

« UNIVERSITE DE LIMOGES

ECOLE DOCTORALE Science – Technologie – Santé

FACULTE des Sciences

Année : 2003

Thèse N° []

Thèse

pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE LIMOGES

Discipline / Spécialité : Informatique

présentée et soutenue par

Pascale FRIBAUT

le 13 Novembre 2003

**MODELISATION DECLARATIVE D'ESPACES
HABITABLES**

Thèse dirigée par Dimitri PLEMENOS

JURY :

M. René CAUBET, Professeur à l'Université de Toulouse rapporteur

M. Georges MIAOULIS, Professeur, Technological Education Institute of Athens apporteur

M. Philippe BLANCHARD, Architecte examinateur

M. Pierre-François BONNEFOI, Maître de conférences à l'Université de Limoges examinateur

M. Djamchid GHAZANFARPOUR, Professeur à l'Université de Limogsexaminateur

M. Ali MANKAR, Directeur de l'Institut d'Ingénierie Informatique de Limoges examinateur

M. Dimitri PLEMENOS, Professeur à l'Université de Limoges

Remerciements

Modélisation déclarative d'espaces habitables

Remercier par quelques mots tous ceux qui ont contribué généreusement à la lente élaboration de ma thèse est une grande injustice : ils mériteraient nettement plus. Néanmoins, ceux à qui sont adressées ces quelques lignes retrouveront derrière mes esquisses de remerciements des projets élaborés d'univers bâtis d'estime et structurés par des échanges fructueux.

Habitent mon univers de travail

- Dimitri PLEMENOS, le créateur premier de la structure de travail à plusieurs étages : il en a conçu les fondations et il en connaît tous les recoins
- Georges MIAOULIS qui a contribué à renforcer la structure porteuse initiale par ses conseils avisés
- René CAUBET, qui a accepté de passer quelques jours de ses vacances plongé dans l'univers des maquettes virtuelles
- Djamchid GHAZANFARPOUR, qui frappe à la porte souvent, pour vérifier que le chantier avance bien
- Ali MANKAR, qui fait de brèves visites et assure l'intendance,
- Philippe BLANCHARD, qui sait prendre les mesures qui s'imposent,
- les thésards et les maîtres de conférence du laboratoire MSI que j'ai régulièrement côtoyés : Pierre-François, Jérôme, Ioanna, Dimitri, William, Guillaume, Olivier, Karim, Vincent, Patrick, Carine, Stéphane, Sylvain, Michel, Pierre, Yann et Karl : ils ont meublé une partie de mon univers avec leurs idées. Merci à Suzy de me les envoyer !
- mes collègues du LR2I : Jean-Christophe, Claude, Aurélie, Hervé, Dominique, Christophe, Mustapha, Philippe, Fethi, Ben, Abdelhadi, Mohammed : ils visitent et me laissent un désordre faramineux ; ils ont raison, c'est du chaos que naît la diversité.
- les squatters les plus encombrants furent sans doute mes filles et leurs copines, Michel, Maman, Sylvie, Josette, Camille, Lucette, Léo, Luka, Christophe, Anne, mais je leur pardonne (et réciproquement) de m'avoir supportée (dans les deux sens du terme) avec humeur et humour.

Et puis il y a les visiteurs occasionnels : Choo, Marie-Claire, Marianne, Brigitte, Florence, Jean-Marie, Richard. Ce sont les piliers de mon équilibre personnel, ceux qui par l'amitié a contribué à maintenir mon édifice dans l'axe.

Enfin, il y a les étudiants de 3IL, certains embarqués malgré eux dans le courant de la création virtuelle, et qui ont tous ramé avec beaucoup de bonne volonté. Je leurs dois quelques illustrations des propos de ma thèse.

Il y a certainement encore beaucoup de personnes qui ont contribué à la réalisation de cette thèse, à différents dosages. Qu'ils se manifestent, je saurai réparer mes oublis.

Il est grand temps de présenter maintenant l'édifice construit à partir de la profusion de matériaux en tous genres apportés par chacun et liés solidement par l'alchimie subtile des relations tissées autour mon travail.

Modélisation déclarative d'espaces habitables

Sommaire

Introduction générale	8
1 - Etat de l'art	11
Introduction	12
1 - 1 Définition du processus de conception	12
1 - 1 - 1 Esquisse	13
1 - 1 - 2 Avant-projet sommaire	14
1 - 1 - 3 Les phases suivantes	14
1 - 2 Les modeleurs géométriques	15
1 - 2 - 1 Les outils	15
1 - 2 - 2 Les avantages	18
1 - 2 - 3 Les logiciels du marché	20
1 - 2 - 4 Leurs évolutions	22
1 - 3 Les modeleurs déclaratifs	29
1 - 3 - 1 Principes de base des modeleurs déclaratifs	29
1 - 3 - 2 Démarches déclaratives antérieures	31
1 - 3 - 3 Etat de l'art dans le domaine de l'architecture	34
1 - 3 - 3 - 1 Passer d'un croquis à un volume 3D	34
1 - 3 - 3 - 2 La déclaration de scènes 3D et de leur perception : CODIS	35
1 - 3 - 3 - 3 Concevoir avec la lumière pour matériau	35
1 - 3 - 3 - 4 Concevoir à partir de modèles existants	36
1 - 3 - 4 MultiFormes : modeleur déclaratif par décomposition hiérarchique	37
1 - 3 - 4 - 1 Les objets de la décomposition hiérarchique	37
1 - 3 - 4 - 2 Les opérateurs de MultiFormes	38
1 - 3 - 4 - 3 Le moteur de MultiFormes	38
1 - 3 - 4 - 4 La décomposition hiérarchique	39
Conclusion	40

2 – Recueil d'informations pour une bonne description du projet

Introduction		42
2 - 1	Informations nécessaires à la conception en général	43
2 - 1 - 1	Le contexte de réalisation	43
2 - 1 - 2	Le cadre légal	43
2 - 1 - 3	Les règles de l'art	44
2 - 1 - 4	Les règles de la construction	45
2 - 1 - 5	Le savoir-faire de l'architecte	46
2 - 2	L'environnement d'un projet particulier	47
2 - 2 - 1	Reconnaissance de la catégorie du projet	48
2 - 2 - 2	Hiérarchisation des espaces du projet	49
2 - 2 - 3	Etude de cas similaires	52
2 - 2 - 4	Les désirs du client	53
2 - 2 - 5	Les contraintes matérielles	53
2 - 2 - 6	Les caractéristiques du terrain	53
2 - 3	Description des espaces habitables	55
2 - 3 - 1	Propriétés des espaces habitables	55
2 - 3 - 2	Personnalisation en fonction de l'architecte	56
2 - 3 - 3	Personnalisation en fonction du projet	57
2 - 3 - 4	Structure arborescente	57
2 - 4	Règles d'assemblage sur les espaces	58
2 - 4 - 1	Définition des règles	58
2 - 4 - 2	Caractérisation des espaces	59
2 - 4 - 3	Règles de respect d'intégrité d'un espace	59
2 - 4 - 4	Règles d'orientation	60
2 - 4 - 5	Règles de proximité	61
2 - 4 - 6	Règles de chevauchement	65
2 - 4 - 7	Règles d'axialité	70
2 - 4 - 8	Règles de positionnement relatif	71
2 - 4 - 9	Règles d'altitude	72
2 - 4 - 10	Règles d'alignement	73
2 - 4 - 11	Règles de symétrie	74
2 - 4 - 12	Règles de dimensionnement relatif	76
2 - 4 - 13	Définition d'un espace par coordonnées et dimensions absolues	77
2 - 5	Exemple de description d'un pavillon	80

2 - 6	Système d'information associé	84
2 - 6 - 1	Repérage des espaces	85
2 - 6 - 2	Repérage des types de projet	85
2 - 6 - 3	Propriétés des espaces	86
2 - 6 - 4	Repérage des espaces par projet	86
2 - 6 - 5	Repérage des règles d'assemblage utilisables	87
2 - 6 - 6	Repérage des règles d'assemblage par projet	87
2 - 6 - 7	Informations relatives à un projet	88
2 - 6 - 8	Les espaces d'un projet	88
2 - 6 - 9	Les règles d'assemblage d'un projet	89
2 - 6 - 10	L'environnement d'un projet	89
2 - 6 - 11	Les solutions d'un projet	90
2 - 6 - 12	Les objets standard d'un projet	91
2 - 6 - 13	Les associations espaces/objets	92
2 - 6 - 14	Intégration de la connaissance architecturale dans MultiCAD	94
2 - 6 - 14 - 1	MultiCAD	94
2 - 6 - 14 - 2	Extension de la base de connaissance architecturale	95
2 - 6 - 14 - 3	Utilisation de projets types	96
2 - 6 - 14 - 4	Diversification des processus de génération	96
2 - 6 - 14 - 5	Personnalisation du cadre de conception	96
	Conclusion	97
3 -	Techniques de production de maquettes	98
	Introduction	99
3 - 1	Diagnostic préliminaire	100
3 - 1 - 1	Faisabilité générale	101
3 - 1 - 1 - 1	Validité des surfaces	102
3 - 1 - 1 - 2	Validité des orientations	103
3 - 1 - 1 - 3	Validité des linéaires de façade	104
3 - 1 - 1 - 4	Mesure de distance à un projet type	105
3 - 1 - 2	Construction de l'arbre hiérarchique	110
3 - 1 - 3	Construction des domaines d'énumération	112
3 - 1 - 3 - 1	Principes de la pré-énumération	112
3 - 1 - 3 - 2	Exemple de construction des domaines de validité	113
3 - 1 - 3 - 3	Repérage des contraintes	114
3 - 1 - 3 - 4	Application des contraintes unaires	115
3 - 1 - 3 - 5	Croisement des listes de coordonnées	116
3 - 1 - 3 - 6	Contraintes binaires et énumération	116
3 - 1 - 3 - 7	Exemple de diagnostic	118

3 - 2	Construction du code GNU Prolog	119
3 - 2 - 1	Choix de GNU Prolog	119
3 - 2 - 2	Construction du code fixe	120
3 - 2 - 3	Construction du code spécifique	121
3 - 2 - 4	Exécution du code	123
3 - 2 - 5	Présentation des solutions en mode plan	124
3 - 3	Analyse des solutions	126
3 - 3 - 1	Règles de visualisation en mode plan	126
3 - 3 - 1 - 1	Couleurs	127
3 - 3 - 1 - 2	Aspect des frontières des espaces	128
3 - 3 - 1 - 3	Forme	129
3 - 3 - 1 - 4	Angle	131
3 - 3 - 2	Extraction de solutions	132
3 - 3 - 3	Présentation de différents filtres	132
3 - 3 - 3 - 1	Le nombre de pièces	132
3 - 3 - 3 - 2	Le linéaire de contours extérieurs	133
3 - 3 - 3 - 3	Le linéaire de baies possible	134
3 - 3 - 3 - 4	Le cumul des surfaces	134
3 - 3 - 3 - 5	La mesure des circulations internes	134
3 - 3 - 3 - 6	Le nombre d'étages	135
3 - 3 - 3 - 7	La similitude par rapport à un projet type	135
3 - 3 - 3 - 8	La combinaison de plusieurs filtres	138
3 - 3 - 3 - 9	Filtres complémentaires	138
3 - 3 - 4	Mode d'extraction des contours	140
3 - 3 - 4 - 1	Projections	141
3 - 3 - 4 - 2	Construction d'une liste de points	141
3 - 3 - 4 - 3	Lissage de la liste de points	143
3 - 3 - 4 - 4	Tri de la liste de points	143
3 - 3 - 4 - 5	Cas particuliers	143
3 - 3 - 4 - 6	Vue en mode contours	145
3 - 3 - 5	Visualisation en mode maquette volumétrique	145
3 - 3 - 5 - 1	Toiture	145
3 - 3 - 5 - 2	Indication des baies	146
3 - 3 - 5 - 3	Équipement de la maison	150
3 - 3 - 5 - 4	Texture	152
3 - 3 - 5 - 5	Contrôle de l'éclairage naturel et de l'ensoleillement	153
3 - 3 - 5 - 6	Contrôle de l'adaptation au terrain	154

3 - 4	Résultats comparatifs	155
3 - 4 - 1	Définition des espaces du pavillon test	155
3 - 4 - 2	Définition des contraintes du pavillon test	156
3 - 4 - 3	Mise en œuvre et résultats partiels	157
3 - 4 - 4	Extraction des topologies	160
3 - 4 - 5	Conclusion sur le problème de R. Maculet	163
	Conclusion	164
	Conclusion générale	165
	Bibliographie	168
	Liste des illustrations	176
	Liste des annexes	180
	Annexes	181

Introduction générale

J'ai passé mon diplôme d'architecte il y a bientôt 20 ans, à une époque où l'on croyait ferme que l'intelligence artificielle allait remettre en cause des pratiques professionnelles pour lesquelles on pourrait modéliser la démarche et les raisonnements sous-jacents. Jeune architecte appartenant aux premières promotions formées à l'informatique, j'avais réalisé des maquettes numériques avec Euclid ⁽¹⁾, par cartes perforées interposées.

Ma pratique professionnelle devait m'apprendre que les architectes se méfiaient énormément de l'ordinateur : loin d'être considéré comme un outil augmentant la qualité des prestations et les performances, son introduction en agence a été lente et difficile. Lente parce que les architectes de mon âge n'étaient pas systématiquement formés, difficile par ce que les patrons d'agence craignaient de perdre leur pouvoir de décision et par conséquent une partie de leur créativité.

Petit à petit, cependant, les logiciels dits de Conception Assistée par Ordinateur (CAO) ont conquis les agences : l'ergonomie des logiciels, la rapidité d'exécution, la qualité de rendu des pièces graphiques, l'aide aux calculs fastidieux des métrés et aux chiffrages des ouvrages, la diminution des temps de réalisation des dossiers et la sécurité dans les répercussions sur l'ensemble du projet dans le cadre des nombreuses et inévitables modifications ont fait pencher la balance. Nous donnerons un aperçu de ce qu'est le travail d'agence dans la première partie afin de mesurer la démarche entreprise dans cette thèse.

Il n'empêche que les logiciels existants n'ont de Conception Assistée que le nom : en réalité, lorsque l'architecte s'assoit devant son ordinateur pour modéliser le projet, le travail de conception pure est pratiquement terminé. Il a dans sa tête (ou couché sur un croquis) une idée des espaces et des volumes qu'il veut assembler en fonction des règles de l'art ou d'autres règles qu'il s'est lui-même fixées.

C'est sur cette faille que j'ai voulu travailler : inscrite une première fois en thèse à Paris juste après mon diplôme d'architecte, je voulais élaborer un LEGO intelligent jouant le rôle des matériaux dont on use pour construire des maquettes d'étude ou de présentation. Ce que j'apportais en plus, outre la rapidité de fabrication des maquettes numériques, c'était la mise en œuvre contrôlée des composants du projet. A ce moment, mes composants étaient proches de ceux avec lesquels on réalise les maquettes, c'est à dire des éléments pleins, presque des éléments de construction.

La vie a modifié la linéarité de ma démarche. J'ai quitté Paris pour travailler en agence d'architecture à Limoges, mesurant l'immense fossé existant entre l'enseignement théorique et la pratique des chantiers, regrettant chaque jour d'avoir abandonné la table traçante pour retrouver mes plumes et mes grattoirs sur calques bien réels, dans des agences classiques. Aussi, lorsque j'ai su qu'une équipe de Limoges travaillait sur un modeleur déclaratif, j'ai voulu faire partie de l'équipe du laboratoire MSI pour apporter ma contribution à la spécialisation de MultiFormes⁽²⁾ à l'architecture. La première partie de la thèse explique comment certaines tâches de la conception architecturale

sont déjà prises en charge par divers outils informatiques, et comment un modeleur déclaratif peut compléter cette panoplie en répondant aux besoins non encore couverts de la phase d'esquisse.

En intégrant l'équipe du MSI, j'avais gardé mon idée du LEGO, mais ma pratique professionnelle m'avait appris qu'un architecte travaille avec les vides (espaces, ombres et lumières, ambiances visuelles ou sonores...) plutôt qu'avec les pleins, représentant l'enveloppe des espaces. L'assemblage des matériaux, c'est une affaire de construction, l'architecture intervient surtout dans « *le jeu savant, correct et magnifique des volumes assemblés dans la lumière ... Les ombres et les clairs révèlent les formes...* » selon LE CORBUSIER [LEC 23]. C'est ainsi que les composants de base de mon futur outil d'aide à la conception devenaient les espaces projetés. L'idée avait déjà été développée par le Professeur NEGROPONTE [NEG 70] du MIT sous le nom d'allocation spatiale. J'ai retravaillé cette idée en définissant le système d'information associé, répertoriant et programmant toutes les règles d'assemblage en usage pour l'architecture.

J'ai tout d'abord exploré toutes les sources d'informations dont dispose l'architecte avant de commencer à esquisser une ligne du projet. Ce sont les règles de l'art en général, la pratique personnelle en particulier et les informations propres au projet en cours. Puis j'ai étudié les interactions entre ces ensembles d'informations, en déduisant des règles applicables aux espaces à concevoir. La deuxième partie de ma thèse présente le système d'information que j'ai conçu pour supporter la description des composants de mon jeu de construction et leurs règles d'assemblage.

Une fois le système d'information défini, il faut réaliser la maquette numérique, celle qui permet à l'architecte de vérifier ses idées et qui alimentera le système de CAO traditionnel par la suite, en vue de la production de plans, coupes, façades et descriptifs divers. Dans la pratique classique, si l'on veut construire un pont, on donne au modeleur géométrique les dimensions et les positions exactes du tablier, des piles ou autres câbles de suspente. Au modeleur déclaratif, dans l'idéal, on dira seulement « Je veux traverser le fleuve à pieds secs », dessein complété par une description textuelle du fleuve. C'est dans cet esprit que j'ai travaillé.

La troisième partie de ma thèse explique comment, d'une description des désirs d'un client, c'est à dire d'une déclaration en intention, on peut générer, si cela est possible, une série de maquettes virtuelles. Ces maquettes représentent des propositions d'organisation des espaces répondant aux préoccupations du client, assemblés selon les critères standard ou qui sont propres à ses habitudes personnelles. L'architecte devra choisir les réponses les plus pertinentes, compte tenu du contexte ou de ses préférences esthétiques. Les propositions retenues, éventuellement retravaillées, iront alimenter par la suite le système de production de documents architecturaux classiques.

Les résultats obtenus mettent en évidence le formidable potentiel d'accroissement de la créativité que l'on peut offrir à l'architecte. Se détachant des tâches « comptables » de dimensionnement et positionnement des espaces, il peut se consacrer à la description du projet,

recommençant une partie qui ne lui donnerait pas satisfaction, comme il le faisait de manière traditionnelle sur les maquettes d'argile ou de balsa, sans limitation matérielle.

Pour remanier, remodeler, retravailler ces maquettes, nous proposons des outils de filtrage des solutions, de façon à mettre en valeur celles qui répondent le mieux aux préférences de l'architecte et de son client.

Les chercheurs du laboratoire MSI m'ont fait confiance et ont adopté mon mode de description et de production de maquettes architecturales. Les premiers résultats présentés ici ne demandent qu'à être confirmés sur des projets de plus grande envergure, et à être intégrés dans un système de conception plus vaste : MultiCAD, plateforme de conception de modeleurs déclaratifs pour les métiers du design en général. Des exemples de maquettes virtuelles architecturales réalisées à partir de modélisations déclaratives par décomposition hiérarchique seront présentés en fin de troisième partie. Malgré le petit côté frustré du système de construction modulaire, les organisations spatiales qu'elles proposent sont saines et fiables, et font émerger en prime des esquisses de forme que l'architecte aura plaisir à faire évoluer suivant ses aspirations.

Nous concluons ce travail en proposant des pistes de réflexion en complément à la mise en place d'un véritable outil d'aide à la conception architecturale.

(1) EUCLID : modeleur géométrique 2D et 3D de Matra Datavision. Au départ généraliste, il a été orienté mécanique ces dernières années.

(2) MultiFormes : modeleur déclaratif par décomposition hiérarchique réalisé initialement par Dimitri PLEMENOS [PLE 91]

1 - État de l'art

1 – Etat de l'art

Le débat est ouvert dans les écoles d'architecture pour définir ce qu'est le processus de conception architecturale et surtout pour faire émerger les meilleurs moyens de l'enseigner. Philippe BOUDON a souvent témoigné de son expérience à ce sujet [BOU 01]. Tour à tour, architectes, sociologues, économistes, urbanistes, sémioticiens, plasticiens revendiquent une place dans la longue série de décisions et de choix que représente l'élaboration d'un projet architectural.

Le travail présenté ici n'a pas la prétention de répondre à tous. Il est le fruit de l'observation de la pratique professionnelle dans de petites agences et se voudrait être une ouverture vers la définition d'outils spécifiques aux architectes dans les premières phases de la conception. Il voudrait également alimenter le débat général par ses réflexions sur les informations dont disposent les architectes, sur l'amélioration de la qualité et du temps de réponse par la génération automatique de solutions, voire l'augmentation éventuelle de la créativité par la proposition de solutions moins conventionnelles mais correctes.

Dans cette partie, nous aborderons les différentes étapes du processus de conception architecturale, et nous verrons comment les modeleurs géométriques prennent en charge une grande partie de la production des documents associés à chaque étape. Nous verrons également qu'ils laissent un manque au niveau de la définition du projet. Les principes des modeleurs déclaratifs semblent répondre aux types de problèmes soulevés lors de la recherche d'une solution architecturale répondant aux exigences du projet, et en particulier Multifformes, qui repose sur la décomposition hiérarchique des scènes à créer. Nous expliquerons pourquoi nous avons adopté cette démarche.

1 – 1 Définition du processus de conception

Le processus de conception architecturale s'organise en différentes phases, codifiées par la profession. Chaque phase se termine par un dossier composé d'un jeu de plans à une échelle donnée et de pièces écrites. L'architecte le fait valider par le maître d'ouvrage, les autorités administratives s'il y a lieu, ou encore les partenaires financiers, avant de passer à l'étape suivante.

Les phases qui nous intéressent plus particulièrement ici sont les phases de la conception pure : l'esquisse (ESQ) et l'avant-projet sommaire (APS), validé en général par le permis de construire. Le code des marchés publics en donne une définition précise (Annexe 1). A ce moment de la conception, l'architecte dispose d'un ensemble d'informations peu structurées, de nature et de sources diverses, floues et incomplètes : ce sont les désirs du client (« je voudrais trois chambres, un grand séjour, et peut-être un bureau »), les données propres au terrain (orientation, accès possibles, mitoyennetés, etc.), les caractéristiques administratives (coefficient d'occupation des sols, alignements obligatoires, etc...) et l'environnement dans lequel il faut insérer le projet.

1 - 1 - 1 Esquisse

L'esquisse permet de définir « le parti général de l'ouvrage, et d'engager le dialogue entre le maître d'ouvrage et la maîtrise d'œuvre » [d'A 94]. L'échelle des plans va du 1/200 au 1/500^{ème}. « Au stade de l'esquisse, l'équipe de maîtrise d'œuvre doit examiner la compatibilité de celle-ci avec la partie de l'enveloppe financière prévisionnelle fixée par le maître d'ouvrage et consacrée aux travaux, et justifier les conclusions de cet examen. » [d'A 94] C'est dire le rôle fondamental de la phase de l'esquisse, tant au niveau de la conception architecturale que de la faisabilité financière du projet.

Actuellement, l'architecte construit son dossier esquisse en rassemblant un maximum d'informations sur le projet, et en composant les éléments du programme, de façon à répondre au mieux aux contraintes esthétiques, techniques, administratives et financières qui pèsent sur le projet : un procédé heuristique qui doit beaucoup à l'expérience du concepteur. Il propose au maître d'ouvrage un ensemble de croquis présentant le ou les partis architecturaux retenus, comme ceux de la figure 1, les plans à petites échelles permettant d'étudier l'organisation générale du projet. Les véritables dimensions des espaces bâtis ne seront fixées qu'en phase d'avant-projet définitif (APD), à l'échelle 1/50^{ème}.

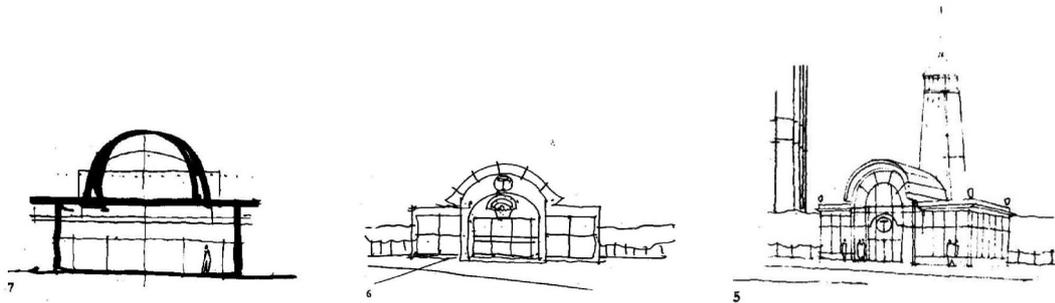


Figure 1 - Exemple de croquis : studies of station building de Venturi, Rauch, Scott Brown con/with Williams, O'Brien Associates pour Hannepin Avenue, Minneapolis - Revue Lotus International n°39 1983

Il n'est pas rare, au cours de cette phase où l'allure générale du bâtiment est élaborée, que l'architecte propose à son client des maquettes en trois dimensions (réelles ou virtuelles) de façon à ce qu'il se rende mieux compte des volumes définis pour le projet.

L'importance de la phase de l'esquisse n'est cependant pas reconnue dans les chiffres, notamment en ce qui concerne les pourcentages de rémunération. On ne donne pas beaucoup de moyens à l'architecte pour explorer toutes les potentialités d'un projet au tout début de la démarche créative. Le premier dossier du projet architectural compte pour 5% de la rémunération de la mission totale, comme le montre le tableau de la page suivante, alors qu'il porte les décisions fondamentales sur le parti du projet, garantes de la bonne adéquation avec le programme défini par le maître d'ouvrage.

1 – 1 – 2 Avant-projet sommaire

L'avant-projet sommaire est la formalisation de l'esquisse, sous forme de jeux de plans, le plus souvent à l'échelle 1/200^{ème}, voire 1/100^{ème} pour les petits projets. « *Bien que faible en contenu, l'avant projet suggère le **tout** architectural, sa qualité dépend de sa force d'anticipation des solutions futures qui seront apportées et validées lors de la phase d'instrumentation* » rappelle Paul Quintrand [QUI 85].

