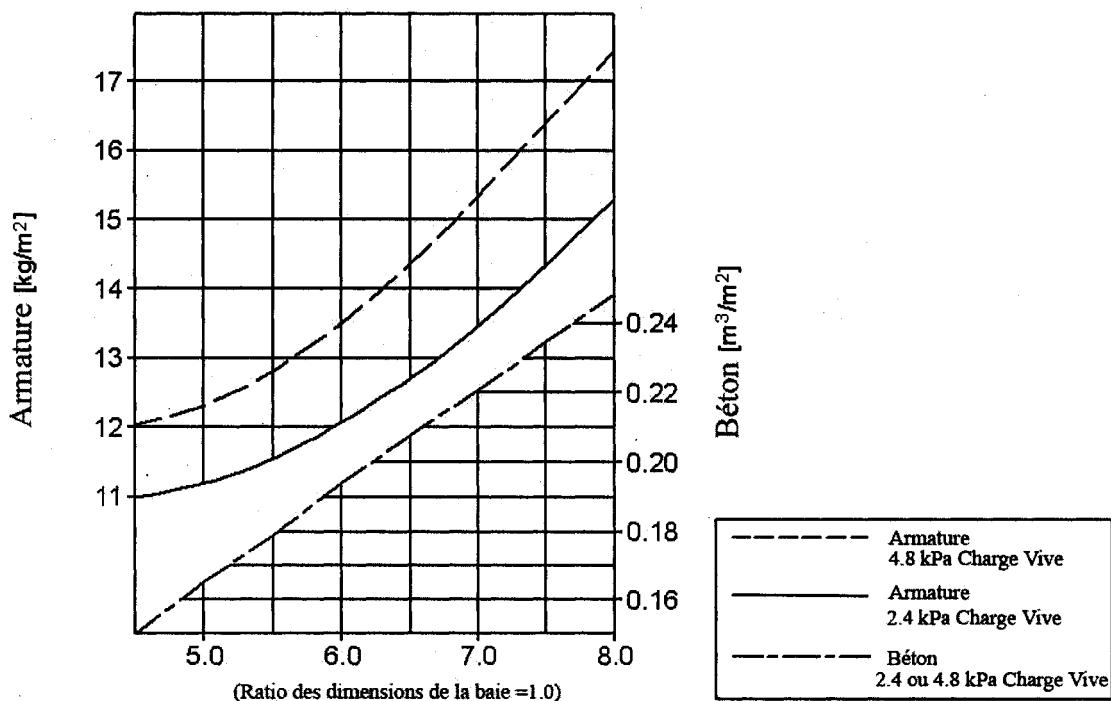
Figure 54 Système Gerber : proportions des porte-à-faux

(Fondation pour la formation en charpentes d'acier, 1990)

### A 2.5.9. Sous-systèmes structuraux en béton

#### A 2.5.9.1. Dalle champignon (Flat Plate)

84. Une trame structurale régulière est souhaitable, mais le positionnement des colonnes est flexible. Souvent, c'est le poinçonnement à l'endroit de jonction des colonnes et dalles qui limitent les possibilités (Schodek. 2004. p-524).
85. Ce système est souvent utilisé pour des bâtiments à logement ou pour des dortoirs (Schodek. 2004. p-524).
86. Pour l'intégration des services, le système devient très avantageux puisqu'aucune poutre ou abaque ne gêne le passage des conduits.
87. Les avantages d'un tel système sont les suivants :
  - Réduction de la hauteur nécessaire à la structure;
  - Les coffrages sont les plus simples.
88. Les inconvénients d'un tel système sont les suivants :
  - La stabilité latérale n'est pas assurée pour des bâtiments qui ne sont pas de faible hauteur (bâtiment de moins de 15 à 20 étages) (Ravi, 1998, p.5 à 28);
  - Requiert une grande quantité d'acier d'armature (Schodek. 2004. p-524).
89. Des graphiques donnant la masse d'armatures en  $\text{kg/m}^2$  et la profondeur de la dalle de béton sont fournis par l'Association canadienne de ciment Portland pour des baies rectangulaires et carrées. Le graphique 6 peut être utilisé pour des baies carrées.



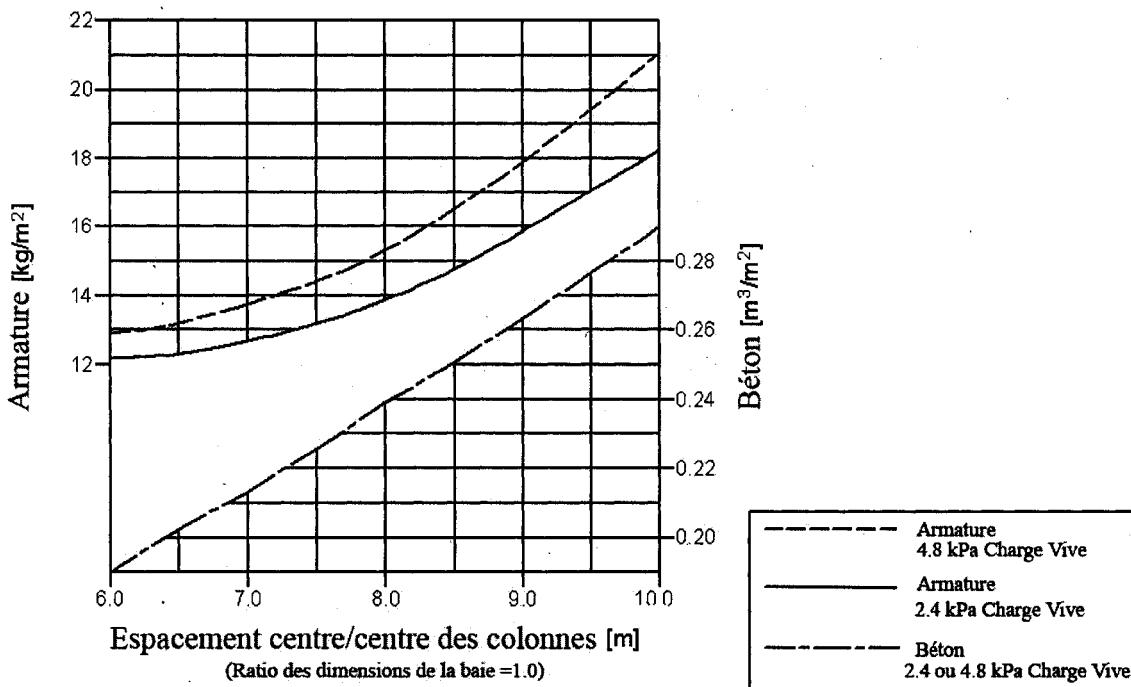
**Graphique 6** Armature en kg/m<sup>2</sup> et épaisseur de la dalle plate de béton en fonction des portées de la baie et ce pour des charges vives de 2,4 kPa et 4,8 kPa

(Adapté de David A. Fanella, 2000)

#### A 2.5.9.2. Dalle champignon avec abaque (Flat slab)

90. Cette solution présente les mêmes caractéristiques que les dalles plates sauf que l'on vient augmenter la résistance au poinçonnement aux jonctions colonnes/dalle en ajoutant des abaques. Avec cet ajout, le système structural peut reprendre de grandes charges. La résistance latérale est meilleure (Schodek, 2004, p-524).
91. Le système convient aux charges d'utilisation de bureaux ou de bâtiments industriels (Shaeffer, 1992).
92. L'abaque a généralement comme longueur l'équivalent du tiers de la portée de la dalle (Shaeffer, 1992).
93. Il est possible, avec ce système, d'avoir des colonnes qui sont déplacées de leur axe structural jusqu'à 20 % de la portée de la dalle. Toutefois, la pile de colonnes entière doit être déplacée (Shaeffer, 1992).
94. Des graphiques donnant la masse d'armatures en kg/m<sup>2</sup> et la profondeur de la dalle de béton sont fournis par l'Association canadienne de ciment Portland pour

des baies rectangulaires et carrées. Le graphique 7 peut être utilisé pour des baies carrées.



Graphique 7      Armature en kg/m<sup>2</sup> et épaisseur de la dalle plate de béton avec abaque en fonction des portées de la baie et ce pour des charges vives de 2,4 kPa et 4,8 kPa

(Adapté de David A. Fanella, 2000)

#### A 2.5.9.3. Dalle nervurée

95. Cette méthode utilise des coffrages métalliques déjà formés. Des poutres ayant besoin d'être plus profondes à certains endroits peuvent être faites facilement. Ce type de système est particulièrement efficace pour transmettre les charges latérales (Schodek. 2004. p-524).
96. Ce système requiert une dalle de 3 à 4 pouces, des poutrelles dont les portées vont de 30 à 45 pieds (précontraint 40 à 60 pieds), et poutres avec portées de 30 à 40 pieds. La profondeur d'un tel système varie de 18 à 24 pouces (Lin et al., 1988, p-184).
97. Quelques règles du pouce (Stommel, 2003) :
  - la hauteur en pouce  $\cong$  la portée en pied;
  - la profondeur des nervures ne doit pas excéder  $3,5 \times$  épaisseur des nervures;

- l'épaisseur des nervures peut être déterminée ainsi :  $b \cong (0.45 \text{ à } 0.65) \times d$
  - l'espacement entre les nervures ne doit pas dépasser 30 pouces et les espacements standards sont de 500 à 760 mm (20 à 30 pouces);
  - les hauteurs standards de nervures : 150, 200, 250, 300, 350, 400, 500 mm;
98. L'épaisseur de la dalle et l'épaisseur totale des poutres peuvent être trouvées en fonction des portées de la baie au Tableau XX.

Tableau XX

## Épaisseur du système de dalle nervurée

Poutrelle	Portée (m)	Poutre	Épaisseur de la dalle (mm)	Épaisseur totale des poutres (mm)
	5.5	8.5	229	559
	6	9.8	280	660
	7.3	11	356	711
	8.5	12.2	432	813

(Shaeffer, 1992, p.31)

99. Une des inconnues lors de la conception préliminaire est le poids propre du système structural. En béton, ce poids propre est souvent très important. Le Tableau XXI résume le poids propre que l'on peut utiliser pour une première itération.

Tableau XXI

Poids propre moyen du système à dalle nervurée en fonction de l'épaisseur de la dalle et la profondeur des nervures

Depth of joist below slab, in	Thickness of slab, in	Average weight of floor	
		psf	kN/m <sup>2</sup>
6	2	42	2.01
	2½	48	2.30
8	2	48	2.30
	2½	54	2.59
10	2	55	2.63
	2½	61	2.92
12	2	61	2.92
	2½	67	3.21
	3	73	3.50
14	2	69	3.31
	2½	75	3.60
	3	81	3.88

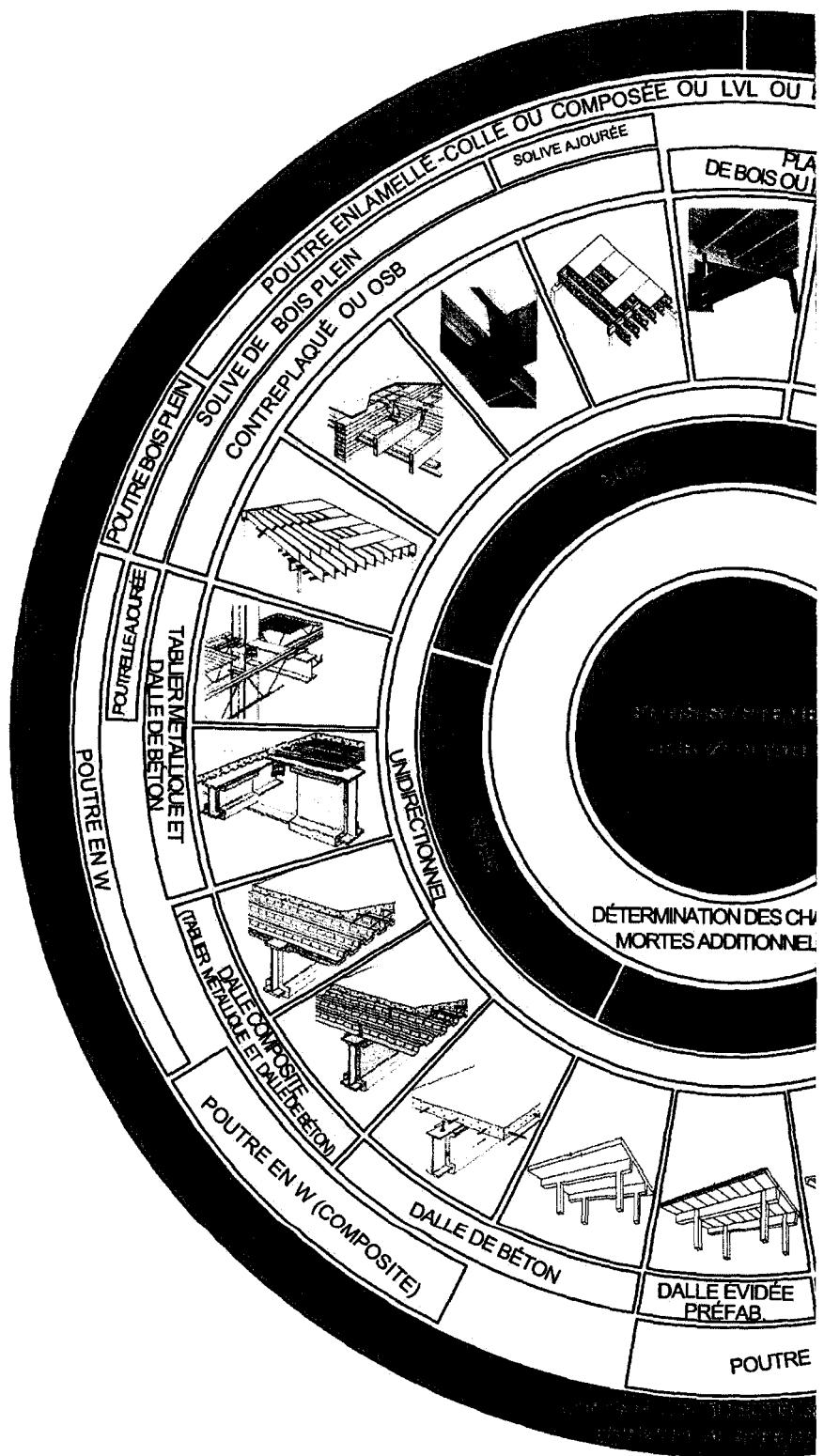
(Stommel, 2003)

