

# L'Intégration des connaissances techniques dans le processus de conception architecturale et urbaine

Luc Adolphe

## RÉSUMÉ

*La conception architecturale et urbaine est un acte complexe reposant sur la transformation de contraintes appartenant à des savoirs et savoir-faire hétérogènes, en des formes, des espaces, et des ambiances. Lier de manière cohérente les connaissances scientifiques et techniques et leur opérationnalité dans ce contexte passe nécessairement par la synergie entre trois axes thématiques concomitants: le développement de modèles du processus de conception, la reformulation des connaissances techniques pour les intégrer aux modèles et le choix de paradigmes informatiques adaptés aux modèles et aux connaissances.*

*Après avoir défini les termes théoriques de cette approche globale de l'intégration de l'aide à la décision technique dans la conception architecturale et urbaine, nous présentons deux illustrations: le projet AMACH (Approche Multi-Acteurs du Confort dans l'Habitat), dans un contexte de CAO et le projet CALIN (Computer Aided Learning Integration System), dans un contexte d'EAO.*

## INTRODUCTION

Pour représenter le comportement technique d'un bâtiment ou d'une ville à concevoir, ont été développés à partir des lois fondamentales de la physique, des "modèles physiques" (acoustique, énergétique, éclairage, structures...). Ces modèles requièrent une connaissance quasi exhaustive sur l'objet à concevoir ainsi que souvent une puissance de calcul importante pour être résolus.

Le développement rapide des ordinateurs comme machines séquentielles programmées a permis de mettre en œuvre des représentations numériques de ces modèles physiques dans des programmes développés toujours par des ingénieurs, très souvent pour des ingénieurs.

Il y a une quinzaine d'années, est né un courant de recherches visant à l'intégration de ces outils dans la pratique des concepteurs de bâtiments. Ces "traductions" étaient principalement basées sur des modes de pensée déductifs et des relations logiques.

Le relatif échec de cette première famille d'outils dits de conception nous a amené à élargir notre champ de recherches pour intégrer les avancées dans ce que l'on peut regrouper sous le terme générique de *sciences de la connaissance* à savoir la psychologie cognitive, l'intelligence artificielle et l'aide à la décision (Voir Figure 1).

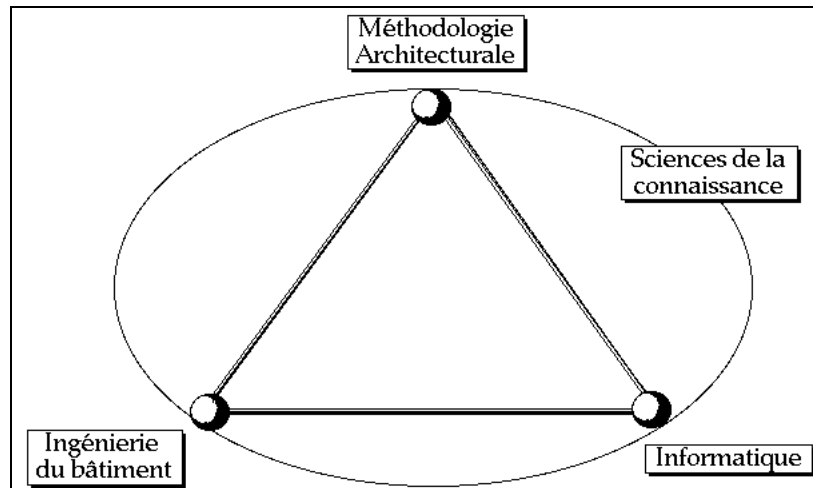


Figure 1 Le champ de recherches et ses disciplines

Selon ce schéma, notre réflexion peut être structurée selon trois axes [ADOLPHE 91]:

- 1) la **méthodologie architecturale**, par une réflexion sur les pratiques des concepteurs de bâtiments, et sur les mécanismes sous-jacents à cette activité,
- 2) les **connaissances techniques**, axe qui vise à lier de manière cohérente les connaissances scientifiques et techniques (centrées sur l'Énergétique du bâtiment), et leur opérationnalité dans le champ de l'Architecture,
- 3) les **paradigmes informatiques**, axe qui vise à déterminer des environnements adaptés aux modèles et aux connaissances (Voir Figure 2).

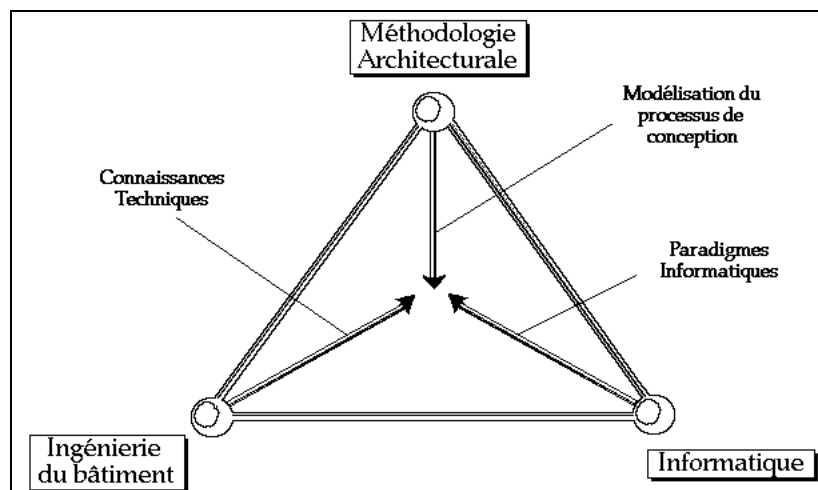


Figure 2 Les 3 axes de la recherche

Notre recherche vise donc à profiter des synergies entre ces trois axes pour produire des connaissances sur la Connaissance et permettre la création d'outils d'aide à la décision et à la négociation pertinents dans ce contexte.

A chacun de ces 3 axes peut être associée une question fondamentale qui structurera notre exposé:

- 1) Comment formaliser la conception architecturale et urbaine dans des modèles opérationnels ?
- 2) Comment formaliser les connaissances techniques pour les adapter à ces modèles ?
- 3) Quels paradigmes informatiques peuvent autoriser la mise en œuvre de ces modèles et de ces connaissances ?

# I Comment formaliser la conception architecturale dans des modèles opérationnels ?

La conception architecturale et urbaine est d'abord caractérisé par de nombreux acteurs: l'architecte ou l'urbaniste, le programmiste, l'ingénieur du Bureau d'Études ou du Bureau de Contrôle, le Maître d'Ouvrage, l'utilisateur... entretenant des relations complexes de délégation, de sous-traitances, dans un contexte médiatisé à outrance par les procédures de concours. A chaque acteur correspond un point de vue dont l'importance n'est pas hiérarchisable d'emblée: la conception n'est donc pas l'addition de points de vue réducteurs. Le processus de conception est un processus de négociation, de décision collective.

Le processus de conception architecturale ou urbain ne s'apparente pas à un processus de conception scientifique pour lequel à un énoncé correspondent des critères d'évaluation objectifs permettant d'atteindre une solution unique aux propriétés vérifiables. Ici, l'énoncé n'est jamais certain car le problème n'est pas formulé de manière exhaustive et souvent pas pertinente [BOUDON 94]. Le processus de conception débute donc par une phase de **formulation d'un énoncé** dont les composantes sont les finalités (type de projet), les utilités (type de programme), les performances (techniques, économiques) et l'intention des concepteurs et autres acteurs. Vient ensuite une phase de **formulation de solutions**. Cette phase est souvent sacralisée par les architectes (l'éclair de génie, le moment d'illumination...). En fait, elle correspond à la succession de propositions de formes, accompagnées d'une prise de position délibérée de l'architecte et soumises à un examen critique. Enfin vient une phase de **concrétisation de solutions** dans laquelle les contraintes physiques relatives au parti constructif ont un rôle déterminant.

C'est pourquoi, on peut parler d'un **contexte de résolution de problèmes**. A ce contexte correspond ce que nous appelons le **paradoxe du processus de conception**. Les phases amont de conception ont en effet un poids hégémonique sur les choix architecturaux et techniques fondamentaux: c'est lors de la phase de programmation que les choix fonctionnels sont décidés; lors de l'esquisse que le parti, l'implantation, l'orientation, le volume générique sont décidés... Paradoxalement, c'est dans ces phases que l'information disponible est la plus faible, car il est impossible d'appliquer stricto sensu toutes les contraintes, ou de déterminer des procédures admissibles pour atteindre un but; le problème n'a pas de formulation définitive (Voir Figure 3).

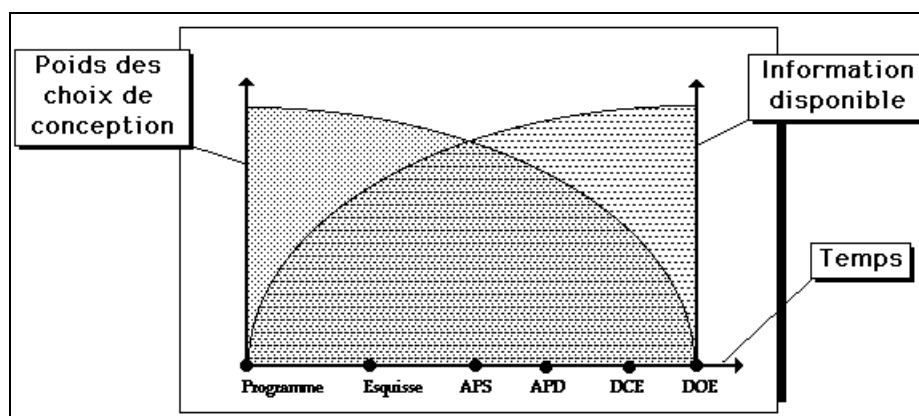


Figure 3 Le paradoxe de la conception architecturale

Les conséquences potentielles des outils d'aide à la conception sont donc maximales dans ces phases. Les outils traditionnels de l'ingénieur nécessitant une connaissance quasi-exhaustive sur les objets à concevoir ne sont applicables en l'état qu'à la fin du processus, quand le degré de liberté des concepteurs est le plus faible: l'ingénierie est souvent plus curatif que créatif ou préventif.