	Missions de base de la maîtrise d'ouvrage		Pourcentage de rémunération
Etudes	Esquisse	ESQ	5
	Avant-projet sommaire	APS	10
	Avant-projet définitif	APD	17.5
	Projet	PRO	20
	Assistance pour la passation des contrats	ACT	7.5
Travaux	Visa des études d'exécution	VISA	9
	Direction de l'exécution des travaux	EXE	25
	Assistance aux travaux de réception	AOR	6
			100

Figure 2 - Répartition indicative de la rémunération des éléments de mission [d'A 94].

La figure 2 indique la répartition de la rémunération correspondant à chaque élément de mission. On remarquera que l'esquisse correspond au plus faible pourcentage.

L'annexe 1 donne la définition des trois premières missions dans le cadre des marchés publics. Jusqu'à la phase APS on ne parle pas de dimensionnement, mais de volumes intérieurs et d'aspect extérieur. C'est seulement à la phase APD que l'on voit apparaître le calcul des surfaces et les dimensions approximatives de l'ouvrage. Enfin, c'est à la phase PRO que seront définitivement fixées les dimensions en fonction de la structure retenue et de la mise en œuvre des matériaux qui la complètent.

1 – 1 – 3 Les phases suivantes

Une fois le dossier APS approuvé, commence le travail de description de l'ouvrage en terme de composants de construction. Deux dossiers sont produits : le Cahier des Clauses Administratives Particulières (CCAP) et le Cahier des Clauses Techniques Particulières (CCTP) qui répertorie par corps d'état les éléments nécessaires à la réalisation du projet et les modes de mise en œuvre ou d'assemblage préconisés par le maître d'œuvre ou l'architecte. Ils complètent les cahiers des clauses générales (CCAG et CCTG). Parallèlement, les documents graphiques complètent cette description en donnant la position et les dimensions de chaque élément.

Le lecteur trouvera en annexe 2 un exemple de clause extrait d'un CCTP. Il s'agit d'indiquer les matériaux et leur mise en œuvre pour chaque élément de la construction, clairement identifié et localisé.

Les phases suivantes travaillent sur des états successifs de définition, précision ou réalisation du projet. Très souvent ce sont des collaborateurs d'architectes qui assurent ces missions, tout au moins en partie : il faut des bonnes connaissances techniques et de la rigueur, le volet esthétique et créatif étant en grande partie déjà défini.

Les outils de CAO traditionnels prennent en charge le processus de conception à partir de la phase APD, lorsque la géométrie du projet est connue et qu'il faut passer d'une représentation mettant en valeur les espaces et leur aspect extérieur à une représentation définissant les enveloppes et leurs constituants.

1 – 2 Les modelleurs géométriques

Les logiciels professionnels actuels sont bâtis sur des modelleurs géométriques : les dimensions et les positions des espaces sont connues, il faut en indiquer la composition des enveloppes.

Si les logiciels de CAO actuels du marché ne prennent pas véritablement en charge le processus de conception, ils interviennent de façon non négligeable dans la production de plans dans de nombreux cabinets d'architecture.

1 – 2 – 1 Les outils

L'élaboration de plans numériques se fait sur calques virtuels superposés, à l'aide d'objets « murs », de différentes épaisseurs, suivant les matériaux utilisés, et paramétrables par l'utilisateur. Cet objet mur s'étire comme une ligne autour d'un espace, prend les virages à angle droit ou avec des angles spécifiques, et s'adapte s'il croise un autre mur défini avec un autre matériau. Les étapes de création d'un mur sont données en figure 3. S'adapter veut dire continuité de la structure porteuse s'il y a lieu, plaquage de l'isolant si le mur a un côté extérieur ou sur un espace non isolé (garage ou cave).

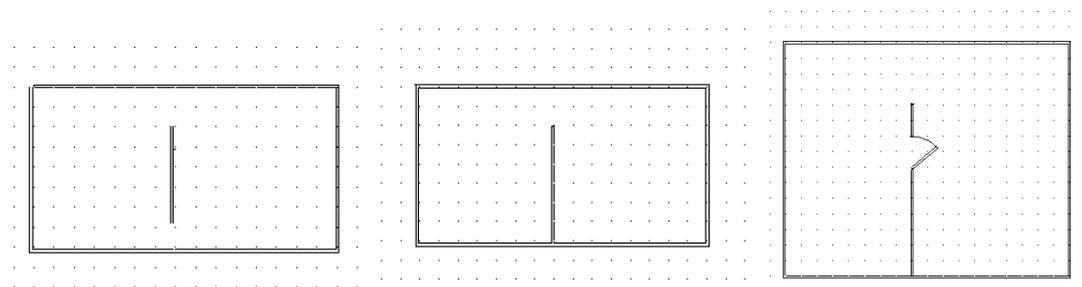


Figure 3 – Les étapes de création d'un mur enveloppe et d'un mur perpendiculaire à l'aide d'une grille de fond

Les illustrations 3 à 8 sont issues du manuel utilisateur d'Architecte 3D [MIC 97].

En ce qui concerne les toitures, l'architecte choisit la forme générale dans un menu : terrasse, ou à deux, quatre pentes, en pointe de diamant... Il paramètre les débords de toit, donne des indications sur la structure de la charpente et sa pente suivant le matériau couvrant et la zone climatique. Le logiciel dispose alors des éléments suffisants pour construire l'élément toiture et araser les murs à la bonne hauteur, suivant la pente qu'il convient. La visualisation 3D associée permet à l'architecte de vérifier l'aspect extérieur. Il confirme les volumes sous toiture par une étude de l'intérieur, disposant des côtes finies.

La figure 4 définit quels sont les paramètres d'une toiture. La figure 5 en montre une vue en trois dimensions, après avoir choisi les valeurs des paramètres dans le menu associé.

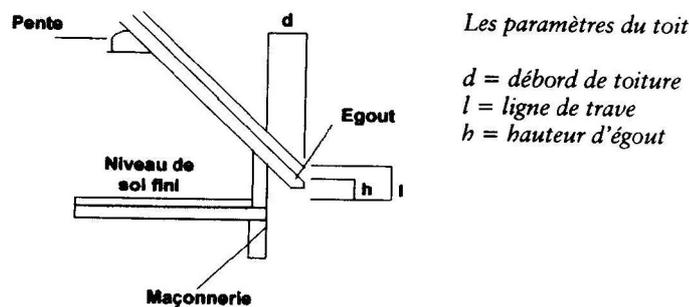


Figure 4 – Des paramètres de définition d'un toit

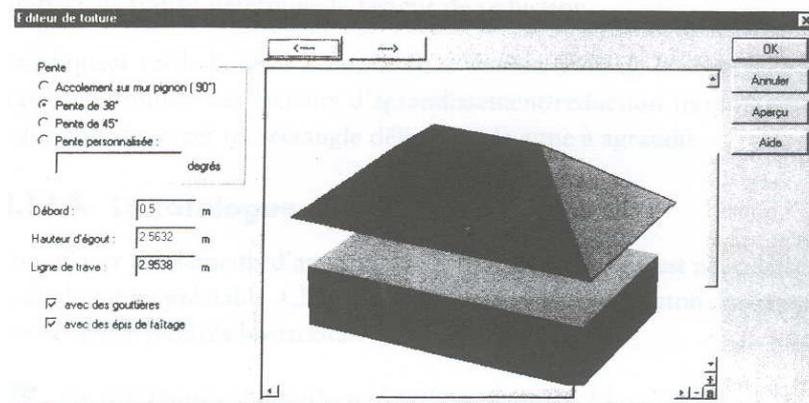


Figure 5 – Exemple de menu de paramétrage de la forme d'un toit

Le module d'aide à la construction des escaliers est également une aide importante à la conception : il s'agit de calculer la hauteur et la disposition des marches dans une cage d'escaliers déterminée, permettant de franchir une hauteur connue. C'est souvent l'escalier qui s'adapte aux composantes de la cage de l'escalier plutôt que l'inverse, bien qu'il ne soit pas exclu que l'on puisse modifier à posteriori les côtes de l'espace dédié à la circulation verticale.

La figure 6 présente les principaux paramètres requis pour la définition d'un escalier.

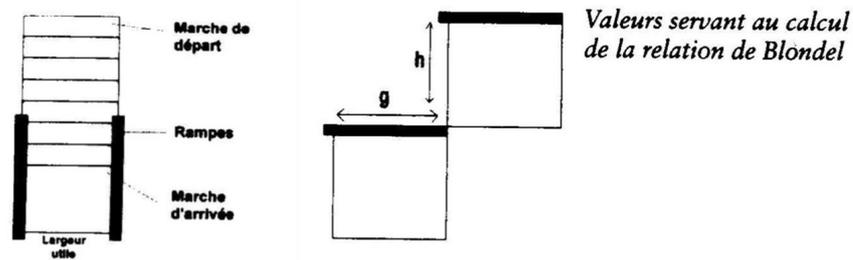


Figure 6 – Des paramètres de définition d'un escalier

La figure 7 montre une visualisation en plan et perspective d'un escalier.

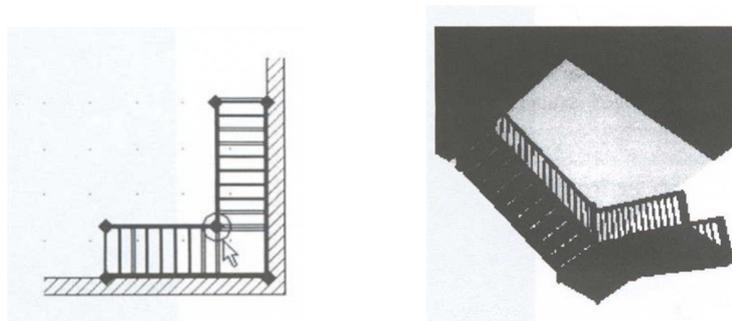


Figure 7 – Définition en plan et visualisation d'un escalier

Les deux modules dont nous avons choisi de parler, prenant en charge la définition des escaliers et des toitures, représentent une petite révolution dans le travail du dessinateur. Ils permettent d'effectuer des calculs d'intersections de volumes et de visualiser le résultat très rapidement. C'est si facile que l'on peut réaliser plusieurs essais avant de prendre sa décision. Avant cette aide, l'architecte visualisait dans sa tête les résultats possibles et choisissait suivant ses critères, puis demandait à un dessinateur de faire les calculs et dessiner le résultat en plans, coupes et élévations... A ce stade le projet était pratiquement entièrement défini, et la perspective, seul document réellement lisible par un néophyte, n'était que rarement produite, car très longue à réaliser. Aujourd'hui le dialogue avec les maîtres d'ouvrage est certainement facilité. La sécurité de la conception et la qualité du projet y gagnent également par la vérification visuelle qui permet de voir qu'un pan de toiture n'est pas en harmonie avec le reste du bâtiment ou qu'un escalier n'échappe pas au dernier niveau.

On utilise des symboles standard ou personnalisés représentant les portes et fenêtres. Les symboles s'adaptent à l'épaisseur du mur qui les supporte et à l'échelle de visualisation ou à la vue demandée. On dispose d'une palette étendue de textures de remplissage, allant des hachures classiques jusqu'à l'illustration de matériaux spécifiques, souvent distribuées par les entreprises de commercialisation de composants du bâtiment.

Sur la figure 8 nous voyons comment les composants fenêtres et portes s'adaptent à l'épaisseur du mur, en plan et en perspective.

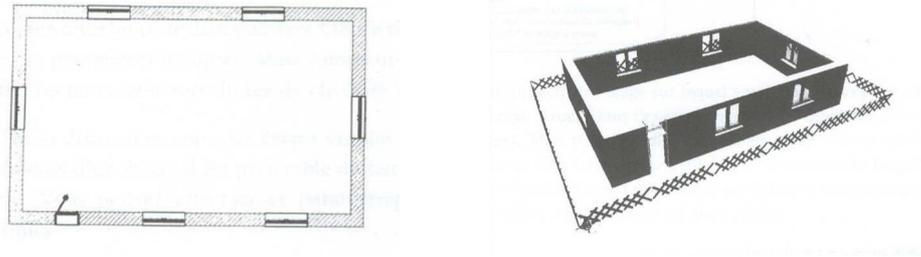


Figure 8– Visualisation d'un mur et ses ouvertures en plan et en perspective éclatée.

De nombreux autres modules prennent en charge la partie calcul ou rendu de tâches de collaborateurs d'agence : aide à la production de métrés et devis, rendu 3D en perspective, voire animations pour les jurys de concours, aide à la visualisation des ambiances intérieures pour décider un client un style d'appareils sanitaires par exemple...

Les logiciels de CAO actuels sont d'excellents outils de production des documents graphiques sur lesquels travaillent tous les intervenants du projet : architectes et ingénieurs pendant l'étude, métreurs et ouvriers aux phases de réalisation. Seul, le maître d'ouvrage n'a pas été concerné par l'entrée de l'informatique dans les agences : il ne dispose pas de document sur le projet en train de s'élaborer, il ne le découvre qu'une fois les principaux choix organisationnels et volumiques arrêtés.

1 – 2 – 2 Les avantages

Les avantages de travailler avec une représentation numérique du plan sont nombreux. Nous les avons classés par ordre croissant de gain de performance. Cet ordre peut varier d'une agence à l'autre, suivant sa structure et les compétences qu'elle détient.

- Amélioration de la rapidité de production des plans
- édition de plans à divers niveaux de précision ou diverses échelles sans avoir à redessiner tout le projet comme cela se faisait lorsqu'on passait de la phase APS à la phase APD puis à la phase PRO
- amélioration de la qualité et la lisibilité des dessins et de la stabilité de la représentation symbolique qui pouvait varier d'un dessinateur à un autre, d'une agence à l'autre.
- meilleure communication avec les divers corps d'état : on peut sélectionner sur un calque les seuls symboles électriques pour donner à l'électricien qui chiffre, puis réalise les travaux. Cela évite des erreurs de métrés.

- vérification de la cohérence des plans : la superposition de toutes les informations permet de voir si deux fluides incompatibles se croisent ou si l'on a projeté le placement d'une prise de courant derrière un radiateur. Très souvent ce sont deux ingénieurs différents qui s'occupent du chauffage et de l'électricité, l'architecte ayant pour mission de coordonner et de vérifier leurs études.
- sécurité dimensionnelle des composants du projet : des modules spécifiques de calcul des escaliers ou de pente de toit permettent d'éviter des erreurs ou des recherches fastidieuses lorsqu'on ne travaille pas dans sa région et qu'il faut vérifier la zone climatique avant de dessiner la toiture.
- répercussions automatiques et fiables des modifications sur tous les plans concernés, cela évite les oublis fatals et les mauvaises représentations. Sur un calque, modifier veut dire enlever l'encre du symbole avec une lame de rasoir et redessiner par-dessus cette surface moins lisse qu'à la première occasion. Cela entraîne bien souvent des épaissements de traits, voire des trous dans le calque, donc une dégradation de la lisibilité.
- chiffrage rapide et fiable des métrés permettant de faire des devis estimatifs. Le chiffrage d'un projet est long et fastidieux. Il se fait parallèlement à l'élaboration du CCAP. De nombreux logiciels d'architecture fournissent une aide à l'élaboration de ces pièces écrites qui sont contractuelles.
- communication aisée avec le client si l'utilisateur produit une maquette virtuelle lisible. Les dossiers traditionnels proposent des croquis, des plans, coupes et façades réalisés à main levée. Le client n'a pas toujours une bonne lisibilité de son projet.
- réalisation rapide de dossiers administratifs, notamment pour ceux qui demandent une illustration en trois dimensions de l'insertion dans le site, comme le permis de construire. La production traditionnelle de ces documents monopolise d'importantes ressources : aller photographier, redresser la photo, mettre en perspective le projet, lui donner un aspect réel en le coloriant, en traçant les ombres, l'intégrer au document photographique en enlevant la végétation qui cacherait l'ouvrage... Les logiciels d'architecture proposent des outils élaborés répondant à ces tâches.

Les deux derniers points renforcent la lisibilité du projet vers les intervenants extérieurs à l'agence : le client d'abord, puis les autorités administratives ou les jurys de concours. Cette lisibilité intervient de façon paradoxale alors que le projet est totalement défini, et qu'il n'y a plus rien à décider, sauf à faire des modifications qui peuvent remettre en cause une partie du projet. Des outils de partage d'informations sur la volumétrie du projet seraient plus efficaces s'ils étaient disponibles dès la phase esquisse ou APS au plus tard : les modifications seraient possibles, les maîtres d'ouvrage seraient véritablement associés à la validation du projet en toute connaissance de cause.

1 – 2 – 3 Les logiciels du marché

L'énumération qui suit est restreinte : de nombreux logiciels d'architecture de qualité existent sur le marché. Nous avons choisi de présenter trois d'entre eux en fonction d'une de leur particularité.

AutoCAD, distribué en 1982 par la société Autodesk était au départ un logiciel de DAO (Dessin Assisté par Ordinateur). Il a ensuite évolué vers la CAO (Conception Assistée par Ordinateur), la CFAO (Conception de Fabrication Assistée par Ordinateur) et les SIG (Systèmes d'Information Géographique). Ce logiciel s'est imposé comme un standard dans les bureaux d'études dans le domaine du bâtiment. Les formats d'échanges de données privilégiés sont DXF et DWG.

Autodesk Architectural Desktop 3, la version architecturale du modeler, possède une fonction de maquettage, à partir de primitives géométriques que l'on peut modeler à loisir, c'est le « modèle de masse ». Un modeler de données architecturales Autodesk Revit gère les informations de la conception, le modèle géométrique lui-même, ainsi que la nomenclature des composants de la construction, avec leur représentation graphique. Toute mise à jour sur une vue est répercutée au système d'information, ce qui garantit une cohérence de tous les documents associés à un projet.

AutoCAD est employé par certains membres du Laboratoire MSI parce qu'il intègre un environnement de programmation, Visual LISP permettant de développer des outils personnalisés pour manipuler les données géométriques. L'illustration en figure 9 propose un exemple de programme contrôlant la visualisation des axes de cercles ou arc.

```
; Programme LISP : AXE.LSP
;
; Ce programme a pour fonction de dessiner deux lignes d'axes
; centrees sur un point après la selection d'un cercle ou d'un arc
;
; Entree : selection d'un cercle ou d'un arc , % longueur des
lignes
; Sortie : opération graphique
;
; mise à jour : 30-01-01
; version 1.0
; DEHOUCK Philippe

(defun c:axe()
  (setq entite (entget (car (entsel "\nSelectionner un cercle
ou un arc"))))
  (setq typ (cdr (assoc 0 entite)))
  (while (and (/= typ "CIRCLE") (/= typ "ARC"))
    )
  (initget 4)
  (setq pourcentage (getreal "\nDépassement des lignes
d'axe en % ="))
  (setq centre_cercle (cdr (assoc 10 entite)))
```

```

(setq diametre (* 2.0 (cdr (assoc 40 entite))))
(setq diametre_plus (+ (/ (* pourcentage diametre) 100.0)
                       diametre))
(setq diametre_divise (/ diametre_plus 2.0))
(setq p1 (list (- (nth 0 centre_cercle) diametre_divise)
               (nth 1 centre_cercle) 0.0))
(setq p2 (list (+ (nth 0 p1) diametre_plus) (nth 1 p1) 0.0))
(setq p3 (list (nth 0 centre_cercle)
               - (nth 1 centre_cercle) diametre_divise) 0.0))
(setq p4 (list (nth 0 p3) (+ (nth 1 p3) diametre_plus) 0.0))
;Enregistrement de l'environnement d'AutoCAD
(setq actuel (getvar "osmode"))
(setq oldlayer (getvar "CLAYER"))
(command "-accrobj" "aucun")
(command "ligne" p1 p2 "")
(command "ligne" p3 p4 "")
;Configuration de l'ancien environnement d'AutoCAD
(setvar "osmode" actuel)
(setvar "CLAYER" oldlayer)
)
(princ "\n\tC:AXE chargé. Pour exécuter, taper : axe")
(princ)

```

Figure 9 – Exemple de programme LISP associé à AutoCAD

Un autre logiciel intéressant est **ArchiCAD**, de la société ABVENT. Dès 1984, date de sa création, il a été présenté comme un logiciel pensé par des architectes pour des architectes. Sa grande efficacité et son originalité viennent du fait qu'il propose des outils directement inspirés des habitudes de travail des architectes et qu'il a proposé très tôt des interfaces ergonomiques, dans un environnement de travail Macintosh. Aujourd'hui, une série d'outils complètent ce logiciel : TeamWork pour gérer le travail collaboratif, Zoom pour et Atlantis pour les images de synthèse et les animations représentant les projets définis à partir d'ArchiCAD.

Un outil de la gamme ABVENT qui a particulièrement attiré notre attention est SketchUp, qui prend en charge la construction de maquettes numériques. Voici un extrait de la brochure publicitaire qui renseigne sur les objectifs de SketchUp, très proches des nôtres :

Maintenant, votre ordinateur est capable de calculer, de débiter, sans bavure, vos kilomètres de plan. Mais qu'en est-il des indicibles bonheurs d'une maquette contrecollée, de la magie des sculptures de pâte à modeler, de l'évidente clarté du croquis jeté sur un coin de nappe, de toutes ces sensations que seul le geste sait procurer ? (Brochure ABVENT – Description du logiciel SketchUp).

SketchUp reste malgré tout un modelleur géométrique, même si sa facilité d'utilisation permet de définir rapidement des volumes, de les travailler, de les habiller avec toitures, textures et autres artifices. Notre étude si située en amont de cette méthode de travail.

Le dernier modelleur abordé ici est **AIIPLAN** de la société allemande NEMETSCHKE. Cette société a tissé des liens avec le GAMSAU (Groupe de recherche pour l'Application de Méthodes Scientifiques à l'Architecture et à l'Urbanisme) à Marseille. Dirigé par Farid AMEZIANE et Michel FLORENZANO [AME 01], un des axes de recherche du projet « Communication et outils de CAO » a pour objectifs d'étudier les perspectives dégagées par :

- *l'approche objet intégrée dans les systèmes de gestion de bases de données*
- *l'approche paramétrique des systèmes de CAO mécanique*
- *l'exploitation des outils et langages liés au réseau Internet*

La démarche innovante de cette étude se situe dans la prise en charge des informations liées à la conception et leur intégration dans un système d'information classique, représentant le bâtiment et ses composants tels qu'il sera ou est construit, représenté par AIIPLAN. Les contraintes sont définies en fonction des composants du bâtiment. L'hypothèse que nous avons choisie pour notre part est de déplacer encore le problème avant le choix des composants matériels, et dans notre étude, les contraintes porteront sur les espaces eux-mêmes.

1 - 2 - 4 Leurs évolutions

Les besoins des architectes étant couverts à partir de la phase APS par des logiciels similaires à AutoCAD, ArchiCAD ou AIIPLAN, des outils commencent à apparaître qui prennent en charge des tâches relevant des phases précédentes ou qui agissent de manière transversale. Nous avons vu que le travail collaboratif est une préoccupation commune aux éditeurs de logiciels architecturaux. BatiBox, présenté plus bas, répond à ce besoin de partager l'information entre les partenaires de l'acte de construire. L'autre préoccupation majeure est la communication des informations du projet : nous présenterons un parmi les nombreux logiciels de rendu et d'animation servant à mettre en valeur un projet en vue de sa communication au public. Enfin, le cœur du problème reste la modélisation des données de la construction et leur traitement. Nous avons dressé un panorama des différentes études sur ce sujet.

Outils de travail collaboratifs :

Les nombreux intervenants dans la pratique du projet s'organisent de plus en plus autour des nouveaux outils de communication mis à leur disposition. C'est ainsi que BATIBOX a été créé, sous l'égide de grandes organisations professionnelles, dont l'Union Nationale des Syndicats Français d'Architectes, (UNSFA). BATIBOX est un serveur de boîtes à projets, ayant pour vocation de faire partager au mieux l'information : plans, images, compte rendu, tableau, planning, descriptif, bordereau de prix, croquis, photos, etc...

La figure 10 montre ce qu'on peut trouver dans une boîte projet (ici extrait de la page de démonstration). On y voit, par exemple, dès la première phase du

projet (esquisse), un dialogue se noue entre le paysagiste qui propose des références d'enduits, ayant eu connaissance des photos du site et de la première esquisse.

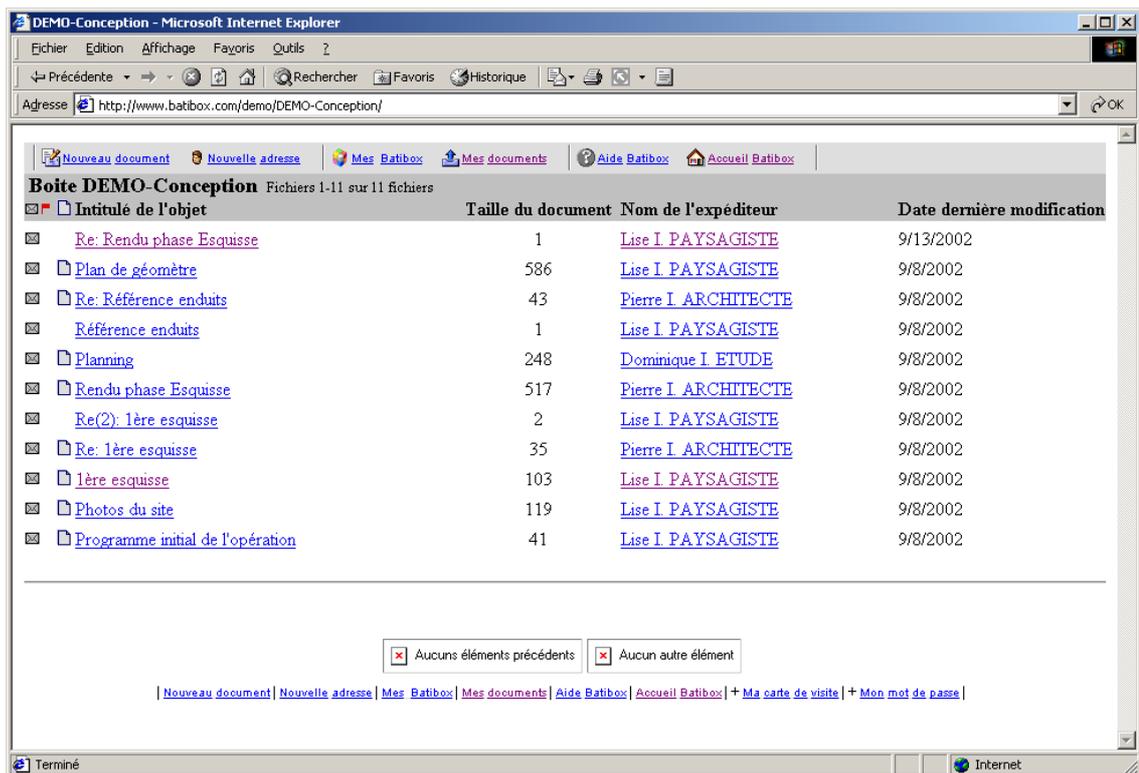


Figure 10 – Boîte de démonstration de BATIBOX

« Les concepteurs du bâtiment - architectes, ingénieurs, économistes - pour la plupart isolés dans un cadre libéral ou artisanal, devraient trouver dans ces nouvelles technologies le moyen de travailler sur un pied d'égalité avec leurs puissants interlocuteurs traditionnels, la maîtrise d'ouvrage et l'entreprise de construction. » dit Olivier CELNICK [CEL 02]. Rappelons que sur les 15 500 agences d'architecture de France, 60% d'entre elles n'ont pas de salarié, 90% d'entre elles ont moins de 4 salariés, d'après une étude de l'ordre des architectes. C'est dire si la maîtrise des nouveaux outils de communication appropriés à la gestion du projet va sans doute faire considérablement évoluer la pratique professionnelle dans les petites agences.