100. Il est recommandé de mettre des entremises de béton renforcées aux positions décrites plus bas (Stommel, 2003). Elles devraient être renforcées avec au moins une barre #4 en haut et en bas.

- Portée < 20 pieds : aucune
- Portée entre 20 et 30 pieds : à mi-portée
- Portée > 30 pieds : aux tiers de la portée.

### **ANNEXE 3**

**Agrandi de l'arbre circulaire de décision amenant au choix des sous-systèmes horizontaux**



#### **ANNEXE 4**

**Définition des groupes utilisés pour la création des liens entre les nœuds pour la définition des éléments de bases pour deux sous-systèmes horizontaux**

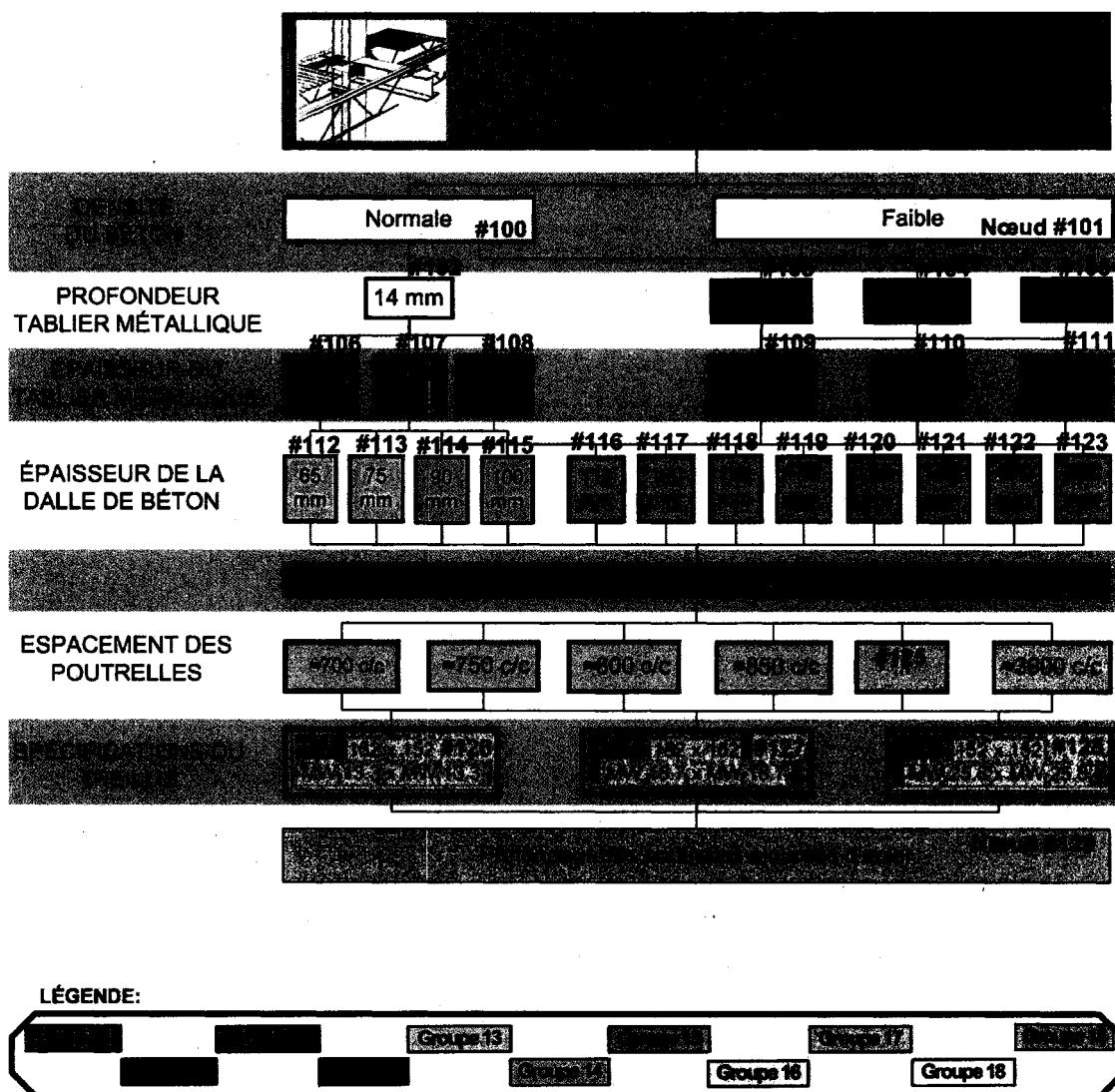


Figure 55 Numérotation des groupes et nœuds utilisés pour l'implémentation du sous-système de dalle de béton sur tablier métallique supportés par des poutrelles d'acier ajourées et poutre en I

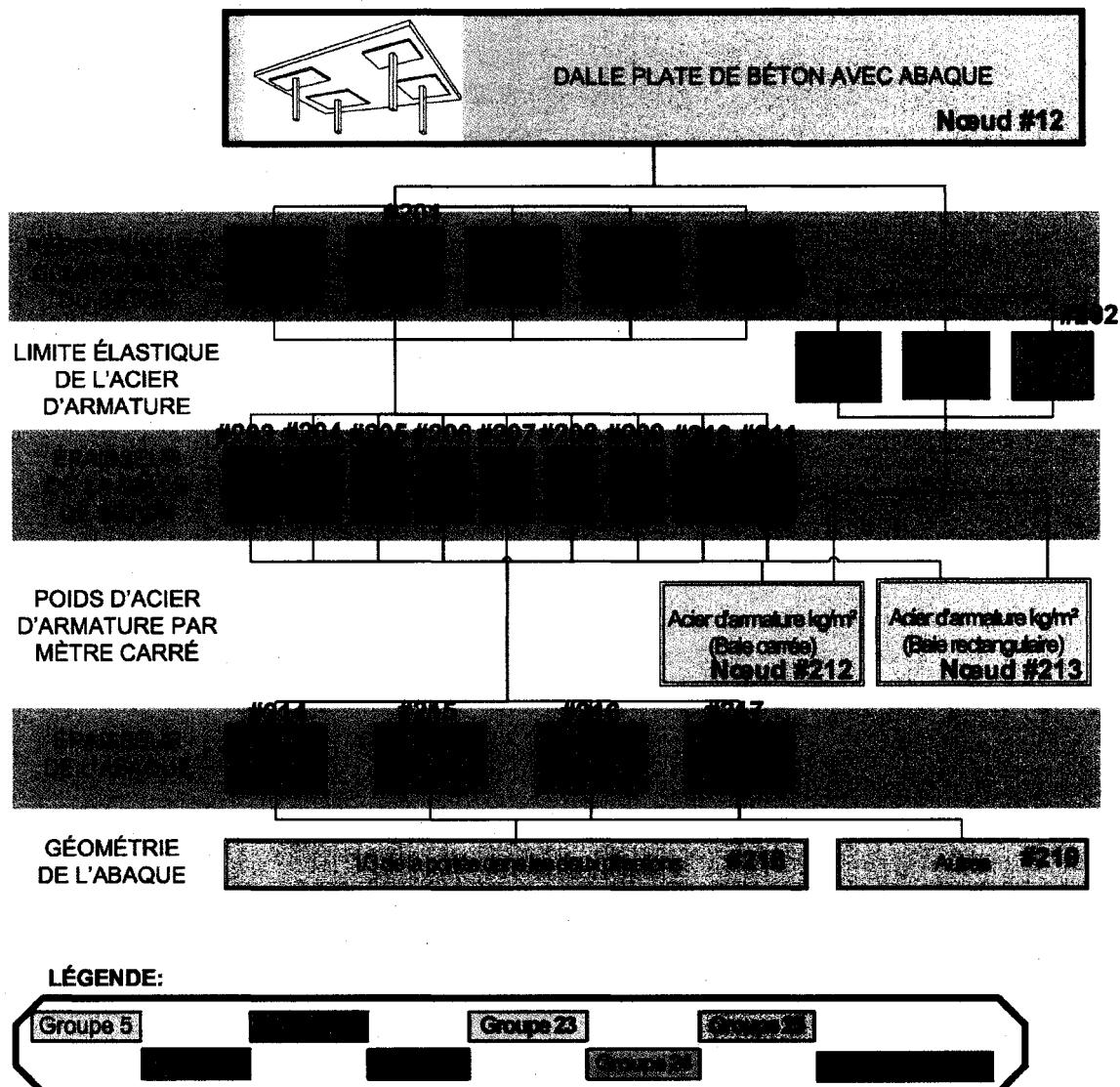


Figure 56      Numérotation des groupes et nœuds utilisés pour l'implémentation du sous-système de dalle plate de béton avec abaque

## **ANNEXE 5**

### **Détails des attributs utilisés pour les systèmes de plancher implémentés**

**Attributs généraux inclus dans la classe SlabElement qui s'applique à tous les systèmes de planchers**

Tableau XXII

Attributs utilisés pour la classe **SlabElement** relatifs aux connaissances

Attributs		Type	Unité	Description
Français	Anglais			
chargeVivePermSupp	livePlusDeadLoad s	Double	kPa	Charge vive la plus élevée sur l'élément de dalle + la charge permanente additionnelle (Cloison, mécanique, etc.).
petiteDimBaie	shortBayDim	Double	mm	Petite dimension de la baie.
grandeDimBaie	longBayDim	Double	mm	Grande dimension de la baie.
profondeurSysteme	slabElementDepth	Double	mm	Profondeur du système établie par une fonction de la sous-classe de chaque type de plancher.
directionnel	directional	Enum	N/A	Nombre de direction sur lesquelles l'élément de dalle porte. - unidirectionnel - bidirectionnel
chargeVive	LiveLoad	Double	kPa	Charge vive affectant l'élément de dalle en fonction de l'usage.

**Système 1 - Dalle de béton sur tablier métallique supportés par des poutrelles ajourées d'acier et poutre en W**

Nom de la sous-classe (français): **DalleBetonTablierMetalPoutrellePoutreW**

Nom de la sous-classe (anglais) : **ConcreteSlabSteelDeckOpenWebJoistWBeam**

Superclasse : **SlabElement**

Tableau XXIII

Attributs utilisés pour la sous-classe **DalleBetonTablierMetalPoutrellePoutreW**

Attributs		Type	Unité	Description
Français	Anglais			
actionTablierMetal	steelDeckAction	String	N/A	Relation entre le pontage et la dalle de béton. - Composite - Non-composite
typeTablierMetal	steelDeckType	String	N/A	Épaisseur du pontage. - Type_28      - Type_22 - Type_26      - Type_20 - Type_24      - Type_18
profondeurTablier	SteelDeckDepth	Double	mm	Profondeur du tablier métallique.
pPPTablierDalle	fSWSteelDeckSlab	Double	kPa	Poids propre pondéré de la dalle de béton + le tablier métallique.