Les deux caractéristiques du processus de conception architecturale, conséquences de ce paradoxe, sont **une structure de données évolutive** et la **mise en œuvre concourante de plusieurs types de raisonnement**.

Les concepteur schématisent; ils mettent en œuvre des représentations simplifiées des objets à concevoir et leur appliquent un jeu limité de contraintes. Les objets, leurs relations, les contraintes qui s'y appliquent sont donc éminemment variables.

Sur la Figure 4, nous avons fait figurer trois niveaux de spécification du projet, d'une esquisse à un détail constructif, en passant par un plan des espaces principaux. On voit que les structures de données correspondantes évoluent de structures extrêmement simples liant volume générique et orientations, à des structures extrêmement complexes au niveau du détail constructif. Tout au long du processus, le concepteur passe d'un niveau à un autre pour résoudre les problèmes de conception qu'il décide d'aborder.

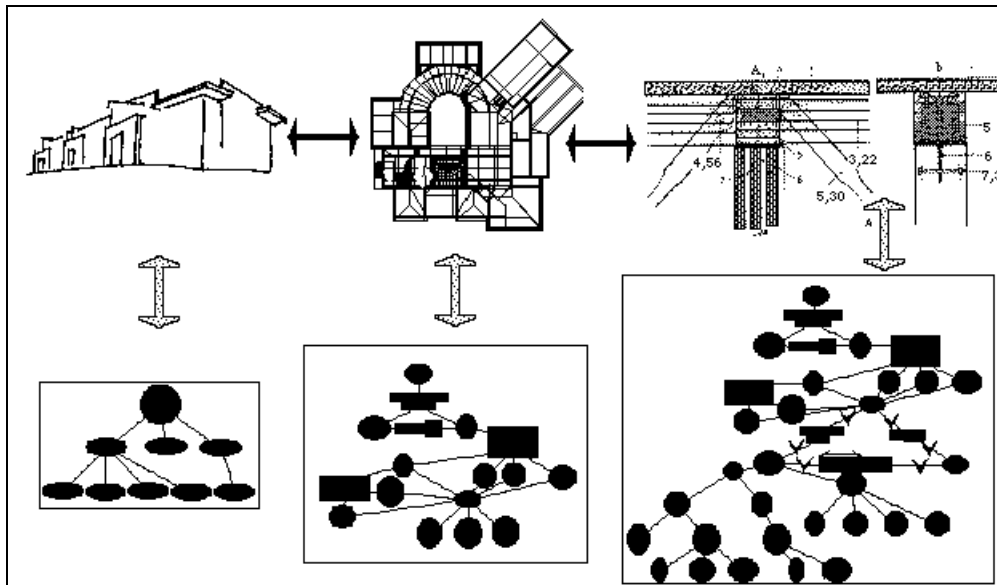


Figure 4 La conception architecturale: Une structure de données évolutive

Les différents types de raisonnement mis en œuvre par les concepteurs peuvent être regroupés en trois familles fondamentales: les approches déductives, inductives et référentielles (voir Figure 5).

Les approches **déductives** renvoient au modus ponens d'Aristote, et visent à prévoir les effets de causes connues. Ces approches sont qualifiées de descendantes ("top down"- du global au détail) car elles visent à décomposer un objet en sous-objets élémentaires pour lesquels des solutions sont connues puis à recomposer pour aboutir à la solution finale. Ces approches nécessitent que le problème soit formulé de façon exhaustive et univoque [ALEXANDER 65, WHITEHEAD 65].

Les approches **inductives** qualifiées d'approches montantes ("bottom-up") visent a contrario à passer de propriétés partielles vers une classe générique, de la partie au tout: elles renvoient au fameux synecdoque des ethnologues [Cercle de Vienne 1922, HOC 87].

Les approches que nous avons baptisé **référentielles** [ADOLPHE 95] ont comme caractéristique commune l'**émergence très rapide de solutions possibles** (certains auteurs parlent de *générateurs primaires*) alors que le problème n'est pas encore assimilé. Suivant le type de solutions, nous les appellerons des approches stéréotypiques, analogiques ou abductives.

Pour le **stéréotype**, la solution est un bâtiment ou une forme (Cfs. l'architecture de Bofill, les maisons sur catalogues...).

Pour l'**analogie**, la solution est une classe de bâtiment ou de forme (Cfs. le naturalisme de Guimard, ou les forteresses médiévales de Louis Kahn...). Ce type de raisonnement est à la base de l'enseignement des Beaux-Arts: analogie du projet de l'étudiant à des projets remarquables de l'histoire de l'Architecture.

Pour l'**abduction**, la solution est un schéma d'interprétation, un *protomodèle*. Ce concept a été inventé par la Philosophie des Sciences [MARCH 76, CROSS 86, POPPER 86] et tout énergéticien en connaît des exemples célèbres (l'analogie électrique- thermique visant à appliquer les lois d'Ohm et de Kirchoff aux transferts thermiques linéarisés, par exemple). En Architecture, la psychologie cognitive [SIMON 65, LAWSON 78, RASMUSSEN 84, HOC 87] a montré que ces protomodèles sont extrêmement synthétiques, puissants, peu nombreux et longs à développer. Cette dernière propriété renvoie à l'importance du modèle culturel. Les raisonnements référentiels sont spécifiques à la culture architecturale et ne peuvent être portés que par l'architecte. Quelque soit l'évolution des pratiques, l'architecte, par le poids de ces approches référentielles doit rester le "chef d'orchestre", l'homme de synthèse du processus de conception.

Enfin, il existe des familles hybrides comme la **Réfutation de conjectures**, concept inventé par la Philosophie des sciences [KUHN 70, SCHANK 81], dans laquelle l'édification de solutions est suivie d'un examen critique mettant en évidence les défauts, les limites de ces solutions pour établir les bases de nouvelles. Cette approche qui renvoie à la pensée critique (chercher consciemment à éliminer ses erreurs) correspond bien à la pratique en conception (discontinuité des buts, autocritique et débats contradictoires...) (Voir Figure 5)

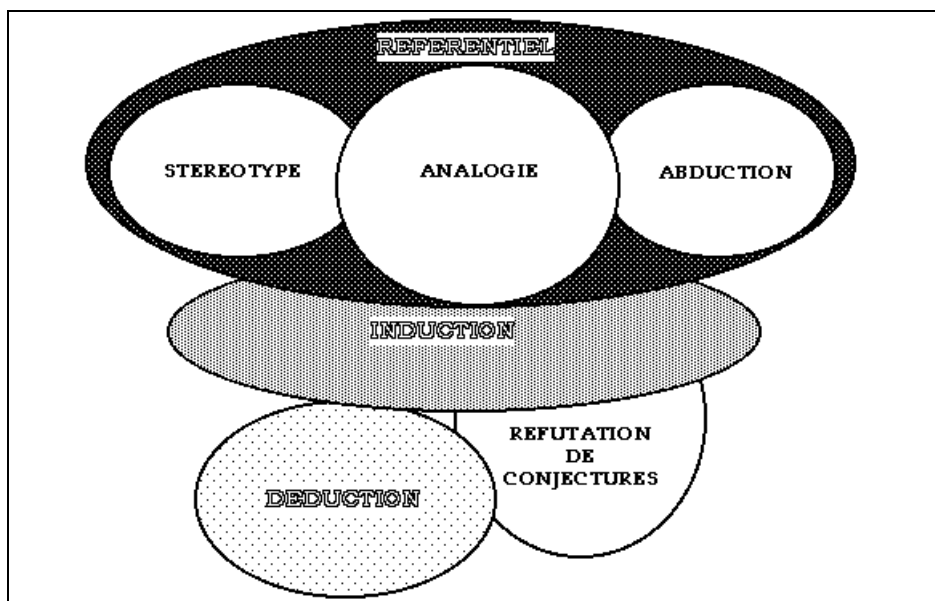


Figure 5 Les différents modes de raisonnement mis en œuvre par les concepteurs

En conclusion, la conception architecturale exige le développement de modèles de processus. Ces modèles correspondent à l'intégration d'un (ou plusieurs types) de raisonnement(s) avec les connaissances et données nécessaires à leur mise en œuvre. Ces modèles sont nécessairement complexes sinon le processus n'aurait pas à être modélisé mais doivent rester suffisamment simples pour être opérationnels dans des outils de Conception Assistée par Ordinateur (CAO). Ces modèles doivent combiner différents types de raisonnement (approches déductives, inductives, référentielles) et permettre une évolutivité des données.

## II Comment formaliser les connaissances techniques pour les adapter à ces modèles ?

Nous nous intéressons ici à une discipline, l'Énergétique du bâtiment. Balayons rapidement ses spécificités.

L'Énergie détermine une grande partie des étroites relations entre un projet et son environnement; en ce sens cette discipline a des interactions fortes avec les variables de conception (implantation, orientation, échelle, matériaux, systèmes) et traverse ainsi tout le processus de conception.

La recherche de la performance énergétique passe non seulement par l'économie d'énergie mais encore par le confort thermique d'hiver et d'été, buts parfois conflictuels.

La recherche de la performance énergétique peut aboutir à des solutions conflictuelles avec la qualité de l'air, le confort visuel...

Les modèles physiques mis en jeu dans le bâtiment (convection, conduction, rayonnement, changement de phase) sont instationnaires, non linéaires, couplés au niveau des mêmes objets. Ils renvoient donc à une culture technique, souvent mal intégrée aux pratiques de l'Architecte qui manque de référents techniques.