Outils de communication :

Lorsqu'on présente une série de plans à un client ou à un maître d'ouvrage, le plus souvent, il ne se rend absolument pas compte des volumes qui sont définis sur les plans, et encore moins de leur habitabilité ou des proportions qui seront visibles une fois le bâtiment intégré dans son site.

Les logiciels de rendu permettent non seulement de donner l'aperçu le plus réaliste possible des volumes projetés, suivant plusieurs points de vue, ils permettent également de se déplacer dans l'espace. L'architecture n'est pas un art statique : c'est en parcourant le bâtiment que l'on peut mesurer sa bonne adéquation aux fonctions que l'on attend de lui, l'harmonie des

proportions, la recherche dans les éclairages et les points de vue et enfin la charge émotionnelle qu'il peut susciter.

Bruno ZEVI [ZEV 59] explique la raison de la nécessité d'une quatrième dimension : *"La peinture existe sur deux dimensions, même si elle en suggère trois ou quatre. La sculpture vit selon trois dimensions, mais l'homme reste extérieur. L'architecture, au contraire, est comme une grande sculpture évidée, à l'intérieur de laquelle l'homme pénètre, marche, vit. »*

En attendant de bénéficier des techniques d'immersion dans des mondes virtuels, nous pouvons utiliser des logiciels de mise en valeur de projets architecturaux dans les quatre dimensions : l'espace et le temps de traversée des éléments projetés.

Le croquis de la phase esquisse que l'architecte montre à son client comporte une part d'incertitude, qui peut devenir un objet de discorde si le client s'en fait une représentation mentale qui ne correspond pas au bâtiment une fois construit. C'est pour cela qu'il est important de lui montrer plus tôt possible les éléments qui lui permettront petit à petit de se construire une image coïncidant avec la définition du projet en cours. La maquette, réelle ou virtuelle, augmente la qualité de la communication vers le client.

La figure 11 montre une planche de communication d'un projet réalisée le logiciel de rendu Form Z RenderZone de la société AutoDesSys : le fractionnement en niveau permet d'appréhender rapidement les organisations des espaces et la structure du bâtiment. Les planches classiques de communication des projets montrent souvent des plans, coupes, élévations qui parlent aux professionnels du bâtiment mais qui sont loin de la vision qu'aura l'utilisateur in fine. Un citadin a rarement assez de recul dans sa rue pour voir sa maison telle qu'elle est dessinée sur l'élévation qui lui est présentée. Par contre, il sera sensible aux détails qui seront perceptibles lors de l'approche de son porche d'entrée par un piéton.

Le témoignage d'un utilisateur du logiciel Form Z est instructif : il lui a permis d'aider ses clients à visualiser ce que l'équipe de conception pensait aussi bien que ce que les clients souhaitaient.

" During the last year, we have used this software from the very beginning of the projects to help clients to visualize what we are thinking as well as what they are expecting. "

Chapman, Griffin, Lanier Sussenbach Architects, Inc. provides a broad range of clients with comprehensive planning and architectural design services."

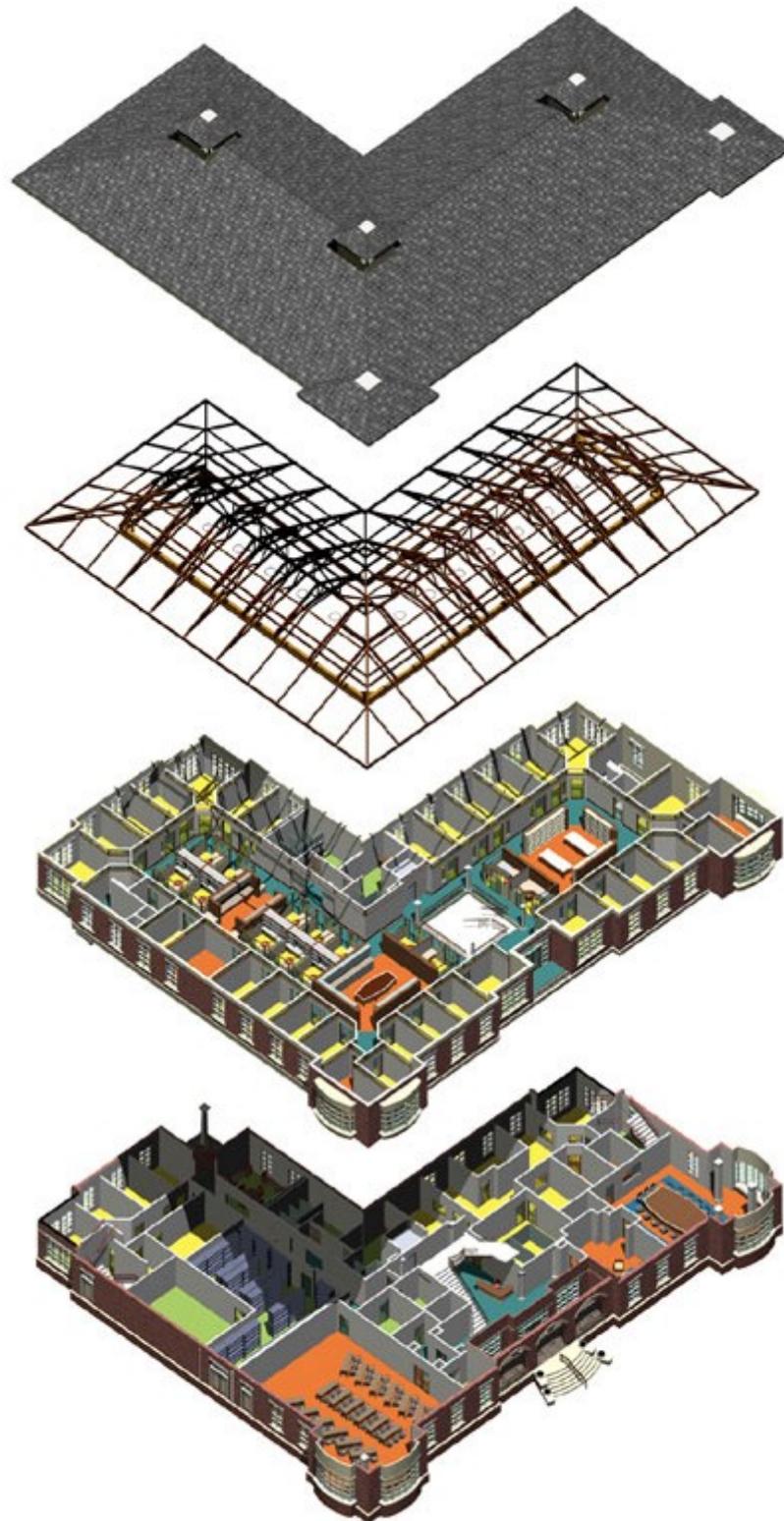


Figure 11 – Planche de communication d'un projet – Logiciel Form Z
Projet de CGLS Architects, Inc. Young Ho Yoon Atlanta, Georgia

Systèmes d'information dédiés à la conception :

La communication des informations du projet ne se fait pas seulement vers le client. A partir de l'acceptation des grandes lignes du projet par le client, l'architecte engage des relations d'échange de données vers les autres acteurs de la conception du projet dans sa totalité : paysagistes, ingénieurs béton, ingénieurs fluides (chauffage, électricité...), bureaux de contrôle, organismes administratifs, métreurs, et plus tard les entreprises qui réaliseront le projet.

Très souvent la communication est informelle, et un des écueils est la transmission des documents mis à jour. On peut utiliser les outils de travail collaboratif, présentés plus haut. Une solution fiable et complémentaire serait de partager la même source d'information, mise à jour pour tous au même moment.

La norme ISO 10303, standard de représentation et d'échange de données, appelée également STEP (STandard for the Exchange of Product model data) a été définie en 1994 et a pour objet de décrire les caractéristiques physiques et fonctionnelles de n'importe quel type de produit industriel (dans le cas qui nous intéresse, ce sera un bâtiment, assimilé à un produit industriel), tout au long de son cycle de vie, de l'intention de construire jusqu'à la réalisation, maintenance et démolition du bâtiment. Le langage EXPRESS associé à STEP permet de décrire les données en termes sémantiques et de les lier entre elles. Le même composant peut être vu différemment suivant la vue à laquelle il participe.

La figure 12 illustre deux vues différentes d'un mur percé de deux fenêtres.

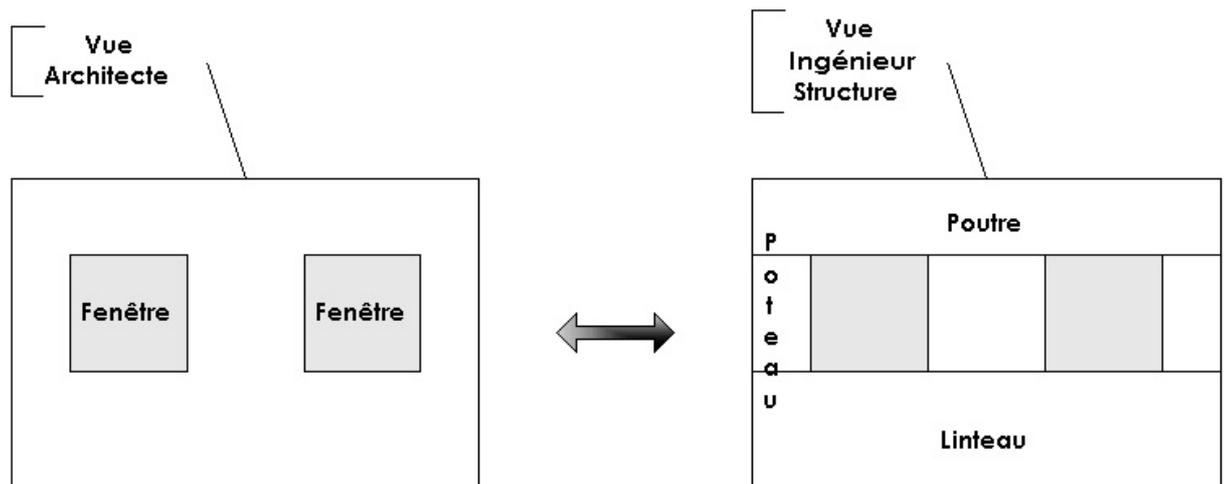


Figure 12 – Exemple de vues prises en charge par la norme STEP

La norme STEP est utilisée dans de nombreux projets européens tels que CIMSTEEL, pour les constructions métalliques, COMBI pour le béton armé, COMBINE (Computer Models for the Building INdustry in Europe) étudié par L. KHEMLANI et E. KALAY [KHE 98], plus spécialement dédié au domaine de l'énergie du bâtiment (chauffage, ventilation...) ou encore ATLAS

(Architecture, methodology and Tools for computer integrated Large Scale engeneering), pour la gestion du projet.

Une autre réponse à l'exigence d'une représentation unique des composants d'un projet est le modèle EDM (Engineering Database Model,) proposé par C. EASTMAN et A. SIABIRIS [EAS 95] qui se veut le lien entre tous les intervenants de la construction et leurs logiciels respectifs. Plus que le stockage des éléments de la construction d'un projet, EDM représente une série de concepts intermédiaires entre l'intention humaine et la structure physique actuelle du produit.

Dans ce modèle, nous trouverons une représentation

- des matériaux (CONSTRUCTED_FORM)
- des aires d'occupation humaine organisées de manière hiérarchique (BOUNDED_SPACE)
- des activités (ACTIVITYs) qui s'y déroulent

Chaque entité est définie sur un domaine de validité, peut participer à une agrégation (ou regroupement d'entités) et est l'objet de contraintes (ou spécifications).

U. Flemming et R. Woodbury [FLE 95] ont travaillé sur SEED (Software Environment to Support Early Phases in Building Design) dont le but est d'accompagner la conception dès les premières phases de la démarche. Il encourage le mode exploratoire du processus de conception en permettant aux architectes de produire et d'évaluer très facilement différentes versions du même projet. Une base de données permet également de retrouver et de ré-utiliser d'anciennes versions de projet et des adapter au contexte actuel.

Parmi les études proches, nous pourrions citer encore KAAD (Knowledge-based System to Support Architectural Design) de G. CARRARA et E. KALAY en 1994 [CAR 94].

Enfin, nous avons remarqué le travail de K. MENIRU, C. BEDARD et H. RIVARD [MEN 02] qui organisent le processus de conception en quatre étapes :

- définition du projet
- analyse du site
- étude de la configuration des espaces construits
- composition des éléments de construction

Comme dans notre étude, c'est le thème de la configuration des espaces construits qui est particulièrement abordé dans leur article, plus particulièrement les interactions entre le concepteur et son dessin sur les formes à construire. Chaque entité de construction est vue sous trois angle : fonctionnel (les contraintes appliquées à l'unité : « le garage est au rez de chaussée » par exemple), géométrique (hauteur sous plafond = 2.4m) et d'évaluation (perte de chaleur de 82Kw pour -23 degré de température extérieure – les études sont menées au Canada).

Les entités sont organisées de manière hiérarchique, les plus abstraites proches de la racine (une maison a trois niveaux, chaque niveau a ses pièces...), les feuilles terminales correspondant aux objets concrets participant à la construction (porte, applique...).

La démarche de conception est l'ensemble des décisions qui conduit à une solution. Les événements composent la démarche au cours d'un processus dynamique qui fait appel aux transformations et duplications pour définir les arrangements d'entités représentant une solution. L'architecte dispose d'outils graphiques permettant de travailler sur la représentation 3D des entités. Un éditeur gère la disposition des entités dans la structure hiérarchique. Des règles assistent le concepteur lors de sa démarche : ce sera par exemple le respect de la distance entre deux pièces. Les auteurs ont pour dessein de favoriser les interactions entre le concepteur et le modèle du projet, de stimuler l'imagination de l'architecte et encourager les expériences de type « et si... ».

Notre travail est très proche de la démarche de la dernière référence. Nous y trouvons un souci de description de l'information du contexte du projet, ce qui est peu fréquent dans les travaux mentionnés plus haut. Les entités y sont décrites suivant une hiérarchie, bien que la notre ne suive pas les mêmes règles de décomposition. L'entité de base ici est tout élément relatif à l'architecture ou à la construction. Nos composants fondamentaux sont plus architecturaux que constructifs. Les règles d'évaluation du comportement des entités se retrouvent également dans notre logiciel. Ici, cette évaluation se fait après proposition de positionnement et dimensionnement d'une entité par le concepteur, alors que dans notre travail, les règles d'assemblages sont évaluées avant la définition complète de l'espace.

Pour un projet donné, plusieurs solutions sont acceptables, et la trace des essais antérieurs (la démarche) est stockée dans les deux cas. Il s'agit toujours d'enrichir la démarche créative de l'architecte en lui permettant des essais, des erreurs, des retours en arrière, des réutilisations de parties de projets antérieurs. Les deux approches combinent à la fois l'information abstraite et graphique, les deux modes d'expression privilégiés des architectes.

Dans notre démarche nous avons mis l'accent sur les modes de conception au moment de l'esquisse et n'avons pas traité la définition du système d'information comme une fin en soi. Nous nous sommes cependant attachés à construire un système d'information qui puisse intégrer et rendre compte de la diversité des informations dont se sert le concepteur.

1 – 3 Les modeleurs déclaratifs

« La modélisation déclarative repose sur l'idée que nous pouvons appréhender le monde autrement que par sa description géométrique » [cité in JAR 97]. Il s'agit de s'appuyer sur une méthodologie différente, en amont de l'utilisation des logiciels dits de CAO présentés plus haut. Nous rappellerons les principes de base d'un modeleur déclaratif et verrons que la démarche qui leur est propre a été engagée de diverses manières. Nous ferons un tour d'horizon sur les modeleurs déclaratifs proches du domaine de l'architecture et enfin expliquerons comment MultiFormes a initié notre travail.

1 – 3 – 1 Principes de base des modeleurs déclaratifs

Un concepteur de scène 3D a souvent une idée générale d'organisation de volumes dans sa tête, sans en connaître précisément toutes les caractéristiques géométriques. Il peut en faire une description textuelle : « ici une maison de type traditionnel, à sa droite un arbre, plus loin à gauche une ferme... ». Un modeleur déclaratif permet de décrire une scène avec un haut niveau d'abstraction, laissant certains détails de dimensionnement ou de placement dans l'incertitude ou l'incomplétude, sans pour autant que la scène ne perde du sens pour celui qui reçoit la description.

Le texte déclaratif fait appel à des représentations d'objets standard, des concepts : maison de type traditionnel, arbre, ferme... que l'on peut éventuellement personnaliser dans la suite du discours. Il introduit des notions de placement (ici, à droite, plus loin à gauche) qui n'ont rien de géométrique mais correspondent à plusieurs emplacements possibles des objets.

Le texte descriptif est construit à partir d'un vocabulaire adapté (objets et relations entre les objets sont reconnaissables) qui permet de construire une représentation interne de la scène, appelée modèle interne. Un objet peut être lui-même représenté par un modèle interne : la maison de type traditionnel est un cube, plus long que large, moins haut que large, avec une toiture à quatre pentes posée sur le volume principal... A chaque modèle correspondent de zéro ou n modélisations géométriques. Zéro s'il y a une incohérence dans la description, n pouvant être un nombre imposant si la scène est très générale.

Le concepteur de la scène décrit un modèle de scène, puis demande une génération des solutions, basée sur la discrétisation de l'univers de la scène. Plus la discrétisation est fine, plus il y aura de solutions, quelquefois très proches les unes des autres. L'étape de visualisation des solutions, ou prise de connaissance, permet au concepteur d'une part, de vérifier que son modèle correspond aux propriétés désirées de la scène et de le modifier le cas échéant, et d'autre part, de choisir la solution qui se rapproche le plus de son modèle mental initial. Toutes les solutions sont correctes, il suffit quelquefois de générer la première solution pour satisfaire le concepteur. Pour d'autres domaines d'applications, comme l'architecture, un choix entre plusieurs types de solution est plus proche de la pratique professionnelle traditionnelle.

L'utilisation d'un modéleur déclaratif permet de manipuler un grand nombre d'objets dans la scène, ayant chacun des propriétés de haut niveau. Des scènes complexes peuvent ainsi être générées (maquettes pour des mondes virtuels) quitte à être retravaillées par la suite avec les outils classiques de modélisation géométriques.

Tous les modéleurs déclaratifs s'organisent autour des 4 étapes principales que nous avons soulignées plus haut et que nous retrouverons dans la suite de ce travail :

- description de la scène à l'aide d'un vocabulaire adapté, portant sur des objets, leurs propriétés et les relations qu'ont ces objets entre eux
- transformation de la description en modèle interne
- génération des solutions
- prise de connaissance

Dès la fin des années 1980, autour de l'école Centrale de Nantes, les recherches sur les modéleurs déclaratifs seront fructueuses et couvriront plusieurs domaines d'application. Parmi elles, nous citerons :]

- PolyFormes [MAR 88] : modéleur déclaratif de polyèdres réguliers ou semi-réguliers décrits par leur nombre de faces, leur convexité ou le nom de leur inventeur.
- MultiFormes [PLE 91] : modéleur déclaratif généraliste de scènes 3D. Il servira de base à notre travail. Il est présenté plus amplement en page 32.
- FiloFormes [PAJ 94] : modéleur déclaratif de tableaux de fils tendus : déclaration des points de passage des fils (clous) et description de la manière dont sont passés les fils.
- VoluFormes [CHA 94] : modéleur déclaratif de formes : un niveau de description est relatif aux formes engendrées, le deuxième niveau contrôle les règles de croissances des formes générées.

Christian Colin [COL 96] met en avant les intérêts de la modélisation déclarative chez les concepteurs de scènes en trois dimensions :

- La description est aisée et rapide : un objet est défini par des propriétés et des contraintes de haut niveau, définies pour le corps de métier du concepteur ou personnalisées par lui-même.
- Les solutions sont toutes correctes et en cohérence avec les requêtes du concepteur, il est inutile d'en vérifier la validité
- la production d'un ensemble d'objets a l'avantage de présenter plusieurs types de solutions, alors que dans le processus traditionnel, la complexité et le temps nécessaires à la production d'une seule solution limitent très certainement le nombre de cas étudiés.
- la facilité et la rapidité de production des solutions permettent de renouveler les essais à moindres frais : le processus itératif de la conception prend alors toute son ampleur

Par conséquent, le concepteur est réellement déchargé des tâches de bas niveau afin qu'il puisse se concentrer sur le processus de création lui-même.

Nous reprenons ces remarques à notre compte et nous tâcherons d'en démontrer le bien-fondé dans les chapitres suivants.

1 – 3 – 2 Démarches déclaratives antérieures

Dans le domaine de l'organisation spatiale et de l'architecture, nous avons retenu trois thèmes de recherche qui sont particulièrement proches des nôtres. Il s'agit des modeleurs DEM²ONS de G. KWAITER [KWA 98], BatiMan de L. CHAMPCIAUX [CHA 98] et ARCHIPLAN, un solveur de contraintes spatiales, étudié par B. MEDJDOUB et B. YANNOU [MED 00].

DEM²ONS

L'objectif du modeleur DEM²ONS est de décharger le concepteur de scènes 3D des tâches laborieuses de dimensionnement et de placement d'objets dans un univers fini. Le concepteur dispose d'une bibliothèque d'objets décrivant leurs principales caractéristiques et d'un ensemble de contraintes spatiales, énoncées dans un langage de haut niveau, qui gère le positionnement relatif des objets ("le vase est sur la table" par exemple).

DEM²ONS intègre le solveur ORANOS, défini par G. KWAITER, V. GAIDRAT et R. CAUBET de l'Université Paul Sabatier à Toulouse. ORANOS est basé sur la technique de satisfaction de contraintes, et a la particularité de prendre en compte aussi bien la hiérarchisation des contraintes suivant un ordre de priorité, que la génération dynamique de solutions en permettant l'ajout, le retrait ou la modification de contraintes en cours de génération.

La définition des contraintes spatiales est basée sur la géométrie des intervalles définie par ALLEN en 1983. Nous y trouverons une forte corrélation de la sémantique aux objets représentés. DEM²ONS possède l'avantage d'intégrer le placement angulaire, alors que la plupart des études (dont la nôtre) placent les objets sur un repère orthogonal. DEM²ONS se donne pour but de rechercher la première solution satisfaisant les contraintes et permet la modification dynamique de cette scène.

Le modeleur DEM²ONS est généraliste, à l'inverse de notre approche qui prend en charge le processus de conception architectural dès le premier entretien avec le client. Néanmoins, les préoccupations de définition des contraintes spatiales et de maintenance de la satisfaction de ces contraintes dans une scène sont très proches des nôtres, et nous suivrons l'évolution de ce travail avec attention.

BatiMan

BatiMan est un modéleur déclaratif permettant de produire des représentations volumiques de bâtiments. Les composants de base sont les murs, la toiture, les fenêtres. Pour chacun de ces composants, l'utilisateur donne des indications sur le positionnement, les proportions, l'aspect. Le moteur du modéleur est de type CSP (Constraint Satisfaction Problem). Un tel type de problème est composé d'un ensemble de variables. A chaque variable est associé un domaine de validité. Un ensemble de contraintes restreint les valeurs que peuvent prendre simultanément les variables. Une solution correspond à l'assignation d'une valeur à chaque variable de façon à ce que toutes les contraintes soient satisfaites. Il peut ne pas y avoir de solutions, ou au contraire une multitude.

Le problème des résolutions de type CSP réside dans le nombre important de solutions, trop important pour permettre une analyse exhaustive par un expert. C'est un problème auquel nous avons été également confrontés dans ce travail, et auquel nous apportons un début de réponse.

L. CHAMPCIAUX résout ce problème en incluant des méthodes d'apprentissage incrémentales qui ont pour but d'une part, de réduire le domaine d'exploration en se servant de la connaissance acquise auparavant sur un problème similaire, et d'autre part, de diviser l'ensemble des solutions en parties représentées par un seul individu chacune. La classification qu'il opère s'appuie sur des observations sémantiques ou de caractéristiques géométriques. BatiMan possède un explorateur de solutions permettant de naviguer dans un groupe de solutions à partir de l'individu représentatif.

Ce dernier traitement répond en partie à nos préoccupations de présentation à l'architecte des meilleures solutions d'une génération, en considération de certains critères. Dans BatiMan, les critères de classification sont acquis par apprentissage. La partition de l'ensemble des solutions s'effectue de manière incrémentale.

ARCHiPLAN

ARCHiPLAN se rapproche des modéleurs déclaratifs définis plus haut par le fait qu'il propose à l'architecte un éditeur d'espaces et un éditeur de contraintes, permettant de décrire un projet architectural. Des domaines de validité sont construits pour chaque variable associée à un espace. Après la phase d'énumération sur les domaines de validité de ces variables, des solutions sont proposées à l'architecte pour qu'il effectue un choix.

Les espaces sont représentés par deux points référents (x_1, y_1) et (x_2, y_2) , surface S , une largeur L et une longueur W , que nous détaillons en figure 13.

