

Marc BOURDEAU
Bertrand DELCAMBRE
Manuel MONTALBAN

Centre Scientifique
et Technique du Bâtiment (C.S.T.B.)
Sophia Antipolis

**Simulation de tâches
de conception de bâtiments
à l'aide de l'environnement
SMECI**

R E S U M E

La phase de conception des projets de bâtiments nécessite le recours à des outils informatiques aujourd'hui bien maîtrisés : logiciels algorithmiques de calculs, de métrés et de dessins.

Par contre, la simulation du comportement des concepteurs qui, face à des enjeux techniques ou/et économiques, maîtrisent très tôt les bons choix pour n'étudier en détail que les meilleures variantes possibles, relève de l'ambition d'une nouvelle génération d'outils logiciels : les Systèmes Experts.

Le projet SMECI, développé à l'INRIA, est un exemple d'environnement informatique d'aide à la construction de Systèmes Experts pour la Conception en Ingénierie. Implanté sur l'ordinateur du C.S.T.B., l'environnement SMECI a permis de développer des premières simulations de processus de conception de bâtiments.

S U M M A R Y

Building project design requires the use of computer tools which are well mastered today : algorithmical softwares for computation, quantities measuring and drawing.

On the other hand, simulating the behaviour of designers who, coping with technical and/or economical stakes, determine the right choices very soon so as to study into details only the best possible solutions, is the characteristic of a new generation of software tools : Expert Systems.

SMECI, a project developed by INRIA, is an example of a computing environment giving an aid to Expert System building for engineering design. Implemented on the C.S.T.B.'s computer, SMECI environment has permitted to develop first simulations of design processes in the building field.

1. INTRODUCTION

Le secteur du Bâtiment est aujourd'hui un des secteurs professionnels où le taux d'équipement en matériel informatique reste encore limité.

Cette situation, qui s'explique par de nombreux facteurs, provient particulièrement du fait que l'informatique, en dépit de l'aide qu'elle a pu apporter dans l'exécution de certaines tâches (gestion, dessins, calculs techniques), n'a pas encore résolu les problèmes d'échanges d'informations entre les nombreux intervenants à l'acte de construire.

En particulier, la PHASE de CONCEPTION des PROJETS illustre les défauts d'approche inhérents aux outils existants : représentations spécifiques et indépendantes de l'objet bâtiment, fichiers de données fastidieux à élaborer, souvent redondants, voire incohérents.

Ce constat est à l'origine du programme INPROBAT lancé par le PLAN CONSTRUCTION et HABITAT en 1984 et auquel le C.S.T.B. s'est associé, en particulier au niveau de son programme de recherche.

La volonté d'aborder de façon globale le problème de la coordination et de la structuration des informations manipulées dans un projet de bâtiment se retrouve dans les travaux menés actuellement par d'autres équipes françaises (projets DESBAT [AUT 85] et X2A organisé autour de la base de données PROJET [MAN 82]).

Au-delà des analyses conceptuelles à mener sur la structuration de ces informations, se pose le problème du choix du support informatique. Certaines études ont montré qu'une approche Bases de Données permettait de représenter des objets et des liens entre ces objets, avec propagation des modifications et gestion de la cohérence. Il semble judicieux d'utiliser les possibilités offertes par des environnements informatiques évolués, tels que les Langages Orientés Objets, afin d'optimiser cette gestion des données et d'y ajouter certaines fonctionnalités : liens hiérarchiques naturels, description d'objets complexes et de prototypes d'objets, utilitaires de calcul et de dessin attachés à chaque classe d'objets.

Le recours aux techniques des Langages Orientés Objets ouvre, d'autre part, de nouvelles perspectives pour le développement d'outils d'Intelligence Artificielle. Le projet SMECI (Système Multi-Expert de Conception en Ingénierie), développé à l'INRIA, est un exemple de nouvelle architecture de Système Expert particulièrement bien adaptée à la résolution de problèmes de conception, comprenant une représentation des connaissances à base d'objets et de règles, et un moteur d'inférences pouvant manipuler ces règles. L'intérêt d'un tel système dans le domaine de l'ingénierie du bâtiment est d'autant plus manifeste que celui-ci présente la particularité de recourir abondamment à des connaissances déclaratives (réglementation, normalisation) qui sont facilement manipulables dans une approche Système Expert.

