

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 débiter 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 vitesse 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).¹

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

¹ 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^{MC} vers ETABS, ce qui peut en faciliter la modélisation à partir des dessins architecturaux réalisés sur AutoCad^{MC}. 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 vigueur. 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-STRUDL*, 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*², 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.

² 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. Tendances 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 bénéfiques 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).

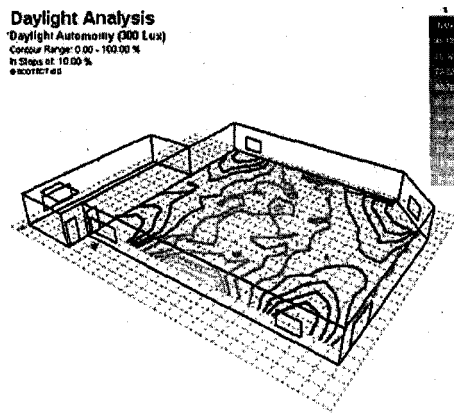


Figure 1 Analyse de lumière réalisée avec ECOTECT
U.S. Dep. of Energy, 2006)

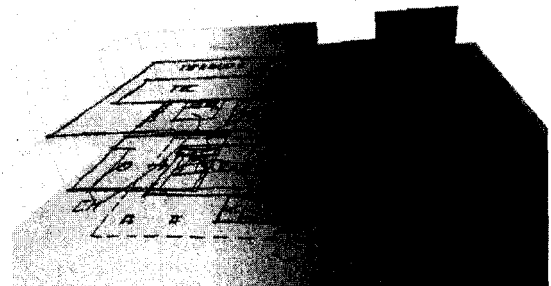


Figure 2 Génération du modèle 3D à partir des esquisses
(Juchmes et coll., 2005)

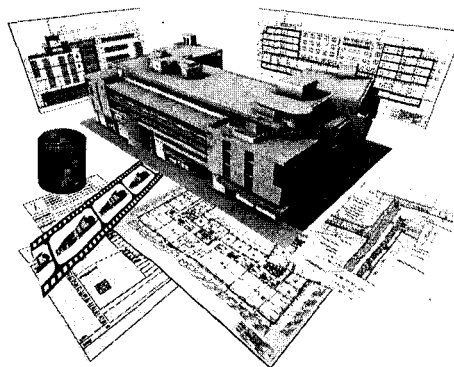


Figure 3 Concept du Virtual Building^{MC} d'ArchiCAD : modèle 3D et génération automatique de plans 2D
(Graphisoft, 2005)

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).

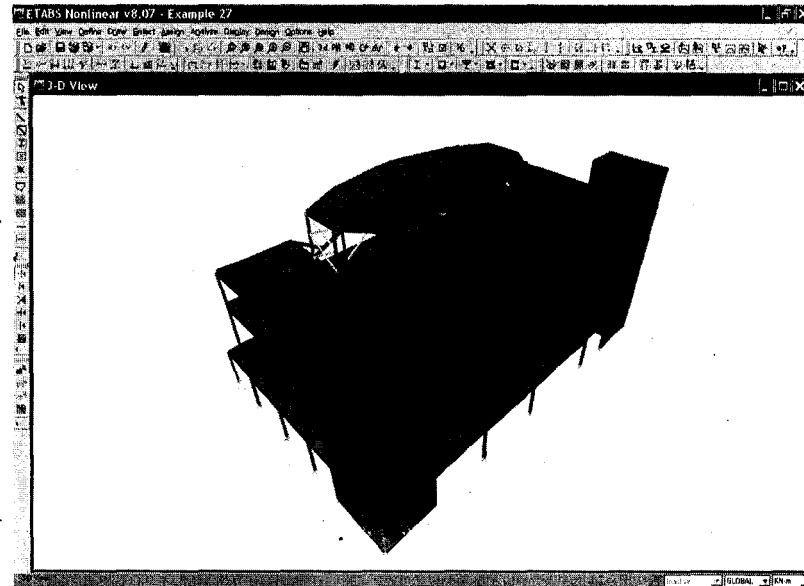


Figure 4 Fenêtre du logiciel ETABS montrant une modélisation 3D d'un bâtiment (Computers & Structures Inc., 2005)

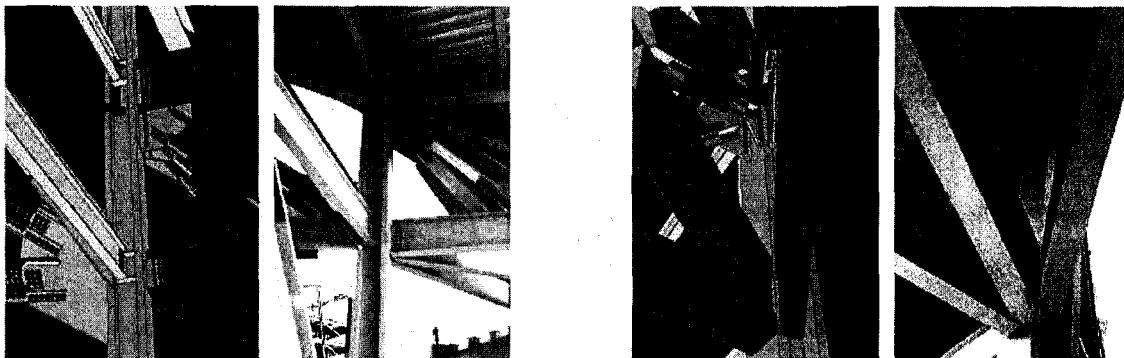


Figure 5 Modélisation 3D des connexions d'une structure d'acier (modèle vs réel) réalisée avec X Steel (Online Steel Detailing, 2006) (Burns, 2004)

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'aborder 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 prédicats 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
	P = ST-LAURENT A FOURNI LE BÉTON
	Q = LAFARGE A FOURNI LE BÉTON
ST-LAURENT A FOURNI LE BÉTON OU LAFARGE A FOURNI LE BÉTON	$\rightarrow P \vee Q$
ST-LAURENT N'A PAS FOURNI LE BÉTON	$\rightarrow \neg P$
LAFARGE A FOURNI LE BÉTON	$\rightarrow = Q$

Avec le *langage des prédicats du premier ordre*, on vient améliorer la représentation en ajoutant, aux concepts de propositions et connecteurs, les notions de fonctions, prédicats, variables et quantificateurs. Les prédicats 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 prédicats où il est possible de déduire la troisième phrase des deux premières.

Tableau II

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

Phrase en français	Langage des prédicats
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*

<i>(Partie gauche)</i>	
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;
<i>(Partie droite)</i>	
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 Environnement) (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 déflexion, 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^{MC} et implémentées en AutoLISP. Ces deux systèmes communiquent à l'aide d'un fichier de transfert ASCII interprété par KAPPA^{MC}, une coquille de système expert. L'utilisateur commence par modéliser la structure à l'aide de « CIFECAD » dans AutoCAD^{MC} 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^{MC} sa conception en fonction des commentaires émis par « COKE » (Fischer, 1991). La version utilisée d'AutoCAD^{MC} 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 »³ (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

³ 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 critiqué 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 prédicats 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, telles que dans l'exemple suivant ou « une colonne ne peut être supportée par une dalle » :

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

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 Reasoning 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 gènes. 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-étagés (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 structurellement 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, différents 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 déflexion 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.»⁴ (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.

⁴ 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; Einfeld & 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; Einfeld & 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.