Tableau XXIII (suite)

Attributs		Type	Unité	Description
Français	Anglais			
typeBeton	concreteType	String	N/A	Type de béton (p/r à la densité). - Normal            - Faible
epaissDalleBeton	concSlabDepth	Double	mm	Épaisseur de la dalle de béton sur le tablier métallique (inclus l'épaisseur du tablier).
				- 65            - 115            - 140
				- 75            - 120            - 150
resistPondDalle	slabFactResist	Double	kPa	Résistance pondérée de la dalle de béton avec le tablier métallique et treillis
				Spécification du treillis à utiliser dans la dalle de béton sur tablier métallique. - 152_152_MW13_MW13 - 152_152_MW18_MW18 - 152_152_MW25_MW25
porteePoutrelle	openWebJoistSpan	Double	mm	Portée des poutrelles ajourées (2 possibilités). - PetiteDimBaie - GrandeDimBaie
porteePerpendiculairePoutrelle	openWebJoistPerpendicularSpan	Double	Mm	Portée perpendiculaire aux poutrelles ajourées

Tableau XXIII (suite)

Attributs		Type	Unité	Description
Français	Anglais			
nombrePoutrelle	openWebJoistQuantity	Integer	N/A	Nombre de poutrelles dans l'élément de dalle.
espacePoutrelle	openWebJoistSpacing	Double	mm	Espacement des poutrelles
poidsPoutrelle	openWebJoistWeight	Double	kg/m	Poids propre de chacune des poutrelles de la baie par mètre de poutrelle.
profondPoutrelle	openWebJoistHeight	Double	mm	Profondeur de la poutrelle.
chargePoutrelle	OpenWebJoistLoad	Double	kN/m	Charge sur la poutrelle en fonction de l'espacement.
resistPoutrelle	OpenWebJoistResist	Double	kN/m	Résistance de la poutrelle.

## Système 2 - Dalle plate de béton avec abaque

Nom de la classe (français): **DallePlateBetonAvecAbaque**

Nom de la classe (anglais) : **FlatSlab**

Superclasse : **SlabElement**

Tableau XXIV

Attributs utilisés pour la sous-classe **DallePlateBetonAvecAbaque**

Attributs		Type	Unité	Description
Français	Anglais			
resistanceBeton	concreteResist	String	MPa	Résistance en compression du béton (seul le 25 MPa est disponible).
				- 20      - 35
				- 25      - 40
		Double	mm	Hauteur de la surépaisseur de la dalle à l'endroit des colonnes.
epaissAbaque	dropPanelDepth			- 55      - 160
				- 110      - 205
epaissDalleBeton	concSlabDepth	Double	mm	Épaisseur de la dalle de béton.
diaMinColOuChap	minDiaColOrCapit			Diamètre minimum de la colonne supportant la dalle (pour respecter la résistance en cisaillement de la dalle)

Tableau XXV (suite)

Attributs		Type	Unité	Description
Français	Anglais			
grandeDimAbaque	dropPanelLongDim	Double	mm	Grande dimension de l'abaque.
petiteDimAbaque	dropPanelShortDim	Double	mm	Petite dimension de l'abaque.
contrainteElastArm	reinfStressLimit	Integer	MPa	Résistance élastique de l'acier d'armature (seule 400 est disponible)
				- 300      - 450 - 400
poidsArmatureParMC	reinfWeightPerSM	Double	kg/m <sup>2</sup>	Poids de l'armature, en kg, par mètre carré.

**Système 3 - Platelage de bois sur poutrelles et poutres de bois (PSL, LVL, lamellée-collée, composée)**

Nom de la classe (français): **PlatelageBoisPoutrelleEtPoutreBois**

Nom de la classe (anglais) : **WoodDeckingWoodGirderAndBeam**

Superclasse : **SlabElement**

Tableau XXVI

Attributs utilisés dans la sous-classe **PlatelageBoisPoutrelleEtPoutreBois**

Attributs		Type	Unité	Description
Français	Anglais			
porteePoutreRepet	girderSpan	Double	mm	Portée des poutres de servent de poutrelles.
epaisseurPlatelage	woodDeckingDepth	Double	mm	Épaisseur du platelage de bois - 38                    - 89 - 64
essencePlatelage	woodDeckSpecies	String	N/A	Type de bois utilisé - D-Fir-L            - S-P-F - Hem-Fir           - Northern
classePlatelage	woodDeckClass	String	N/A	Classe du platelage de bois. - Select - Commercial
resistPlatelage	woodDeckResist	Double	kPa	Résistance du platelage sélectionné.

Tableau XXVII (suite)

Attributs		Type	Unité	Description
Français	Anglais			
espacePoutreRepet	girderSpacing	Double	mm	Espacement des poutres agissant à titre de poutrelles.
profPoutreRepet	girderDepth	Double	mm	Profondeur des poutres agissant à titre de poutrelles.
pPPPlatelage	fSWWoodDeck	Double	kPa	Poids propre pondéré du platelage de bois.
chargePoutreRepet	girderLoad	Double	kN/m	Charge pondérée en kN/m sur les poutres (poutrelles).
essencePoutreRepet	giderSpecies	String	N/A	Essence de bois des poutres agissant à titre de poutrelles
mfPoutreRepet	mfGirder	Double	kN.m	Moment fléchissant sur les poutres (poutrelles).
mrPoutreRepet	mrGirder	Double	kN.m	Moment résistant pondéré sur les poutres (poutrelles).
largeurPoutreRepet	girderWidth	Double	mm	Largeur des poutres (poutrelles).
profPoutreRepet	Girderdepth	Double	mm	Profondeur des poutres (poutrelles).

## **ANNEXE 6**

### **Présentation des arbres de connaissances détaillés**

## Sous-système de dalle de béton sur tablier métallique supporté par des poutrelles et poutres en I

Figure 57

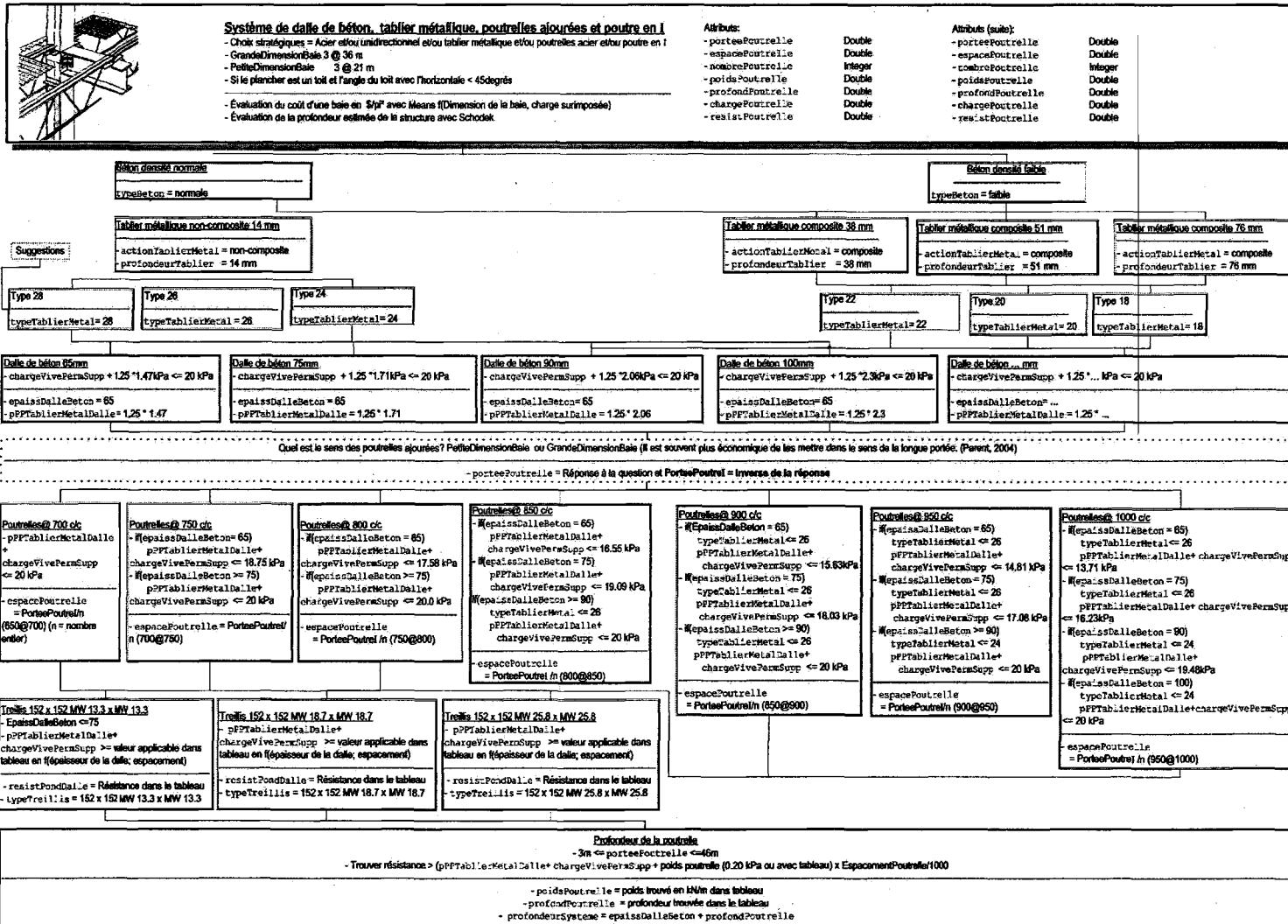
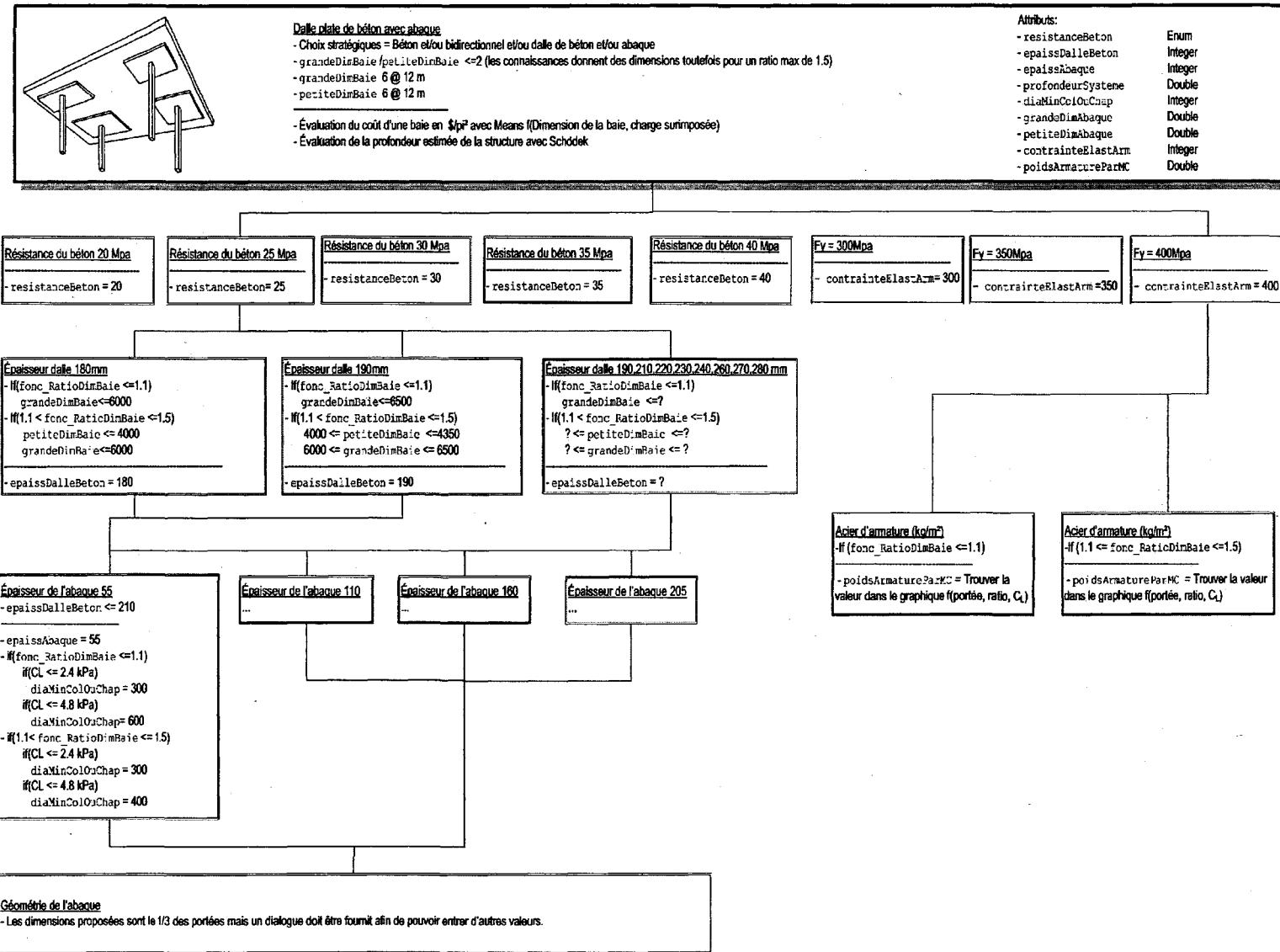