2. S M E C I

Le Système SMECI (Système Multi-Expert de Conception en Ingénierie) est développé à l'INRIA (INSTITUT NATIONAL de RECHERCHE en INFORMATIQUE et en AUTOMATIQUE) dans son Centre de SOPHIA ANTIPOLIS, depuis juillet 1984.

Le projet a pour objectif d'explorer les problèmes liés à la réalisation et à l'utilisation de Systèmes Experts d'aide à la conception. L'analyse du processus de conception en ingénierie montre que très souvent il s'agit d'assembler, de façon cohérente, des objets élémentaires qui peuvent être, soit entièrement déterminés à l'avance (objets sur catalogue), soit connus de manière partielle, certains paramètres de ces objets pouvant prendre leurs valeurs dans des domaines connus. Ces assemblages d'objets élémentaires ne sont, au départ d'un projet, que vaguement référencés au sein des quelques variantes envisagées par l'équipe de conception. L'enjeu essentiel de la conception est de préciser la description des objets constituant les variantes retenues comme les plus intéressantes ; en général, cela conduit à détecter, le plus tôt possible, les mauvais choix et à abandonner les variantes correspondantes, à pousser l'étude en parallèle des variantes possibles en privilégiant celles qui paraissent les meilleures, tout en se gardant à chaque étape la possibilité de revenir en arrière. La conception est terminée lorsqu'on dispose d'un ensemble fini de variantes décrites à un niveau suffisamment fin pour être soumis à des entreprises. Ces variantes, "solutions" du problème de conception, respectent, en particulier, les spécifications et les contraintes du projet et peuvent être ordonnées suivant un critère dont le choix relève d'un consensus entre maître d'ouvrage et maître d'oeuvre : coût, délai de réalisation, fiabilité, ...

Le système SMECI propose des outils de représentation de connaissances et un mécanisme de traitement permettant de simuler le comportement de concepteurs-experts, allant "au plus vite" vers les "meilleurs" choix.

Ces outils ont été développés en Le_LISP et en CEYX. Ils sont aujourd'hui opérationnels sous MULTICS (BULL), ROS (BULL/SPS9), VMS (DEC/VAX) et UNIX ...

Trois domaines ont fait l'objet de développements d'applications spécifiques : la conception portuaire, la conception de satellites et la conception de bâtiments.

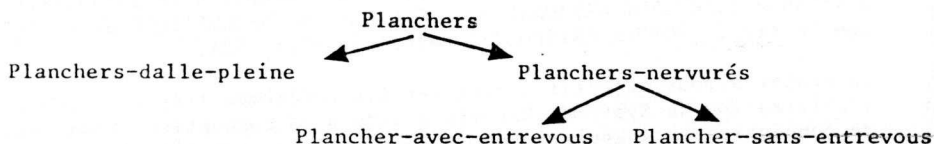
C'est au C.S.T.B., à SOPHIA ANTIPOLIS, où SMECI est implanté sur VAX que s'effectue le développement d'applications relatives au domaine du Bâtiment.

2.1. REPRESENTATION des CONNAISSANCES

Quatre types de représentation sont nécessaires pour construire un Système Expert avec SMECI :

- Les prototypes : SMECI offre la possibilité de décomposer l'univers du concepteur en catégories d'objets. Par exemple, on pourra créer les catégories Poutres, Parois, Planchers, etc... Deux objets appartiennent à la même catégorie s'ils sont de même nature et ont les mêmes propriétés. A chaque catégorie est associée une décomposition hiérarchique de prototypes modélisant les différents types prédéfinis d'objets appartenant à une même catégorie (sorte de bibliothèque initiale).

Exemple : arbre de prototypes de la catégorie Planchers



Alors que la définition d'une catégorie se résume à créer une classe munie d'une liste de champs typés, définir un prototype consiste à préciser sa place dans la hiérarchie, affecter certaines valeurs et contraintes aux champs et, enfin, décrire des méthodes propres aux prototypes (on pourra, par exemple, décrire une méthode de calcul de coût différente par prototype). En outre, la définition hiérarchique des prototypes permet l'héritage de leurs propriétés.