Enfin, Viollet le Duc disait : "Voir, c'est savoir" : L'architecture est avant tout un art visuel. Les autres sens (dont le toucher) sont souvent atrophiés dans la perception architecturale.

Brossons maintenant un rapide panorama des outils d'évaluation énergétique du bâtiment selon deux axes: un axe lié aux **techniques informatiques**, un axe lié aux **méthodes d'évaluation énergétique**.

Selon le premier axe, les outils d'évaluation basées sur des modes de pensée déductives peuvent être scindés en deux familles :

- les méthodes que nous baptisons **méthodes déductives de comportement**, qui regroupent les méthodes analytiques (Facteurs de réponse [MITALAS 68] et de pondération [KUSUDA 84], réponse harmonique établie [GROLEAU 84] ou analyse modale [BACOT 84]...) et les méthodes analogiques (discrétisation spatio-temporelles par différences finies...), qui s'appuient sur les modèles physiques fondamentaux et sont donc caractérisées par une quasi-exhaustivité de l'information sur l'objet à concevoir souvent incompatible avec les données disponibles en conception,
  - les **méthodes déductives de bilan**, issues soit du lissage des résultats des méthodes précédentes, soit d'approches empiriques. Elle visent surtout à établir un bilan sur une période donnée. Leur domaine de validité est souvent plus réduit que les précédentes, mais leur compatibilité avec les données accessibles en conception est plus grande.

Selon le second axe, les outils d'évaluation peuvent être scindés en trois familles:

- les outils **autonomes**, correspondant à une phase du processus et à un acteur, nécessitant un recodage pour tout autre phase et tout autre acteur,
  - les outils **chaînés**, visant à automatiser le transfert entre la base de données géométriques et topologiques provenant d'un outil de dessin assisté par ordinateur (DAO) et la base de données exploitable, par le logiciel applicatif, l'évaluation thermique. Ces outils sont caractérisés par des problèmes d'incomplétude, d'inadaptation sémantique et d'inadaptation aux modèles de processus de conception,
    - les outils **intégrés**, visant à faire graviter autour d'une base de données *neutre* (ou *pivot* ou intégrée), un ensemble de bases de données propres à chaque acteur du processus (l'architecte, le thermicien...) communiquant à travers des interfaces EDI (Échange de Données Informatisées) et alimentant des bases de connaissances et des outils d'évaluation propres à chacun de ces acteurs.
- A l'heure actuelle, aucun outil professionnel ne peut être assimilé à un outil intégré; seulement quelques outils de recherche répondent à ce qualificatif.

Sans trop noircir le tableau on peut donc dire qu'en l'état, les outils d'évaluation énergétique du bâtiment, sont inadaptés à l'évolutivité des données, à la sémantique des objets manipulés en conception, et aux modes de pensée autres que déductifs. A partir de ce constat, proposons **deux stratégies de développement des outils d'évaluation énergétique**:

1) une stratégie à long terme visant à une **reformulation des connaissances** scientifiques et techniques dans des outils intégrés pouvant passer par :

- le développement de **méthodes déductives adaptées** aux phases amont, comme des méthodes déductives de comportement (l'analyse modale qui permet dans certains cas, par un nombre très limité de descripteurs d'analyser très finement par exemple des évolutions de température dans une serre ou dans un bâtiment multizone), ou comme des méthodes déductives de bilan type méthode H2E [EMP 89], ou diagramme de Givoni [GIVONI 78], héliodons ou abaques couplés à des outils de DAO.
- le développement de **méthodes inductives de bilan**, visant à inverser la déduction quand l'expression analytique s'y prête (par exemple à partir de la méthode Balcomb [BALCOMB 80], passer d'un pourcentage de couverture solaire par les gains directs, à une surface de vitrage sud correspondante, information extrêmement précieuse en conception).
- le développement de méthodes à **base de connaissances**, qui nous parait la piste la plus porteuse car elle permet de mettre en œuvre des connaissances de haut niveau, issues de l'expertise de spécialistes,

combinant des modèles inductifs et des modèles référentiels dans des systèmes experts ou des structures hypertextes, ou autorisant le traitement de données partielles, l'apprentissage symbolique...

° l'utilisation d'outils d'**aide à la décision** permettant de replacer l'énergétique dans le contexte multi-contraint, multi-technique de la conception des bâtiments.

2) une stratégie à court terme, liée au fait que la famille la plus prolifique des outils d'évaluation énergétique correspond aux méthodes déductives, par le **développement d'interfaces intelligents**, cette intelligence étant centrée sur:

° le **dialogue avec l'utilisateur**, par la traduction des entrées et des sorties de la méthode dans le langage de l'utilisateur, par l'aide à l'identification de performances inacceptables, ou par la spécification automatique de composants,

• la **forme de l'interface**, (aspect considéré à tort comme anecdotique, surtout lors de l'appropriation de connaissances nouvelles), se traduisant par des interfaces interactives, graphiques, offrant une aide en ligne...

En conclusion à cette deuxième question, nous pensons qu'il faut repenser le statut de la technique dans le processus de conception pour permettre de développer des **corpus de référence techniques** et à terme que l'Architecte s'approprié cette discipline.

### III Quels paradigmes informatiques peuvent mettre en œuvre modèles et connaissances ?

Pour répondre cette dernière question, nous devons d'abord constater que la Recherche en Informatique a eu un rôle déterminant dans la renaissance de la recherche sur les modèles théoriques de conception, notamment grâce à l'Intelligence Artificielle. Cette question n'est donc pas indépendante de la première.

La CAO actuelle peut être grossièrement découpée en deux familles, les outils d'assistance au dessin dans les phases amont de conception, et les outils d'évaluation technique ou économique dans les phases aval.

Citons brièvement les paradigmes informatiques les plus adaptés à l'intégration des connaissances techniques au processus de conception:

• les **langages procéduraux** utilisés pour mettre en œuvre les approches **déductives**, dans des programmes séquentiels, reposant sur une approche déterministique et une sémantique faible: ces langages sont bien adaptés au calcul des représentations géométriques (3D, traitement d'images...) et aux méthodes déductives énergétiques;

• les **hypertextes** utilisés pour mettre en œuvre les approches **référentielles**, par leur faculté de gérer des liens dynamiques entre des informations hétérogènes et l'utilisation du langage naturel;

° l'**intelligence artificielle**, qui nous paraît la plus porteuse à terme pour mettre en œuvre les approches **inductives**, grâce à trois techniques principales:

- la programmation logique par contraintes, permettant de traiter de façon élégante les problèmes multi-contraints,

- les langages à objets, qui formalisent le monde, plutôt que les règles qui portent sur le monde, et mettent en œuvre des concepts de haut niveau, comme, "l'encapsulation" au sein d'un objet d'attributs et de procédures, ou la notion de classe et d'héritage,

- les systèmes experts, très adaptés à la formalisation de connaissances de spécialistes, et permettant de séparer données et connaissances.

Nous sommes passés très rapidement sur cette dernière question, dans la mesure où nous pensons que les outils informatiques compatibles avec notre contexte existent déjà. Il faut toutefois travailler sur la formalisation et la structuration des données en conception pour favoriser les Échanges de Données Informatisées (EDI), développer des représentations de plus en plus abstraites de l'objet à concevoir, pour faire converger DAO et outils d'évaluation techniques vers une réelle CAO devant intégrer différentes techniques informatiques, correspondant à divers types de raisonnement.

## IV LES PROJETS

Pour illustrer notre travail théorique, nous allons maintenant présenter deux projets récents (Voir Figure 6) :

- le projet AMACH (pour Approche Multi-Acteurs du Confort dans l'Habitat) qui, dans un contexte de CAO, vise à une approche globale des composantes ambiantales du confort (ou plutôt d'absence d'inconfort) lors de la conception d'un projet d'habitat. On s'intéresse à cet acteur privilégié qu'est l'architecte et à l'intégration de différentes disciplines techniques (confort acoustique, confort thermique, confort olfactif et qualité de l'air, et confort visuel), en tentant de gérer les problèmes de conflits, de recherche de solutions multicritères satisfaisantes et de choix multi-objectif entre variantes à un même projet.
- le projet CALIN (pour Computer Aided Learning Integration System), qui, dans un contexte d'EAO, vise à l'Enseignement de la discipline énergétique lors de la conception d'un bâtiment. Ici, ce qui nous intéresse, c'est l'intégration de différents types de raisonnements, en utilisant divers techniques informatiques.

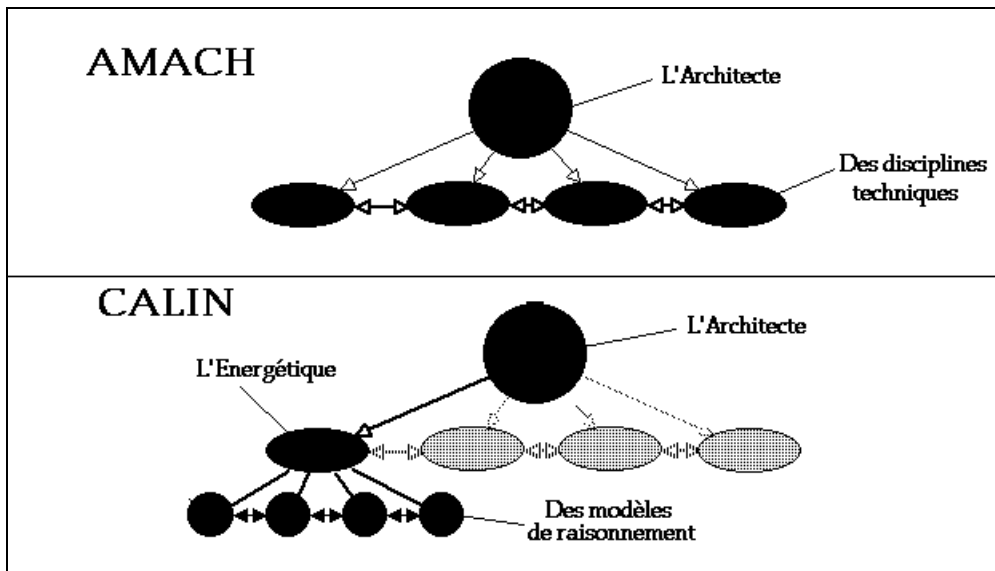


Figure 6 Intégration des disciplines ou des modèles de raisonnement dans les projets AMACH ET CALIN

### 1) Le projet AMACH

Le projet AMACH vise à développer une approche globale du confort ambiantal en conception, pour répondre au fait que différentes contraintes techniques prises isolément aboutissent à des groupes de solutions architecturales totalement différentes. Il faut donc faire un parcours exhaustif de l'ensemble des disciplines définissant le confort dans une ambiance bâtie: ce que nous appelons la synchronicité des dimensions techniques du confort.