Figure 58

Sous-système de dalle plate de béton avec abaque



## **ANNEXE 7**

**Présentation d'exemples de méthodes implémentées  
pour deux sous-systèmes structuraux de plancher**

#### **Exemples de code utilisé pour l'implémentation :**

#### **Nœud décisionnel numéro 4 (Voir annexe 4)**

```
        if(sElement.getshortBayDim()>=3000 &&
           sElement.getshortBayDim()<=21000)
           r = true;
    }

}

catch (CacheException e)
{
    System.out.println(e.getMessage());
}

return r;
}

public BuildingEntity Apply(BuildingEntity be)
{
    SlabElement oldEntity = null;
    ConcreteSlabSteelDeckOpenWebJoistWBeam newEntity = null;

    try
    {
        if (be.gettype().equals("SlabElement"))
        {
            // keep a copy of current version
            oldEntity = (SlabElement)be;

            newEntity = new ConcreteSlabSteelDeckOpenWebJoistWBeam(
                Globals.getDatabase());
            newEntity.setname(oldEntity.getname());
            newEntity.setauthor(oldEntity.getauthor());

            newEntity.setslabElementDepth(oldEntity.getslabElemen-
tDepth());

            newEntity.setlivePlusDeadLoads(oldEntity.getlivePlusD-
eadLoads());

            newEntity.setlongBayDim(oldEntity.getlongBayDim());
            newEntity.setmaterial(oldEntity.getmaterial());

            newEntity.getposList().addAll(oldEntity.getposList());
            newEntity.getstructuralAssemblyList().addAll(

```

```
    oldEntity.getstructuralAssemblyList());  
  
    newEntity.getlineConnectionList().addAll(  
        oldEntity.getlineConnectionList());  
  
    newEntity.getnodeConnectionList().addAll(  
        oldEntity.getnodeConnectionList());  
  
    newEntity.getposList().addAll(oldEntity.getposList())  
;  
    newEntity.setshortBayDim(oldEntity.getshortBayDim());  
    newEntity.setdirectional(oldEntity.getdirectional());  
  
    // make changes to new version  
    newEntity.settype("ConcreteSlabSteelDeckOpenWebJoistWBeam");  
    // set creator decision of new version  
    newEntity.setcreatorDecision(name);  
    // add previous version to list of previous versions  
    newEntity.setpreviousVersion(oldEntity);  
  
    // save new version  
    newEntity._save();  
  
    // replace old with new in current context + graph  
    Globals.getGraphBuilder().replaceInAssembly(  
        (StructuralElement)oldEntity,(StructuralElement)newEntity);  
  
    // recopy to original object to return  
    be = newEntity;  
}  
}  
  
catch (CacheException e)  
{  
    e.printStackTrace();  
    System.out.println(e.getMessage());  
}  
  
return be;  
}
```

```

public String profondeurEstimee(SlabElement se) {
    double max = 0.0;
    double min = 0.0;

    try {
        if (se.getlongBayDim() != null) {
            max = se.getlongBayDim()/18;
            min = se.getlongBayDim()/22;
        }
    }

    catch (CacheException e)
    {
        System.out.println(e.getMessage());
    }

    return ("Profondeur estimée de " + min + " à " +max+ " .");
}

public String getEvaluationToolTip()
{
    String tooltip = super.getEvaluationToolTip();
    double coutParPiCarre = 0.0;
    double profondeurStructure = 0.0;
    SlabElement sElement = null;
    BuildingEntity be = null;

    be = Globals.getPickedEntity();

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

            if (sElement.getshortBayDim() != 0.0 &&
                sElement.getlongBayDim() != 0.0 &&
                sElement.getlivePlusDeadLoads() != 0.0)
            {
                double courteDim = dimensionTable1
                    (sElement.getshortBayDim());
                double longueDim = dimensionTable2
                    (sElement.getlongBayDim());
                double chargeSurimposee = chargeTable(1.45 +
                    sElement.getLiveLoad());

                //Requête SQL!!!!!!!
                String input = null;

                // Needed to map a value to the string
                // displayed in the dialog
                LinkedHashMap results = new LinkedHashMap();
            }
        }
    }
}

```

```

try
{
    // connect to the database
    Connection cc = DriverManager.getConnection
        ("jdbc:Cache://localhost:1972/DKM",
         "_SYSTEM", "SYS");

    // Create the SQL query that will give the
    // desired results
    PreparedStatement ps =
        cc.prepareStatement("SELECT
            Dprofondeur, EcoutParPiedCarré FROM
            tables.CoutConcreteSlabSteelDeckOpenWeb
            Joist " + "WHERE ApetiteBaiedim = " +
            courteDim + " AND BlongBaiedim = " +
            longueDim + " AND CchargeSurimposee = " +
            + chargeSurimposee);

    // execute the query
    java.sql.ResultSet rs = ps.executeQuery();

    // collect the values from the resultSet
    rs.next();
    profondeurStructure = (double)
        rs.getFloat("Dprofondeur");
    coutParPiCarre =
        (double)rs.getFloat("EcoutParPiedCarré");

    tooltip += "<p style='color: red; margin:
        3px;'>&nbsp;Coût : " + Math.floor
        ( 100 * coutParPiCarre+.5)/100 +
        "$ /pied carré</p>";

    tooltip += "<p style='color: green; margin:
        3px;'>&nbsp; N.B. Coût basé sur
        une baie de " + courteDim + "mm x
        " + longueDim + "mm avec une
        charge surimposée de " +
        chargeSurimposee + "kPa </p>";

    tooltip += "<p
        style='color: red; margin:
        3px;'>&nbsp;Profondeur de
        structure estimée: </p>";

    tooltip += "<p style='color: green; margin:
        3px;'>&nbsp; - RSMeans: " +
        (int)profondeurStructure + "mm
        </p>";

}

```

```
        catch (SQLException e)
        {
            System.out.println(e.getMessage());

            tooltip += "<p style='color: green;
                        margin: 3px;'>&nbsp;Profondeur
                        estimée: </p>";
            tooltip += "<p style='color: red; margin:
                        3px;'>&nbsp; RSMeans: N/D
                        </p>";
        }

        tooltip += "<p style='color: green; margin:
                    3px;'>&nbsp; - Schodek: min " +
                    (int)((sElement.getLongBayDim()/22) +
                    (sElement.getLongBayDim()/50)) + "mm
                    et max " +
                    (int)((sElement.getLongBayDim()/18) +
                    (sElement.getLongBayDim()/30))+"mm
                    </p></html>";

    }

}

catch (CacheException e)
{
    System.out.println(e.getMessage());
}

return tooltip;
}
```

### Nœud décisionnel numéro 124 (Voir annexe 4)

```

package knowledge_ConcreteSlabSteelDeckOpenWebJoistWBeam;

import dkmApplication.Globals;
import cacheEntities.*;
import com.intersys.objects.*;
import com.intersys.classes.*;
import java.util.List;
import java.util.Iterator;
import javax.swing.*;
import knowledge.StandardDecisionNode;

public class Dec_DIA_SensPoutrelle extends StandardDecisionNode
{
    // must be called with a name argument
    public Dec_DIA_SensPoutrelle(String n)
    {
        super();
        name = n;
        type = "Dec_DIA_SensPoutrelle";
        infoURL = null;
    }

    public boolean isApplicable(BuildingEntity be)
    {
        // applicable flag
        boolean r = false;
        ConcreteSlabSteelDeckOpenWebJoistWBeam sElement= null;

        try
        {
            // make sure the entity is of the right type
            if(be.gettype().equals("ConcreteSlabSteelDeckOpenWebJoistWBeam"))
            {
                sElement = (ConcreteSlabSteelDeckOpenWebJoistWBeam) be;
                r = true;
            }
        }
        catch (CacheException e)
        {
            System.out.println(e.getMessage());
        }

        // return flag
        return r;
    }
}

```

```

public BuildingEntity Apply(BuildingEntity be)
{
    //always create two instances of the entity type being
    modified by this node
    // old version (pre application of the node)
    ConcreteSlabSteelDeckOpenWebJoistWBeam oldEntity = null;
    // new version (post application of the node)
    ConcreteSlabSteelDeckOpenWebJoistWBeam newEntity = null;

    try
    {
        // make sure the entity is of the right type

        if(be.gettype().equals("ConcreteSlabSteelDeckOpenWebJoistWBeam"))
        {
            // keep a copy of current version
            oldEntity = (ConcreteSlabSteelDeckOpenWebJoistWBeam)be;

            //clone current version as starting point for new
            newEntity = (ConcreteSlabSteelDeckOpenWebJoistWBeam)
                oldEntity.constructClone();

            // make changes to new version
            Object input = null;
            Object[] possibilities =
                {newEntity.getshortBayDim(),
                 newEntity.getlongBayDim()};

            //Demander à l'utilisateur quel est le sens des
            poutrelles dans la baie.
            if( newEntity.getopenWebJoistSpan() == null)
                while (input == null)
                {
                    input =
                        JOptionPane.showInputDialog(null,"Qu
                        elle sera la portée des poutrelles?
                        \n\nLes poutrelles sont généralement
                        disposées de façon à couvrir la plus
                        longue portée de la baie. \nCela est
                        habituellement plus économique.
                        (Parent,2004)\n",
                        "Détermination du sens des
                        poutrelles",
                        JOptionPane.PLAIN_MESSAGE,null,possi
                        bilities,null);

                    double porteePoutrelle =
                        Double.parseDouble(input.toString())
                        ;

                    newEntity.setopenWebJoistSpan(porteePoutrelle);

                    if (porteePoutrelle == newEntity.getlongBayDim())

```

```
{  
    newEntity.setopenWebJoistPerpendicularSpan  
    (newEntity.getshortBayDim());  
  
}  
else  
  
    newEntity.setopenWebJoistPerpendicularSpan(n  
    ewEntity.getlongBayDim());  
}  
  
// set creator decision of new version  
newEntity.setcreatorDecision(name);  
  
// add previous version to list of previous versions  
newEntity.setpreviousVersion(oldEntity);  
  
// save new version  
newEntity._save();  
  
// replace old with new in current context + graph  
Globals.getGraphBuilder().replaceInAssembly((S  
tructuralElement)oldEntity,  
(StructuralElement)newEntity);  
  
// replace received entity by new version  
// because returned entity is always same as  
// received (see below)  
  
be = newEntity;  
}  
}  
  
catch (CacheException e)  
{  
    System.out.println(e.getMessage());  
}  
  
return be;  
}
```

## **ANNEXE 8**

**Présentation des pages HTML présentant des conseils et informations sur la conception préliminaire**

Cette annexe présente chacune des pages HTML qui ont été implémentées. Ces pages servent à fournir de l'information et conseils pour la décision à prendre. Elles sont consultables en cliquant à droite sur la souris lorsque le curseur est sur le nœud de la décision à prendre.

The screenshot shows a Microsoft Internet Explorer window with the following content:

- Title Bar:** STRUCTURES UNIDIRECTIONNELLES VERSUS BIDIRECTIONNELLES - Microsoft Internet Explorer
- Menu Bar:** Fichier, Edition, Affichage, Favoris, Outils, ?
- Toolbar:** Back, Forward, Stop, Refresh, Search, Favorites, Print, etc.
- Address Bar:** Adresse : C:\Documents and Settings\AF87460\Bureau\Maîtrise\connaissances\1PageHTML\Uni\_V5\_Bidirectionnel.htm
- Search Bar:** Google, Search, Check, AutoLink, AutoFill, Options
- Content Area:**
  - Section Header:** STRUCTURES UNIDIRECTIONNELLES VERSUS BIDIRECTIONNELLES
  - Section:** Introduction
  - Diagram:** Two boxes illustrating system types:
    - Structure unidirectionnelle:** A box with two vertical arrows pointing downwards.
    - Structure bidirectionnelle:** A box with a central horizontal double-headed arrow and two vertical arrows pointing downwards from its ends.
  - Text:** Ces deux systèmes ont des intervalles de portées dans lesquels ils sont optimisés et souvent utilisés.  
Condition pour obtenir l'effet bidirectionnel: le rapport grande portée/petite portée doit être inférieur à environ 1.5 et tout le pourtour de la baie doit être supporté. (Schodek. 2004. p-478)
  - Section:** Type de structure en fonction des portées
  - List:**
    - 4.6 à 10.7 mètres (15 à 35 pieds), les deux types de systèmes sont utilisés;
    - 15.2 à 18.3 mètres (50 à 60 pieds), c'est autour de ce point que le système bidirectionnel commence à être moins efficace et pour un toit supportant une faible charge avec des poutrelles peu espacées, c'est la structure unidirectionnelle qui est souvent utilisée;
    - 24.4 à 30.5 mètres (80 à 100 pieds), le système unidirectionnel est prédominant (Schodek. 2004. p-467).
  - Section:** Type de structure en fonction des matériaux utilisés
  - Text:** Les structures à ossature de bois sont unidirectionnelles (majoritairement) (Schodek. 2004. p-524).  
Dans les structures d'acier en général, les systèmes sont unidirectionnels (majoritairement) (Schodek. 2004. p-534).