- Les règles : elles constituent la partie de la connaissance qui ne peut être directement attachée à un prototype. Elles sont constituées des deux parties classiques :

- . des prémisses servant à sélectionner un ensemble d'objets vérifiant un ensemble de propriétés (n'importe quel prédicat, LISP ou prédéfini par l'utilisateur) ;
- . des conclusions permettant principalement de calculer des valeurs de champs et de les affecter, de créer des liens entre objets, de créer des objets ou encore de préciser le prototype d'un objet.

On peut aussi définir des règles de contradiction et de vérification de spécifications.

- Les contextes : ils permettent de décomposer le problème de conception en tâches élémentaires. Chaque contexte est composé d'un arbre de tâches et de sous-tâches, chaque tâche contenant un ensemble de règles de production destiné à la réaliser. Cette organisation procédurale des tâches permet, d'une part de réduire le nombre de règles à examiner par le système à chacun de ses cycles (voir ci-dessous), d'autre part, de diminuer le nombre de prédicats à écrire dans les prémisses des règles.

- La fonction d'évaluation : c'est elle qui permet de choisir parmi les variantes possibles, celle à partir de laquelle le système va poursuivre son raisonnement. On pourra, par exemple, orienter la conception vers les solutions les moins coûteuses, les plus séduisantes, ou encore, les deux à la fois.

2.2. FONCTIONNEMENT du MOTEUR

Le moteur travaille sur des états qui représentent la solution en cours d'élaboration. Un état est donc la liste des objets du processus de conception qui sont plus ou moins précis suivant l'état d'avancement de la solution.

Un cycle élémentaire du moteur peut être décrit de la manière suivante :

- A partir de l'état courant, le moteur recherche parmi les règles du contexte courant celle(s) qui est(sont) applicable(s) et génère un (ou plusieurs) état(s) fils plus précis que l'état courant : plusieurs dans le cas de plusieurs règles applicables ou de plusieurs valeurs pour un même paramètre.
- Il classe ensuite l'ensemble des états non explorés (y compris les nouveaux états) à l'aide de la fonction d'évaluation et choisit le meilleur qui devient l'état courant.

On voit donc que le moteur va développer un arbre d'états où :

- . chaque branche de l'arbre correspond à une variante ;
- . l'ensemble des noeuds de chaque branche représente l'ensemble des états de plus en plus précis par lesquels est passé le moteur ;
- . la feuille d'une branche est, soit une solution, soit un état qui a été reconnu impossible par une règle de contradiction, soit un état bloqué sur lequel aucune règle ne peut s'appliquer, soit encore un état non exploré.

Par ailleurs, le système propose un ensemble d'utilitaires destinés à faciliter la création et l'utilisation d'un Système Expert.

- des éditeurs :
 - . de prototypes, avec gestion de cohérence entre pères et fils ;
 - . de règles, avec contrôle vis-à-vis des définitions de catégories et de prototypes ;
 - . d'objets, avec contrôle vis-à-vis des prototypes et activation de démons ;
- un langage de haut niveau, permettant d'accéder facilement aux objets et à leur champs et, donc d'écrire facilement des méthodes ;
- un système d'explication puissant, permettant de retrouver le raisonnement sur n'importe quel paramètre (règle, champ, état) ;
- un débogueur de base de connaissance, permettant de suivre le raisonnement du moteur pas à pas.

Parmi les développements en cours, citons les études concernant un gestionnaire de fenêtres et souris avec "pop-menus", une représentation graphique du raisonnement, un mécanisme de propagation de contraintes et, à plus long terme, des liens avec des logiciels de CAO classiques, un superviseur chargé d'arbitrer différents points de vues concurrents sur un même état, et un système d'aide à la spécification de projets.

3. APPLICATIONS au DOMAINE du BATIMENT

Le Bâtiment est assurément un secteur professionnel où l'activité de conception demeure très complexe alors même qu'il fait appel à des technologies, dans l'ensemble, bien maîtrisées. En réalité, en matière de bâtiments, la complexité de conception provient davantage de la nécessité de gérer beaucoup d'informations et d'objectifs de natures variées et destinés à de multiples interlocuteurs intervenant en parallèle ou/et en chaîne les uns par rapport aux autres, que du besoin d'étudier par des techniques de pointe, le positionnement et le dimensionnement des composants. Par ailleurs, ainsi que le fait remarquer P. QUINTRAND [QUI 85] la conception en projection des bâtiments recouvre deux ambitions bien distinctes : d'une part, la création architecturale qui exprime toute la potentialité du projet, essentiellement à partir de l'organisation des volumes et, d'autre part, "l'instrumentation" qui confère au projet le réalisme constructif nécessaire.