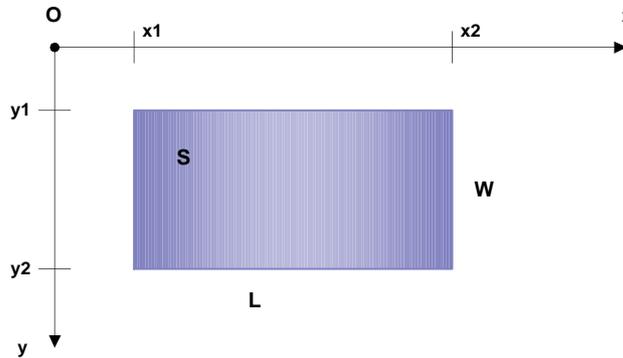


Figure 13 - Représentation géométrique des espaces dans ARCHiPLAN

La consistance géométrique des espaces est assurée par les contraintes suivantes :

(c1)	$x2 = x1 + L$
(c2)	$y2 = y1 + W$
(c3)	$S = L \times W$

Figure 14 - Contraintes assurant la consistance des espaces dans ARCHiPLAN

La classe espace est décomposée en trois sous-classes : Pièce, Circulation et Plancher. La hiérarchisation des espaces est illustrée en figure 15.

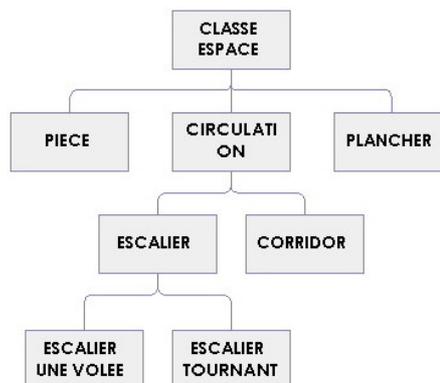


Figure 15 - Hiérarchisation des espaces dans ARCHiPLAN

Les contraintes portent également sur le positionnement des espaces en façade, les proximités (en contact sur au moins un mètre ou distance d'au moins un mètre entre deux espaces) et l'orientation de l'espace (la plus grande longueur orientée à 0° (→) ou 90° (↑)). Le traitement de cette dernière contrainte est particulièrement développé pour la classe "escalier", en fonction des sens de montée. Le non-chevauchement des espaces entre eux est implicite.

Une première phase d'énumération permet d'obtenir un ensemble de solutions topologiques, dont dérivera pour chacune d'elles, un ensemble de solutions géométriques. Le but est de produire une seule solution pour une configuration donnée, puis d'étudier les variations de dimensionnement si la solution topologique est retenue, comme le fait un architecte lorsqu'il choisit

un croquis d'organisation des espaces et qu'il le retravaille pour y caler la géométrie des espaces du projet. Le fait de travailler en deux phases réduit le nombre de solutions à proposer lors de l'étape de la prise de connaissance.

ARCHiPLAN produit des solutions sans espace perdu : pour une surface de plancher donnée, les espaces du projet remplissent la surface sans laisser de vides.

Cette étude très intéressante est celle qui se rapproche le plus de la nôtre. Nous nous permettrons de faire un parallèle de nos démarches respectives et de comparer nos résultats dans le chapitre 3-4.

1 – 3 – 3 Etat de l'art dans le domaine de l'architecture

Le sujet qui nous préoccupe, l'aide à la conception architecturale, est un domaine largement visité par des chercheurs. Pour compléter ce tour d'horizon des études s'intéressant à la conception architecturale, nous choisirons de présenter quatre types de travaux, hors modeleurs déclaratifs, répondant aux préoccupations majeures de ce domaine :

- comment lire un croquis et le transformer en volume 3D ?
- comment passer d'une déclaration à une scène 3D ?
- peut-on concevoir en partant d'hypothèses autres que la volumétrie ?
- peut-on concevoir à partir de modèles existants ?

1 – 3 – 3 – 1 Passer d'un croquis à un volume 3D

Le projet GINA a remis au goût du jour la géométrie de Desargues, ou géométrie projective, qui prend en compte des lignes tracées par un concepteur comme des projections ou arêtes de volumes. Le concepteur a également la possibilité de compléter son dessin par une explication textuelle, comme il le ferait pour présenter son dessin à un tiers. Une maquette tridimensionnelle est alors créée, permettant de partager l'information du croquis initial, et de l'intégrer dans la définition plus vaste du projet. Un exemple de lecture de croquis est donné en figure 16. Le moteur a été réalisé par Phil KUZO et Olivier LHOMME sous la direction de P. MACE à l'école des mines [MAC 97]. Ce travail a été poursuivi par Alexey SOSNOV.

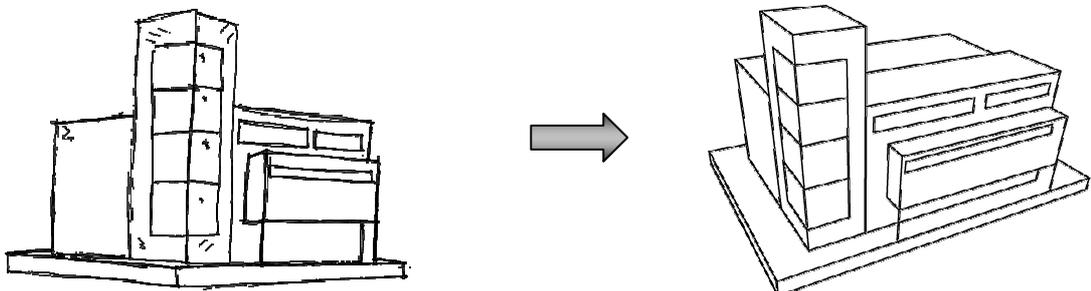


Figure 16 - Exemple de traduction d'un croquis en volumes géométriques

Les architectes sont de fervents défenseurs du croquis initial, fait sur un bout de table, porteur de l'idée maîtresse du projet. A notre sens, c'est plus l'idée du croquis qu'il faudra traduire en volume 3D que sa représentation à main levée, hors échelle, hors contexte. Il n'en reste pas moins que GINA est un outil prometteur, qui pourrait trouver sa place dans la panoplie des instruments de conception pour architecte.

1 – 3 – 3 – 2 La déclaration de scènes 3D et de leur perception : CoDIS

Présenté dans la thèse d'Emmanuel DESMONTILS [DES 98], sous la direction de Michel LUCAS, CoDIS (COncEption Déclarative d'Images et de Scènes) avait pour but de définir une plateforme de spécialisation de modeleur déclaratifs. Le concepteur définissait les objets qu'il voulait manipuler, les règles d'assemblage de ces objets. Des outils de prise de connaissance étaient intégrés afin de visualiser les scènes 3D suivant le point de vue désiré. On déclarait donc des propriétés et des contraintes inhérentes au domaine de spécialisation et des propriétés et des contraintes sur la façon dont la scène devait être perçue par un observateur.

Malgré l'abandon de ce projet, la première préoccupation de CoDIS était très proche de la nôtre : définition d'outils d'acquisition de l'information pour un domaine de connaissance, génération optimisée de solutions et assistance intelligente lors de la phase de prise de connaissance des scènes.

1 – 3 – 3 – 3 Concevoir avec la lumière pour matériau

"La lumière, dans un espace inférieur, est ce qui y pénètre de la nature, ce qui nous situe un tant soit peu dans le cosmos. Le cosmos est absent des parkings souterrains" nous dit Henri CIRIANI [CIR 87]. L'espace et la lumière sont les matériaux fondamentaux de la conception architecturale. Pourquoi ne pas bâtir autour de la lumière, d'une lumière que l'on crée, modèle à son gré. C'est ce qu'a proposé Daniel SIRET dans sa thèse en 1997 [SIR 97].

Ljubica MUDRI a également traité ce sujet en proposant à l'architecte des outils de validation de l'esquisse en fonction de différents indices qualifiant notamment l'éclairage naturel des pièces projetées [MUD 96].

Cette façon de proposer un nouveau point de vue non conventionnel sur la conception architecturale est proche de la nôtre, puisque nous utiliserons l'espace, sans négliger la lumière. Dans la démarche classique, que ce soit implicite ou explicite, la préoccupation de la lumière est omniprésente chez tous les architectes. Les outils proposés dans ces travaux ont le mérite d'aider les architectes dans la phase de conception en prenant en compte un critère peu exploré jusqu'à présent, et pourtant fondamental. Nous reprendrons, mais plus modestement, les critères de l'ensoleillement et de l'éclairage naturel dans les volumes projetés dans la phase de validation de nos maquettes virtuelles.

La lumière est importante pour l'usager du bâtiment. Le maître d'ouvrage se préoccupe de l'aspect du projet à travers le temps. C'est aussi un critère non conventionnel intéressant à prendre en compte dès les premières phases de la conception, bien qu'ici nous nous adressions principalement à la définition des matériaux de revêtement de façades, plutôt qu'à la forme des volumes. On peut cependant signaler que tel matériau en façade Sud vieillira plus vite que s'il était posé en façade abritée de la lumière du soleil. A cette occasion, on proposera alors la pose de brise soleils, éléments volumétriques non négligeables en façade, qui influent sur le parti architectural. Citons à ce sujet les travaux de Guillaume DORME sur le vieillissement des façades [DOR 98].

On le voit, la conception architecturale fait intervenir divers domaines de connaissances : Fernando MONTAGU [MON 75] pose le problème en ces termes : *"L'architecte moyen qui doit donner à ses projets une forme quotidienne et permanente se heurte donc à une grande inconnue : comment assumer la complexité croissante attachée à la résolution de problèmes difficiles avec un matériel exclusivement intuitif ? Comment créer ou formuler des idées architecturales qui soient compatibles avec un grand nombre d'exigences, lesquelles, nous le savons, sont, dans la majorité des cas, incompatibles entre elles ?"*

1 – 3 – 3 – 4 Concevoir à partir de modèles existants

Une autre préoccupation des chercheurs a été de modéliser des types d'architectures à partir de l'organisation topologique de leurs composants. L'équipe du GAMSAU à Marseille a entrepris une étude sur les modèles architecturaux.

Par exemple, une colonne est formée d'une base, d'un fût et d'un chapiteau, eux-mêmes décomposés à nouveau en éléments plus petits, y compris ceux jouant un rôle purement décoratif. Des informations sur le matériau ou l'histoire de son utilisation complètent la description de chaque entité, classées de manière hiérarchique. Les contraintes de proportionnalité, d'existence ou non des composants, de placement ou d'orientation y sont appliquées, profitant de la notion d'héritage grâce à la classification hiérarchique.

La conception à partir d'un modèle fait partie de la démarche classique de l'architecte : avant de se mettre à sa table à dessin, il fait le tour de tous les projets similaires en sa connaissance, à partir de journaux spécialisés ou de sa propre base d'information. Cela lui permet de se rafraîchir la mémoire sur telle insertion d'une véranda sur une maison à un niveau ou sur le calepinage d'un matériau en façade qui se rapprocherait de ce qu'il veut utiliser sur le futur projet.

La démarche entreprise par l'équipe du GAMSAU est très intéressante sur la définition, la recherche et l'utilisation de modèles à partir de critères divers. Notre étude pourrait être complémentaire à celle du GAMSAU dans la mesure où les modèles seraient compatibles avec le formalisme que nous proposerons aux chapitres suivants.

1 – 3 – 4 MultiFormes : modeleur déclaratif par décomposition hiérarchique

La modélisation déclarative par décomposition hiérarchique a été développée dans MultiFormes par Dimitri PLEMENOS [PLE 91]. La description d'une scène peut contenir une ou plusieurs sous-scènes qui sont régies par des propriétés locales, telles que taille, forme, et/ou des propriétés inter-scènes, comme les placements des sous-scènes les unes par rapport aux autres. Grâce à la hiérarchisation, la complexité de la scène peut croître sans que la lisibilité de la description n'en pâtisse.

1 – 3 – 4 – 1 Les objets de la décomposition hiérarchique

Dans MultiFormes, les objets sont organisés en arborescence dont seules les feuilles terminales sont signifiantes, les feuilles intermédiaires ayant pour fonction de regrouper les objets ayant les mêmes propriétés dans des boîtes englobantes. Il s'agit de créer des scènes tridimensionnelles, les objets sont donc regroupés de préférence en fonction de leur futur placement dans l'espace.

Philippe BOUDON [BOU 81] dans son ouvrage « Introduction à une sémiotique des lieux » qualifie les lieux, traduisons pour notre cas : les espaces habitables, par une série de propriétés parmi lesquelles nous retiendrons pour l'immédiat la hiérarchisation. Les autres propriétés seront également prises en charge dans la suite de ce travail.

« *Définition sémiotique d'une théorie des lieux :*

- *la clôture (frontière)*
- *l'accessibilité (rapport sujet-lieu)*
- *la hiérarchisation (sériation et emboîtement)*
- *échelle (humanité, supra-humanité, infra-humanité, a-humanité)*
- *orientation (repérage)*
- *densité (concentration vs dispersion)*
- *motifs géométriques (tracés régulateurs)*
- *stabilité (pour lieux et sujets humains - mobilité-immobilité spatiale temporelle) »*

Nos espaces habitables peuvent être hiérarchisés : tel bâtiment est composé d'un corps central et de deux ailes, chaque aile comporte trois niveaux, chaque niveau contient un appartement, chaque appartement lui-même est défini par une série d'espaces dits habitables, ou feuilles terminales de l'arbre : cuisine, séjour et autres chambres.

Il ne s'agit pas ici d'exprimer une hiérarchie fonctionnelle regroupant les espaces par fonctions, mais une hiérarchie topologique, exprimant les regroupements privilégiés des espaces. Néanmoins, cette hiérarchie est quelquefois difficile à produire a priori, aussi certains espaces pourront-ils être placés dans un premier temps à des niveaux supérieurs de l'arbre, afin d'avoir une plus grande latitude de placement. Une illustration de ce propos sera détaillée en partie 2.

La décomposition hiérarchique de MultiFormes convient bien à la description d'une scène architecturale pour une autre raison : les différentes visions du projet s'expriment avec un niveau de détail qui est fonction de l'échelle. Une scène représentant une rue sera dessinée par exemple à l'échelle 1/200, si l'on veut étudier la volumétrie d'un pavillon de cette rue, on passera à l'échelle 1/100, puis pour les placements des baies d'une façade, ce sera à l'échelle 1/50 et enfin à l'échelle 1/20 pour les détails de modénature. Chaque découpage correspond à un niveau différent de l'arbre hiérarchique. La boîte englobante représentant une sous-scène deviendra une feuille terminale par élagage des branches basses de l'arbre.

1 – 3 – 4 – 2 Les opérateurs de MultiFormes

Les premiers essais de Multiformes pour décrire des scènes architecturales voyaient les volumes comme des formes prédéfinies. Les principaux opérateurs assemblant les objets portaient principalement sur :

- le dimensionnement : *est_plus_grand_que, est_plus_haut_que_large ...*
- le placement absolu : *est_au_milieu...*
- le placement relatif : *est_a_cote_de, est_au_dessus_de*
- la valorisation attachée aux opérateurs : *beaucoup_plus_grand, un_peu_plus_petit...*

Nous avons entièrement redéfini ces opérateurs par des règles d'assemblage d'espaces architecturaux : elles seront détaillées dans le chapitre quatre de la partie deux.

1 – 3 – 4 – 3 Le moteur de MultiFormes

Chaque objet, appelé boîte dans MultiForme, est caractérisé par six variables. Ce sont la position dans l'espace avec les coordonnées x, y et z et les dimensions de la boîte avec l'expression de la largeur, la longueur et de la hauteur.

Le principe du moteur de MultiFormes est de parcourir l'arbre hiérarchique, d'énumérer les possibilités de placement et de dimensionnement pour chaque objet, en respectant les contraintes imposées à chaque nœud de l'arbre. Diverses heuristiques de parcours d'arbre ont été étudiées [BON 00].

Le moteur d'énumération de MultiFormes était écrit en Langage Pascal à l'origine. Sans modifications sérieuses au niveau de la gestion des ressources, il ne pouvait pas supporter le grand nombre d'espaces que nous voulions lui imposer.

Nous avons donc ré-écrit le moteur en langage C. C'est ce moteur qui permettra d'analyser une description, et par sa pré-énumération, de savoir s'il y a ou non une solution, et quel est l'espace qui pose problème le cas échéant.

Pour la génération des solutions elles-mêmes, nous avons privilégié une solution plus souple, partageable par tous les membres du laboratoire : le moteur GNU-Prolog de Daniel Diaz [DIA 02]. C'est ce moteur qui a produit la plupart des exemples qui seront présentés en partie trois.

1 – 3 – 4 – 4 La décomposition hiérarchique

Lors de la définition d'un projet, le point de vue du concepteur se fait à travers plusieurs échelles successives, qui grossissent l'objet au cours de l'avancement de la définition. Pour Multiformes, cela est comparable au raffinement graduel qu'entraîne la décomposition hiérarchique d'une scène. Les objets sont décrits de façon globale en haut de l'arbre hiérarchique représentant la scène, puis décomposés en parties, elles mêmes décomposées à leur tour.

Il est possible de faire un parallèle avec la progression de la définition d'un projet : le passage d'une échelle à une autre permettra de travailler sur des éléments que l'on avait pas encore découverts, parce qu'insignifiants dans le système de référence antérieur. Il est par exemple fréquent que les clients insistent sur l'agencement des meubles de leur future cuisine alors que l'on en est simplement au stade esquisse. L'information est à retenir, mais n'a aucune incidence sur l'organisation immédiate des espaces du projet.

La décomposition du projet architectural se fera de manière fonctionnelle et non pas topologique. Au stade de la définition, on sait que la cuisine de l'hôtel est un élément de la zone "préparation repas", on ne sait pas encore où elle sera placée dans le bâtiment. C'est au cours de la définition que nous apprendrons qu'elle est certainement au même niveau que la salle de restaurant, qui elle, fait partie de zone fonctionnelle "accueil".

A l'inverse, le designer qui veut décrire une chaise par décomposition hiérarchique se sert d'une décomposition topologique : il voit une plateforme d'assise, un dossier, des pieds, des accoudoirs et des liaisons, chacun des composants étant définis dans l'espace par ses relations de proximité avec les autres.

La décomposition initiale hiérarchique fonctionnelle du projet et non pas hiérarchique topologique est une spécificité du domaine de la conception architecturale. Il s'agit de travailler sur les fonctions des composants (les espaces habitables) plus que sur les rapports de proximité. Nous nous rapprochons de la définition d'Alain RENIER [REN 92] sur le projet comme parcours génératif.

Conclusion

Il reste de vastes champs d'investigation à explorer dans le domaine de la conception architecturale. Peut-être d'ailleurs, devrait-on dire dans les domaines ?

Avec Multiformes, nous avons essayé de répondre à une préoccupation récurrente de l'architecte en phase de conception : « sur quelle organisation des espaces du projet puis-je me baser pour étudier la meilleure forme des volumes à bâtir ? » Il ne s'agit en aucune manière de remplacer son rôle créatif par une énumération de formes possibles, mais bien de lui fournir des éléments graphiques de base, assimilables à des maquettes de travail, afin que, déchargé des besognes « comptables » de vérification de surfaces et autres contraintes de proximité, il puisse se consacrer pleinement à proportionner ses volumes sous la lumière, à choisir au mieux ses modénatures en façade, à communiquer très tôt au client les images qui lui permettront de se forger une idée juste, sinon réaliste, de son projet.

Notre ambition ? Produire un outil multiplicateur de créativité dans le domaine de la conception architecturale.

2 – Recueil d'informations pour une bonne description du projet

2 – Recueil d'informations pour une bonne description du projet

On peut voir le processus de conception comme un véritable jeu de construction où chaque composant que l'on place pour composer l'édifice à bâtir représente un vide, c'est-à-dire un espace habitable. Cet espace n'est pas encore qualifié, il recevra son enveloppe limitatrice en fonction de ses mesures, de sa forme, de son contexte de placement, des matériaux employés. Ce n'est donc pas un jeu de construction habituel où le composant de base est un élément plein et représente un élément du système constructif. Ici le composant de base est l'espace, le premier matériau de construction de l'architecte.

Il existe des règles privilégiant certains assemblages ou en interdisant d'autres suivant le but poursuivi : ce sont les règles de l'art, qui s'appliquent, soit de façon générale, soit plus particulièrement à une certaine catégorie de projet. Ces règles sont éventuellement complétées par l'outillage personnel du concepteur : son savoir-faire et son expérience. Enfin, des spécifications propres au projet peuvent venir compléter ou modifier l'ensemble des règles activées pour la conception de ce projet.

Nous avons modélisé la connaissance de l'architecte, ou du moins la partie utile pour commencer la conception. Elle est rangée dans le système d'information, sous forme de propriétés et de contraintes s'appliquant sur les espaces définis, en tant que composants.

Puis nous avons étudié les caractéristiques d'un composant dont la fonction est d'assurer l'adéquation de l'édifice aux fonctions demandées tout en maintenant une harmonie générale dans le projet. Les propriétés d'un composant que nous avons retenues ne qualifient qu'un seul espace à la fois : ce sont les dimensions, la couleur, le nombre d'occurrences dans le projet ou des indications de forme. Nous avons ensuite modélisé les règles d'assemblage des espaces. Elles seront traduites en contraintes qui régissent les relations entre plusieurs composants : inclusion, juxtaposition pour communication, fusion...

Nous étudions la possibilité de proposer différentes vues de contrôle du projet en cours d'élaboration : vue de l'éclairage naturel du bâtiment, vue des circulations intérieures, vue du cheminement des denrées pour un restaurant, vues des accès extérieurs...

La deuxième partie de la thèse est divisée en six chapitres. Le chapitre qui suit présente les informations nécessaires à la conception en général. Le deuxième chapitre s'attache à décrire les informations relatives à un projet particulier. Dans le troisième chapitre seront définis les composants de type espace habitable, puis au quatrième chapitre, ce seront les règles d'assemblage des espaces qui seront passées en revue. Dans le cinquième chapitre, nous donnerons un exemple de description d'un pavillon banal. Le sixième et dernier chapitre opère le rassemblement de toutes ces informations dans la description formalisée du système d'information.

2 – 1 Informations nécessaires à la conception en général

2 – 1 – 1 Le contexte de réalisation

Le maître d'ouvrage informe l'architecte du programme de l'édifice à construire. Les éléments déterminants retenus seront par exemple :

- La nature du client : privé, public, organisme à vocation sociale, mairie ...
- La catégorie du projet et l'usage de la construction : édifice recevant du public, école, hôpital, équipement sportif, habitation principale ou secondaire ...
- L'enveloppe budgétaire prévue pour la construction
- Le délai attendu

Ces informations sont structurantes mais sans aucune connotation spatiale. Néanmoins, une première analyse permettra à l'architecte de mesurer grossièrement le degré de faisabilité du projet (budget et délais impartis sont quelquefois bloquants) et l'importance du travail à réaliser par son agence.

S'il décide de poursuivre, l'organisation des différentes étapes de son travail pour le projet en cours sera déterminée par la catégorie du projet : pour un concours de maîtrise d'œuvre, ce peut être la présentation d'une esquisse à partir d'un cahier des charges établi à l'avance, pour un particulier, il faudra prévoir un rendez-vous sur le terrain et un entretien pour mieux cerner ses demandes et possibilités.

2 – 1 – 2 Le cadre légal

Pour chaque catégorie de projet (maison particulière, équipement sportif, hôpital...), il existe des réglementations appropriées. Très souvent il s'agit d'une sorte de moulage en creux d'un gabarit maximal. Le POS (Plan d'Occupation des Sols déterminé par chaque Mairie) permet de calculer les surfaces maximales autorisées, donne les mesures des gabarits à ne pas dépasser (Voir l'exemple de découpage en secteurs et la réglementation associée pour la commune de Ferney-Voltaire en annexe 4). Les débords de façade sont également réglementés : pas de balcon, pas de volet ouvrant vers l'extérieur au rez-de-chaussée. Les couleurs des façades doivent être choisies dans un nuancier local. Dans les lotissements, de nouvelles interdictions viennent compléter ces directives. Pour un site classé, un nouveau jeu de règles, souvent à base d'interdits resserre encore le champ de la conception.

En plus du POS qui qualifie un terrain particulier d'implantation, il existe des réglementations spécifiques suivant les usages ou les usagers : les établissements recevant du public (ERP) sont particulièrement bien dotés en règlement de sécurité. Y sont consignés par exemple le nombre d'issues pour une salle de classe, la fréquence des portes coupe-feu, les dimensions des passages pompiers. Un extrait de la réglementation s'appliquant aux écoles et colonies de vacances est proposé en annexe 5.

Le cadre légal dans la plupart des cas ajoute des informations spatiales qui délimitent et précisent le champ de la conception.

2 – 1 – 3 Les règles de l'art

On appelle généralement règles de l'art les règles d'assemblage des matériaux de construction qui délimitent les espaces. Nous avons pris le parti d'avoir comme composant principal le plus immatériel des matériaux : l'espace lui-même.

Chaque architecte a tendance à mettre en valeur une composante qu'il juge essentielle dans la conception. Comme LE CORBUSIER et Frank LLOYD WRIGHT, nous plaidons en faveur de l'espace et de la lumière. D'autres illustres architectes mettent en avant ce que nous appellerons "le style", ou l'apparence extérieure, résolument tournée vers l'agencement des rythmes et des matériaux en façade comme R. Venturi et D.Scott Brown (annexe 6).

Il n'en reste pas moins qu'il faut veiller à respecter les règles d'implantation des édifices et des espaces qui les composent. Une multitude de sources d'origines diverses sont exploitables sur le sujet. Par exemple, les cathédrales, comme nombre d'édifices religieux, sont implantées en fonction de l'orientation du champ magnétique terrestre. La règle d'implantation est développée en annexe 7.

Philibert de l'Orme, en 1648, donnait des règles d'implantation des maisons particulières. L'annexe 8 présente ses conseils sur l'orientation privilégiée des chambres.

Il existe également des règles portant sur l'hygiène physique ou sociale. Vers 1822 Charles Fourier imagina un bâtiment, lieu de vie et de travail, permettant de sortir les travailleurs de l'insalubrité des logements ouvriers de l'époque. Une description de son phalanstère est donnée en annexe 9. Aujourd'hui, les organismes HLM prennent le relai et proposent aux architectes des cahiers des charges qui garantissent aux futurs habitants un confort minimum dans des logements sains, entretenus et répondant aux normes acoustiques et thermiques en vigueur.

Les normes minimales de confort ont été décrites dans un décret de 1987, cité en annexe 10. Le Ministre y fixe des dimensions minimales en deçà desquelles la pièce ne peut plus répondre à l'usage qui doit en être fait.

C'est cette réflexion sur les dimensions minimales des pièces à vivre que nous retiendrons pour la suite de notre travail en fixant des limites inférieures à ne pas franchir afin de garantir une bonne habitabilité des espaces projetés. Le but de l'architecte est de maximaliser l'espace habitable : en conséquence, les solutions les meilleures seront celles qui proposent le plus de mètres carrés habitables pour le respect d'un maximum de contraintes du projet.