**Figure 59** Page HTML présentant l'information sur les structures unidirectionnelle et bidirectionnelle

**STRUCTURES D'ACIER**



**INTRODUCTION**

L'acier est un des trois matériaux les plus utilisés dans la construction de bâtiments. L'organisme favorisant le développement commercial des bâtiments en acier est l'**Institut canadien de la construction en acier**. On peut retrouver l'acier dans différents types de bâtiments dû à la grande variété de systèmes structuraux possibles. Ainsi les portées typiques des systèmes structuraux en acier sont présentées dans Schodek (2004).

[Exemples de bâtiments en acier](#)      [Documentation vidéo](#) →

**AVANTAGES**

**Général**  
Offre facilement et économiquement de grande portée, ce qui donne une plus grande flexibilité et efficacité d'aménagement des espaces (*Pacific Northwest steel fabricators association*);

Analyses facilement réalisable lors d'inspections futures car leurs propriétés géométriques et les propriétés intrinsèques matérielles sont facilement identifiables (*Pacific Northwest steel fabricators association*);

Réduit le temps de projet : conception, achat et érection, quelque soit les conditions climatiques. Facilite la construction « fast track » (*Pacific Northwest steel fabricators association*);

Réduit les coûts de financement étant donné que l'occupation du bâtiment est plus rapide (*Pacific Northwest steel fabricators association*).

**Développement durable** <http://www.cisc-icca.ca/content/sustainable/default.aspx>  
Grande valeur de revente due à la facilité d'expansion des structures d'acier (*Pacific Northwest steel fabricators association*);

Peuvent être entièrement recyclées et en partie réutilisées. Conséquemment, une réduction des coûts dû à la démolition du bâtiment, réduction des déchets, réduction des coûts reliés au transport des déchets et aide à préserver l'environnement. (*Pacific Northwest steel fabricators association*)

Offre un rapport résistance/ matériel très intéressant et cela devrait être considéré selon Fukushima (2002). Les connections utilisées devraient être préféablement boulonnées de façon à faciliter le démontage. (Kott et Kunzel. 2003) (Ainsi, les cadres d'acier rigides devraient être évités si l'on veut tenir compte du développement durable)

Une structure d'acier peut facilement être agrandie dans n'importe quelle direction et si le bâtiment change d'usage au cours de sa vie utile, une structure d'acier peut facilement être renforcée (*Pacific Northwest steel fabricators association*);

**INCONVÉNIENTS**

L'acier est un matériau coûteux qui présente comme désavantage de prendre rapidement de la chaleur lors d'un feu et est fortement propice à rouiller en milieu humide. Des dispositions doivent être prises à ce sujet. Il était courant de mettre les composantes d'acier dans le béton afin de les protéger. Maintenant, on peut utiliser seulement un enduit protecteur, du gypse ou autre. On recherche habituellement à limiter le coût en recherchant les sections les plus légères. (Ambrose . 1993,p-24)

**CONNAISSANCES TIRÉES DE CAS PARTICULIERS**

Pour un environnement contrôlé (poussière et autres), il peut être non-approprié d'utiliser une structure d'acier qui doit souvent être protégée par un enduit relativement friable afin d'avoir le degré de résistance au feu requis. [Projet Centre médical du Sud-ouest de Dallas, à l'université du Texas]. (*Datum Engineers, Inc. 2003*)

Figure 60 Page HTML présentant les structures d'acier

**STRUCTURES DE BÉTON - Microsoft Internet Explorer**

Echler Édition Affichage FAVORIS Outils 2

Précedente Rechercher Favoris Options

Adresse : C:\Documents and Settings\AF87460\Bureau\Ma trise\connaissances\PageHTML\Beton.htm

Google Search Check Autolink AutoFill Options

**STRUCTURES DE BÉTON**

**INTRODUCTION**

Le béton est un des trois matériaux les plus utilisés dans la construction de bâtiments. L'organisme favorisant le développement commercial des bâtiments en béton est l'Association canadienne du ciment Portland. Ainsi les portées typiques des systèmes structuraux en béton sont présentés dans Schodek (2004).

Les principaux coûts du béton proviennent du fait qu'il faut le former et en faire la finition. (*Comité Mixte International. 1973.p-187*)

Lors de temps froid, des précautions importantes doivent être prises lors de la coulée des éléments de béton. Une des précautions serait de maintenir l'intérieur du bâtiment un peu au dessus du point de congélation en protégeant la construction avec des bâches et en chauffant énormément. (*Comité Mixte International. 1973.p-187*)

Dans les structures de béton, la durée de vie utile de la structure est déterminée par l'avancement de la carbonatation du béton et de la corrosion des barres d'armatures. Pour assurer une durée de service maximale, on devrait s'assurer de la qualité des travaux de construction et de faire des maintenances régulières et les réparations nécessaires. (*Fukushima. 2002*)

La précontrainte peut non seulement permettre d'atteindre de plus grandes portées mais peut aussi permettre de sauver de l'argent par la diminution de la distance plancher plafond. Pour un bâtiment de 40 étages, par exemple, de grandes économies pourraient en résulter. Les porte-à-faux doivent être limités car ce type de structure réagit mal dans ces conditions. La précontrainte n'est pas appropriée pour des charges concentrées ou des charges uniformes inhabituellement élevées. (*Lin et al. 1988.p-167*)

Exemples de bâtiments en béton

**AVANTAGES**

**Général**

On peut trouver plusieurs avantages à utiliser le béton. Notamment, la polyvalence, l'attrait esthétique, la rentabilité, la solidité de la structure et certains aspects écologiques.

La flexibilité des formes en fait un attrait majeur. (*Comité Mixte International. 1973.p-187*)

Le béton peut être coulé sous des formes et finis variables. C'est un matériau qui a une bonne résistance au feu et c'est pourquoi des compagnies d'assurances préfèrent les structures de béton. Le matériel résiste très bien à la moisissure, insecte et à la rouille. Aussi, étant donné que la capacité d'isolation acoustique dépend entre autres de la masse du matériau, le béton est un matériau idéal. Les ajustements sur le site dus à des changements en cours de chantier sont faciles à faire. Habituellement, une construction en béton, étant donné sa faible profondeur de structure nécessaire, va permettre de faire un étage de plus qu'avec les autres matériaux pour la même hauteur de bâtiment totale. Étant donné que les colonnes peuvent reprendre une plus grande charge axiale, on peut réduire le nombre de colonne. Pas de délai de livraison pour les composantes de la structure (*Association Canadienne du Ciment. 2004*).

Même si l'on peut croire que les constructions d'acier sont plus rapidement érigées, les données de l'industrie montre qu'il y a 13% moins de délais rapportés pour les constructions de béton comparativement à celles d'acier. Le fait qu'il est plus facile de trouver des équipes pour les structures de béton que pour les structures d'acier vient réduire le temps de construction. (*Reinforced concrete construction committee*)

**Développement durable**

L'utilisation de béton préfabriqué peut être préférable puisqu'il permet la réutilisation des pièces. Toutefois, il ne faudrait pas appliquer une chape de béton par-dessus ces éléments, ce qui compliquerait le démantèlement et la réutilisation des pièces préfabriqués. La conception d'éléments spéciaux spécifiques à certaines conditions devrait être évitée car les seules méthodes écologiques pouvant être utilisées ici seraient d'utiliser le bâtiment tel qu'il est le plus longtemps possible ou de recycler ses matériaux. (*Kott et Kunzel. 20*)

Quoique les murs de cisaillements de béton posent des problèmes pour la possibilité de démantèlement, ils aident à former de grands espaces de planchers qui pourraient être facilement réaménagés. (*Kott et Kunzel. 2003*)

Le béton est disponible localement dans la plupart des régions ainsi que le matériel de base. (ciments, agrégats, etc.)

Le béton peut agir à titre de masse thermique, c'est-à-dire qu'il peut « emmagasiner de l'énergie thermique pour ensuite l'émettre par radiation et par convection » (Office québécois de la langue française 2004). Les coûts de chauffage et de climatisation pourront être donc être réduits dû à ce phénomène (*Association Canadienne du Ciment. 2004*).

**INCONVÉNIENTS**

Le béton a un poids propre très important ce qui amplifie, notamment, les charges sismiques affectant le bâtiment.

Figure 61 Page HTML présentant les structures de béton

The screenshot shows a Microsoft Internet Explorer window titled "Nouvelle page 1 - Microsoft Internet Explorer". The address bar displays the path: "C:\Documents and Settings\AF87460\Bureau\Maitrise\connaissances\PageHTML\Bois.htm". The page content is as follows:

## STRUCTURES DE BOIS

### INTRODUCTION

Le bois est un des trois matériaux les plus utilisés dans la construction de bâtiments. Actuellement davantage associé à la construction résidentielle, des efforts sont actuellement faits pour que le bois soit aussi utilisés dans les constructions non-résidentielles. L'organisme favorisant le développement commercial des bâtiments en bois est le [conseil canadien du bois](#). Les portées typiques des systèmes structuraux en bois sont présentés dans Conseil canadien du bois (2002).

Plusieurs espèces de bois sont disponibles. Habituellement le plus économique est de choisir le grade le moins élevé possible qui correspond à l'usage qui devra en être fait. Le bois est utilisé massivement pour les constructions temporaires : échafaudages, contreventement et coffrage de béton. (Amrose, 1993, p-23)

Les charpentes légères sont utilisées habituellement pour des bâtiments allant jusqu'à 3 ou 4 étages. Les murs porteurs sont faits de colombages faiblement espacés ou en maçonnerie. (Schodek, 2004, p-524)

Avec les bois d'ingénierie, on peut maintenant franchir de plus grandes portées qu'avec le bois plein.

Une étude du conseil canadien du bois a déterminé que 52 % de la construction non-résidentielle pourrait être construite en bois et que seulement 15 % le sont. (*Timber system*, 2003)

[Exemple de bâtiments en bois](#)

### AVANTAGES

#### Développement durable

Le bois est le seul matériau structural renouvelable. (*Timber system*, 2003)

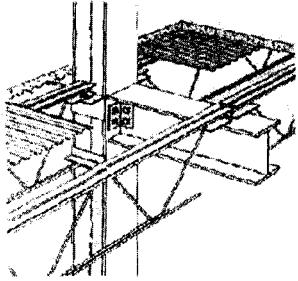
Le conseil canadien du bois fait la [promotion des bâtiments durables en bois](#).

### INCONVÉNIENTS

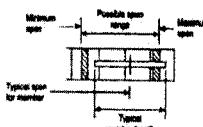
Les structures de bois sont relativement coûteuses pour les constructions non-résidentielles (Parent, 2004).

Figure 62 Page HTML présentant les structures de bois

**DALLE DE BÉTON SUR TABLIER MÉTALLIQUE SUPPORTÉ PAR DES POUTRELLES D'ACIER AJOURÉES ET POUTRES EN I**



Decking	Span Foot																		
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180
Wide flanges	I	U18-U26																	
Open-web joists	I	U18-U22																	



**Informations sur le système**

Ce système est très économique pour des charges relativement faibles et uniformément distribuées. (*Schodek. 2004. p-534*)

Lorsque les poutrelles sont utilisées pour un toit, plusieurs ingénieurs n'utilisent plus ce système lorsque le toit a un angle de plus de 45 degrés (Newman, 1997).

La grille structurale la plus économique, pour un système de poutrelle ajourées et poutre W, serait de 9×12 mètres (30×40 pieds) (Newman, 1997).

Il sera souvent plus économique, lorsqu'une partie de la structure est plus chargée, de seulement réduire l'espacement des poutrelles au lieu d'augmenter la section (*Fondation pour la Formation en Charpentes d'Acier. 1990*).