Il est clair qu'aujourd'hui seule la conception au sens de l'instrumentation peut faire l'objet d'une formalisation suffisante pour être soumise à des expérimentations informatiques. C'est donc à ce niveau que nous situons notre démarche. Notre objectif, dans ce cadre général, est de montrer comment, grâce à la panoplie d'outils proposée par SMECI, nous pouvons essayer de simuler l'attitude experte des concepteurs de projets de bâtiments capables, face à des problèmes techniques, de mettre en évidence, très efficacement, les meilleurs des choix possibles pour l'élaboration de solutions. Nous avons retenu, à titre provisoire, deux premiers exemples illustrant la problématique dans laquelle nous nous situons.

3.1. PRINCIPES DES APPLICATIONS RETENUES

Ces deux premières applications de SMECI au domaine du Bâtiment sont relatives à des problèmes classiques d'ingénierie.

3.1.1. Ossature d'un bâtiment de bureaux

Il s'agit de concevoir l'ossature de l'étage courant d'un immeuble de bureaux, respectant à la fois les spécifications propres au projet particulier et des contraintes dites de bonne conception. L'ossature est constituée de poteaux et d'un plancher, celui-ci pouvant être une dalle pleine ou une dalle supportée par des poutres. Le problème de conception considérée consiste à choisir l'emplacement des poteaux, préciser le type du plancher (éventuellement l'emplacement des poutres) et dimensionner tous ces éléments.

Les spécifications de projet concernent essentiellement les dimensions du bâtiment de géométrie parallélépipédique (longueur, largeur, hauteur d'étage, hauteur utile sous plafond), le nombre de bureaux de l'étage courant, la position et la largeur du couloir de circulation.

Ainsi posé, notre problème de conception pourrait se résoudre d'une manière algorithmique, puisqu'il suffirait de balayer l'ensemble des configurations d'ossatures possibles et de choisir parmi cet ensemble la ou les configurations solutions. Notre préoccupation est différente : nous voulons simuler le comportement des ingénieurs de bureaux d'étude qui, face au problème considéré, ignorent délibérément certaines possibilités de choix pour aller très vite vers

l'étude d'une ou de quelques variantes dont l'expérience leur a appris qu'elles les mèneraient vers les "meilleures solutions".

Ce type d'attitude experte suppose la prise en compte, d'une part d'un ensemble de contraintes que doivent respecter les variantes retenues et, d'autre part, un mécanisme de tri entre ces variantes de façon à étudier en priorité les meilleures d'entre elles. Ces caractéristiques nous ont semblé propices à une expérimentation de l'environnement SMECI qui permet effectivement la gestion des contraintes sous des formes variées (prototypes, objets, règles de production) et dont le mécanisme de progression vers les états solutions du problème est de type "best-first" (fonction d'évaluation).

La difficulté essentielle d'un exercice de ce genre provient en fait, de la nécessité d'exploiter les contraintes et la logique de choix entre les différentes possibilités qui sont très souvent peu ou mal formulées par les experts eux-mêmes. Cette phase de codification du savoir est fondamentale pour une transcription en logiciel mais elle est très délicate et nécessite de nombreuses itérations entre informaticiens et experts.

Exemples de contraintes pour l'application "Ossatures" :

- contraintes stables (elles sont exprimées au niveau des champs des prototypes d'objets).

Ex. L'épaisseur d'une dalle de plancher doit être au minimum de 16 cm, afin de réaliser un isolement acoustique suffisant.

- contraintes relatives au projet (elles sont exprimées au niveau des champs des objets réels).

Ex. L'épaisseur totale de la structure du plancher doit être inférieure à 60 cm, afin de ménager une hauteur utile sous plafond suffisante.

- contraintes relatives au processus de conception (elles sont exprimées par des règles).

Ex. Si la portée dans le sens longitudinal est supérieure à 5 m, les variantes avec deux files de poteaux seulement dans le sens transversal ne doivent pas être examinées (parce que la charge supportée par les poutres transversales serait trop importante).