2 – 1 – 4 Les règles de la construction

Les règles de construction s'appliqueront également à notre édifice, dès la phase de conception. Si le système constructif est notifié avant la conception du projet, l'architecte ajoutera dans les règles de conception le respect des mesures propres au système constructif choisi. Cette requête est peu fréquente mais elle existe : cela peut être le cas d'un lotissement entièrement construit en ossature bois dans le cadre d'une opération promotionnelle sur le bois. Il faut dans ce cas vérifier que les largeurs des espaces projetés ne dépassent pas la portée autorisée par ce système de construction. Un exemple de contrainte initiée par le système constructif est donné en annexe 11.

La plupart des règles de construction sont disponibles, vulgarisées par le CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment) et différents constructeurs qui indiquent pour chaque matériau les règles de mise en œuvre en dehors desquelles aucune garantie ne peut intervenir. Voir en annexe 12 les règles de mise en œuvre de carreaux de plâtre. Certaines entreprises acquièrent des certifications pour la mise en œuvre de composants relativement complexes.

L'ensemble des règles de l'art est vaste, et en perpétuelle évolution. Des banques de connaissances permettent aux architectes de se tenir informés des dernières réglementations ou des nouveautés. Une l'encyclopédie des textes réglementaires et techniques du bâtiment, le REEF (Recueil des Eléments utiles à l'Etablissement des projets des marchés du bâtiment en France) contient les textes officiels et lois applicables au bâtiment, les DTU (Documents Techniques Unifiés), les documents généraux d'Avis Techniques, les règles de calcul, les exemples de solutions et solutions techniques et les normes applicables au bâtiment.

Les règles de construction portent sur l'assemblage des composants mais ne structurent que très peu l'organisation des espaces en vue du respect du programme défini par le client.

Dans l'exposé qui suit, nous ne retiendrons que des règles générales de construction, représentant un sous-ensemble des connaissances de toutes provenances présentées dans les paragraphes précédents. C'est un ensemble réduit mais suffisant pour étayer notre propos.

2 – 1 – 5 Le savoir-faire de l'architecte

Le savoir-faire est représentatif de l'expérience d'un architecte particulier. Il complète le plus souvent les règles d'ordre général énoncées plus haut, qui restent prioritaires.

Par exemple, le fait qu'un édifice public doit avoir une entrée accessible aux handicapés, est de l'ordre des règles d'ordre général. Un architecte complète cette règle en se renseignant toujours sur les accès à l'édifice public munis de passage permettant de rouler les fauteuils et oriente quand c'est possible les rampes vers ces accès : son l'expérience personnelle lui dicte cette règle qui n'est énoncée dans aucun code légal.

A ce stade, les règles d'assemblage dont dispose l'architecte se fondent sur des connaissances d'ordre général, des connaissances spécifiques à la catégorie de projet en cours et des connaissances personnelles acquises par les études, l'observation et l'expérience.

Pour la suite de ce travail, ne seront retenues que les connaissances qui interviennent sur l'organisation des espaces. Les formes complexes ou très précises, les détails de modénatures de façades, les couleurs ne sont entre autres pas traitées dans cette première version du logiciel.

Voyons maintenant le genre d'information que peut apporter l'étude d'un projet particulier.

2 – 2 L'environnement d'un projet particulier

Le premier souci des architectes est d'adapter le plus parfaitement l'édifice au terrain sur lequel on va bâtir, et de tirer parti au maximum de toutes ses particularités : orientation, déclivité, vue, végétation existante, contexte urbain immédiat, contexte culturel du moment.

Le rôle du contexte culturel n'est pas à négliger : il y a 20 ans on ne jurait que par les maisons bio-climatiques, permettant des économies d'énergie. Il y a 10 ans, c'est l'utilisation des technologies de cette époque au service de la maison qui intéressait les particuliers avec l'émergence de la domotique. Actuellement, respect de l'environnement oblige, on observe une tendance vers l'utilisation de matériaux recyclables...

Toutes ces informations sont présentes à l'esprit du concepteur lorsqu'il commence à travailler sur son projet.

Jean Nouvel, par exemple, est très attentif au contexte :

"A l'aube des années 80, Nouvel a défini les bases d'une démarche sous-tendue par deux convictions : l'architecture ne peut plus se poser en discipline autonome, refermée sur elle-même et ignorante du monde dans lequel elle s'inscrit ; le projet par nature - location, climat, relief, destination, économie, culture - ne peut qu'être spécifique. "Je ferai deux fois le même projet quand il me sera posé deux fois la même question", dira-t-il".

In [BOI 96] (page 12)

2 – 2 – 1 **Reconnaissance de la catégorie du projet**

Il est important dans un premier temps de repérer la catégorie du projet : de façon à savoir quel sous-ensemble des connaissances sera activé lors de la conception. Les catégories proposées lors de la demande du permis de construire en France sont les suivantes :

- bâtiment à usage d'habitation individuel (pur ou groupé) ou logement collectif
- bureaux
- commerces
- bâtiments industriels
- stockage non agricole
- stockage agricole
- construction agricole hors stockage
- aires de stationnement
- équipements collectifs en transport
- en enseignement et recherche
- en santé
- en hygiène et action sociale (hors hébergement)
- en culture et loisirs
- hôtels, motels et autres locaux d'hébergement (dont foyers)
- ouvrages spéciaux.

A l'intérieur de ces quinze catégories citées, nous avons surtout travaillé sur les types de projet à usage d'habitation, individuel ou collectif. Les logements sont typés selon le nombre de leurs pièces principales : T1 pour un studio, T2 pour deux pièces, T3 pour trois pièces ... etc. On emploie également le symbole F pour famille, suivi du nombre de personnes : par exemple un logement de type F4 comporte 3 chambres, un séjour.

La catégorisation du projet permet de lister à priori les espaces obligatoirement présents dans un projet ou qu'il est d'usage de proposer au futur usager.

Voici par exemple des prescriptions relatives au logement social urbain définies par le Ministère de l'Habitat et de l'Urbanisme Algérien.

Chaque logement se compose obligatoirement de :

- *un séjour*
- *deux à trois chambres*
- *une cuisine*
- *une salle de bains*
- *un W.C*
- *un espace de dégagement*
- *des volumes de rangement*
- *une loggia*
- *un séchoir.*

Le listage des espaces obligatoires se poursuit par des recommandations sur l'orientation et sur l'organisation des espaces [MIN 03] et par un tableau des surfaces dont suit un extrait :

- Les espaces fonctionnels du logement devront être totalement indépendants et avoir une communication directe avec le dégagement. Les espaces qui se commandent sont proscrits.

- Il est nécessaire de pouvoir isoler la partie susceptible de recevoir des visites de celle réservée à la vie intime du ménage.

- Le séjour est prolongée par une loggia et la cuisine par un séchoir, ces deux espaces extérieurs étant distincts.

REPARTITION DES SURFACES PAR TYPE DE LOGEMENT.

DESIGNATION	T.3	T.4	OBSERVATIONS
SEJOUR	19	21	
CHAMBRE 1	13	13	
CHAMBRE 2	13	12	
CHAMBRE 3	-	12	
CHAMBRE 4	-	-	
CUISINE	11	11	
SALLE DE BAINS	3	3	
W.C	1	1	
RANGEMENT	2	2	
COULOIR	8	10	
TOTAL	70	85	
LOGGIA	4	4	
SECHOIR	3	3	
COURS	10	10	<i>pour logt individuel</i>

La surface habitable moyenne pondérée par logement est de 77,5 m² avec une tolérance de l'ordre de 3%.

2 – 2 – 2 Hiérarchisation des espaces du projet

L'expression des espaces pour un projet peut le plus souvent se représenter par un arbre hiérarchique. Si tel n'est pas le cas, des espaces intermédiaires seront intercalés de façon à retrouver la structure hiérarchique qui permettra de rester dans le cadre de MultiFormes, pour l'utilisation de la modélisation déclarative par décomposition hiérarchique.

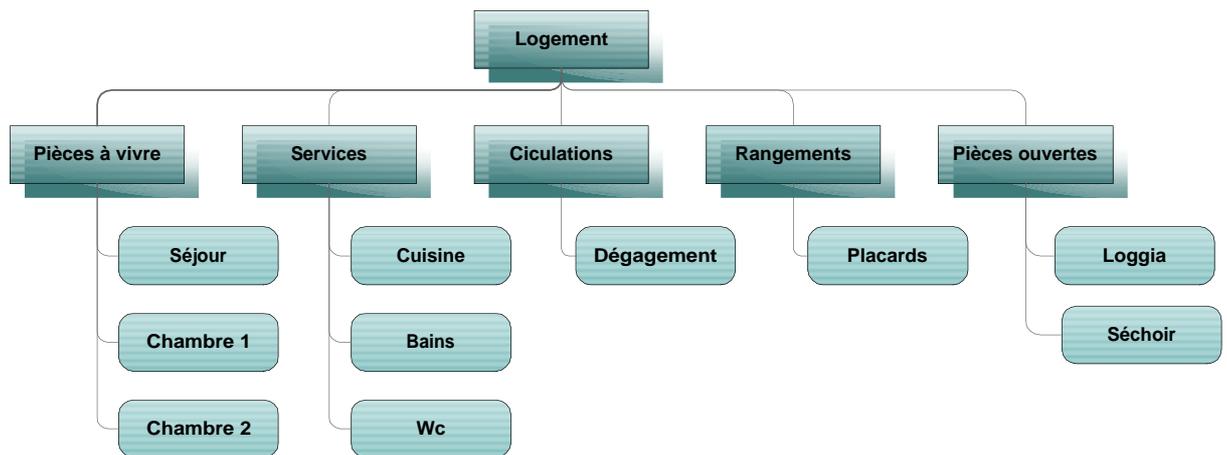


Figure 17 – Arbre hiérarchique fonctionnel d'un logement

Dans l'exemple des logements définis par le gouvernement algérien ci-dessus, on peut construire un arbre hiérarchique fonctionnel, basé sur la définition des fonctions prescrites. Les espaces notés dans les cases ombrées de la figure 17 sont issus d'une nomenclature fonctionnelle classique, que nous avons reprise dans notre système d'information.

On peut également exploiter les quelques indications topologiques présentes dans le programme des logements : les espaces sont indépendants et ne communiquent pas entre eux, ils ouvrent vers le dégagement. La partie réservée à la vie intime est isolée de celle dédiée aux visites... L'arbre hiérarchique topologique est construit différemment de l'arbre fonctionnel : il fait apparaître les relations de proximité ou d'englobement connues lors de description des espaces. L'arbre hiérarchique topologique est présenté en page suivante.

Ici on a choisi, et c'est un choix personnel, de répartir les 2m² de rangements en quatre placards. D'autres architectes pourraient avoir d'autres choix.

Là encore, les espaces intermédiaires notés dans des cases ombrées n'existent que pour les besoins du découpage hiérarchique et n'ont pas d'existence réelle affirmée. Nous les retrouverons par la suite, éventuellement avec des noms non significatifs, générés en suivant.

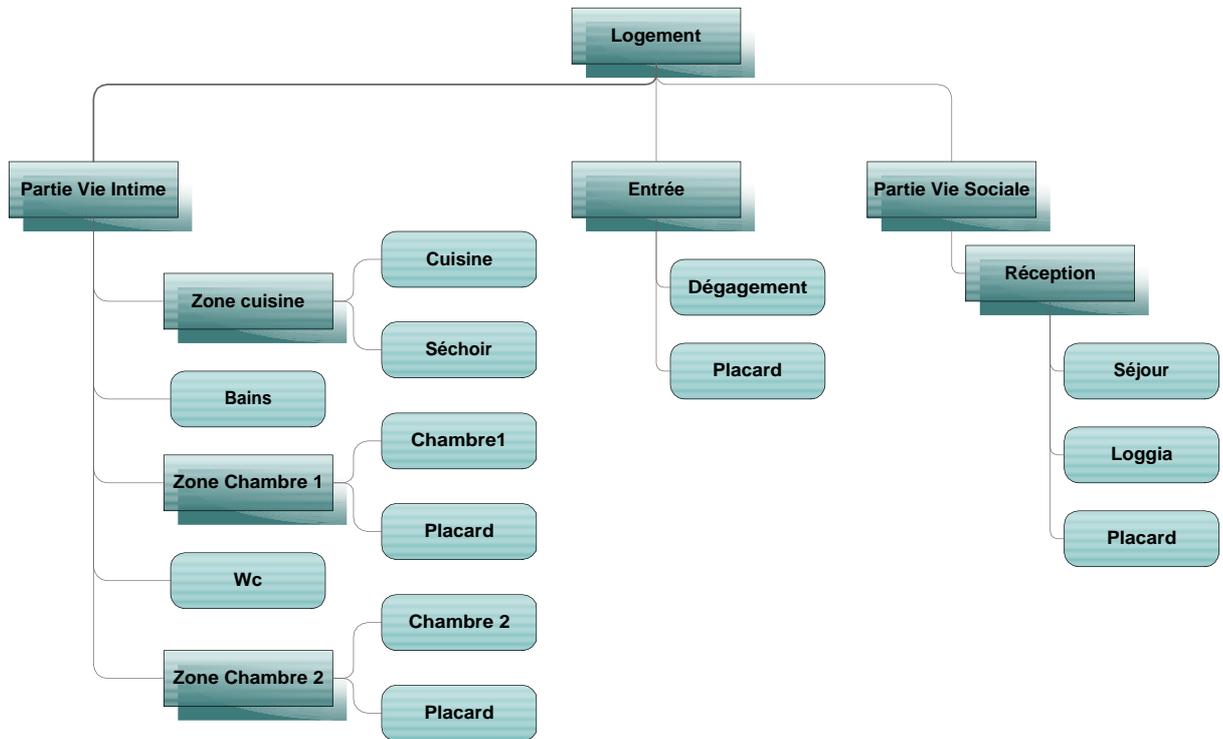


Figure 18 – Arbre hiérarchique topologique d'un logement

Le découpage hiérarchique topologique est largement utilisé dans la pratique courante : on opère un premier découpage intuitif par ailes de bâtiments, par étages, indépendamment des diverses fonctions qui vont s'y rassembler. C'est donc l'organisation topologique que nous allons privilégier dans la suite de notre travail. La figure 18 donne l'arbre hiérarchique topologique correspondant à l'arbre hiérarchique fonctionnel étudié ci-dessus.

Lors de la prise de connaissance des différentes organisations d'espaces proposées par notre outil d'aide à la conception, les espaces terminaux seuls seront visualisés (notés dans les cases claires), ou plutôt seules leurs enveloppes seront visualisées suivant le standard couramment employé par les architectes. La figure 19 montre la visualisation d'un espace sans fenêtre, le plan de coupe étant situé de façon classique à un mètre de haut.

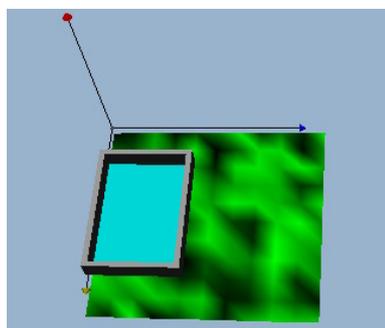


Figure 19 - Représentation d'une pièce unique, terrain et axes

Ce standard d'affichage peut être redéfini assez facilement sur demande de l'architecte. Les espaces intermédiaires ou englobants, qui n'ont pas d'existence véritable dans la construction, seront visualisés sous forme fil de fer ou, à la demande de l'architecte, n'apparaîtront pas. La figure 20 montre un espace englobant et les quatre espaces qui le composent.

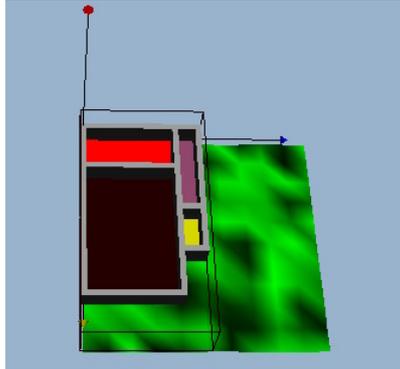


Figure 20 - Représentation d'un espace englobant et de 4 espaces associés

2 – 2 – 3 Etude de cas similaires

Les architectes ont l'habitude de regarder avec attention les ouvrages de leurs confrères, qu'ils soient contemporains ou construits au cours de siècles passés. Ils en tirent de multiples solutions face à des problèmes récurrents.

On citera pour exemple le traitement des angles vifs des îlots délimités au XVIII^{ème} siècle lors du traçage des grandes voies de Paris. En visitant Paris on peut faire le catalogue des solutions proposées : jardin d'angle, nez de bâtiment arrondi, terrasse en toiture, coupole le plus souvent avec pièce noble en hauteur...

Régulièrement, les revues d'Architecture publient des anthologies présentant un panel des meilleurs projets sur un thème donné. Ce sont des outils de travail, assimilables à plusieurs réponses possibles à un problème donné, abstraction faite du lieu, climat et moyens mis en œuvre. Pour un concept de haut niveau donné, une série de projets est analysée et le concepteur tire de cette lecture des enseignements renforçant sa connaissance générale de ce type de projet.

Au Laboratoire MSI, Ioanna RAVANI met en œuvre une base de concepts pour MultiCAD [RAV 01], construite à partir de descriptions, issues de travaux de modélisation comme les nôtres, ou à partir d'analyses de magazines spécialisés. Cette base de concepts permettra aux architectes la recherche des cas similaires à leur projet sur différents critères.

Le résultat de cette étape est de proposer à l'architecte un canevas fiable de conception correspondant à la catégorie du projet en cours. Lors de la description d'un projet, nous présenterons l'arbre hiérarchique topologique associé au projet type retenu par le concepteur, arbre modifiable suivant les besoins du client et la configuration du terrain.

2 – 2 – 4 Les désirs du client

Un architecte n'oublie jamais qu'il construit avant tout pour un usager humain. Son client, celui qui commande l'ouvrage, n'est pas forcément celui qui utilisera l'édifice, ce qui peut être source de conflits lorsque des intérêts économiques non négligeables sont en jeu.

Le rôle de l'architecte est de prendre en compte les souhaits du client tout en garantissant un confort d'usage au futur utilisateur.

Pour une construction personnelle, un entretien permet de cerner les principaux désirs du client. Certains architectes se servent de listes de questions préparées à l'avance. La catégorisation du projet permet de définir une pré-liste des espaces que l'on va trouver dans le projet, ainsi que les règles d'assemblages en usage, afin de guider au mieux l'expression des désirs du client et de n'omettre aucun point.

Pour un chantier de grande envergure, généralement le fait de marchés publics, une programmation des principales fonctions du futur édifice est consignée dans un cahier des charges. Cette expression des désirs du client donne rarement des indications spatiales directement utilisables. Pour un centre de formation avec internat, il était par exemple demandé à ce que les nuisances sonores provenant des cuisines tôt le matin (livraisons, ramassage des poubelles) ne soient pas perceptibles des chambres.

Une analyse des textes d'interview ou du cahier des charges augmente et oriente de façon considérable la connaissance mobilisée sur le projet en cours.

2 – 2 – 5 Les contraintes matérielles

En face des désirs d'un client demandant la réalisation d'un édifice dont on peut, en comparaison avec un projet similaire, chiffrer grossièrement l'enveloppe financière, les principales mesures d'encombrement spatial, le temps de réalisation, les contraintes extérieures au projet (notamment les accès aux chantiers), l'architecte doit décider de la faisabilité du projet. Avant même d'avoir tracé une ligne (déposé un composant dans notre jeu de construction virtuel), il peut dire si le projet est réalisable, irréalisable ou s'il faudra faire des adaptations afin qu'un compromis soit trouvé, cas le plus fréquent. Il est de la responsabilité de l'architecte d'empêcher tout début de réalisation s'il pense que la construction ne pourra être achevée, faute d'argent le plus souvent.

2 – 2 – 6 Les caractéristiques du terrain

En complément des contraintes matérielles, l'étude du terrain présenté par le client donne les informations les plus directement utilisables par l'architecte : il s'agit de la localisation du terrain, de dimensions, de son orientation, déclivité, voisinage... toutes ces valeurs permettront d'activer certaines règles de

conception plutôt que d'autres (possibilité de demi niveaux sur un terrain présentant une pente suffisante par exemple). La figure 21 montre une modélisation de terrain accidenté.

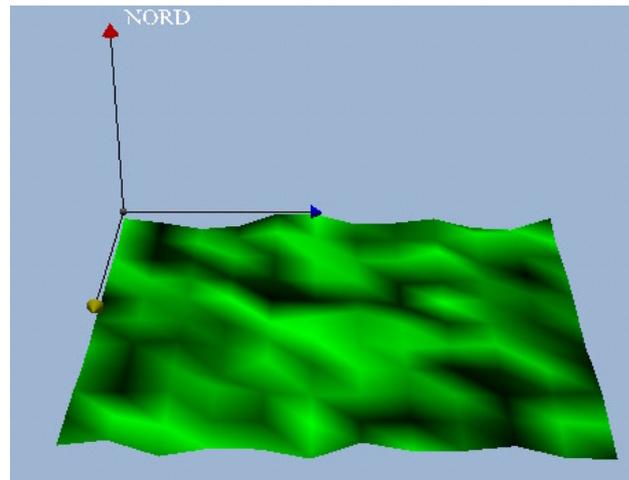


Figure 21 - Modélisation d'un terrain accidenté

Dans notre travail, la modélisation du terrain est automatique. La déclivité est donnée en pourcentage sur une des 8 directions : 5% de pente en montant vers le Nord-Est pour l'exemple de la figure 22.

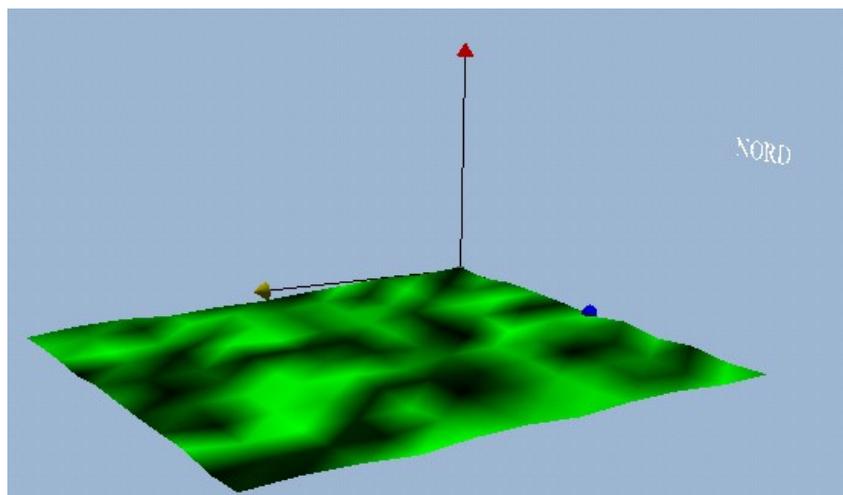


Figure 22 - Modélisation du terrain avec 5% de pente vers le Nord

Cette modélisation simple permet de couvrir la plupart des cas classiques de configuration de terrain constructible. Il sera néanmoins possible à moyen terme de l'extraire d'un système d'informations géographiques plus réaliste.

On ne définit pas de catégorie spécifique de projet en fonction des caractéristiques du terrain, mais la géométrie du terrain donne un cadre spatial très fort au projet et elle est présente dans toutes les phases de la conception.

On note, par exemple, que dans les cités construites sur des terrains exceptionnels, rochers abrupts ou zones baignées par la mer, les mêmes modes de conception se retrouvent sur la plupart des habitations, ce qui rend homogène le style des constructions. C'est la solution la plus satisfaisante au problème de forte déclivité qui sera reproduite avec des variantes, et la créativité (l'exception) est rare, parce qu'elle demande des prouesses techniques que le commun des usagers ne peut se permettre le plus souvent.

2 – 3 Description des espaces habitables

Le composant de base de notre jeu de construction virtuel est l'espace habitable. Une fois l'ensemble des informations disponibles passé au filtre de l'analyse des points cités plus haut, l'architecte connaît l'ensemble des espaces qu'il doit assembler afin de proposer une solution au programme défini avec le client.

Pour chaque espace, en fonction de sa catégorie, sont associées des dimensions typiques et certaines caractéristiques géométriques que nous appellerons les propriétés.

2 – 3 – 1 Propriétés des espaces habitables

Voici les différentes caractéristiques géométriques associées à chaque espace dans le système d'information. Elles sont définies une fois pour toutes en ce qui concerne la connaissance générale, type de projet type de projet s'il y a lieu.

- surface : caractéristique lisible directement par tous les acteurs du projet (client et architecte), il s'agit d'une surface minimum, le dessein d'une bonne conception étant de maximiser la surface habitable. En deçà de cette surface, à - 5% près, ou au-delà, à 10% près, on considère que l'espace ne peut plus répondre aux fonctions qui lui sont demandées. Ces seuils de -5% et +10% sont arbitraires et paramétrables.

La surface minimum d'un espace change en fonction de la catégorie du projet : cuisine de HLM pour type 3 : 8,5 m² au moins par exemple. Cuisine collective pour salle polyvalente accueillant - de 350 personnes : 50 m² au moins.

- largeur minimum : une pièce peut avoir la surface requise et être encore inadaptée à la fonction qui lui est allouée. Un couloir de moins de 0.70 m de large n'a plus vocation à être un couloir permettant un passage fluide et confortable de personnes. De même, un salon pourra avoir une forme en L, mais la dimension minimum d'un de ses cotés ne devra pas être inférieure à 2,5 m afin d'avoir la place d'y installer un canapé.
- linéaire de façade : cette mesure exprime le caractère obligatoire ou non d'avoir une ouverture en façade pour l'espace en question et indique le linéaire d'ouverture habituellement utilisé.

Les pièces qui doivent avoir une baie ouvrant vers l'extérieur seront positionnées en façade. A la visualisation, une baie standard sera proposée, en fonction des dimensions retenues, comme sur la figure 23. Les véritables dimensions des ouvertures ne sont pas décidées lors de l'esquisse, il s'agira de propositions standard à affiner aux stades ultérieurs de la réalisation d'un projet.

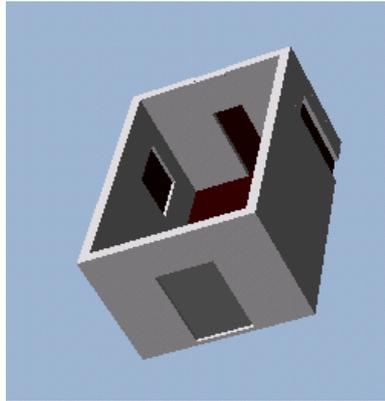


Figure 23 - Exemple de pièce terminale avec différentes baies :
Une porte-fenêtre, une fenêtre et deux portes de communication intérieures

Le positionnement en façade est un élément très important pour la recherche d'un placement satisfaisant. Si le linéaire en façade demandé lors de la personnalisation d'un espace est plus large que la dimension minimum de l'espace, cela veut dire qu'il y aura plusieurs baies, donc ouvrant sur plusieurs façades. Ce fait est signalé à l'attention du concepteur et pourra être contrôlé lors de l'analyse de l'éclairage naturel.