Le projet AMACH tente une adéquation aux approches cognitives du processus de conception par la prise en compte de deux niveaux de spécification, Esquisse et Avant-Projet Sommaire (APS), correspondant à l'évolutivité des données en conception.



Le projet AMACH utilise une approche à base de connaissances, issues de l'expertise de spécialistes sous forme d'algorithmes simples ou de règles de production recueillies à partir d'un protocole d'interviews qui a permis la formalisation et la structuration de connaissances nouvelles.

Le projet AMACH utilise des paradigmes informatiques avancés comme l'approche objet, les systèmes experts, la programmation logique par contraintes et l'aide à la décision.

L'architecte joue un rôle fondamental en conception par le poids de ses référents architecturaux. C'est donc à lui que nous nous intéressons dans AMACH. L'architecte débute par la description géométrique et topologique du projet dans un outil de DAO, le poste architecte du projet KREPIS [CAOMIP 88]. On en extrait des modèles de données qui alimentent différentes bases de connaissances. Deux niveaux de base de connaissances ont été développés correspondant aux deux niveaux de spécification Esquisse et APS (Voir Figure 7).

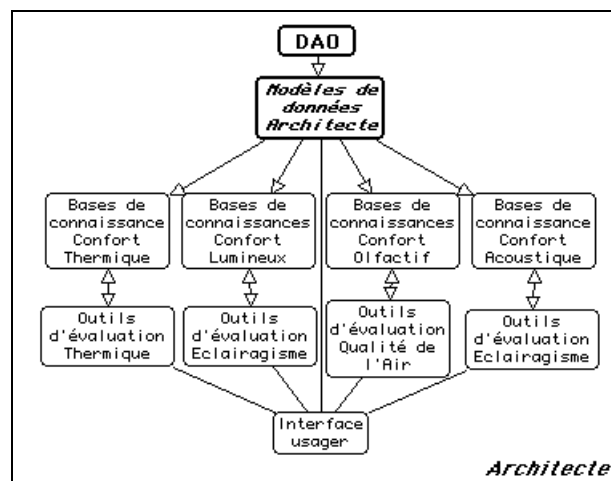


Figure 7 La structure des modules AMACH

Ces deux phases se déroulent de manière analogue. Nous sommes partis de l'hypothèse que l'architecte grâce à l'outil informatique peut mener de façon plus systématique la conception en parallèle de différentes variantes au même programme: plusieurs *intentions* (Voir Figure 8). Après dessin dans le modelleur KREPIS, la base de données est instanciée puis confrontée aux bases de connaissances diagnostic selon les différentes disciplines. .

Vient ensuite une phase de recherches de solutions multicritères qui permet à partir d'une stratégie définie par l'utilisateur (Ex.: Modifier la surface de vitrage d'une pièce) et d'un ensemble de contraintes à vérifier (Note de solarisation et Note de Bruit Aérien Extérieur positives), la génération de variantes techniques et/ou architecturales respectant cet ensemble de contraintes (Ex.: une surface de vitrage respectant un niveau de solarisation et de bruit extérieur). A partir des diverses variantes satisfaisantes retenues pour chaque famille, un module d'aide au choix multi-objectif permet d'agrèger les préférences de l'utilisateur du système, pour aboutir à la variante la plus adaptée à son point de vue.

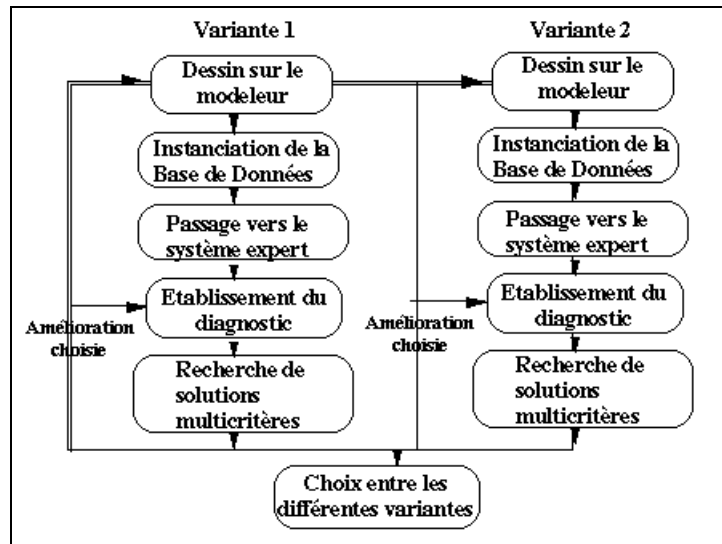


Figure 8 Le déroulement d'une phase AMACH

Notre approche théorique a montré les avantages d'une structure de données objet (tout objet est instance d'une classe - *héritage* - , et toute classe est sous-classe d'une autre classe - *construction par raffinement de classes existantes* - ). Pour décrire une partie de la base de données simplifiées (Esquisse), nous utilisons dans la Figure 9, le formalisme NIAM [NIAM 82], dans lequel les objets sont figurés par des ronds, les relations orientées par des rectangles (notamment la hiérarchie, l'association...), sauf les relations d'héritage figurées par des arbres de spécialisation; les contraintes de totalité ou d'unicité sont figurées respectivement par des barres ou des V sur la relation concernée. On remarque la complexité de cette partie de la Base de données, mettant en œuvre des relations variées (Ex: un projet est constitué d'un environnement qui entoure un bâtiment qui est agrégat de locaux (logement, local techn., circulation, local d'activ.) qui sont agrégats de pièces (pièce principale, pièce humide) qui délimitent un espace qui est défini par un ouvrage et une façade qui sont regroupés par un ouvrage. Pour comprendre la puissance de ce formalisme objet, on voit sur l'arbre de spécialisation présenté à droite de la Figure 9 que l'information sur un attribut de la classe paroi sera héritée par toutes les instances de ses sous-classes (paroi opaque ext, mur extérieur, toiture, plancher bas...).

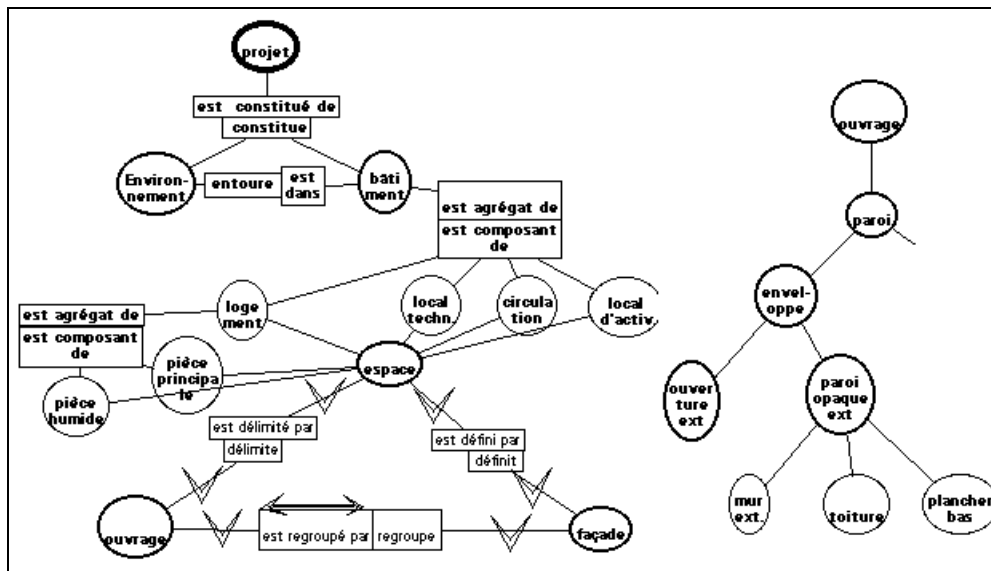


Figure 9 La structure des données simplifiées de AMACH

Cette structure de données alimente une structure de bases de connaissances pour le diagnostic et la recherche de solutions multicritères satisfaisantes. L'objectif global est le confort "multi-technique". Les sous-objectifs retenus sont au nombre de 5: confort thermique d'été, confort thermique d'hiver, confort acoustique, confort olfactif, et confort visuel, et correspondent chacun à une base de

connaissances édifïée auprès d'experts des disciplines concernées. A chacun de ces sous-objectifs correspond des objectifs élémentaires correspondant à des îlots de connaissances, choisis pour être les plus indépendants possibles.