3.1.2. Thermique d'un bâtiment collectif d'habitation

L'application concerne la détermination des caractéristiques thermiques des bâtiments collectifs à usage d'habitation. La réglementation en vigueur en matière d'isolation thermique de ces bâtiments impose des limitations en déperditions ou/et en besoins de chauffage - coefficients G et B -. Le calcul de ces coefficients nécessite, d'une part, la connaissance détaillée des caractéristiques thermiques des composants de l'enveloppe des bâtiments et, d'autre part, les métrés correspondants.

Le contrôle de la conformité au règlement thermique d'un projet de bâtiment est donc un contrôle a posteriori. Cependant, l'expérience montre que, grâce à leur savoir-faire, les ingénieurs de bureaux d'étude, ou les architectes eux-mêmes, parviennent en général, à travers les choix effectués à différents stades du projet, à proposer une ou des solutions conformes au règlement thermique. La mise au point de processus permettant de guider, de façon experte,

les choix au fil de l'avancement des études, serait un pas important vers l'avènement de véritables outils d'aide à la conception thermique des bâtiments.

En réalité, dès le départ d'un projet de logement, on connaît généralement, d'une part, l'ensemble des données de situation et, d'autre part, l'ensemble des familles d'ouvrages et de composants à l'intérieur duquel les choix vont s'effectuer. Si on se place, en outre, en fin d'Avant-Projet Sommaire, c'est-à-dire à un stade du projet où la géométrie est arrêtée, alors il devient possible d'évaluer, grâce à la connaissance des caractéristiques thermiques de la famille d'ouvrages concernée, la fourchette de variations possibles des coefficients G ou B pour le projet considéré. De même, on peut concevoir un processus effectuant cette évaluation de fourchettes à la suite de chacun des choix possibles et gérant la progression du projet en fonction de la situation de l'objectif réglementaire par rapport aux bornes de ces intervalles.

Ce sont ces éléments qui nous ont suggéré le recours à SMECI pour l'ébauche d'un processus de simulation d'une conception thermique de bâtiments.

Dans un premier temps, nous nous sommes limités au cas d'un projet de bâtiment collectif, dont nous étudions un logement particulier situé à un niveau intermédiaire et à un stade où les linéiques, surfaces et volumes sont connus. La contrainte thermique réglementaire est exprimée uniquement en coefficient G.

Avec ces hypothèses, le problème se limite à l'étude des compositions possibles des murs du logement collectif considéré : position et épaisseur de l'isolation thermique des parois opaques, position et type des parois vitrées.

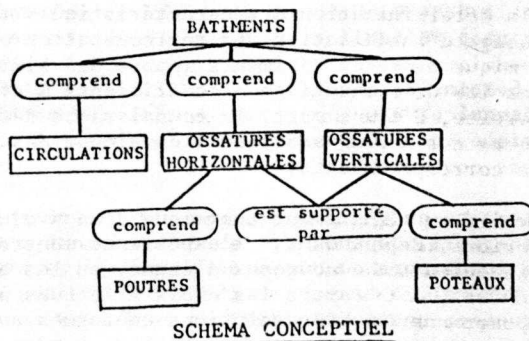
Là encore, pour cette application, il s'agit, plutôt que d'être exhaustif, de mettre en évidence les connaissances expertes nécessaires pour, très rapidement, ne prendre en compte que les bons choix.

3.2. Implémentation sur SMECI de l'application n°1 : ossature d'un bâtiment de bureaux

3.2.1. Les catégories et prototypes

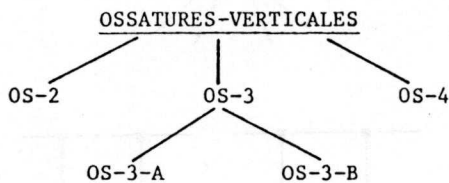
L'application retenue manipule un ensemble d'objets spécifiques qui sont pourvus de propriétés et entre lesquels existent certains liens.

Le schéma suivant, de type entité-association, montre, sous une forme simplifiée, la structure de ces données à un niveau conceptuel.