Il est courant d'allonger la semelle inférieure de la poutrelle afin de donner la stabilité à la colonne (*Fondation pour la Formation en Charpentes d'Acier. 1990*).

Figure 63      Page HTML du sous-système nommé « dalle de béton sur tablier métallique supporté par des poutrelles d'acier ajourées et poutres en I

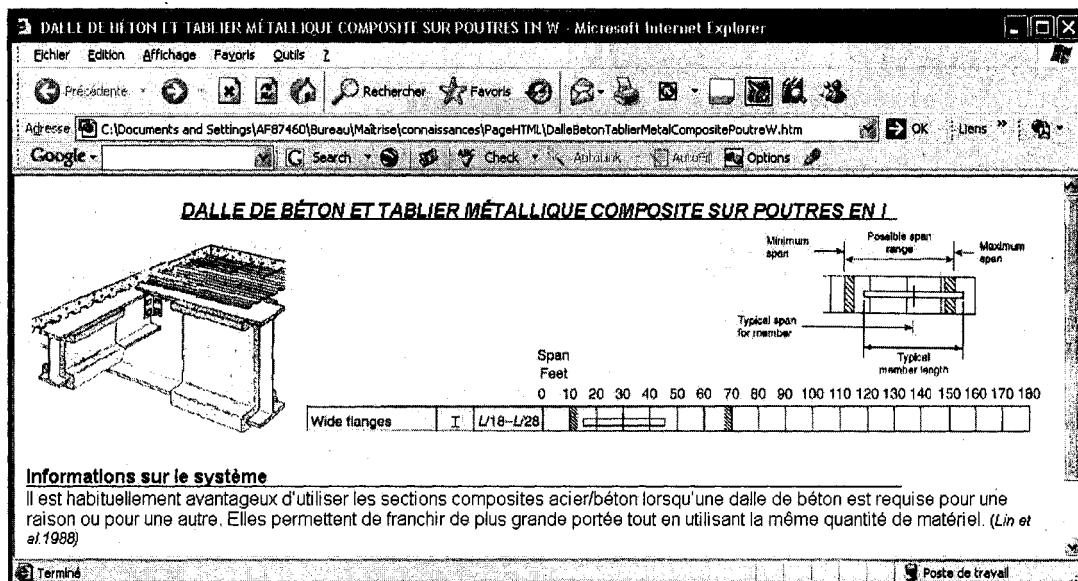


Figure 64 Page HTML du sous-système nommé « dalle de béton et tablier métallique composite sur poutres en I »

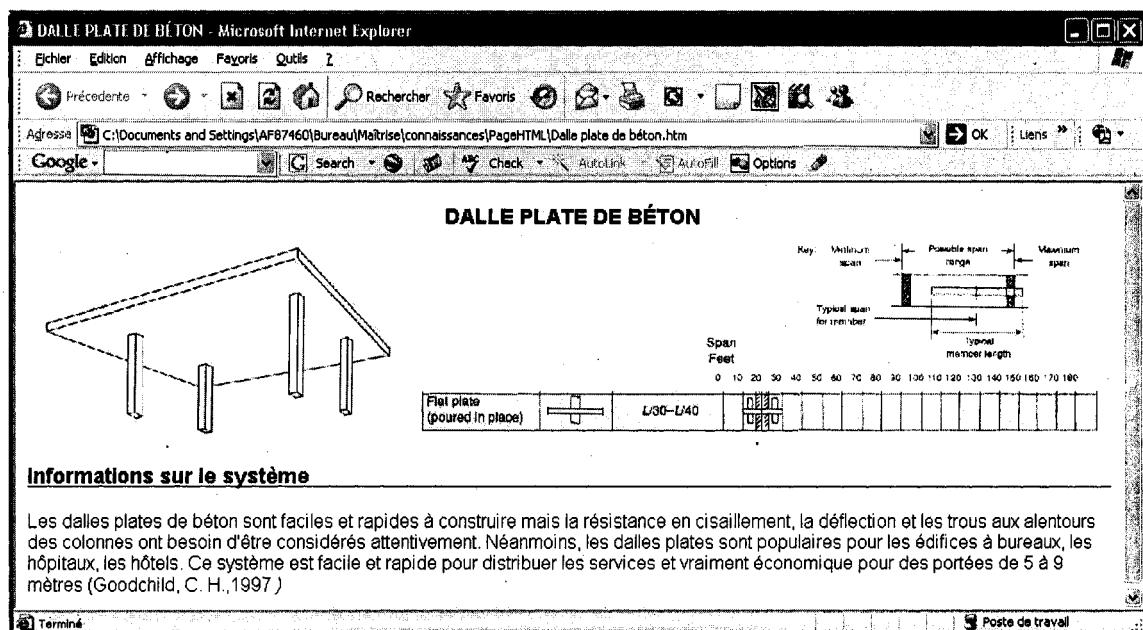


Figure 65 Page HTML du sous-système nommé « dalle plate de béton »

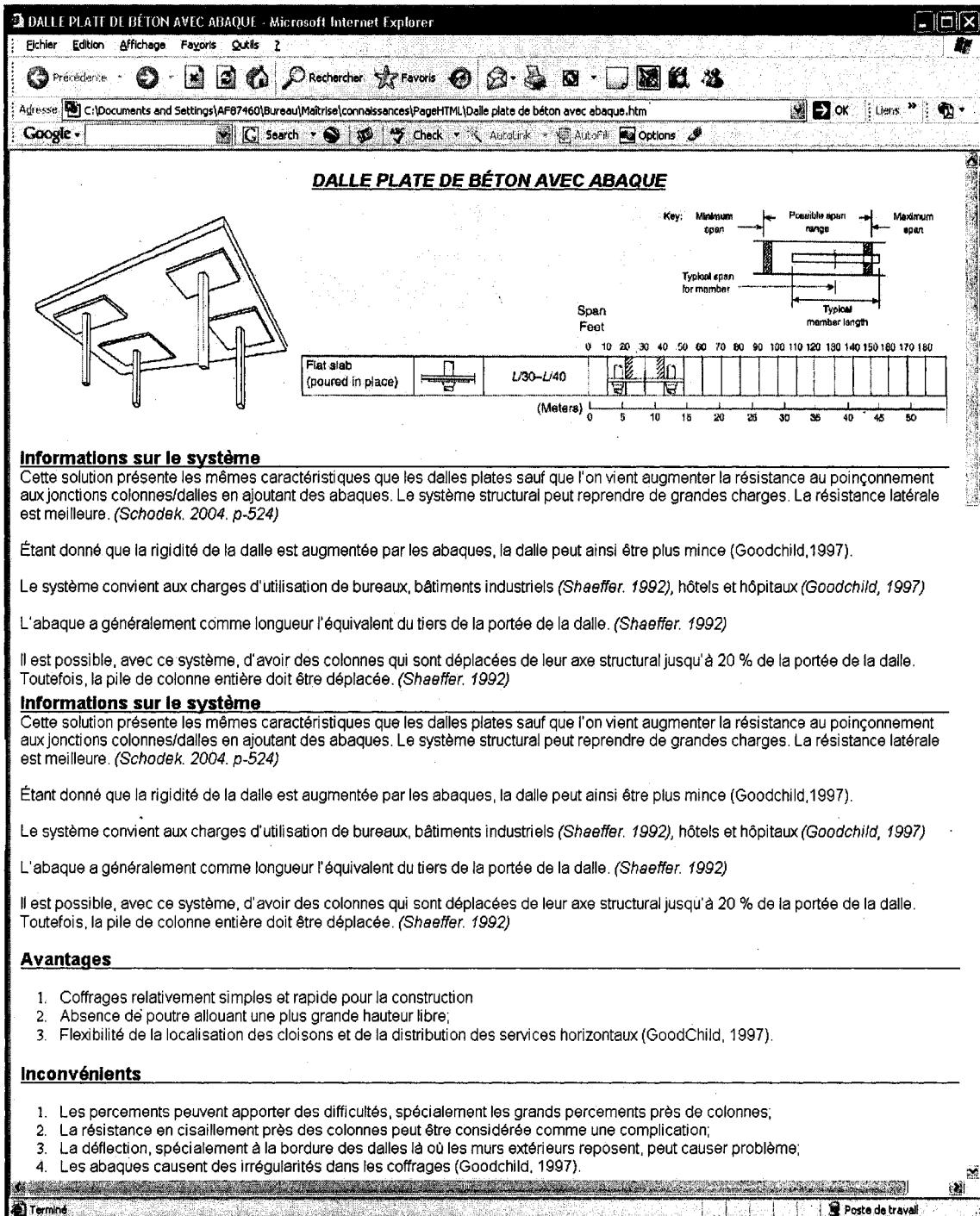


Figure 66 . Page HTML du sous-système nommé « dalle plate de béton avec abaque »

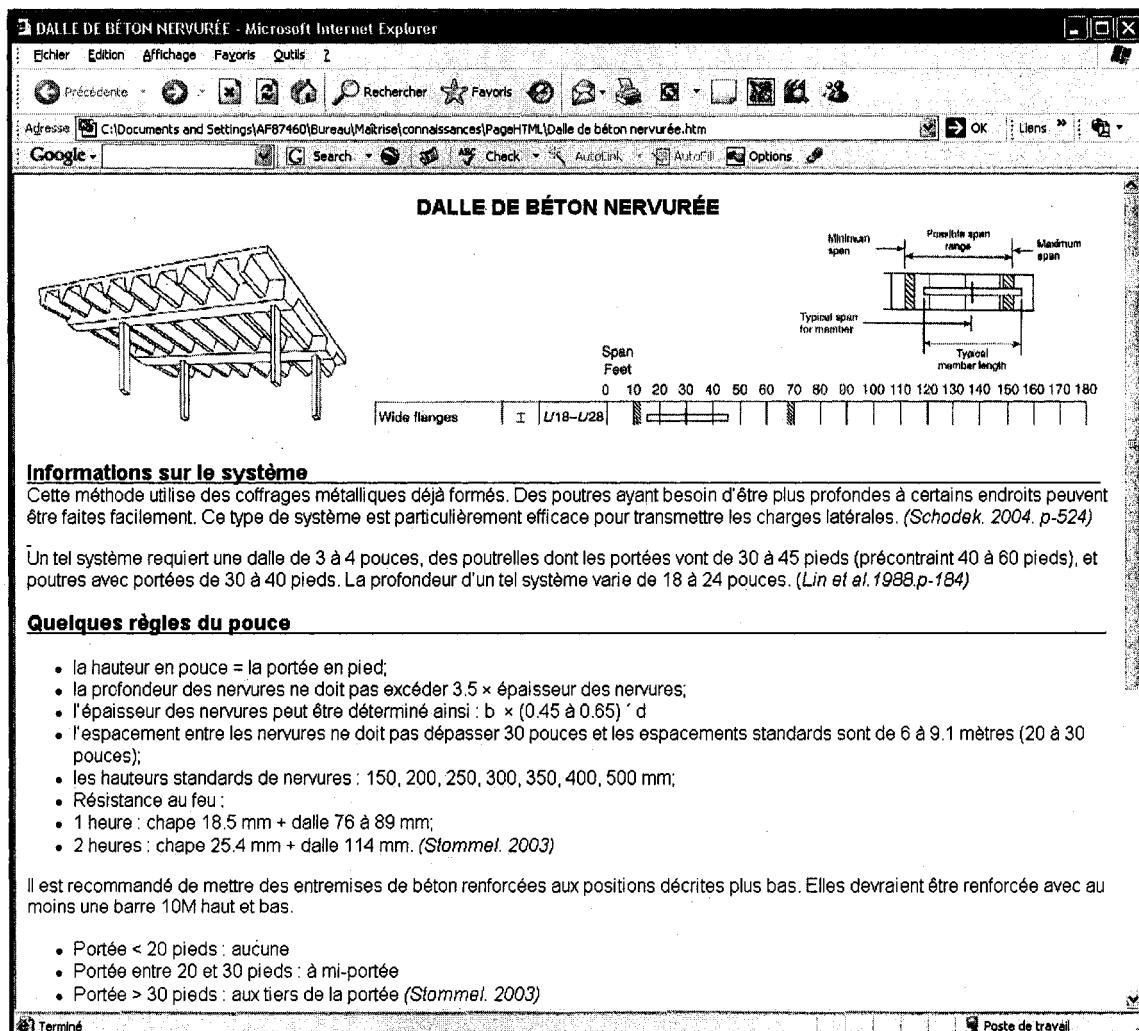


Figure 67 Page HTML du sous-système nommé « dalle plate de béton nervurée »

**PLATELAGE DE BOIS SUR POUTRELLES ET POUTRES DE BOIS - PLATELAGE DE BOIS SUR POUTRELLES ET POUTRE** Microsoft Internet Explorer

Fichier Edition Affichage Favoris Outils Z

Précédente Rechercher Favoris OK Liens

Adresse : C:\Documents and Settings\AF67460\Bureau\MaTrise\connaissances\PageHTML\Platelage de bois sur poutrelles et poutres de bois.htm

**PLATELAGE DE BOIS SUR POUTRELLES ET POUTRES DE BOIS**

Platelage, solives et poutres	Portées types, m	Rapport approximatif portée/hauteur ( l / d )
Platelage de bois	1 à 2,5	25 à 35
Bois de charpente	3 à 7	15 à 25
Poutres-caissons en contreplaqué	4 à 9	18 à 20
Bois recombiné de longues lames parallèles (PSL)	4 à 18	18 à 20
Bois en placage stratifié (LVL)	4 à 18	18 à 20
Lamellé-collé	4 à 25	18 à 20

**Informations sur le système**

**Poutres à caissons**  
Utile pour de grandes portées, voir Annexe A, et pour des charges concentrées.

**Poutres lamellée-collée**  
Grande gamme de portée (voir Annexe A) puisque l'on peut ajouter des lames presque autant que requis.