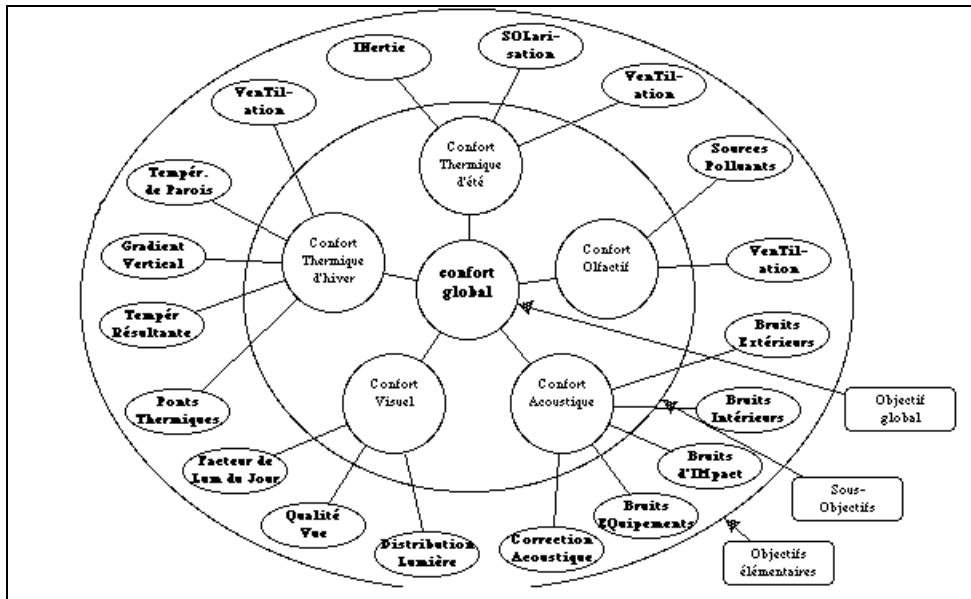


Figure 10 La structure des base de connaissances de AMACH

Ces bases de connaissances prennent la forme d'algorithmes simples ou de règles de production. Il faut noter ici l'extrême hétérogénéité des connaissances variant entre des domaines très balisés comme la thermique (nous avons abouti à une structure de connaissances proche de la rubrique p de la méthode Qualitel pour l'été [QUALITEL 89], et à une structure de connaissances proche du profil UCRES pour l'hiver [CSTB 82] ), ou comme l'acoustique (où les notions de performance et de confort sont intimement liées), et des domaines de connaissances éparées et très peu structurés, pour le confort visuel et olfactif.

A la fin de cette phase sont marqués les objets élémentaires ou globaux à problème (à partir d'une cotation -2 à +2, et est proposé une liste de remèdes pour revenir à des conditions de confort. Un exemple de bases de connaissances simplifiées en Acoustique est présenté en figure 11. Nous avons choisi l'environnement SMECI pour mettre en œuvre ces bases de connaissances [SMECI 92].

Bruit Aérien Extérieur (Note par façade)			N o t e							
Techno Gros œuvre	Etanchéité enveloppe	Parti Façades	Exposition des façades							
Maçonnerie Lourde	Etanche	Peu Vitrée	A	0	B	1	C	2	D	2
		Normal	A	0	B	1	C	1	D	2
		Très Vitrée	A	-1	B	0	C	1	D	2
	Normale	Peu Vitrée	A	0	B	1	C	2	D	2
		Normal	A	-1	B	0	C	1	D	2
		Très Vitrée	A	-1	B	0	C	1	D	2
	Perméable	Peu Vitrée	A	-1	B	0	C	2	D	2
		Normal	A	-1	B	0	C	1	D	2
		Très Vitrée	A	-1	B	0	C	1	D	2
Maçonnerie Légère	Etanche	Peu Vitrée	A	-1	B	1	C	2	D	2
		Normal	A	-2	B	0	C	1	D	2
		Très Vitrée	A	-2	B	-1	C	0	D	1
	Normale	Peu Vitrée	A	-1	B	1	C	2	D	2
		Normal	A	-2	B	0	C	1	D	2
		Très Vitrée	A	-2	B	-1	C	0	D	1
	Perméable	Peu Vitrée	A	-2	B	0	C	1	D	2
		Normal	A	-2	B	0	C	1	D	2
		Très Vitrée	A	-2	B	-1	C	0	D	1
Structure Bois	Etanche	Peu Vitrée	A	-2	B	0	C	1	D	2
		Normal	A	-2	B	0	C	1	D	2
		Très Vitrée	A	-2	B	-1	C	0	D	1

Figure 11 Exemple de la base de connaissances simplifiées acoustiques sur le Bruit Aérien Extérieur

La phase suivante correspond à la recherche de solutions satisfaisantes vis à vis globalement d'un ensemble de contraintes ou de domaines de contraintes retenus par l'utilisateur du système. Or l'interactivité entre contraintes techniques liées au confort, et certains objets particuliers du projet est très forte.

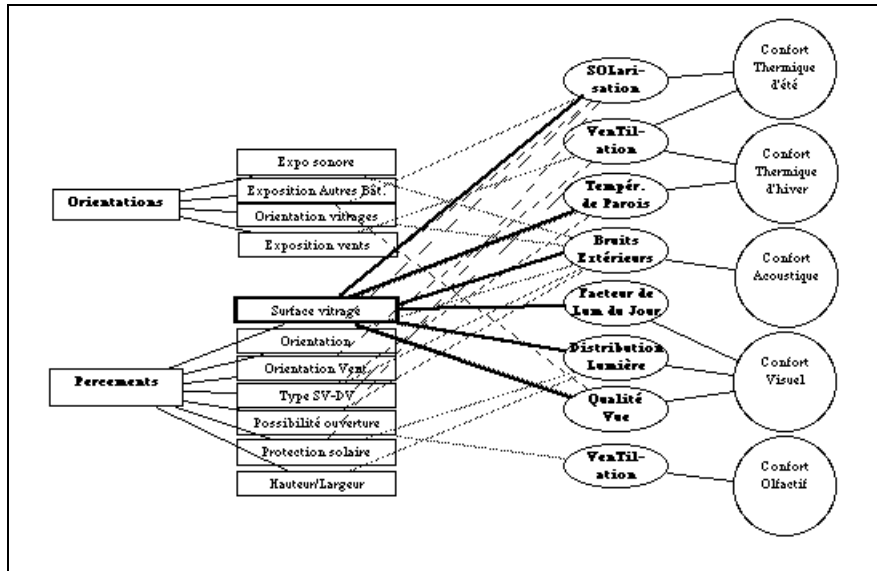


Figure 12 Interactivité des contraintes de confort au niveau de mêmes objets physiques ou symboliques

Sur la Figure 12, nous avons représenté un certain nombre d'objets physiques (perçements) et symboliques (orientations); ces objets sont directement liés à un ensemble de contraintes. Par exemple, si l'utilisateur décide de modifier la surface de vitrage d'une pièce, des contraintes liées à des disciplines variées seront sollicitées: la contrainte *solarisation* pour le confort thermique d'été, la contrainte *température de paroi* pour le confort thermique d'hiver, la contrainte *bruit aérien extérieur* pour le confort acoustique, les contraintes *facteur de lumière du jour*, *distribution de Lumière* et *qualité de la vue* pour le confort visuel. Pour résoudre ce type de problème, nous avons retenu une technique très élégante pour la résolution de systèmes multi-contraintes, la programmation logique par contraintes.

La programmation logique par contraintes associée à une clause PROLOG (une règle de type *Si Hypothèses Alors Conclusions*) un ensemble de contraintes à vérifier, dans une *métarègle*. En utilisant deux mécanismes fondamentaux, la propagation itérative de contraintes et la réduction de l'espace de recherches, le déclenchement d'une métarègle aboutit à une solution satisfaisant l'ensemble des contraintes courantes (elle n'est pas unique, elle n'est pas optimale).

Sur la figure 13, nous avons représenté la métarègle permettant de modifier la surface de vitrage d'une pièce. Nous voyons à la droite de la règle, un certain nombre de contraintes constructives (la somme de la surface vitrée et de la surface opaque d'une paroi extérieure doit rester constante) et de contraintes liées à nos bases de connaissances diagnostic (notes de solarisation et de bruit aérien extérieur positives ou nulles). Le déclenchement de cette métarègle pour une pièce du projet aboutit à une surface de vitrage respectant l'ensemble des contraintes. Nous avons choisi l'environnement PECOS pour mettre en œuvre ces métarègles [PECOS 93]. Cette phase aboutit donc, pour chaque variante, à un projet satisfaisant l'ensemble des contraintes retenues par le concepteur.

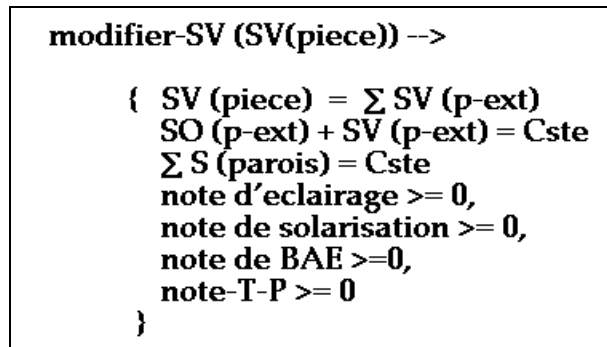


Figure 13 Exemple de métarègle en programmation logique par contraintes pour modifier la surface de vitrage d'une pièce

La dernière étape vise à aider l'utilisateur à agréger ses préférences pour déterminer à partir des variantes retenues et d'un ensemble exhaustif et cohérent de points de vue, de critères et d'évaluateurs (Voir Figure 14), la variante à choisir. Les évaluateurs retenus peuvent soit être alimentés par les phases précédentes, soit manuellement par l'utilisateur qui leur associe une note ou une place. Une procédure d'agrégation multicritère appelé "Méthodes des Compensations Probantes" a été développée au LAMSADE [ROY 85]. Elle permet à partir de la définition des préférences de l'utilisateur du système, et par une approche interactive (une suite d'étapes de traitement et de dialogue), d'aboutir au choix multi-objectif d'une variante correspondant le mieux aux points de vue de l'utilisateur.