- hauteur sous plafond : la surface et la largeur minimale permettent de projeter au sol l'espace habitable. La hauteur sous plafond permet d'avoir sa volumétrie. Pour un pavillon de plain pied, la plupart des espaces ont la même hauteur sous-plafond (2,50 m), mais pour les édifices publics il y peut y avoir une grande variété de valeurs. C'est également le cas de la cage d'escalier pour une maison particulière, qui déroge à la règle du standard à 2,50m.

2 – 3 – 2 Personnalisation en fonction de l'architecte

Ces dimensions d'usage pour chaque espace sont proposées lors de l'analyse d'un projet en fonction de sa catégorie. L'architecte a le loisir de modifier les dimensions minimales de certains espaces ou de se créer une catégorie inédite pour un projet atypique.

Par exemple, un architecte travaillant fréquemment à la construction d'habitations de vacances, sur-dimensionnera certainement les balcons aux dépens de la surface des chambres, à partir d'une catégorie standard d'habitations collectives.

2 – 3 – 3 Personnalisation en fonction du projet

Lors de l'entretien avec le client, les dimensions standard peuvent être modifiées sous la responsabilité de l'architecte. Si les dimensions varient étrangement par rapport à ce qui est décrit dans la base de concepts, un message doit attirer l'attention du concepteur : il a pu se tromper à la saisie des valeurs ou en nommant l'espace, mais il se peut également que cette anomalie soit volontaire. Cela pourrait être le cas pour un client demandant une baignoire ronde, si la surface de sa salle de bains ne correspond plus aux normes habituelles.

2 – 3 – 4 Structure arborescente

Les espaces sont organisés en hiérarchies arborescentes proposées par défaut. Là encore, l'architecte peut déplacer des composants dans la hiérarchie s'il le désire. Il faudra cependant que l'espace englobant soit assez large pour contenir les pièces qui le composent, si celles-ci ne sont pas chevauchantes.

Pour certaines pièces, l'équipement (mobilier, appareils électroménagers) détermine les dimensions minimales. Les contrôles de surface peuvent mettre à jour des incohérences de description et nécessiter des modifications des caractéristiques du projet.

Dans notre système d'information, à chaque espace est affecté un identifiant numérique, complété par l'identifiant de son englobant direct (nœud père dans l'arbre), les dimensions citées ci-dessus (surface, largeur minimum, linéaire de façade, hauteur sous-plafond), un code de couleur pour faciliter la prise de connaissance à la visualisation et un code forme (pièce terminale ou espace englobant de type fil-de-fer).

Cette description première sera complétée par différentes propriétés, définies ci-dessous. Un exemple complet sera présenté en paragraphe 2 - 5.

2 – 4 Règles d'assemblage sur les espaces

Les propriétés définissent les caractéristiques intrinsèques d'un espace. Les contraintes sont l'expression de règles d'assemblage utilisées en fonction du contexte. Il peut y avoir des contraintes unaires, associées à un seul espace, ou binaires, liant deux espaces. Des essais nous ont amenés à abandonner des contraintes liant plus de deux espaces, en terme d'utilité et d'efficacité : un cas de règle ternaire, comme par exemple l'expression du fait qu'un espace est entre deux autres espaces, peut toujours se ramener à deux (ou un ensemble de) contraintes binaires.

2 – 4 – 1 Définition des règles

Les règles d'assemblage portent principalement sur le placement de l'espace sur le terrain en fonction de son orientation, son axe, et sur les relations qu'a cet espace avec les autres composants du projet : communication, juxtaposition, fusion...

A chaque espace est associé un ensemble de règles standard d'usage général, qui peut être modifié ou complété en fonction de la catégorie de projet, modifié encore par l'architecte qui peut en restreindre la portée s'il le juge nécessaire dans sa pratique personnelle, et enfin pouvant encore être modifié pour convenir au mieux au projet actuel.

Exemple de personnalisation d'une règle :

Règle générale : les pièces à vivre sont orientées Sud-Est de préférence
Règle de catégorie : pour un pavillon (tous types : T3, T4 et plus) le séjour est de préférence traversant (double orientation)
Règle de contexte régional personnalisée par l'architecte : pas d'orientation Sud (le soleil est trop intense en été)
Règle adaptée pour le projet : il y a une projection d'ombre en façade Sud en été, on peut accepter l'exposition Sud pour le séjour de ce projet.

Sont présentées en suivant les règles actuellement disponibles dans notre logiciel d'aide à la conception. Elles pourront être complétées à la demande de l'architecte (il ne pourra le faire lui-même que s'il est également programmeur Prolog). Une piste de travail avait été envisagée qui aurait permis à l'architecte de définir de manière dynamique ses propres règles. Le changement du moteur de résolution de contraintes opéré assez récemment n'a pas permis de développer cette piste plus avant, mais il est possible de le faire ultérieurement.

L'annexe 13 présente le tableau récapitulatif de toutes les règles utilisables actuellement par le concepteur qui décrit une scène.

2 – 4 – 2 Caractérisation des espaces

Les composants doivent être définis avant de pouvoir être utilisés. C'est le rôle des règles suivantes, qui puisent leurs informations directement dans la description de chaque espace à partir d'une surface, d'une largeur et d'une hauteur sous plafond minimales.

`définir_pièce` : un espace n'existe qu'à l'intérieur d'un projet. Il doit y être défini, en termes de coordonnées (X, Y et Z) et de dimensions (Largeur, Longueur, Hauteur). Son nom, le numéro de son espace englobant immédiatement supérieur dans l'arbre hiérarchique et son type de visualisation (suivant qu'il est ou non une feuille terminale de la structure arborescente du projet) sont également connus à ce niveau.

Pour les démonstrations suivantes, nous présenterons les données directement issues du système d'information sous cette forme :

```
%5 CHAMBRE 1 contenu dans ZONE NUIT - 3
Chambre1 turquoise 5 3 3.0 1.4 11 2.5 Mur
```

Les lignes débutant par % sont des commentaires. La ligne permettant de définir un espace commence par le nom de l'espace (`Chambre1`), sa couleur lors de la visualisation (`turquoise`), puis son numéro dans la nomenclature des espaces (5) et celui de son espace englobant (3), placé au niveau directement supérieur dans l'arbre hiérarchique. Suivent les valeurs des seuils relatifs à la largeur minimale de l'espace (3.0), son linéaire de façade minimal (1.4), sa surface minimale (11), la hauteur sous-plafond (2.5) et son type de représentation (ici `Mur`, pour un espace terminal).

La règle `définir_pièce` est activée pour chaque espace du projet.

Il faut ensuite s'assurer que les dimensions et les proportions restent valides, c'est l'objet des contraintes suivantes.

2 – 4 – 3 Règles de respect d'intégrité d'un espace

`respecter_surface`, `respecter_hsp`, `respecter_lineaire_façade` : ces contraintes contrôlent à chaque instant que les dimensions de la pièce restent dans des limites raisonnables, toujours avec une tolérance d'un seuil de -5% ou +10% (seuils modifiables) par rapport aux objectifs qui ont été fixés à la description. Il est important de donner la meilleure approximation possible lors de la description.

Le dessein de la conception architecturale est de profiter au mieux de l'espace, et souvent de maximaliser la surface habitable. C'est pourquoi les seuils sont modifiables.

Les contraintes sont par principe toutes activées sur chaque espace, sauf si une description mentionne une valeur à zéro. Si la surface est nulle, cela veut

dire qu'il est incohérent de vouloir la contraindre à rester des limites de valeurs prédéfinies. C'est le cas pour les espaces de circulation dont la surface ne peut être fixée à priori ou pour les espaces non obligatoires (cellier par exemple), pour lesquels une surface nulle reste réaliste.

2 - 4 - 4 Règles d'orientation

Les règles d'orientation permettent de positionner un espace dans une orientation donnée, soit par rapport à son englobant (son père dans l'arbre hiérarchique), c'est la contrainte `au_nord_dans()` par exemple, soit par rapport à un autre espace, ce sera la contrainte `au_nord_de()`.

Dans le schéma de la figure 24 et les suivants, les englobants sont représentés sous forme fil-de-fer, la chambre a un sol bleu et le garage un sol gris foncé. Le projet est ici composé des seuls espaces nécessaires à l'illustration des contraintes. Dans le coin haut gauche sont figurés les repères Ox (bleu), Oy (rouge) et Oz (jaune).

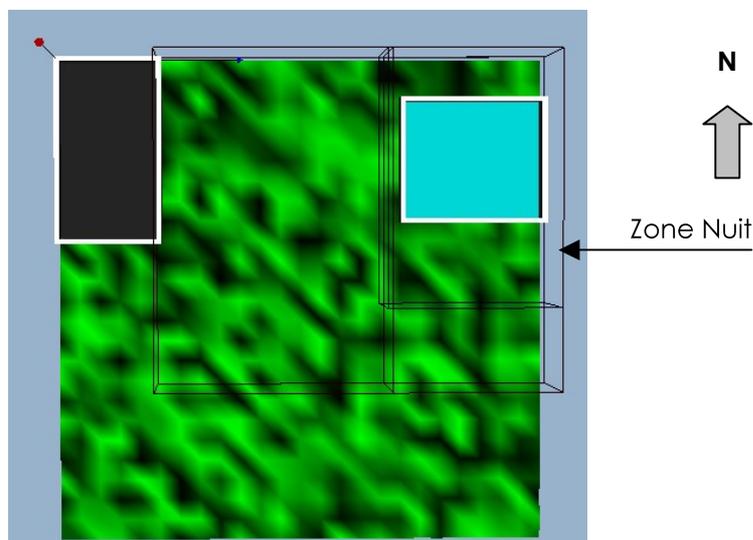


Figure 24 – Contraintes d'orientation "au_nord_dans "

Extrait de la description initiale, construite à partir des données du système d'information :

```
% 4 GARAGE contenu dans TERRAIN - 0
>au_nord_dans(Z4, Z0),

%5 CHAMBRE 1 contenu dans ZONE NUIT - 3
>a_lest_dans(X5, La5, X1, La1),
```

Chambre 1 est à l'est dans l'espace 1 (Pavillon), ce qui contraint chambre 1 à être collée en façade EST, puisque l'espace Pavillon représente la zone construite sur le terrain. On obtiendrait un peu plus de liberté de forme en mettant chambre 1 à l'est dans la zone nuit.

Si l'on rajoute un espace salle de bains, en vert, et que l'on indique qu'il est au nord de la chambre 1 :

```
%7 BAINS contenu dans ZONE NUIT - 3  
>au_nord_de(Z7, Lo7, Z5),
```

La figure 25 montre deux possibilités de placement de la salle de bains. Cet espace ne sortira pas des limites de sa boîte englobante `zone nuit`, de par sa définition.

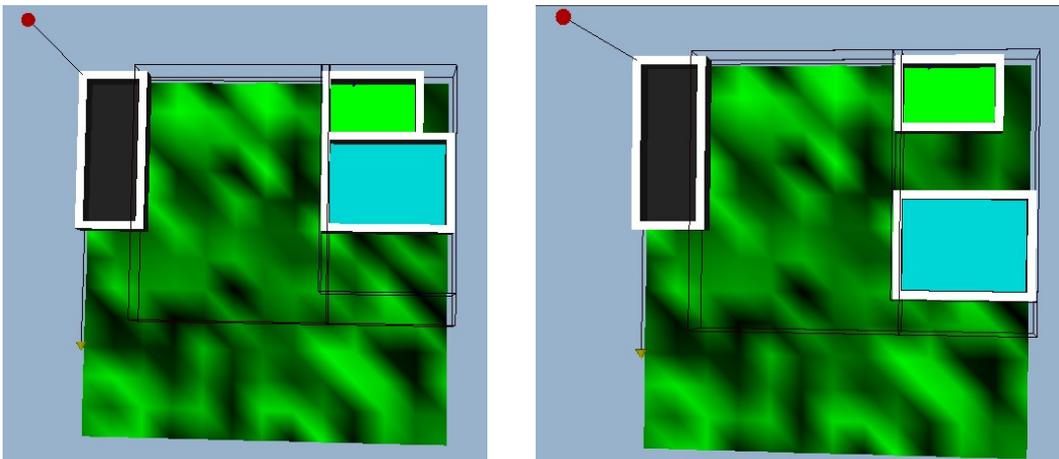
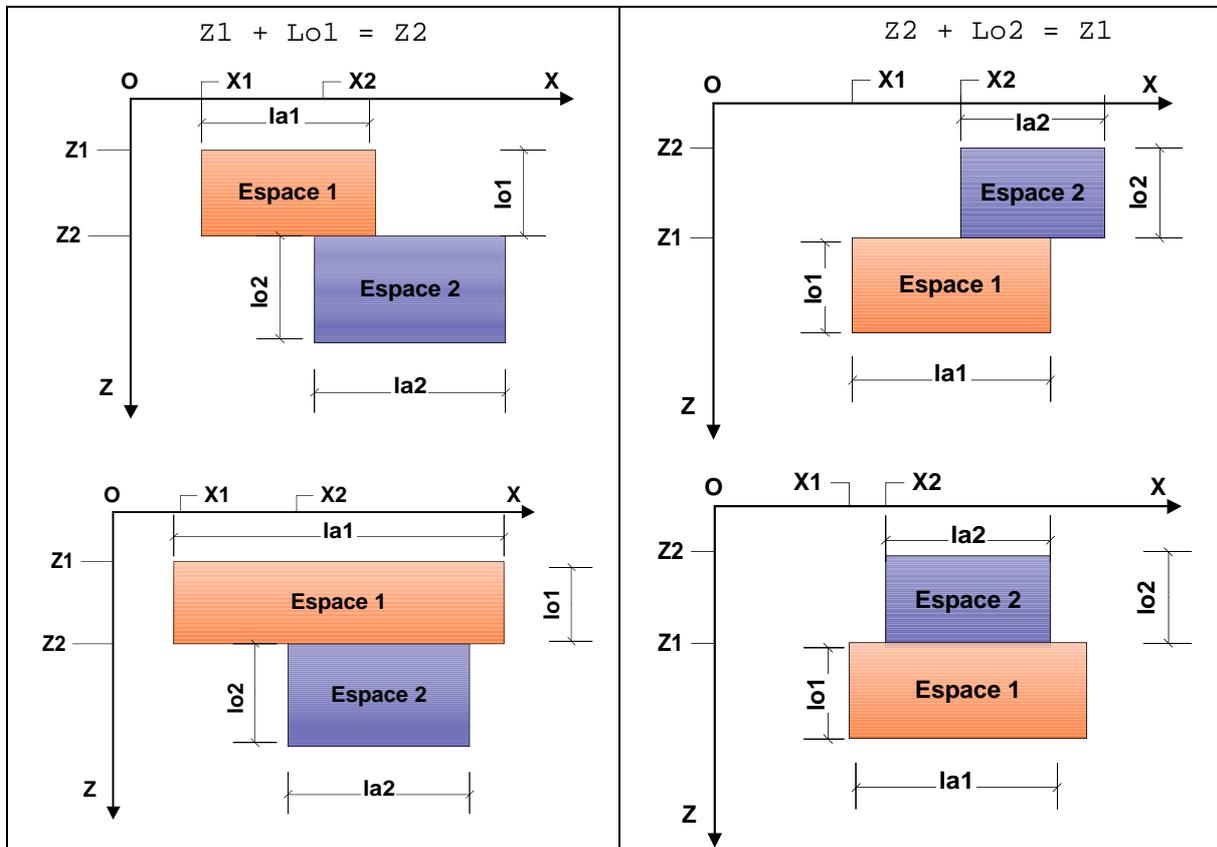


Figure 25 – Contraintes d'orientation "au_nord_de "

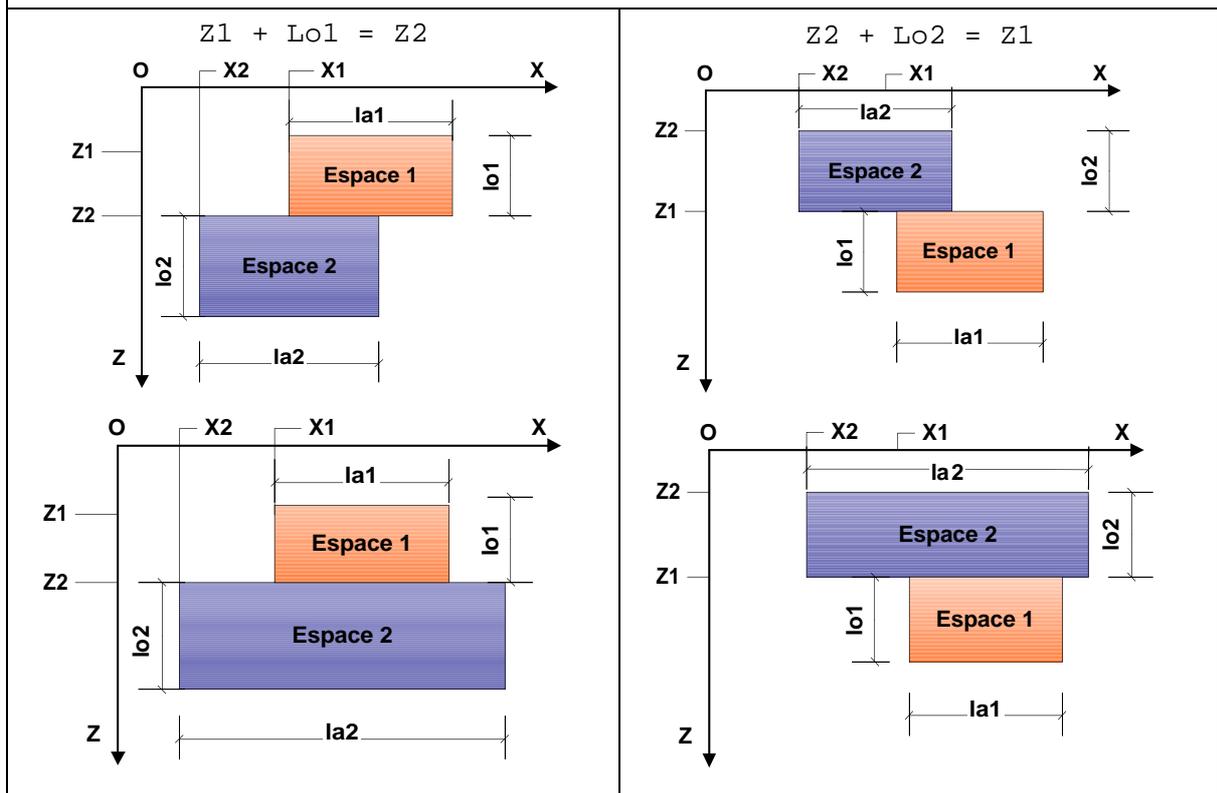
2 – 4 – 5 Règles de proximité

Il s'agit de contraindre deux espaces à avoir une frontière commune. Huit cas peuvent se présenter en 2D. Nous avons décidé d'étudier les communications sur des espaces étant au même étage. `comm` est la dimension désirée de la communication. Pour une porte de communication intérieure, on demandera 1 m de large par exemple, ce qui correspond à la largeur de la baie et de l'hubriserie. La valeur de `comm` peut varier s'il s'agit d'une porte à un battant, à deux battants, ou s'il s'agit de faire passer une gaine (30 à 60 cm).

Les schémas de la figure 26 montrent les 16 cas de proximité qui peuvent se présenter pour deux espaces dans le plan. Les variables `X1`, `La1`, `Z1`, `Lo1` représentent les coordonnées en X et Z de l'Espace 1 ainsi que ses dimensions en largeur et longueur. Il en est de même pour l'espace 2. Ce sont les huit variables qui permettent de vérifier si la règle de proximité est vérifiée pour les deux espaces en question. Dans le programme, il est également vérifié que les deux espaces sont au même étage.



$X2 \geq X1$
 $X2 + comm \leq X1 + La1$



$X1 \geq X2$
 $X1 + comm \leq X2 + La2$

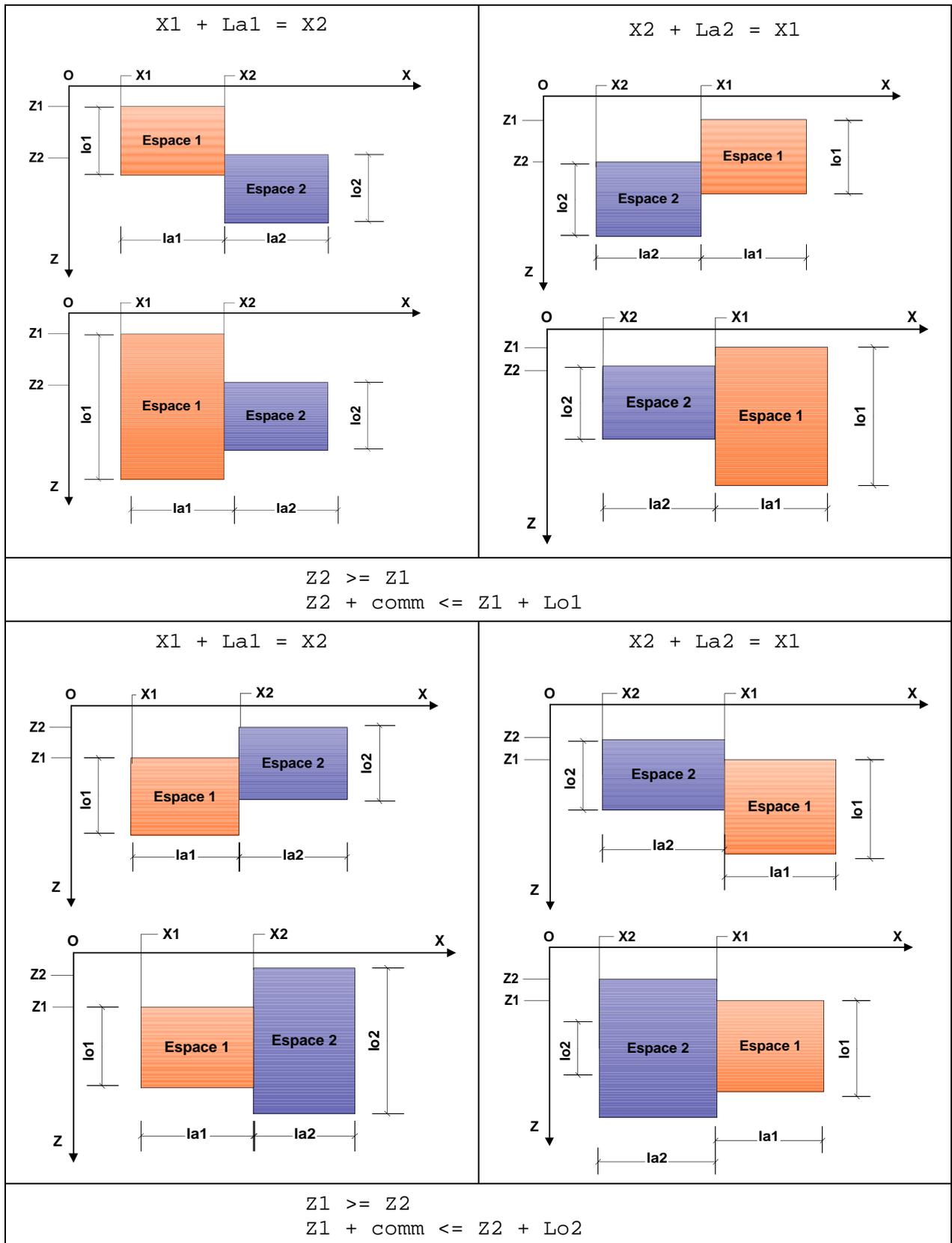


Figure 26 – Différents cas de proximité entre deux espaces

Prenons deux chambres et mettons les en communication par un espace de circulation appelé dégagement (c_{omm} = 1m ici) :

```
%5 CHAMBRE 1 contenu dans ZONE NUIT - 3
%6 CHAMBRE 2 contenu dans ZONE NUIT - 3
%12 Dégagement contenu dans ZONE NUIT - 3
>communique(X12, Y12, Z12, La12, Lo12, X5, Y5, Z5, La5, Lo5, 1),
>communique(X12, Y12, Z12, La12, Lo12, X6, Y6, Z6, La6, Lo6, 1),
```

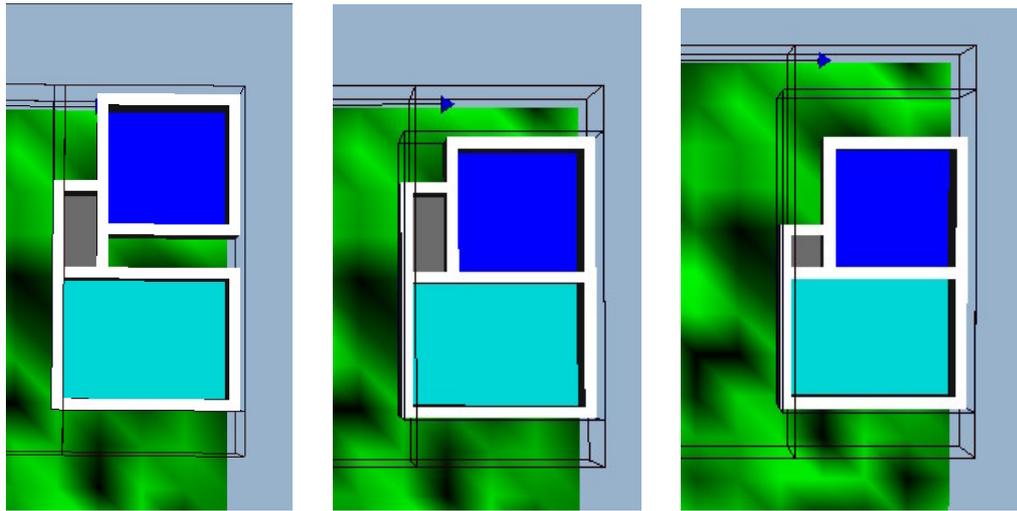


Figure 27 – Contraintes de communication

La règle `Communique` lie deux espaces qui doivent communiquer directement. Sur la figure 27, les deux chambres (en bleu) doivent communiquer avec le dégagement (gris). Cela a posé le problème de la définition des espaces de circulation : couloirs, entrée, dégagement... Nous les avons considérés dans un premier temps comme espaces résiduels, c'est-à-dire les "trous" qui apparaissent lorsque l'on a placé les pièces principales. Après plusieurs essais, il est devenu évident que les circulations devaient devenir des espaces à part entière, de dimensions modestes, certes, mais dont la fonction de communication est primordiale pour la bonne organisation des espaces habitables. Ils ont été intégrés dans la description, éventuellement morcelés pour une plus grande liberté du plan. Pour eux, nous avons créé des règles plus lâches de vérification des surfaces : on ne peut a priori leur donner une surface minimale.