**Poutres parallam**  
Ces poutres sont disponibles pour les dimensions maximum suivantes : 20 pouces de hauteur, par 11 pouces de large, et 66 pieds de long. (*Trus Joist. 2001*)

Terminé Poste de travail

Figure 68

Page HTML du sous-système nommé « platelage de bois sur poutrelles et poutres de bois»

## BIBLIOGRAPHIE

- Adeli, H. (1988). *Expert systems in construction and structural engineering*. London, Angleterre: Chapman and Hall. 330.
- Alcade. *Base de Données Objet CACHE*. [En ligne] <http://www.alcade.com/base-donnees-objet.htm> (Consulté le 4 juillet 2006)
- Ambrose, J. E. (1993). *Building structures* (2nd ed.). New York, N.Y.: J. Wiley and Sons. xv, 701.
- Ambrose, J. E. (1997). *Simplified design of steel structures* (7th ed.). New York, N.Y.: J. Wiley and Sons. xvi, 446.
- American Institute of Steel Construction. (2004). The James H. Clark Center. *Modern Steel Construction*, Vol. 44, No. 4.
- American Institute of Steel Construction. (2005). The Steel Conference. *Modern Steel Construction*, Vol., No. April 2005.
- American Institute of Steel Construction, & Institut canadien de la construction en acier. (1997). *Floor vibrations due to human activity*. Chicago, Ill., Willowdale, Ont.: American Institute of Steel Construction, Canadian Institute of Steel Construction
- AMIQ Consulting. *Gallery of JUNG Images - Grape*. [En ligne] <http://jung.sourceforge.net/pmwiki/index.php/Main/ImageGallery> (Consulté le 4 juillet 2006)
- Association canadienne du ciment Portland. (1995). *Concrete design handbook* (2nd ed.). Ottawa, Ont.: Canadian Portland Cement Association. 1 v. (page multiple).
- Association canadienne du ciment Portland. *Concrete Thinking in engineering solutions*. [En ligne] <http://www.cement.ca/cement.nsf/0/04E78E71C998827A85256AA4006131EB?OpenDocument> (Consulté le 12 juillet 2004)
- Association canadienne du ciment Portland. (2005). *An Engineers Guide to: Economical Concrete Floor Systems*
- ATHENA'S Environnemental Impact Estimator. (2004). Athéna software (Version 3.0.1).
- Atman, C. J., Chimka, J. R., Bursic, K. M., & Nachtmann, H. L. (1999). Comparison of freshman and senior engineering design processes. *Design Studies*, 20(2), 131-152.
- Bailey, S. F., & Smith, I. F. C. (1994). Case-based preliminary building design. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 8(4), 454-467.

- Balboni, B. (2001). *Square foot and assemblies estimating methods* (3rd ed.). Kingston, Mass.: R.S. Means. xviii, 342.
- Berrais, A. (2005). A knowledge-based expert system for earthquake resistant design of reinforced concrete buildings. *Expert Systems with Applications*, 28(3), 519-530.
- Biedermann, J. D., & Grierson, D. E. (1995). Generic model for building design. *Engineering with Computers*, 11(3), 173-184.
- Biggs, D. (1996). Structural Design Forum. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, 1(1), 3-8.
- Boulanger, S. (1997). *Preliminary Bridge Design Navigation Tool For Novices*. École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne. Thèse. 175.
- Brownston, L., Farrell, R., Kant, E., & Martin, N. (1985). Programming Expert Systems in OPS5. *Addison-Wesley, Reading, MA*.
- Buchanan, B. G., & Shortliffe, E. H. (1984). Rule-Based Expert Systems. *Addison-Wesley, Reading, MA*.
- Burns, J. G. (2004). *Design of Soldier Field with 3D Object Modeling of Steelwork*. Présenté à la conférence: Structures 2004, Nashville, Tennessee, USA. 22 mai 2004.
- Canam - Poutrelles et tablier métallique. (2005). *Tablier Métallique*. Canada, Saint-Gédéon. 38.
- Canam - Solutions + Service. (2003). *Catalogue de poutrelles*. Canada. 82.
- Carrato, P., & Holland, M. (2004). *Business Practices in a 3D Structural Model Environment: How Do They Effect the Steel Designer and Detailer*. Présenté à la conférence: Structures 2004, Nashville, Tennessee, USA. 22 mai 2004.
- CIS/2 @ GT. *What is CIS/2@GT about?* [En ligne] <http://www.coa.gatech.edu/~aisc/> (Consulté le 31 août 2006)
- CivilDesign inc. *VisualDesign*. [En ligne] <http://www.civild.com> (Consulté le 18 août 2005)
- Comité mixte international sur la conception et l'étude des immeubles de grande hauteur, & Journées francophones "Urbanisme vertical" Paris. (1973). *Rapports présentés au Congrès international sur la conception et l'étude des immeubles de grande hauteur, qui s'est tenu à l'Université de Lehigh du 21 au 26 août 1972*. Paris,: Journées francophones "Urbanisme vertical". 28v.
- Computers & Structures Inc. *CSI Products*. [En ligne] <http://www.csiberkeley.com/> (Consulté le 17 août 2005)

- Conseil canadien du bois. (2001). *Manuel de calcul des charpentes en bois 2001 : l'ouvrage de référence complet pour le calcul des charpentes en bois au Canada* (4e éd. . ed.). Ottawa: Conseil canadien du bois. 1 v. (pag. multiple).
- Conseil canadien du bois. (2002). *Introduction au calcul des charpentes en bois* (2002 ed.). Ottawa: Canadian Wood Council. 1 v. (pag. multiple).
- Conseil national de recherches du Canada, & Québec (Province). Régie du bâtiment du Québec. (2001). *Code de construction du Québec chapitre I, bâtiment ; Code national du bâtiment : Canada 1995 (modifié)* (1ère éd. ed.). Ottawa, Ont.: Conseil national de recherches du Canada Institut de recherche en construction. 1 v. (pag. multiple).
- Consolis. *Double T slabs.* [En ligne] [http://www.consolis.com/CEE/TM\\_TT\\_salb.pdf](http://www.consolis.com/CEE/TM_TT_salb.pdf) (Consulté le 7 juillet 2004)
- Datum Engineers Inc. *News and Awards, University of Texas Southwestern medical center of Dallas.* [En ligne] [http://www.datumengineers.com/html/UT\\_SWMC.html](http://www.datumengineers.com/html/UT_SWMC.html) (Consulté le 16 juillet 2004)
- Deitel, H. M., & Deitel, P. J. (2002). *Comment programmer en Java* (4e éd. ed.). Repentigny, Québec: R. Goulet. 1546.
- Dekker, K. J. (2000). *Conceptual Design of Concrete Structures.* Mémoire de maîtrise, Chalmers University of Technology, Göteborg. Thèse. 67.
- Dubois, L. (2003). *Cours du CRIM - Concepts de l'orienté objet (C019)* (Version 2.1 ed.)
- Dym, C. L., & Levitt, R. E. (1991). *Knowledge based systems in engineering.* Montreal: McGraw-Hill, Inc. 404.
- Eisfeld, M., & Scherer, R. (2003). Assisting conceptual design of building structures by an interactive description logic based planner. *Advanced Engineering Informatics*, 17(1), 41-57.
- Fanella, D. A. (2000). *Concrete Floor Systems: Guide to Estimating and Economizing, Second Edition.* 39.
- Fanella, D. A., & Ghosh, S. K. (1993). *Simplified design reinforced concrete building of moderate size and height.* Skokie, Ill., USA: Portland Cement Association. 1 v. pag. multiple.
- Federal Construction Council. (1974). *Technical Report No.65, 1974, Expansion Joints in Buildings.* Washington, D.C.
- Fenves, S., Rivard, H., & Gomez, N. (2000). SEED-Config: a tool for conceptual structural design in a collaborative building design environment. *Artificial Intelligence in Engineering*, 14(3), 233-247.

- Fenves, S. J. (1966). Tabular decision logic for structural design. *American Society of Civil Engineers Proceedings, Journal of the Structural Division*, 92(ST6), 473-490.
- Fenves, S. J., Flemming, U., Hendrickson, C., Maher, M. L., Quadrel, R., Terk, M., et al. (1994). *Concurrent Computer-Integrated Building Design*. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall, Inc. 242.
- Fischer, M. A. (1991). *Using construction knowledge during preliminary design of reinforced concrete structures*. Mémoire de maîtrise, Stanford University, United States -- California
- Fischer, M. A. (1993). Automating constructibility reasoning with a geometrical and topological project model. *Computing Systems in Engineering: An International Journal*, 4(2-3), 179.
- Fisher, J. M. (2005). Expansion Joints: Where, When and How. *Modern Steel Construction*, Vol. Avril 2005, No. 29-36.
- Flemming, U., & Woodbury, R. (1995). Software Environment to Support Early Phases in Building Design (SEED): Overview. *Journal of Architectural Engineering*, 1(4), 147-152.
- Fondation pour la formation en charpentes d'acier. (1990). Les batiments d'un seul etage. S.I.: Fondation pour la Formation en Charpentes d'Acier.
- Fortin, D. (2006). *Système d'aide à la décision en conception préliminaire de structures* (Projet synthèse de fin d'étude). Montréal: École de technologie supérieure
- Fukushima, T. (2002). *Integrated Environment-Conscious Life-Cycle Design (Eco-Life-Cycle Design) of Building Structural Composite Materials, Components, and/or Systems - as a Basis of Establishment of Sustainable Eco-buildings and Eco-cities* (Vol. 43, n. 3). 368-377.
- Fuyama, H., Law, K. H., & Krawinkler, H. (1997). An interactive computer assisted system for conceptual structural design of steel buildings. *Computers & Structures*, 63(4), 647-662.
- Gallaher, M. P., O'Connor, A. C., Dettbarn, J. L., & Gilday, L. T. (2004). *Cost Analysis of Inadequate Interoperability in the U.S. Capital Facilities Industries*: U.S. Departement of Commerce, Technology Administration, National Institute of Standards and Technology (NIST)
- Georgia Tech Research Corporation. GT STRUDL. [En ligne] <http://www.gtstrudl.gatech.edu/index.html> (Consulté le 24 août 2006)
- Golabchi, M. (2005). *An expert system for optimal selection of large span structural systems*. Présenté à la conférence: 3rd specialty Conference on The Conceptual Approach to Structural Design, Singapore. 25-26 Août 2005.