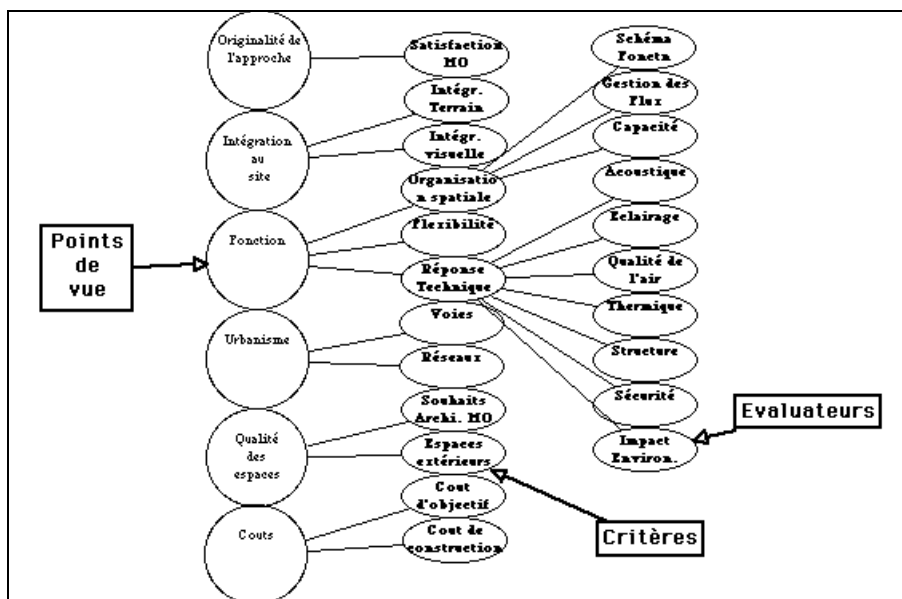


Figure 14 Ensemble de points de vue, de critères et d'évaluateurs pour le choix multi-objectif entre variantes

Le projet AMACH est un projet ambitieux (7 DEA encadrés au Centre d'Énergétique de l'École des Mines de Paris, allant de l'intelligence artificielle, à la structuration de connaissances d'experts, en passant par l'aide à la décision). C'est un projet de 3 ans qui s'est achevé en février 1993 [AMACH 93].

## 2) Le projet CALIN

Le projet CALIN est sans doute moins ambitieux, mais il a le mérite d'opérationnalité puisqu'il est le support d'un nouveau cours à l'Université du Colorado à Boulder et qu'il commence à être diffusé dans d'autres universités américaines. Ce projet vise au développement d'un didacticiel hybride intégré pour l'enseignement de la prise en compte de la composante énergétique dans la conception architecturale. C'est un didacticiel et non un outil de CAO: il met en œuvre des situations de terrain choisies pour leur qualité pédagogique. Ce didacticiel est hybride car il utilise différents techniques informatiques

correspondant à différents types de raisonnement (algorithme pour la déduction, système expert pour l'induction et hypertexte pour l'approche référentielle). Ce didacticiel est intégré car ces différentes techniques coopèrent dans un ensemble cohérent. Ce didacticiel permet de nouvelles stratégies pédagogiques liées aux approches inductives et référentielles qui font contrepoints aux didacticiels utilisant les outils traditionnels de l'ingénieur (méthode déductive), basés sur des stratégies essai-erreur ou sur des études paramétriques, qui nous paraissent assez mal adaptées à la pédagogie.

Pour ce faire un certain nombre de modules coopèrent de façon invisible à l'utilisateur dans un interface graphique hautement convivial (Voir Figure 15) utilisant l'environnement Le Lisp- Aida- Masai [LELISP 93].

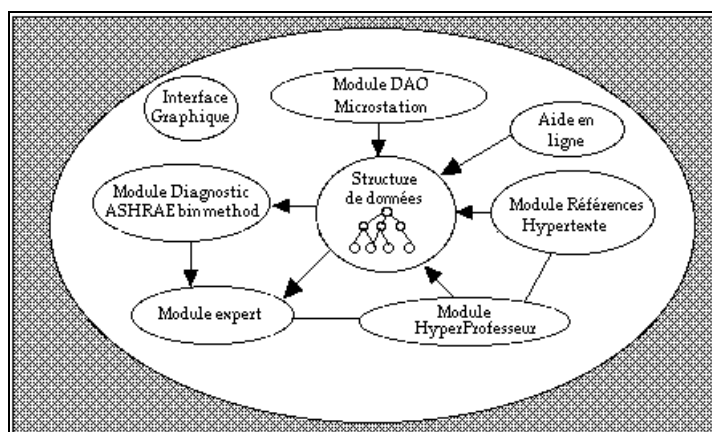


Figure 15 La structure des modules de CALIN

Une session de travail débute par la description graphique du projet dans l'outil de CAO, Microstation [MICROSTATION 93] qui est accompagné d'un environnement de programmation MDL nous ayant permis de développer un métré spécifique à notre projet. Ce métré permet l'extraction de données géométriques et topologiques de Microstation dans une structure de données. Cette structure de données alimente deux types de modules : • un module Diagnostic de la performance énergétique du projet mettant en œuvre une méthode déductive de bilan, la bin method de l'ASHRAE [ASHRAE 83]. Un module expert qui propose des stratégies d'amélioration de la performance énergétique. Un ensemble d'hypertextes permettent de présenter des bâtiments de référence analysés énergétiquement ainsi qu'un livre électronique sur l'Énergie des bâtiments en conception.

Sur la figure 16, nous voyons le projet dessiné dans le DAO (trois vues et les outils de dessin de Microstation), ainsi qu'à droite de l'écran, les développements spécifiques pour le projet permettant d'extraire toutes les données géométriques et topologiques du dessin pertinents vis à vis de la thermique.

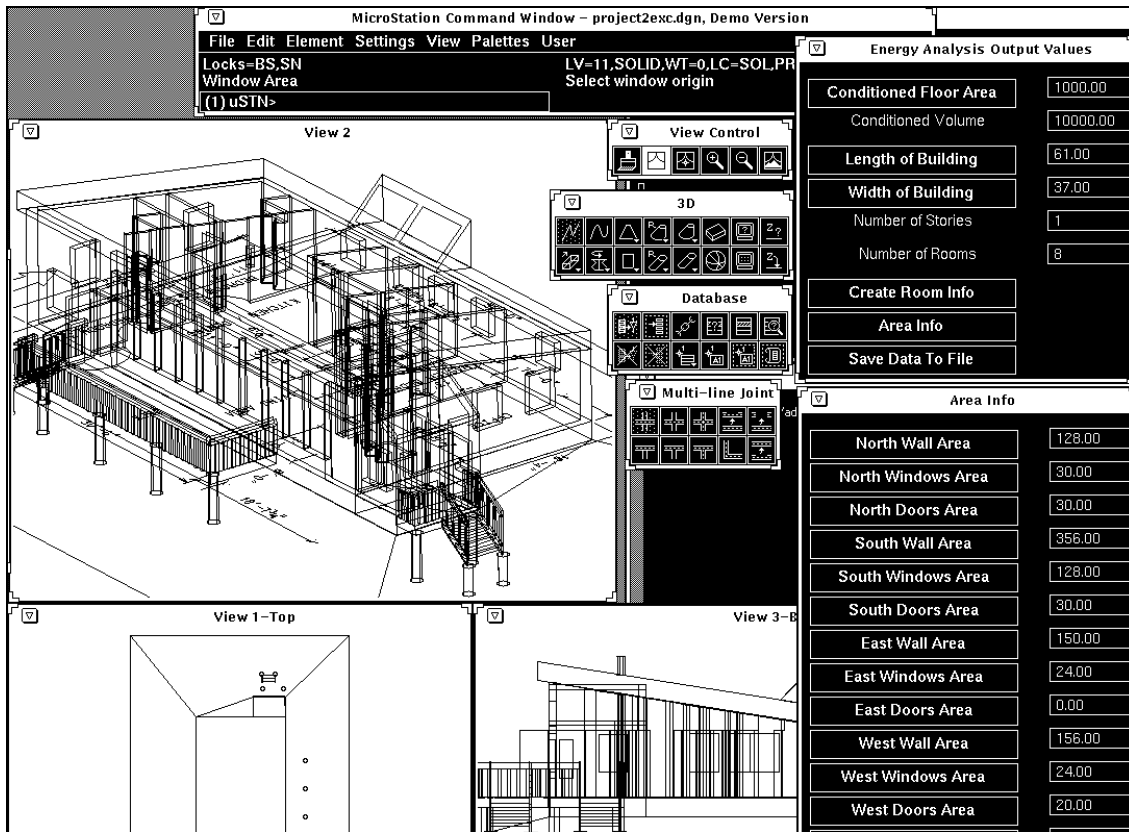


Figure 16 La saisie du projet dans Microstation et le mètre MDL.

Le module diagnostic met en œuvre une approche **déductive** basée sur la bin method de l'ASHRAE qui utilise un traitement statistique d'années types, associant à un intervalle de températures sèches, un certain nombre d'heures annuelles (ou mensuelles) et les humidités relatives correspondantes. Ceci permet de tenir compte des non linéarités de certains phénomènes comme le rendement des systèmes de chauffage et de climatisation. Cette méthode permet de calculer un bilan annuel des consommations latentes et sensibles pour le chauffage, l'eau chaude sanitaire et la climatisation. Nous avons modifié de manière importante les algorithmes initiaux en tenant compte de la variation saisonnière des gains solaires [VADON 91], de la conduction vers le sol [MITALAS 87], et des débit de ventilation [GRIMSUD 84]. Une bibliothèque de 52 sites nord-américains a été constituée pour le projet.

Sur la figure 17, sont représentés à gauche certains écrans d'entrées, et à droite, les écrans de sortie de la méthode. Les résultats sont donnés soit sous forme numérique (souvent inexploitable par l'apprenant), soit sous forme de compteurs (donnant 3 informations supplémentaires: des valeurs mini et maxi de références et la place du projet par rapport à ces références).