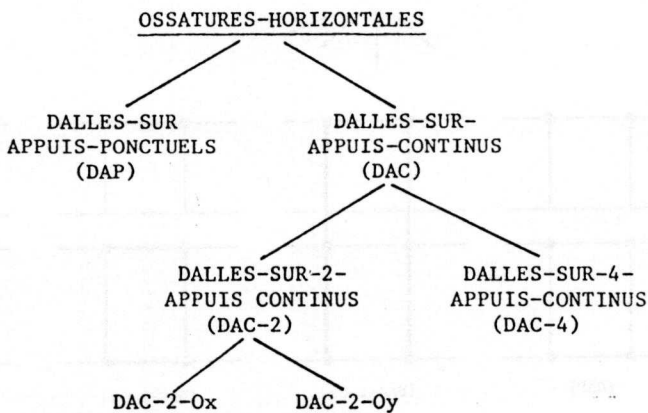
L'implémentation de cette structure dans le langage de représentation de SMECI a été réalisée en créant les catégories correspondant aux diverses entités manipulées, et en traduisant les associations par des champs d'objets spécifiques.

La catégorie OSSATURES-VERTICALES a été décomposée en un arbre de prototypes qui mettent en évidence les différents choix potentiels pour l'emplacement des poteaux dans le sens transversal du bâtiment (voir figure 1).



Ainsi, OS-3-A désigne le prototype qui comporte 3 files de poteaux dans le sens transversal, la file de poteaux intermédiaire étant située sur le bord "inférieur" du couloir de circulation.

La catégories OSSATURES-HORIZONTALES a été également décomposée en un arbre de prototypes qui représentent tous les choix potentiels de plancher (voir figure 1).



Ainsi, DAC-2-Ox désigne le prototype constitué d'une dalle pleine reposant sur deux poutres placées dans le sens transversal du bâtiment (la dalle portant alors dans le sens longitudinal Ox).

A titre d'illustration, la figure 2 indique les champs qui ont été définis pour la catégorie précédente, leurs types respectifs, ainsi que les contraintes de valeurs exprimées au niveau des différents prototypes. Les champs sont référencés par [C] lorsqu'ils sont définis uniquement pour les prototypes (ex. les mathodes), par [R] lorsqu'ils le sont uniquement pour les objets réels (ex. les associations entre objets), et par [CR] lorsqu'ils le sont pour les deux à la fois.