Dans les règles de proximité, nous avons aussi `a_cote_de` qui exprime la même idée. Nous avons gardé deux règles différentes, `communique` et `a_cote_de`, car lors de l'étape de la visualisation, seule la règle `communique` donnera lieu au placement d'une porte. Le premier cas de la figure 27 sera transformé en la maquette de la figure 28 comportant le placement automatique de deux portes de communication.

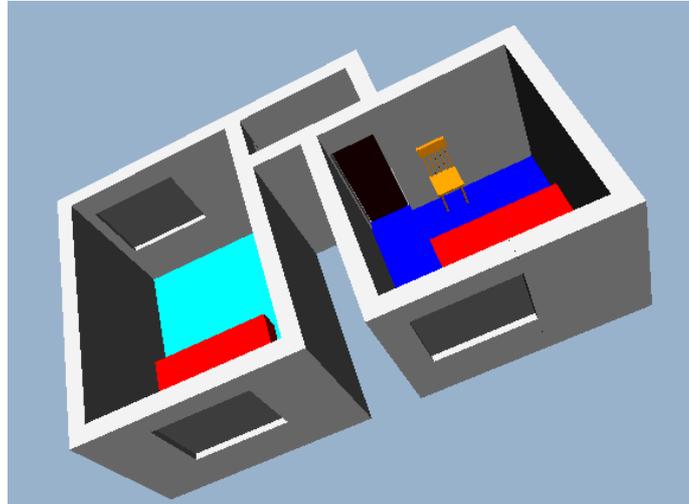


Figure 28 – Exemple de visualisation d'une porte de communication

2 – 4 – 6 Règles de chevauchement

Pour les illustrations précédentes, nous avons utilisé des espaces qui ne se chevauchent pas, ce qui paraît évident... mais fait qu'il faut cependant spécifier. Les chevauchements sont étudiés pour des espaces au même étage.

Pour l'exemple précédent, nous avons deux chambres liées par un dégagement. Les règles associées sont données ci-dessous. Le garage n'est pas visible sur l'image.

```

%2 ZONE JOUR contenu dans PAVILLON - 1

%3 ZONE NUIT contenu dans PAVILLON - 1
>non_chevauche(X2, Y2, Z2, La2, Lo2, X3, Y3, Z3, La3, Lo3),

% 4 GARAGE contenu dans TERRAIN - 0
>non_chevauche(X4, Y4, Z4, La4, Lo4, X1, Y1, Z1, La1, Lo1),

%5 CHAMBRE 1 contenu dans ZONE NUIT - 3

%6 CHAMBRE 2 contenu dans ZONE NUIT - 3
>non_chevauche(X5, Y5, Z5, La5, Lo5, X6, Y6, Z6, La6, Lo6),

%12 Dégagement contenu dans ZONE NUIT - 3
>non_chevauche(X12, Y12, Z12, La12, Lo12, X5, Y5, Z5, La5, Lo5),
>non_chevauche(X12, Y12, Z12, La12, Lo12, X6, Y6, Z6, La6, Lo6),

```

Figure 29 - Exemple de règles de non chevauchement

La règle `non_chevauche` est binaire et est déclinée pour tous les couples d'espaces ne se chevauchant pas, comme sur l'exemple de la figure 29.

Pour étudier si un espace E1 ne chevauche pas un espace E2 en deux dimensions, nous divisons l'espace trois zones, une fois horizontalement, une fois verticalement. x_n , z_n , La_n et Lo_n correspondent au placement dans le plan et à la largeur et à la longueur de l'espace n. Les figures 30 et 31 illustrent les zonages effectués.

- division horizontale :

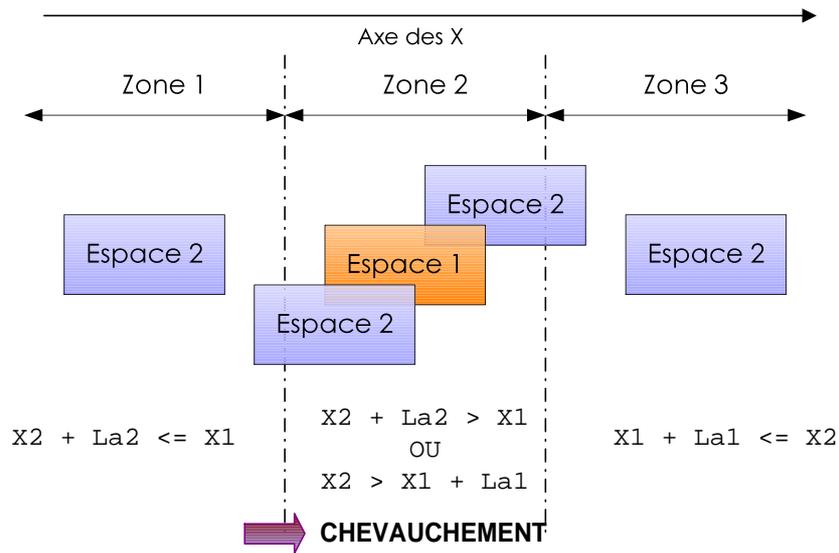


Figure 30 - Etude du chevauchement de deux espaces : division horizontale

- division verticale :

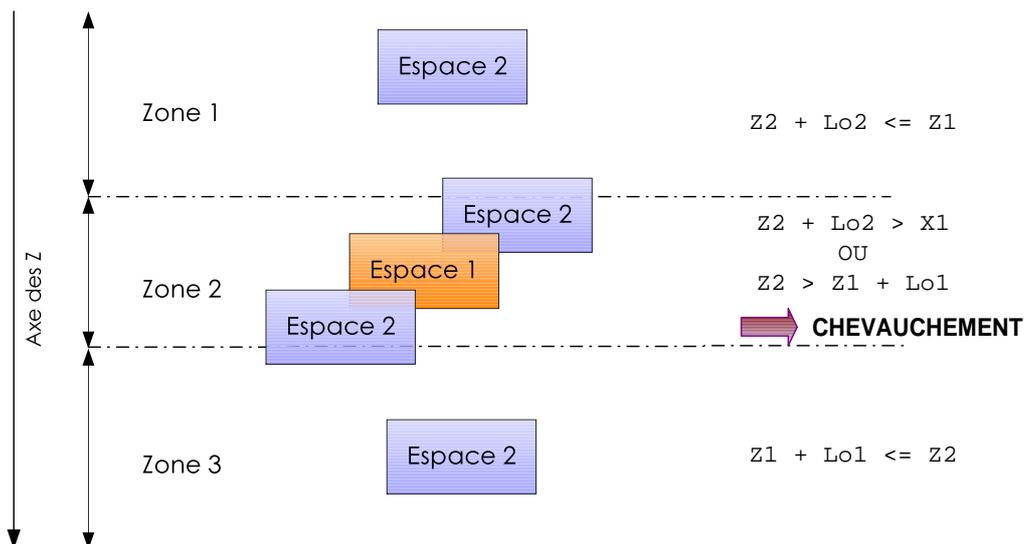
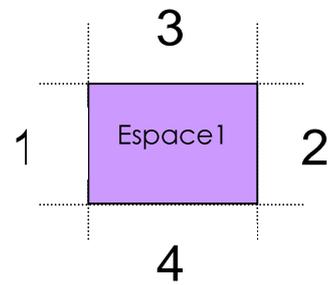


Figure 31 - Etude du chevauchement de deux espaces : division verticale

Les combinaisons qui ne provoquent pas de chevauchement :

- $X1 \geq X2 + La2$ 1
- OU $X2 \geq X1 + La1$ 2
- OU $Z1 \geq Z2 + Lo2$ 3
- OU $Z2 \geq Z1 + Lo1$ 4



Pour mémoire, le code GNU Prolog associé qui gère cette règle est relativement simple, codé en figure 32 :

```

% non chevauchement de deux espaces
% vérifié en 2D sur le même niveau

non_chevauche(X1, Y1, Z1, La1, Lo1, Ha1,
              X2, Y2, Z2, La2, Lo2, Ha2) :-
    Y1 #= Y2,
    X1 #>= X2 + La2    #\ /
    X2 #>= X1 + La1    #\ /
    Z1 #>= Z2 + Lo2    #\ /
    Z2 #>= Z1 + Lo1.

non_chevauche(X1, Y1, Z1, La1, Lo1, Ha1,
              X2, Y2, Z2, La2, Lo2, Ha2) :-
    Y1 #>= X2 + Ha2.

non_chevauche(X1, Y1, Z1, La1, Lo1, Ha1,
              X2, Y2, Z2, La2, Lo2, Ha2) :-
    Y2 #>= X1 + Ha1.

```

Figure 32 – Traduction GNU Prolog de la règle de non-chevauchement

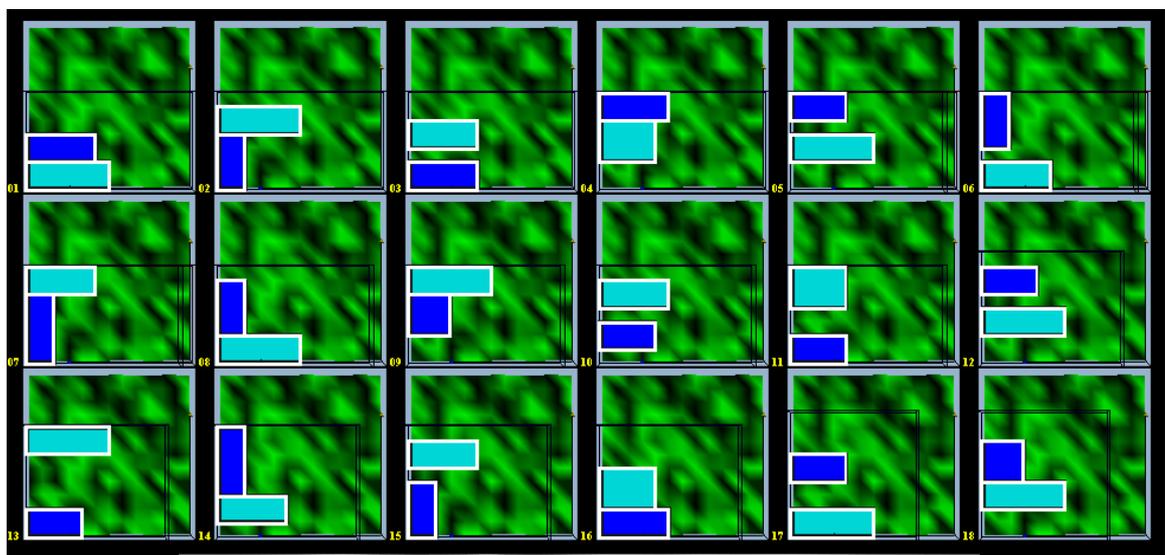


Figure 33 – Illustration de la règle non_chevauche sur deux espaces à l'ouest

La figure 33 illustre la mise en œuvre de la propriété `non_chevauche` sur deux espaces contraints à être positionné en façade Ouest. L'extension à la troisième dimension suit le même principe.

On peut vouloir autoriser le chevauchement sur une partie de l'espace, grâce à la règle `chevauchement de n : n` correspond à un pourcentage de surface à respecter entre deux espaces : ce peut être le cas du salon et de la salle à manger. Cette propriété permet de lier deux espaces de façon plus solide que la propriété de communication. Elle travaille sur les coordonnées X et Z et autorise donc des chevauchements pour des espaces de niveaux différents, donnant ainsi la possibilité d'inscrire quelques marches dans l'intersection des deux volumes.

Voici l'exemple de la figure 34 avec un chevauchement de 0 à 4 mètres carrés, soient 44% maximum de la surface bleu roi.

```
%5 CHAMBRE 1 contenu dans ZONE NUIT - 3  
%6 CHAMBRE 2 contenu dans ZONE NUIT - 3  
>chevauche(X5, Y5, Z5, La5, Lo5, X6, Y6, Z6, La6, Lo6, 4),
```

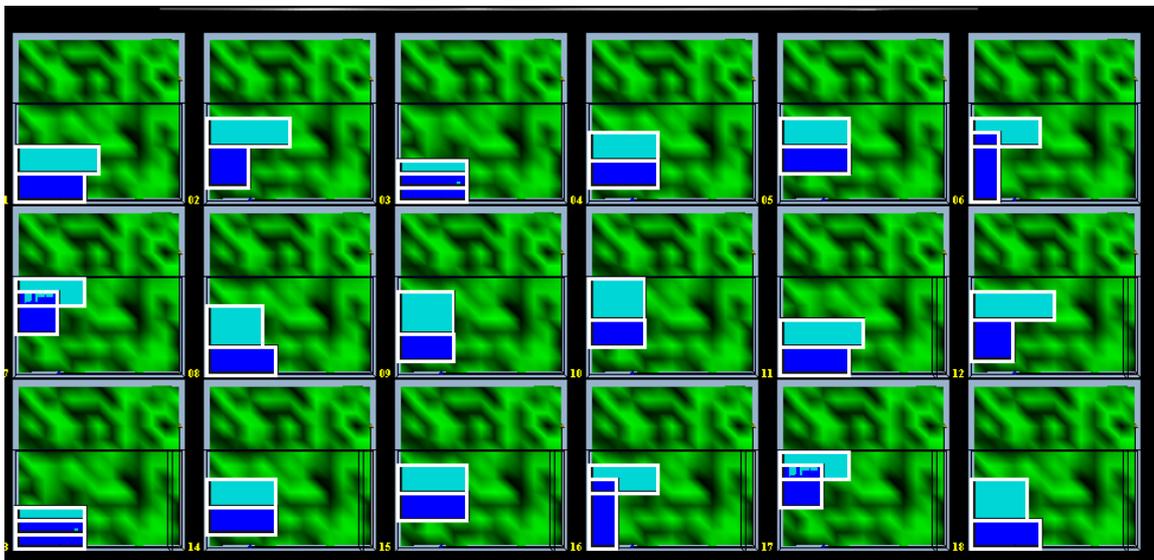


Figure 34 – Contrainte `chevauche` sur deux espaces à l'ouest avec séparateur

Nous pouvons choisir de ne pas faire apparaître le mur séparateur des espaces, ce qui est illustré par la figure 35.

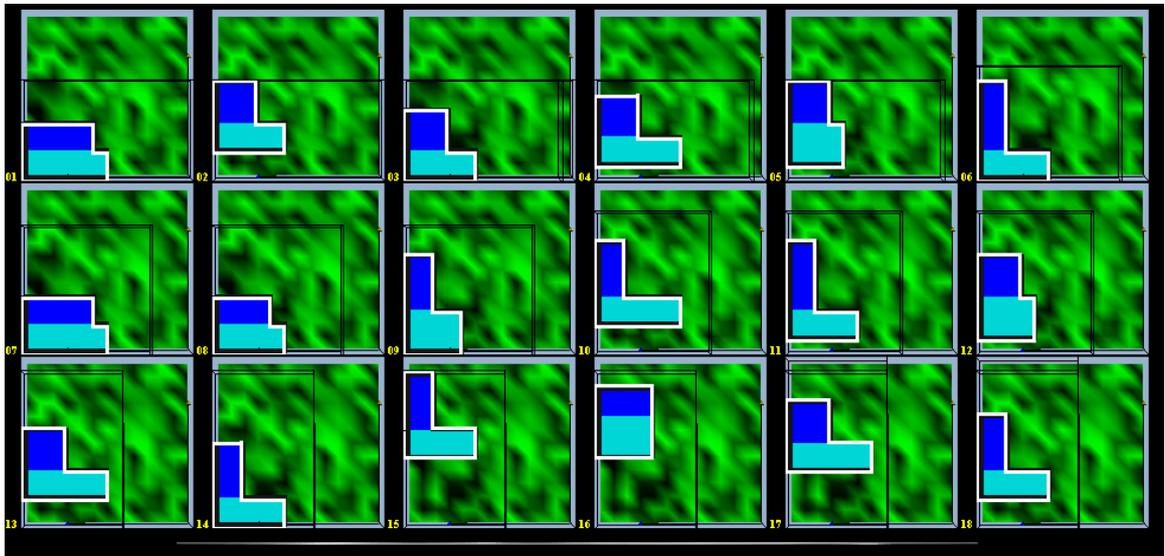


Figure 35 – Contrainte chevauche sur deux espaces à l'ouest sans séparateur

On peut aussi choisir de rassembler deux espaces sans chevauchement, dans ce cas, le mur séparateur entre les deux espaces n'est pas visualisé, comme sur la figure 36.

```

%5 CHAMBRE 1 contenu dans ZONE NUIT - 3
%6 CHAMBRE 2 contenu dans ZONE NUIT - 3
>assemble(Y5, Y6),
  
```

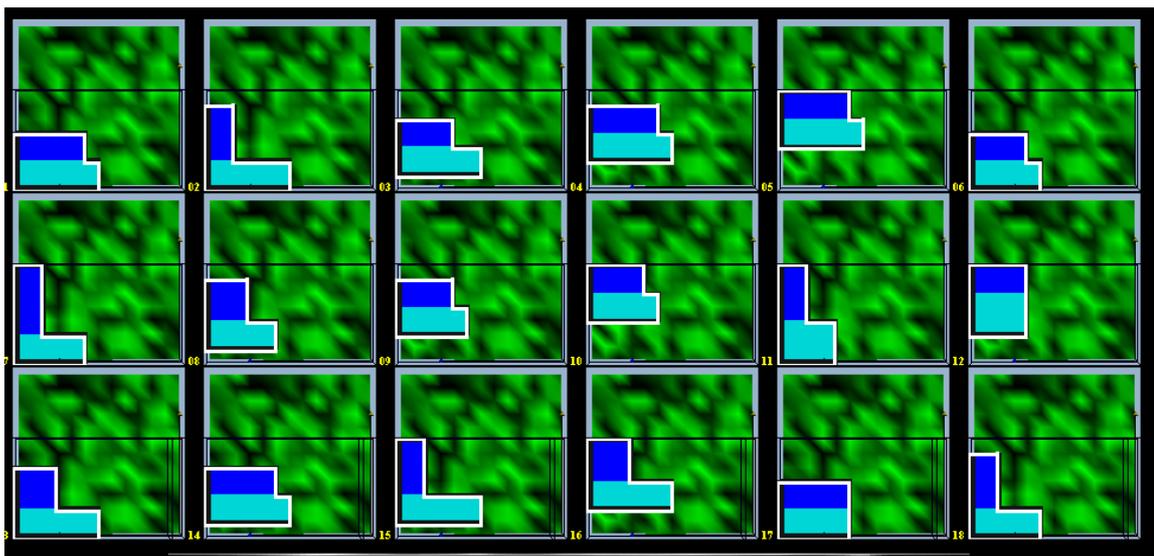


Figure 36 – Contrainte assemble sur deux espaces à l'ouest

Les contraintes de chevauchement et d'assemblage de deux espaces seront utiles pour définir des espaces en forme de L ou de T. L'exemple de la figure 37 comporte trois espaces assemblés, de même couleur, les deux plus grands étant contraints à être en façade ouest.

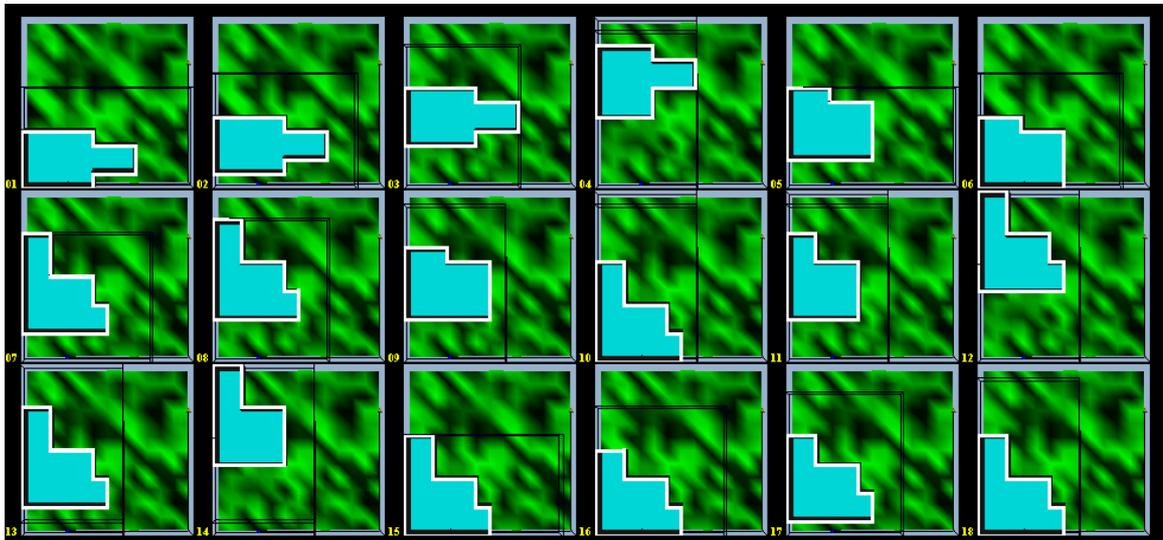


Figure 37 – Contrainte assemble sur trois espaces

2 – 4 – 7 Règles d'axialité

Certains espaces doivent être orientés, tout en gardant sa forme de boîte parallélépipédique. C'est le cas d'un garage pour une voiture pour lequel la plus grande des dimensions est perpendiculaire à l'entrée du véhicule. Il s'agira de la contrainte dans l'axe Nord ou dans l'axe Est qui donne le sens de la plus grande dimension.

Voici par exemple trois espaces qui communiquent, les deux chambres sont orientées est/ouest et la salle de bains, en vert, est orientée Nord/Sud :

```
%5 CHAMBRE 1 contenu dans ZONE NUIT - 3
>dans_axe_EO(La5, Lo5),

%6 CHAMBRE 2 contenu dans ZONE NUIT - 3
>dans_axe_EO(La6, Lo6),

%7 BAINS contenu dans ZONE NUIT - 3
>dans_axe_NS(La7, Lo7),
```

Ces espaces sont visualisés sur la figure 38.

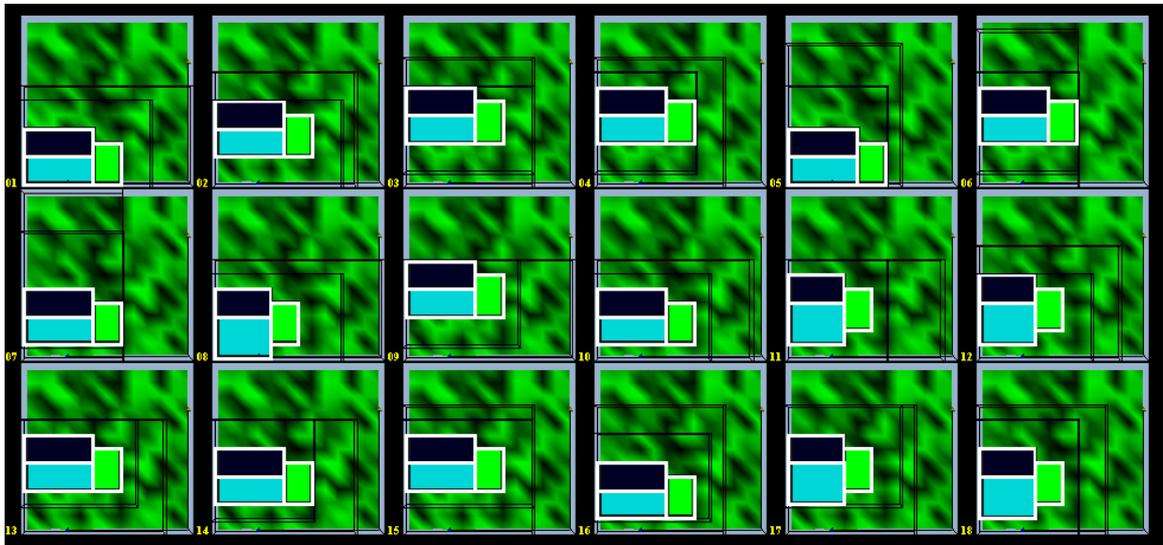


Figure 38 – Contrainte d'orientation axiale

2 – 4 – 8 Règles de positionnement relatif

Est contenu dans : les englobements des espaces les uns dans les autres correspondent à la traduction de l'arborescence structurant le projet. Chaque espace est donc contraint à ne pas dépasser les limites de son englobant immédiatement supérieur. C'est une contrainte obligatoire pour tout espace.