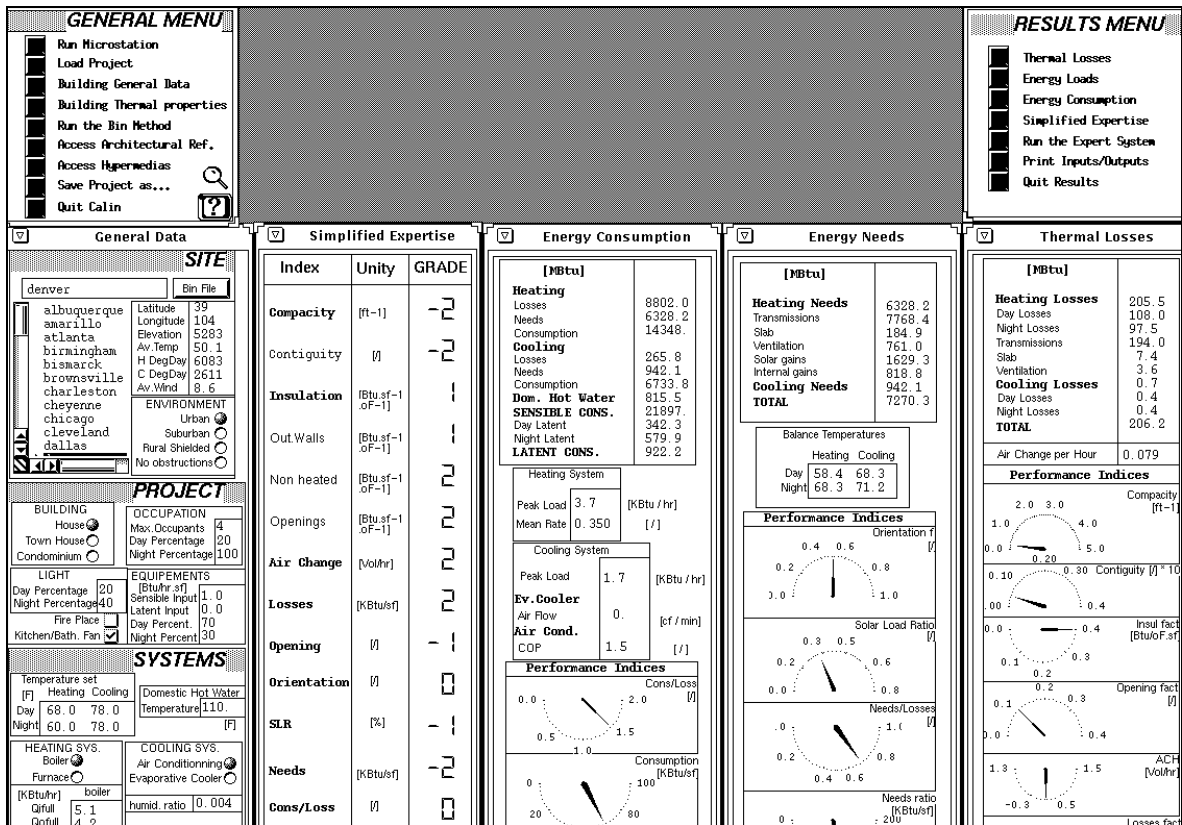


Figure 17 Les entrées et sorties de la modélisation thermique.

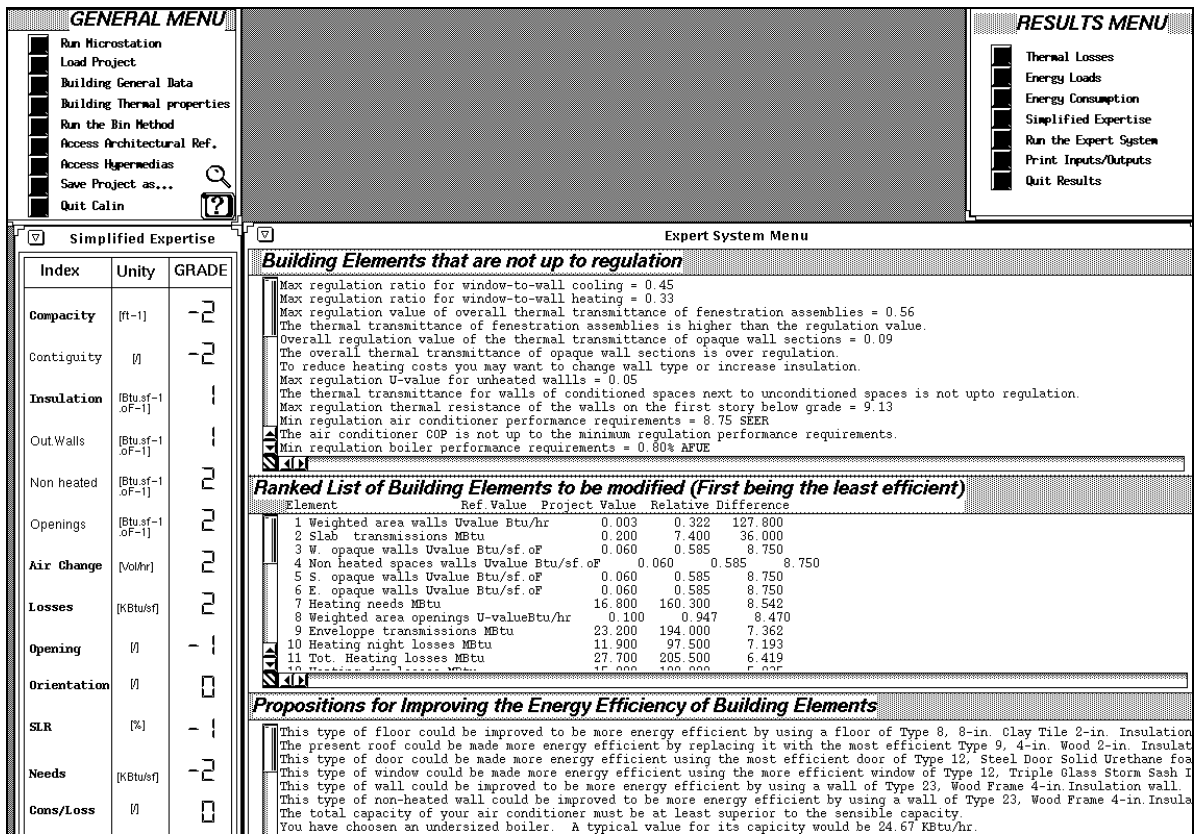


Figure 18 Le système expert pour améliorer la performance énergétique du projet.



Le système expert met en œuvre une approche **inductive** à deux niveaux.

Le premier niveau que nous appelons *baromètre* du projet (à gauche dans la figure 18) vise à une comparaison purement algorithmique entre ratios fondamentaux du projet et ratios de référence (Compacité, Contiguïté, Isolation, Orientation...), donnant une note de -2 à +2 permettant de repérer les tendances thermiques favorables et défavorables du projet.

Le second niveau correspond à la mise en œuvre de connaissances issues de la réglementation (américaine) et de connaissances d'experts dans des règles de production (écrites dans l'environnement CLIPS [NASA 89]).

Les résultats donnés par ce système expert sont de trois types (Voir partie droite de la figure 18):

- les éléments du bâtiment qui n'atteignent pas le niveau réglementaire,
- une liste classée des objets à problèmes ,
- des stratégies d'amélioration de la performance énergétique des éléments à problème.

Des modèles **référentiels** sont mis en œuvre dans des structures hypertextes qui présentent 4 bâtiments choisis pour leur qualité pédagogique. Nous avons développé spécifiquement pour ce projet une structure d'hypertextes accessibles en ligne par l'utilisateur et basés sur une hiérarchie à trois niveaux : Chapitres, Sous-Chapitres, Pages, chacun de ces niveaux apparaissant dans une fenêtre distincte (Voir Figure 19). Cette structure arborescente permet le saut d'un concept à un concept associé en cliquant sur un mot clé (en gras dans la fenêtre de droite, Figure 19), ou sur une partie d'un dessin en inversion vidéo.

Cette structure hypertexte sert ainsi de support à d'autres modules du projet, comme l'Hyperprofessor, livre de thermique électronique présentant les concepts fondamentaux de la thermique du bâtiment utiles au projet.