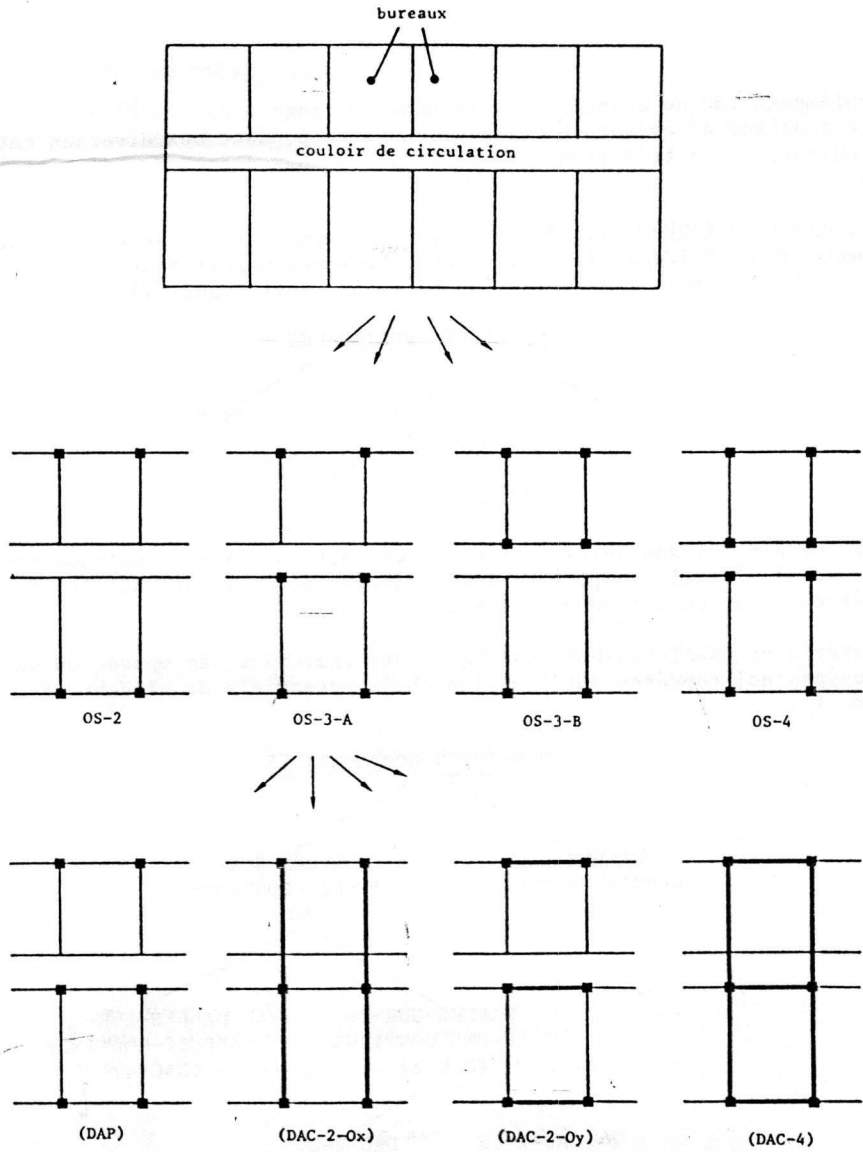


Figure 1 : Modèle d'un étage courant

OSSATURES-HORIZONTALES

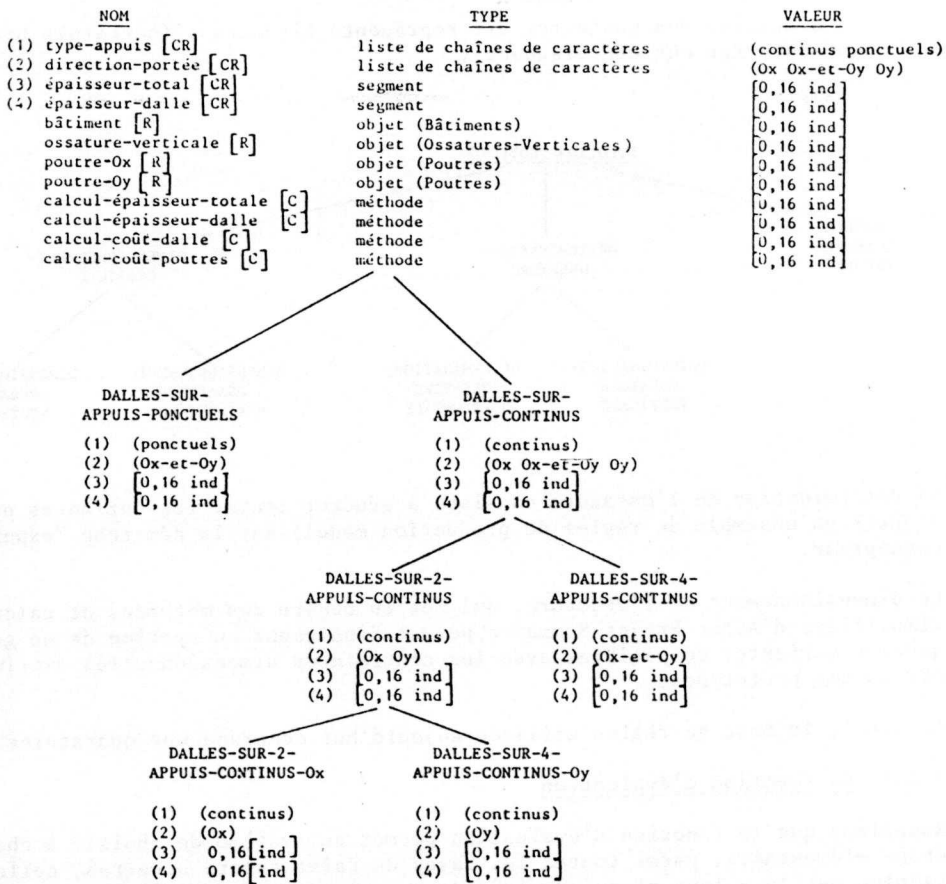
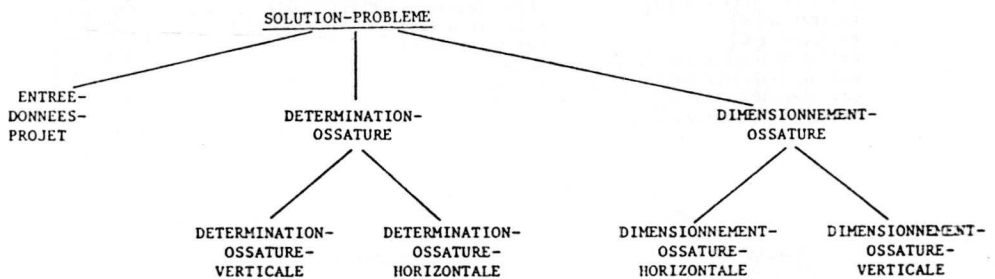


Figure 2 : Champs de la catégorie OSSATURES-HORIZONTALES

3.2.2. Les règles et contextes

L'arbre simplifié des contextes est représenté ci-dessous (certaines branches de sous-contextes ont été élaguées).