- Gomez, N. (1998). *Conceptual structural design through knowledge hierarchies*. Thèse de doctorat, Carnegie Mellon University, United States -- Pennsylvania
- Goodchild, C. H. (1997). *Economic concrete frame elements*. Crowthorne, Berks, U.K.: British Cement Association. 128.
- Graphisoft. *Virtual Building Concept*. [En ligne] [http://www.graphisoft.com/products/virtual\\_building/](http://www.graphisoft.com/products/virtual_building/) (Consulté le 15 septembre 2005)
- Grierson, D. E., & Khajehpour, S. (2002). Method for Conceptual Design Applied to Office Buildings. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 16(2), 83-103.
- Harty, N., & Danaher, M. (1994). A Knowledge-based approach to preliminary design of buildings. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Structures and Buildings*, 104(2), 135-144.
- Heesom, D., & Mahdjoubi, L. (2004). Trends of 4D CAD applications for construction planning. *Construction Management and Economics*, 22(2), 171-182.
- Heisserman, J., Mattikalli, R., & Callahan, S. (2004). A grammatical approach to design generation and its application to aircraft systems. *The Boeing Company*.
- Idrus, A., & Newman, J. (2003). IFESS: a computer tool to aid structural engineers at the conceptual design stage. *Construction Innovation*, 3(3), 127-143.
- Institut canadien de la construction en acier. (2000). *Handbook of steel construction* (7th ed.). Willowdale, Ont.: Canadian Institute of Steel Construction. 1 v. (pag. multiple).
- Institut royal d'architecture du Canada, & Programme canadien d'aide à la pratique de l'architecture. (1999). Manuel canadien de pratique de l'architecture. Canada: PCAP.
- International Alliance for Interoperability (IAI). *IAI Vision and Goal*. [En ligne] <http://www.iai-na.org/> (Consulté le 26 novembre 2006)
- Jain, D., Krawinkler, H., Law, K. H., & Luth, G. P. (1991). Formal approach to automating conceptual structural design, part II: application to floor framing generation. *Engineering with Computers (New York)*, 7(2), 91-107.
- Juchmes, R., Leclercq, P., & Azar, S. (2005). A freehand sketch environment for architectural design supported by a multi-agent system. *Special issue of Computers and Graphics on Calligraphic Interfaces, Vol 29:6*(To appear).
- JUNG: Java Universal Network/Graph Framework. Overview. [En ligne] <http://jung.sourceforge.net/> (Consulté le 4 juillet 2006)

- Kolodner, J. (1993). *Case-based reasoning*. Morgan Kaufmann, San Mateo, Calif
- Kolountzakis, M., & Fischer, M. A. (1991). CIFECAD: A User's Manual, CIFE Working Paper, Center for Integrated Facility Engineering, Stanford University.
- Korman, T. M., Fischer, M. A., & Tatum, C. B. (2003). Knowledge and reasoning for MEP coordination. *Journal of Construction Engineering and Management*, 129(6), 627-634.
- Kott, M., & Kunzel, E. (2003). *Construction and planning considerations in the development of structural systems for sustainable buildings made of precast concrete*. (Vol. 69, n.5). 62.
- Kumar, B., & Raphael, B. (1997). CADREM: A case-based system for conceptual structural design. *Engineering with Computers*, 13(3), 153-164.
- Leclercq, P. (1999). *Interpretative tool for architectural sketches*. Présenté à la conférence: International Conference on Visual and Spatial Reasoning in Design, MIT, Cambridge, MA, USA. 15-17 Juin.
- Leclercq, P., & Juchmes, R. (2002). The absent interface in design engineering. *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing: AIEDAM*, 16(3), 219-227.
- Lecomte, A. (2003). *De l'Esquisse d'Architecture au Prédimensionnement Structurel*. Université de Liège, Liège
- Lin, T. Y., & Stotesbury, S. D. (1988). *Structural concepts and systems for architects and engineers* (2nd ed.). New York, N.Y.: Van Nostrand Reinhold. xiii, 507, [581].
- Lofqvist, P. (1994). *Knowledge-based systems for preliminary design of structures*. Chalmers University of Technology, Göteborg
- Ma, Z., Shen, Q., & Zhang, J. (2005). *Application of 4D for dynamic site layout and management of construction projects*. Présenté à la conférence: Automation in Construction  
International Conference for Construction Information Technology, Feb 18-21 2004, Langkawi, Malaysia
- Maher, M. L. (1985). *HI-RISE: A Knowledge-Based Expert System For The Preliminary Structural Design of High Rise Buildings*. Carnegie-Mellon University, Pittsburgh, Pennsylvania. Thèse. 125.
- Maher, M. L., & American Society of Civil Engineers. (1987). *Expert systems for civil engineers technology and application*. New York, N.Y.: American Society of Civil Engineers. xvi, 148.

- Maher, M. L., Liew, P.-S., Gu, N., & Ding, L. (2005). An agent approach to supporting collaborative design in 3D virtual worlds. *Automation in Construction*, 14(2 SPEC ISS), 189-195.
- Meniru, K., Rivard, H., & Bedard, C. (2003). Specifications for computer-aided conceptual building design. *Design Studies*, 24(1), 51-71.
- Meyer, S. J. (1995). *A description of the structural design of tall buildings through the grammar paradigm*. Thèse de doctorat, Carnegie Mellon University, United States -- Pennsylvania
- Miles, J. C., Cen, Taylor, M., Bouchlaghem, N. M., Anumba, C. J., & Shang, H. (2003). *Linking Sketching and Constraint checking for Early Conceptual Design*. Cardiff University et Loughborough University, Cardiff et Loughborough. Thèse. 11.
- Miles, J. C., Moore, C. J., Kotb, A. S. M., & Jaberian-Hamedani, A. (2000). End user evaluation of engineering knowledge based systems. *Civil Engineering and Environmental Systems*, 17(4), 293-317.
- Mora, R. (2005). *Representation and reasoning for integrated conceptual design of building structures*. NR05719, Concordia University (Canada), Canada
- Mora, R., Rivard, H., & Bédard, C. (2005). *From Architectural Sketch to Feasible Structural System Solution*. Présenté à la conférence: Proceedings of the 2005 ASCE International conference on Computing in Civil Engineering, Cancun, Mexico. 12-15 Juillet 2005.
- Mora, R., Rivard, H., & Bédard, C. (2006). Computer representation to support conceptual structural design within a building architectural context. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 20(2), 76-87.
- NavisWork. *The combining force in 3D design review*. [En ligne] <http://www.navisworks.com> (Consulté le 26 novembre 2006)
- Newman, A. (1997). *Metal building systems : design and specifications*. New York ; Montréal: McGraw Hill. 389.
- Office de la langue française. *Grand Dictionnaire terminologique*. [En ligne] <http://w3.granddictionnaire.com> (Consulté le 3 août 2005)
- Online Steel Detailing. *Detailling with Speed: X-Steel Detailing*. [En ligne] <http://www.onlinesteeldetailing.com/> (Consulté le 24 août 2006)
- O'Sullivan, B. (2002). Interactive constraint-aided conceptual design. *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing: AIEDAM*, 16(4), 303-328.

- Pacific Northwest steel fabricators association. *Adavantage steel: The top ten reasons to specify structural steel.* [En ligne] <http://www.pnsfa.org/benefitsOfSteel.htm>. (Consulté le 12 juillet 2004)
- Parent, S. (2004). *Validation, auprès d'Experts, des Connaissances en Conception Préliminaire de Structure de Bâtiment compilées lors du Stage 3* (Projet Synthèse de fin d'étude). Montréal: École de technologie supérieure. 64.
- Parent, S., Rivard, H., & Mora, R. (2006). *Acquisition and modeling of conceptual structural knowledge*. Présenté à la conférence: Building on IT: International Conference on Computing and Decision Making in Civil and Building Engineering, Montréal
- pcaStructure Point. *Concrete Design Software.* [En ligne] <http://www.pcastructurepoint.com/index.asp> (Consulté le 5 janvier 2006)
- Quatrani, T. (1998). *Visual modeling with rational rose and UML*. Reading, Mass.: Addison-Wesley. xix, 222.
- R.S. Means Company. (2005). Square foot costs (pp. v.). Kingston, MA: R.S. Means Co.
- R.S. Means Company. (2006). Heavy construction cost data (pp. v.). Kingston, Mass: R.S. Means Co.
- Rafiq, M. Y., Mathews, J. D., & Bullock, G. N. (2003). Conceptual Building Design--- Evolutionary Approach. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 17(3), 150-158.
- Ram International. *RAM Structural System.* [En ligne] [http://www.ramint.com/products/r\\_structural\\_system.jsp](http://www.ramint.com/products/r_structural_system.jsp) (Consulté le 5 janvier 2005)
- Ramachandran, S. (2004). *An integrated computer tool to support building envelope design process*. Mémoire de maîtrise, Concordia University (Canada), Canada
- Ravi, M. (1998). *Knowledge-based system approach to integrated design of multistorey office buildings at the preliminary stage*. Concordia University (Canada), Canada
- Reinforced concrete construction committee. *The concrete advantage.* [En ligne] <http://www.rc3online.com/advantages.html>. (Consulté le 12 juillet 2004)
- Reiworld.com. *Staad.Pro 2005.* [En ligne] <http://www.reiworld.com/> (Consulté le 5 janvier 2006)
- Rivard, H., Bedard, C., Fazio, P., & Ila, K. H. (1995). Functional analysis of the preliminary building envelope design process. *Building and Environment*, 30(3), 391.

- Rivard, H., & Fenves, S. J. (2000). SEED-Config: A case-based reasoning system for conceptual building design. *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing: AIEDAM*, 14(5), 415-430.
- Robert, C. A., & David, I. R. (2006). Consider Constructability. *Modern Steel Construction*, Vol. April 2006, No. 28-30.
- Rogowsky, D., & Gollcher, E. (2002). *Reinforced Concrete Floor Systems* (Guide d'estimation). Alberta: University of Alberta, Construction Research Institute of Canada. 28.
- Sacks, R. (2004). Evaluation of Economic Impact of Three-Dimensional Modeling in Precast Concrete Engineering. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 18(4), 301-312.
- Sacks, R., Eastman, C. M., & Lee, G. (2004). Parametric 3D modeling in building construction with examples from precast concrete. *Automation in Construction*, 13(3), 291-312.
- Sacks, R., & Warszawski, A. (1997). A project model for an automated building system: design and planning phases. *Automation in Construction*, 7(1), 21-34.
- SAFI Quality Software Inc. *Products*. [En ligne] <http://www.safi.com> (Consulté le 17 août 2005)
- Saunders, C. M. (2005). Seismic Joints in Steel Frame Buildings. *Modern Steel Construction*, Vol. April 2005, No. 57-62.
- Scalzi, J. B. (1971). *The Staggered Truss System - Structural Considerations*. Présenté à la conférence: National Engineering Conference, Cleveland, Ohio. 6-7 Mai 1971.
- Schodek, D. L. (2004). *Structures* (5th ed.). Upper Saddle River, N.J.: Pearson/Prentice Hall. 585.
- Shaeffer, R. E. (1992). *Reinforced concrete preliminary design for architects and builders*. New York, N.Y.: McGraw-Hill. xvi, 196.
- Shea, K., & Cagan, J. (1999). The design of novel roof trusses with shape annealing: assessing the ability of a computational method in aiding structural designers with varying design intent. *Design Studies*, 20(1), 3-23.
- shiftTHINK. *Gallery of JUNG Images - shiftTHINK Connect*. [En ligne] <http://jung.sourceforge.net/pmwiki/index.php/Main/ImageGallery> (Consulté le 4 juillet 2006)
- Sisk, G. M., Miles, J. C., & Moore, C. J. (2003). Designer centered development of GA-based DSS for conceptual design of buildings. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 17(3), 159-166.

- Smith, J. W. (1988). *Vibration of structures applications in civil engineering design.* London, Angleterre: Chapman and Hall. 338.
- Soibelman, L., & Pena-Mora, F. (2000). Distributed Multi-Reasoning Mechanism to Support Conceptual Structural Design. *Journal of Structural Engineering*, 126(6), 733-742.
- Stansfield, K. (2004). Working with 3D models - Keeping it simple. *Structural Engineer*, 82(21), 14.
- Stommel, T. *Lecture 10 - Pan Joist and Pattern Loads.* [En ligne] <http://stommel.tamu.edu/~esandt/Teach/Spring03/CVEN444/Lecture/Lecture10/lecture10.ppt> (Consulté le 7 juillet 2004)
- Timber Systems Limited. *Wood as primary structure.* [En ligne] [http://www.timsys.com/html/wood\\_as\\_primary\\_structure.html](http://www.timsys.com/html/wood_as_primary_structure.html) (Consulté le 12 juillet 2004)
- Tremblay, R., & Mitchell, D. (2005). *Notes de cours: CIVE 612 Earthquake Resistant Design of Structures.* Montréal: École Polytechnique de Montréal, McGill University
- TrusJoist. (2000a). *Linteaux et Poutres Microllam LCL 1.9E.* Boise, Idaho, États-Unis
- TrusJoist. (2000b). *Linteaux, poutres et colonnes Parallam PSL.* Boise, Idaho, États-Unis
- U.S. Departement of Energy: Energy Efficiency and Renewable Energy. *Building Energy Software, ECOTECT.* [En ligne] [http://www.eere.doe.gov/buildings/tools\\_directory/software.cfm?ID=391/pagename=alpha\\_list](http://www.eere.doe.gov/buildings/tools_directory/software.cfm?ID=391/pagename=alpha_list) (Consulté le 21 juin 2006)
- Withson, A. *Turning Green Into Gold: Sustainability - For Anybody Who Wants to Make a Profit.* [En ligne] <http://www.buildings.com/Articles/detail.asp?ArticleID=718> (Consulté le 12 juillet 2004)