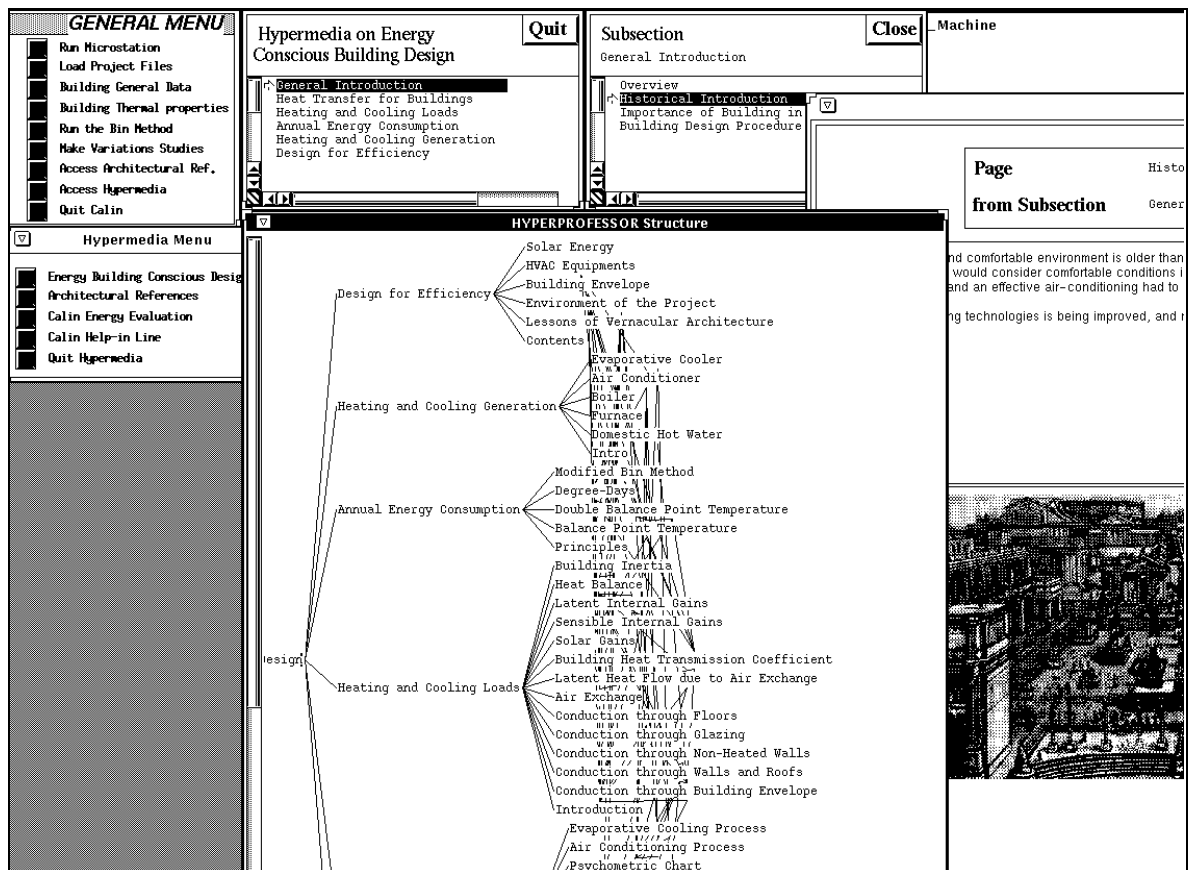


Figure 19 Des structures hypertextes pour accéder à l'information.

Le projet CALIN a vu l'encadrement de 3 masters (DEA) et de 4 étudiants niveau "undergraduate" (licence). C'est un outil développé sur stations SUN qui a été porté en version simplifiée sur Macintosh en 1994.

## CONCLUSION

Pour conclure replaçons notre travail par rapport à son contexte: la Recherche en Architecture, l'Enseignement et la Culture Architecturale.

**Recherche.** L'Histoire de la Recherche Architecturale est extrêmement courte par rapport à certains domaines comme les sciences physiques. Il y a 25 ans, quand l'Enseignement était en quête de lui-même, la Recherche Architecturale a joué un rôle fondamental qu'elle a perdu aujourd'hui: on assiste trop souvent au confinement des équipes, à la dispersion des thèmes de recherche. A l'aube la renaissance de la Recherche par le biais de nouvelles formations doctorales en Architecture, notre travail peut jouer un rôle important d'intégration des recherches dans des outils communs, et de stimulation de la coopération entre acteurs. Ce travail peut aussi participer à l'établissement des bases d'une réelle réflexion sur les modèles théoriques de conception et les corpus de références techniques. Ce dernier aspect fera notamment contrepoint au courant majoritaire de la Recherche trop centré sur les objets, donc sur l'Architecture comme résultat, pas sur l'Architecture en tant que processus.

**Enseignement** Depuis l'Enseignement des Beaux-Arts où le poids du référent architectural par le biais de l'étude de bâtiments remarquables de l'histoire de l'Architecture était exacerbé, en passant à l'après 68, la création des Unités Pédagogiques et la Réforme de 84 qui donnaient trop d'importance aux disciplines connexes (sciences humaines et sciences physiques), on se dirige aujourd'hui, notamment avec la Directive Frémont [**FREMONT 93**] vers le recentrage sur le projet en liaison avec les disciplines connexes. Or le projet est une combinatoire complexe de savoirs et de savoir-faire, de pratiques et de théories. A l'heure de l'alignement du statut des enseignants des écoles d'Architecture avec l'Enseignement supérieur, la recherche doit être le support d'un réel enseignement de 3<sup>e</sup> cycle en Architecture. Notre travail liant modèles théoriques et opérationnalité des connaissances scientifiques peut être intégré à la pratique pédagogique du projet au sein de ces nouvelles formations doctorales.

**Culture Architecturale** Repenser la formulation des contraintes techniques doit permettre d'en faire des référents de la culture architecturale, de participer au développement d'une culture technique (un bon sens, les grands principes). Permettre de passer de *dispositifs techniques* à des *dispositifs architecturaux*. Notre travail, par notamment la revalorisation des principes du bioclimatisme non assimilés par la plupart des architectes, peut participer au développement de cette culture, et éviter ces contre-cultures techniques trop fréquentes: réactions collectives d'adaptation défensives renvoyant à des attitudes de ségrégation et de superficialité.

## BIBLIOGRAPHIE

- ADOLPHE 91**, Adolphe L., L'aide à la décision technique dans la conception architecturale, Thèse de doctorat, Ecole des Mines de Paris, 1991.
- ADOLPHE 95**, Adolphe L., L'Intégration des connaissances techniques dans le processus de conception architecturale, Habilitation à diriger des recherches, UPS-Toulouse, 1995.
- ALEXANDER 65**, Alexander C., Notes on the synthesis of Form, Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts, 1964.

- AMACH 93**, Projet AMACH, Approche Multi-Acteurs du Confort dans l'Habitat, Accord cadre AFME ARMINES, Rapport Final, Février 93.
- ASHRAE 83**, ASHRAE, Simplified energy analysis using the modified bin method, Atlanta, 1983.
- BACOT 84**, Bacot P., Analyse modale des systèmes thermiques, Thèse de docteur-ingénieur, Université Pierre et Marie Curie, Paris VI, 1984.
- BALCOMB 80**, Balcomb & Wray W.O., A simple procedure for assessing thermal comfort in passive solar heated buildings, Solar Energy, Vol.25, 1980.
- BOUDON 94**, Enseigner la conception architecturale, Cours d'architecture, Ed. La Villette, 1994.
- CAOMIP 88**, CAOMIP, KREPIS, Rapport final de recherche, Convention MELATT 86-A6/04, Toulouse, 1988.
- CONAN 90**, Concevoir un projet d'architecture, Ed. L'Harmattan, 1990.
- CROSS 86**, Croos N., Understanding Design: the lessons of design methodology, Design Methods & Theories, Vol. 20, N°2, 1986.
- CSTB 82**, CSTB, Profil UCRES, Paris, 1982.
- EMP 89**, centre d'Energétique de l'Ecole des Mines de Paris, Participation au programme PEBI (Personnal Computers and European Building Innovation), Rapport final MELT-INPROBAT, Convention N°8854/05, 1989.
- FREMONT 93**, Frémont A., Ecoles d'Architecture 2000, Schéma de développement, Ministère de l'Equipement, 1993.
- GIVONI 78**, Givoni B. L'homme, l'Architecture et le Climat, Ed. du Moniteur, Paris, 1978.
- GRIMSUD 84**, Grimsud & al., Infiltration model and shielding coefficients, Lawrence Berkeley Laboratory, 1984.
- GROLEAU 84**, Groleau D. & Marenne C., Simulation thermique en régime variable: résolution par décomposition en série de Fourier. Application au bâtiment, Journées d'études Modélisation et simulation thermique, AMSE, GUT, Poitiers 1984.
- HOC 87**, Hoc J.M., Psychologie cognitive de la planification, Sciences et Technologies de la connaissance, PUG, Grenoble, 1987.
- KUHN 70**, Kuhn T., The structure of scientific revolutions, University of Chicago Press, 1970.
- KUSUDA 84**, Kusuda T. & Beau J.W., Simplified methods for determining seasonal heat loss from uninsulated slab-on-grade floors, ASHRAE Transactions, Vol.90 Part 1B, 1984.
- LAWSON 78**, Lawson B.R., The architect as designer, in W.T. Singleton: the study of real skills, Vol. 1, St Leonardgate, MTP, 1978.
- LELISP 93**, Manuel de références Lelisp-Aida- Masai, ILOG, Paris.
- MARCH 76**, March L.J., The architecture of Form, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1976.
- MICROSTATION 93**, INTERGRAPH, Microstation reference guide, Huntsville, 1993.
- MITALAS 68**, Mitalas G.P., Calculation of transient heat flow through walls and roofs, ASHRAE transactions, Vol. 74, Pt 2, 1968.
- MITALAS 87**, Mitalas G.P., Calculation of below grade residential heat-losses: low rise residential buildings, ASHRAE Transactions 1987, V.93.
- NASA 89**, CLIPS User's guide, Version 4.3, Lyndon B. Johnson Space Center, Houston, TX, 1989.
- PECOS 93**, Manuel de références PECOS, ILOG, Paris.
- POPPER 86**, Popper in Broadbent G., On current directions in design methods, Design Methods & Theories, Vol. 20, N° 2, 1986.
- PROST 1992**, Conception architecturale, une investigation méthodologique, Ed.L'Harmattan, Paris, 1992.
- QUALITEL 89**, Association Qualitel, Guide Qualitel, Paris, 1989.
- RASMUSSEN 82**, Rasmussen J. & Lind M., A model of human decision making in complex systems and its use for design of system control strategies, RISO M-2349, Roskilde, DK, 1982.
- ROY 85**, ROY Bernard, Méthodologie multicritère d'aide à la décision, Gestion- Economica, 1985.
- SIMON 65**, The structure of ill-structured problems, Artificial Intelligence, Vol 4, 1977.
- SMECI 92**, Manuel de références SMECI, ILOG, Paris.
- VADON 91**, Vadon M., Kreider JF & Norford LK, Improvement of the solar calculations in the modified bin method, ASHRAE Transactions 1991, V.97.
- WHITEHEAD 65**, Whitehead B. & Eldars M.Z., The planning of single storey layouts, Building Science, Vol 1, 1965.