La détermination de l'ossature consiste à générer toutes les variantes possibles d'après un ensemble de règles de production modélisant la démarche "experte" du concepteur.

Le dimensionnement de l'ossature, qui met en oeuvre des méthodes de calcul simplifiées d'Avant Projet Sommaire, permet finalement au système de ne garder que les variantes compatibles avec les contraintes dimensionnelles exprimées au niveau des prototypes.

Au total, la base de règles utilisée aujourd'hui comprend une quarantaine de règles.

3.2.3. La fonction d'évaluation

Rappelons que la fonction d'évaluation permet au système de choisir à chaque étape élémentaire, parmi toutes les bases de faits encore ouvertes, celle qui a la plus petite valeur et qui devient donc la base de faits courante.

Pour l'application traitée, dans une première approche, nous avons retenu comme critère d'évaluation le coût total de l'ossature d'un étage courant, sur la base d'un coût volumique forfaitaire pour le béton armé.

Si l'évaluation de ce coût total ne pose pas de problèmes pour une variante entièrement déterminée, il en est autrement au cours du processus de conception où certains paramètres restent encore indéterminés. Il est alors seulement possible de calculer les coûts extrémaux des solutions complètes qui pourraient être bâties à partir de la base de faits courante, en utilisant notamment les contraintes dimensionnelles exprimées dans les prototypes.

Au stade actuel de développement de cette application, il ne nous est pas possible de préciser quel choix pour la fonction d'évaluation (coût minimal ? coût maximal ? pondération des coûts extrêmes ?) permet d'obtenir la meilleure solution, ou les n premières meilleures solutions, le plus rapidement possible.

4. CONCLUSION

Ces premières tentatives de l'utilisation pour des applications au domaine du Bâtiment d'un environnement logiciel tel que celui proposé par SMECI, nous permettent de tirer les principaux enseignements suivants :

- la conception de Bâtiment dans sa phase d'instrumentation est un champ d'expérimentation favorable au recours aux techniques des Systèmes Experts, sous réserve de disposer de facilités de représentations de connaissances sous des formes variées : typification et composition des objets manipulés, règles de production, cheminements experts à travers l'arbre des variantes possibles ;
- les principales difficultés dans l'élaboration d'applications dignes d'un intérêt professionnel résultent, d'une part, de la nécessité de donner à ces applications une taille suffisante pour que l'expert humain soit en mesure d'apprécier l'aide proposée par ces outils et, d'autre part, des problèmes liés à la disponibilité et à la mise en forme des connaissances pour la simulation d'un comportement réellement expert ;
- les nombreuses facilités d'édition et de contrôles syntaxique et sémantique offertes par SMECI, en parallèle à sa puissance de représentation, en font un outil particulièrement bien adapté à une démarche d'élaboration d'outils d'aide à la conception de bâtiments. Les développements en cours des aspects Multi-Experts de SMECI devraient confirmer cet espoir.

REFERENCES

- [AUT 85] "L'utilisation des SGBD dans le domaine du Bâtiment", par J. AUTRAN et M. FLORENZANO, AFCET, MBD num.1, 1985
- [MAN 82] Projet : une base de données relationnelle en CAO pour le projet d'architecture, par C. MANAGO, P. TERRACOL, M. DUTREIX et G. GUENA, rapport CIMA, 1982
- [QUI 85] "La CAO en Architecture", par P. QUINTRAND, Editions HERMES, 1985

Auteurs

Marc BOURDEAU
Bertrand DELCAMBRE
Manuel MONTALBAN

CENTRE SCIENTIFIQUE et TECHNIQUE du BATIMENT (C.S.T.B.)
Etablissement de SOPHIA ANTIPOLIS
Boîte Postale n°21
06561 VALBONNE CEDEX

Téléphone : 93.65.34.00

Télex : 970194 F