Un abri de jardin ou un garage, un espace "libre" qui n'aurait pas d'englobant immédiat est cependant contraint par les limites du terrain. Il est donc situé au niveau le plus haut de la structure arborescente, avec pour père la racine de l'arbre : le terrain. La figure 39 montre l'englobement de la chambre dans la zone nuit.

```

%3 ZONE NUIT contenu dans PAVILLON - 1
ZoneNuit gris_fonce 3 1 7.0 2.0 50 2.5 Mur

%5 CHAMBRE 1 contenu dans ZONE NUIT - 3
Chambre1 turquoise 5 3 3.0 1.5 11 2.5 Mur
  
```

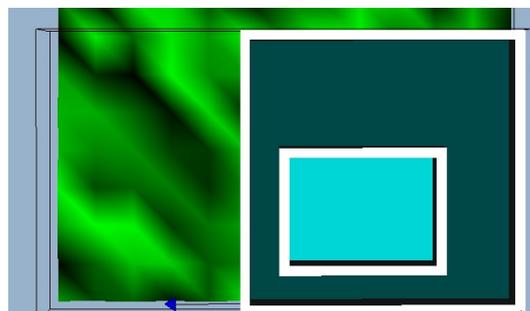


Figure 39 – Contrainte d'englobement

`Est_au_dessus_de`, `Est_au_dessous_de` : permettent de donner une altitude relative d'un espace par rapport à un autre. Etre au dessus de exprime le fait d'être à l'étage supérieur. La règle `empile_sur` oblige l'espace du haut à s'aligner parfaitement sur celui du bas, comme le montre la figure 40. Ce sera le cas pour les espaces englobants, les salles de bains ou les gaines pour aligner les descentes d'eaux. Les enveloppes des espaces matérialisés sont coupées à un mètre de hauteur, afin de pouvoir visualiser les espaces des niveaux inférieurs.

```

%5 CHAMBRE 1 contenu dans ZONE NUIT - 3
%6 CHAMBRE 2 contenu dans ZONE NUIT - 3
>empile_sur(X6, Y6, Z6, La6, Lo6, Ha6, X5, Y5, Z5, La5, Lo5, Ha5),
%7 BAINS contenu dans ZONE NUIT - 3
>communique(X7, Y7, Z7, La7, Lo7, X6, Y6, Z6, La6, Lo6, 1),

```

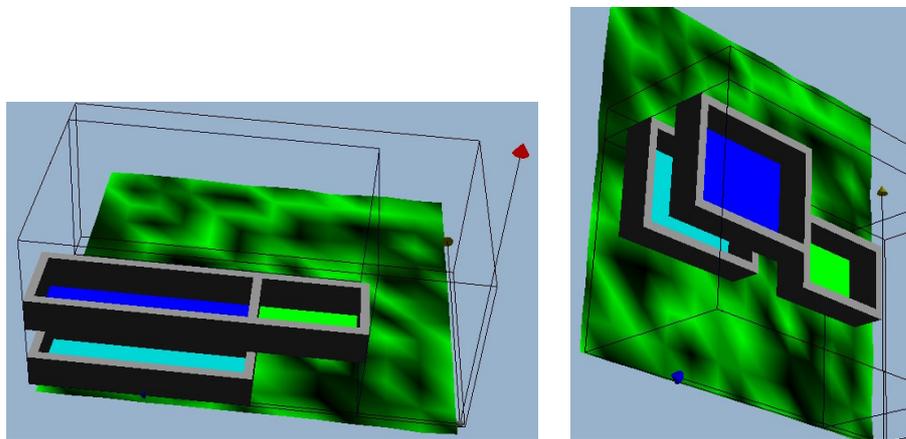


Figure 40 – Contrainte d'empilement

Dans les règles de positionnement relatif, on trouve également `a_coté_de` qui a été présentée dans les contraintes de proximité.

2 – 4 – 9 Règles d'altitude

`De plain pied` : tous les espaces ont la même altitude que le pavillon, c'est-à-dire que tous les espaces sont obligatoirement au rez-de-chaussée.

Le pavillon lui-même a une altitude calculée a priori par le concepteur en fonction de la topographie du terrain. Le calcul automatique de l'adaptation des altitudes des espaces au terrain n'est pas traité aujourd'hui. Ce calcul devrait prendre en compte des exceptions comme les caves ou vides sanitaires, par principe, placés sous les espaces habitables.

Si le pavillon se présente par demi niveaux, il suffit de décrire des espaces intermédiaires avec des altitudes différentes à l'aide de la règle `altitude` qui permet de spécifier l'altitude d'un espace, indépendamment de l'étage du

bâtiment. La salle de bains de l'exemple de la figure 41 a une altitude imposée de 1 m.

```
%7 BAINS contenu dans ZONE NUIT - 3
>altitude(Y7, 1),
```

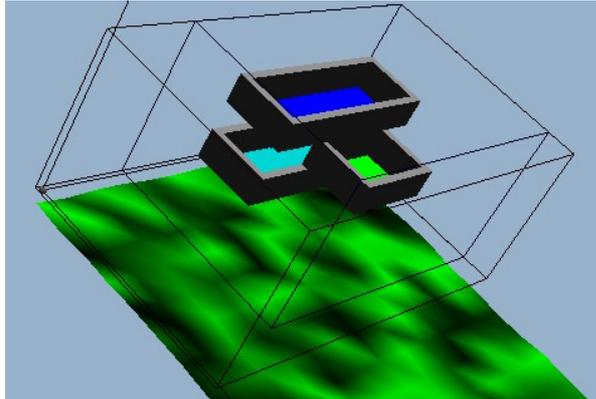


Figure 41 – Contrainte d'altitude

2 – 4 – 10 Règles d'alignement

Lorsqu'on manipule des espaces de grande envergure représentant des bâtiments, il faut des règles d'assemblage permettant de gérer les implantations à grande échelle, à la façon d'un urbaniste.

`aligné_Nord`, et ses variantes pour les 3 autres directions, permettent d'aligner les façades de plusieurs bâtiments à la même coordonnée. L'alignement est une contrainte très utilisée en ville.

L'exemple de la figure 42 présente 5 espaces alignés 3 par 3 avec pour pivot l'espace bleu pâle. L'alignement en diagonale n'a pas été implémenté, mais pourrait l'être à la demande.

```
%5 CHAMBRE 1 contenu dans ZONE NUIT - 3
Chambre1 turquoise 5 3 1 1 1 2.5 Mur

%6 CHAMBRE 2 contenu dans ZONE NUIT - 3
Chambre2 bleu_pale 6 3 1 1 1 2.5 Mur
>aligne_nord(Z6, Z5),

%7 CHAMBRE 3 contenu dans ZONE NUIT - 3
Chambre2 vert_clair 7 3 1 1 1 2.5 Mur
>aligne_nord(Z7, Z5),

%8 CHAMBRE 4 contenu dans ZONE NUIT - 3
Chambre2 rose_saumon 8 3 1 1 1 2.5 Mur
>aligne_est(X8,La8, X5, La5),

%9 CHAMBRE 5 contenu dans ZONE NUIT - 3
Chambre2 jaune 9 3 1 1 1 2.5 Mur
>aligne_est(X9, La9, X8, La8),
```

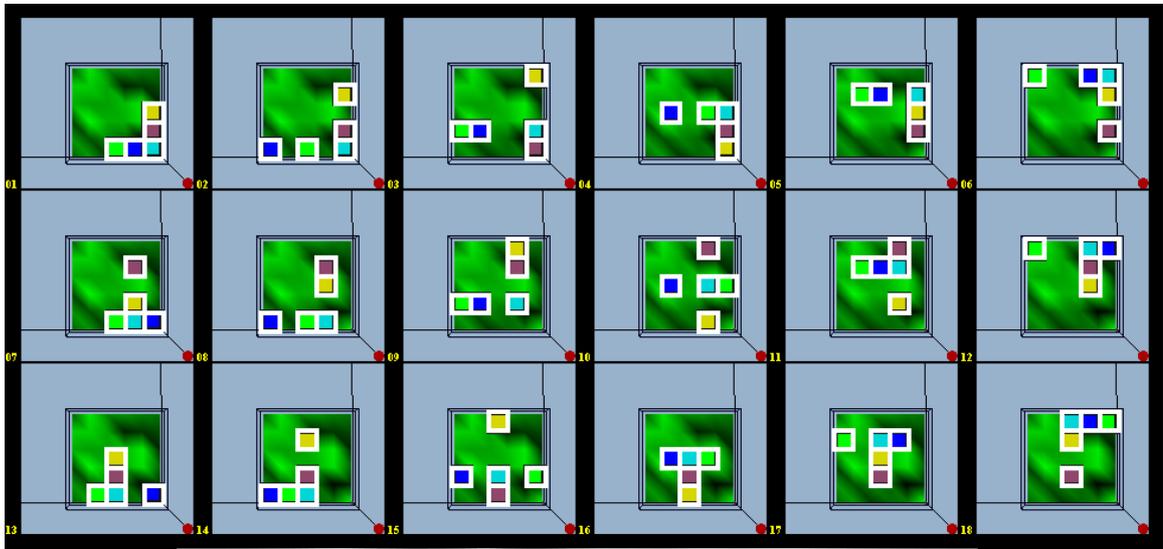


Figure 42 – Règles d'alignement

2 – 4 – 11 Règles de symétrie

Pour forcer un espace à être en symétrie avec un autre, nous avons décidé que les deux espaces doivent avoir les mêmes dimensions et être disposés à égale distance d'un axe, orienté Nord/Sud ou Est /Ouest.

Pour l'exemple de la figure 43, l'axe Nord/Sud et l'axe Est/Ouest, axes de symétrie passent au centre du terrain.

```
%5 CHAMBRE 1 contenu dans ZONE NUIT - 3
%6 CHAMBRE 2 contenu dans ZONE NUIT - 3
>symetrique_NS(X5, Z5, La5, Lo5, X6, Z6, La6, Lo6, 6),

%7 CHAMBRE 3 contenu dans ZONE NUIT - 3
>symetrique_EO(X5, Z5, La5, Lo5, X7, Z7, La7, Lo7, 6),
```

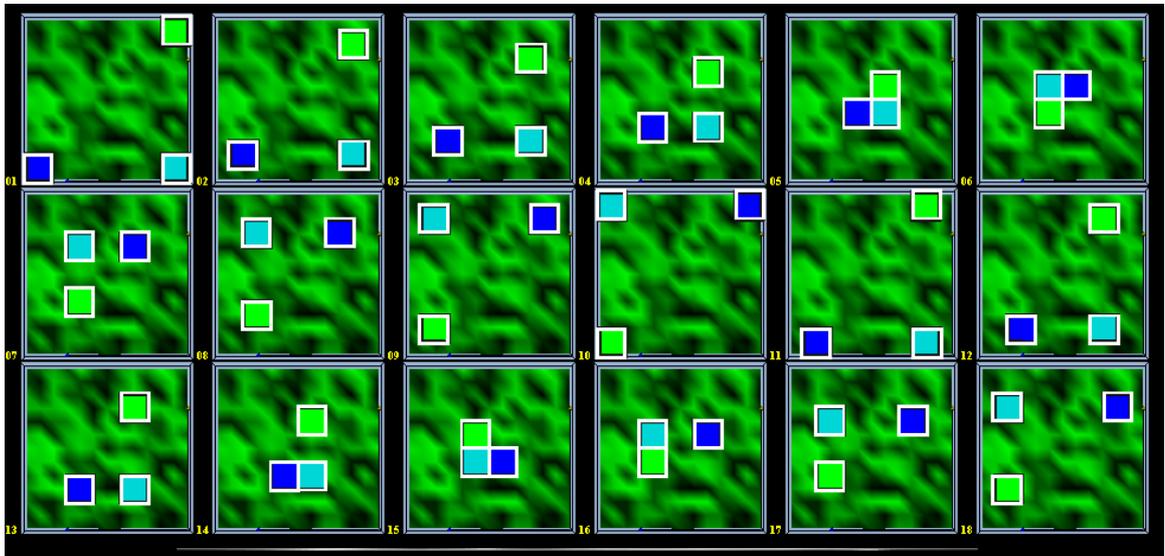


Figure 43 – Règles de symétrie

Dans les règles de symétrie nous avons également rangé la règle : `au_centre` qui positionne un espace au centre d'un autre espace. Pour l'exemple de la figure 44, la chambre bleue est au milieu du pavillon, lui-même au centre du terrain. Un espace occupe le centre de la chambre bleue, symbolisant un objet.

```

% 1 PAVILLON contenu dans TERRAIN - 0
>au_centre(X1, Z1, La1, Lo1, X0, Z0, La0, Lo0),

%5 CHAMBRE 1 contenu dans PAVILLON - 1
>au_centre(X5, Z5, La5, Lo5, X1, Z1, La1, Lo1),

%6 OBJET contenu dans CHAMBRE 1 - 5
>au_centre(X6, Z6, La6, Lo6, X5, Z5, La5, Lo5),

```

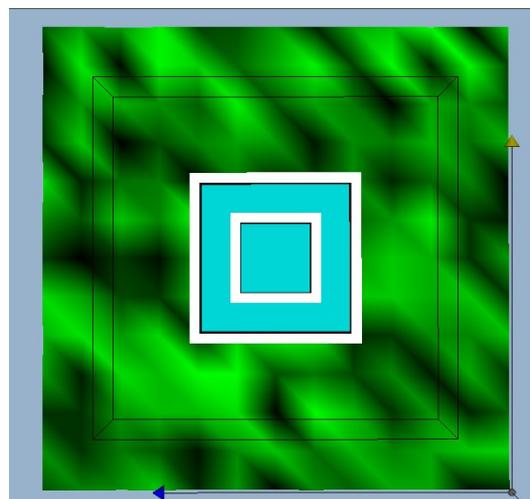


Figure 44 – Règle de centrage

2 - 4 - 12 Règles de dimensionnement relatif

Il est quelquefois utile de décrire un espace en fonction d'un autre : en figure 45, l'espace vert est plus grand que le bleu roi, lui-même plus grand que le bleu pâle, avec des propriétés géométriques (surface et largeur minimum) de base identiques.

```
%5 CHAMBRE 1 contenu dans ZONE NUIT - 3
Chambre1 turquoise 5 3 3 3 9 2.5 Mur

%6 CHAMBRE 2 contenu dans ZONE NUIT - 3
Chambre2 bleu_pale 6 3 3 3 9 2.5 Mur
>plus_grand(La6, Lo6, La5, Lo5),

%7 CHAMBRE 3 contenu dans ZONE NUIT - 3
Chambre2 vert_clair 7 3 3 3 9 2.5 Mur
>plus_grand(La7, Lo7, La6, Lo6),
```

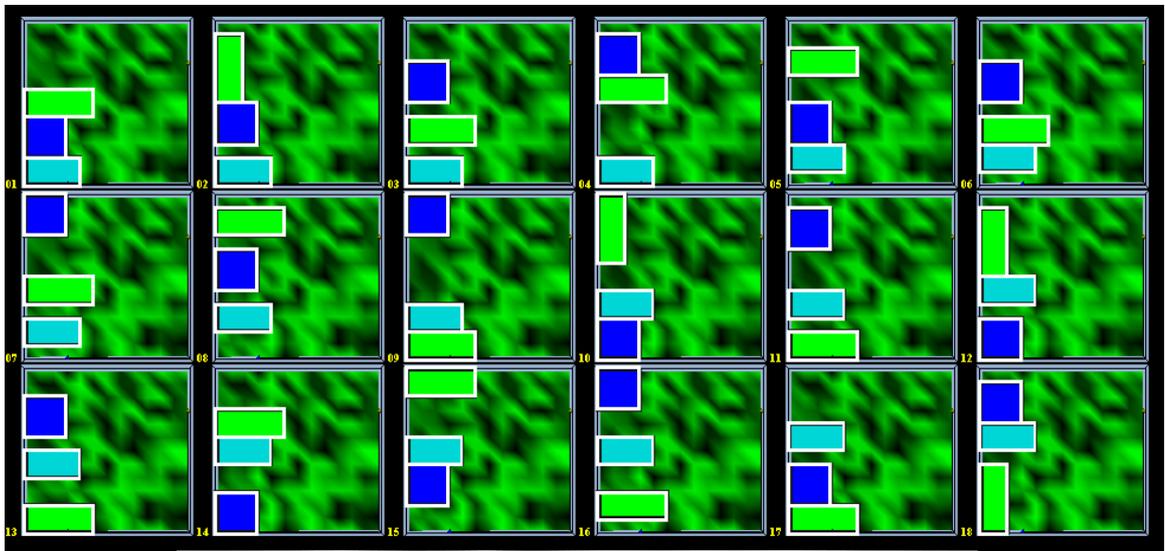


Figure 45 – Règle de dimensionnement relatif : plus grand

Nous avons implémenté les règles suivantes :

plus_grand : l'espace 1 a une surface plus grande que l'espace 2
plus_petit : l'espace 1 a une surface plus petite que l'espace 2
plus_large : l'espace 1 est plus large que l'espace 2
plus_long : l'espace 1 est plus long que l'espace 2
plus_haut : l'espace 1 est plus haut que l'espace 2
meme_largeur : les largeurs de l'espace 1 et de l'espace 2 sont identiques
meme_longueur : les longueurs des deux espaces sont identiques
meme_hauteur : les hauteurs de l'espace 1 et de l'espace 2 sont identiques
meme_surface : les surfaces de l'espace 1 et de l'espace 2 sont identiques
meme_dim : les dimensions de l'espace 1 et de l'espace 2 sont identiques
est_carre : la largeur et la longueur d'un espace sont identiques. Cette règle a été employée pour tester les alignements.

```

%5 CHAMBRE 1 contenu dans ZONE NUIT - 3
Chambre1 rouge      5 3      2 3      7      2.5      Fil_de_fer

%6 CHAMBRE 2 contenu dans ZONE NUIT - 3
Chambre2 bleu_pale  6 3      2 3      9      2.5      Fil_de_fer
>plus_haut(Ha6, Ha5),

%7 CHAMBRE 3 contenu dans ZONE NUIT - 3
Chambre2 vert_clair 7 3      2 3      11     2.5      Fil_de_fer
>plus_haut(Ha7, Ha6),

```

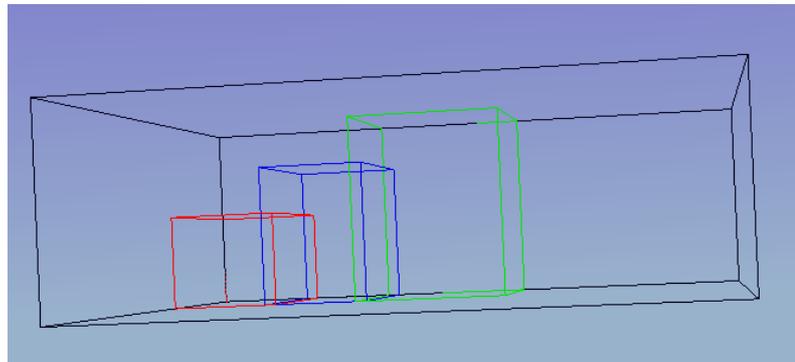


Figure 46 – Règle de dimensionnement relatif : plus haut

Pour cette règle, nous avons opté pour la visualisation de type fil de fer sur la figure 46. Les murs étant coupés à un mètre de hauteur, les variations dimensionnelles n'auraient pas été perceptibles.

Un seuil de tolérance fixé à 5% fait que les dimensions peuvent ne pas être tout à fait exactement identiques. A la phase de l'esquisse il importe plus de bien placer les volumes que de respecter à la lettre des engagements dimensionnels. Ce léger flottement au niveau des dimensions est ce qui permettra dans certains cas à des solutions inédites d'émerger : telle solution peut échapper au concepteur car il n'a pas le temps d'esquisser de multiples propositions ou il n'a l'intention d'explorer une piste particulière, estimant à tort qu'elle est stérile. A charge alors à l'architecte de retravailler cette solution en personnalisant certaines dimensions.

2 – 4 – 13 Définition d'un espace par coordonnées et dimensions absolues

Il existe des composantes dans le projet qui ont soit une position dans l'espace fixe (un arbre dans le jardin ou dans le futur patio), ou des dimensions fixes (mobilier particulièrement encombrant ou équipement de la maison telle une cheminée choisie à l'avance).

Les contraintes suivantes permettent de fixer des coordonnées absolues ou des dimensions stables pour un espace.

pour_x : forcer la coordonnée X d'un espace à une valeur
 pour_y : forcer la coordonnée Y d'un espace à une valeur
 pour_z : forcer la coordonnée Z d'un espace à une valeur
 pour_largeur : forcer la largeur d'un espace à une valeur
 pour_longueur : forcer la longueur d'un espace à une valeur
 pour_hauteur : forcer la hauteur d'un espace à une valeur
 surface_exacte : forcer la surface d'un espace à une valeur

L'exemple de la figure 47 suivant met en jeu des espaces dont certaines dimensions sont fixées :

```

%5 CHAMBRE 1 contenu dans ZONE NUIT - 3
Chambre1 turquoise 5 3 2 3 7 2.5 Mur
>pour_x(X5, 1),
>pour_y(Y5, 0),
>pour_z(Z5, 1),

%6 CHAMBRE 2 contenu dans ZONE NUIT - 3
Chambre2 bleu_pale 6 3 2 3 9 2.5 Mur
>pour_largeur(La6, 3),

%7 CHAMBRE 3 contenu dans ZONE NUIT - 3
Chambre2 vert_clair 7 3 2 3 11 2.5 Mur
>pour_longueur(Lo7, 4),
>pour_z(Z7,7),
  
```

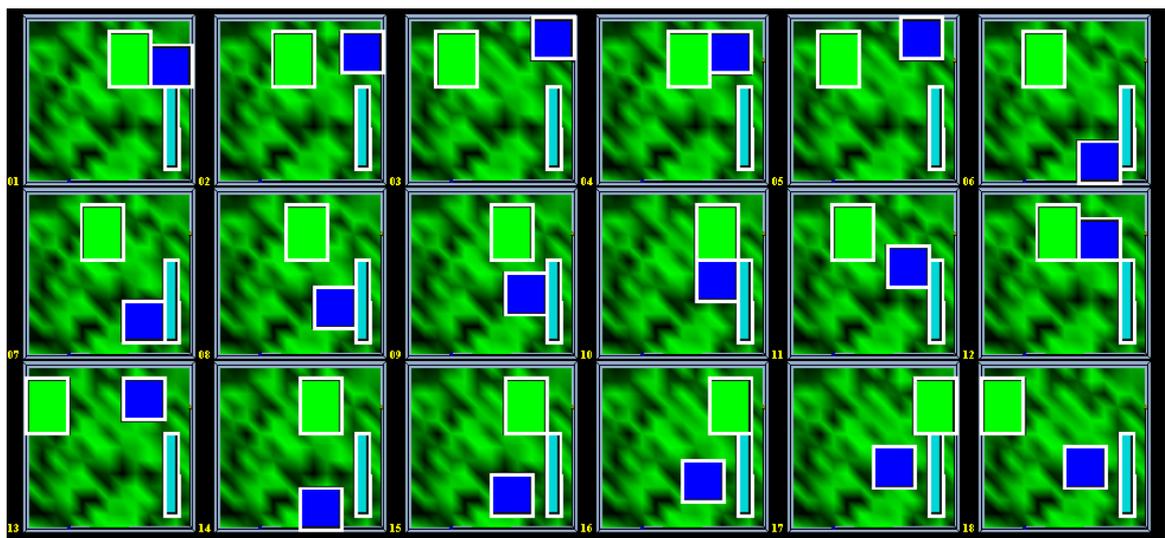


Figure 47 – Règles de dimensionnement et positionnement absolus

C'est avec ces dernières règles que nous avons créé les grilles qui servent de fond au logo du logiciel MOSAICA (MOdeleur Spatial d'Assistance Informatisée à la Conception Architecturale), présenté en figure 48.



Figure 48 – Logo MOSAICA

2 – 5 Exemple de description d'un pavillon

Expression des désirs du client, définis à l'issue d'un ou plusieurs entretiens et d'une visite sur le terrain :

« Nous sommes une famille de 4 personnes et nous voulons un pavillon de plain pied sur notre terrain de 144 m² situé à l'adresse X. Nous voulons un grand séjour communiquant avec la cuisine, avec beaucoup de lumière naturelle. La cuisine a des dimensions normales. L'entrée dessert le séjour, la cuisine, et les WC. Le garage est indépendant. Les trois chambres sont, si possible, orientées Est, et de mêmes dimensions. Elles sont proches de la salle de bains. »

La description succincte précédente donne lieu à la création d'un nouveau projet dans le système d'information. Le projet type, renseigné par l'architecte, indique « pavillon F4 » de plain pied. Un arbre hiérarchique topologique présenté en figure 49 et les informations relatives aux espaces standard sont proposés, servant de canevas de base à la description de ce nouveau projet.

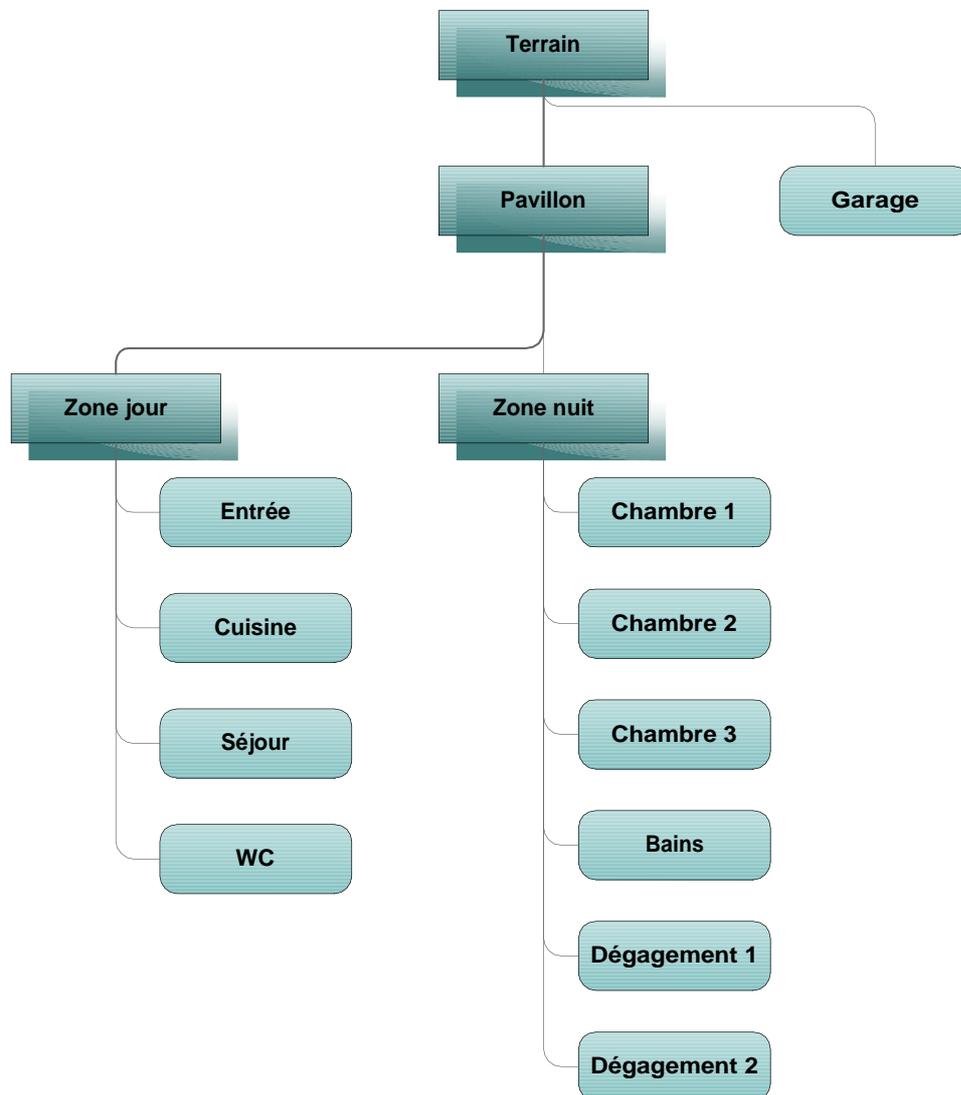


Figure 49 - Arbre hiérarchique topologique du projet

Après personnalisation du projet en fonction du contexte actuel, voici le graphe des relations entre espaces que l'on pourrait construire, présenté en figure 50.

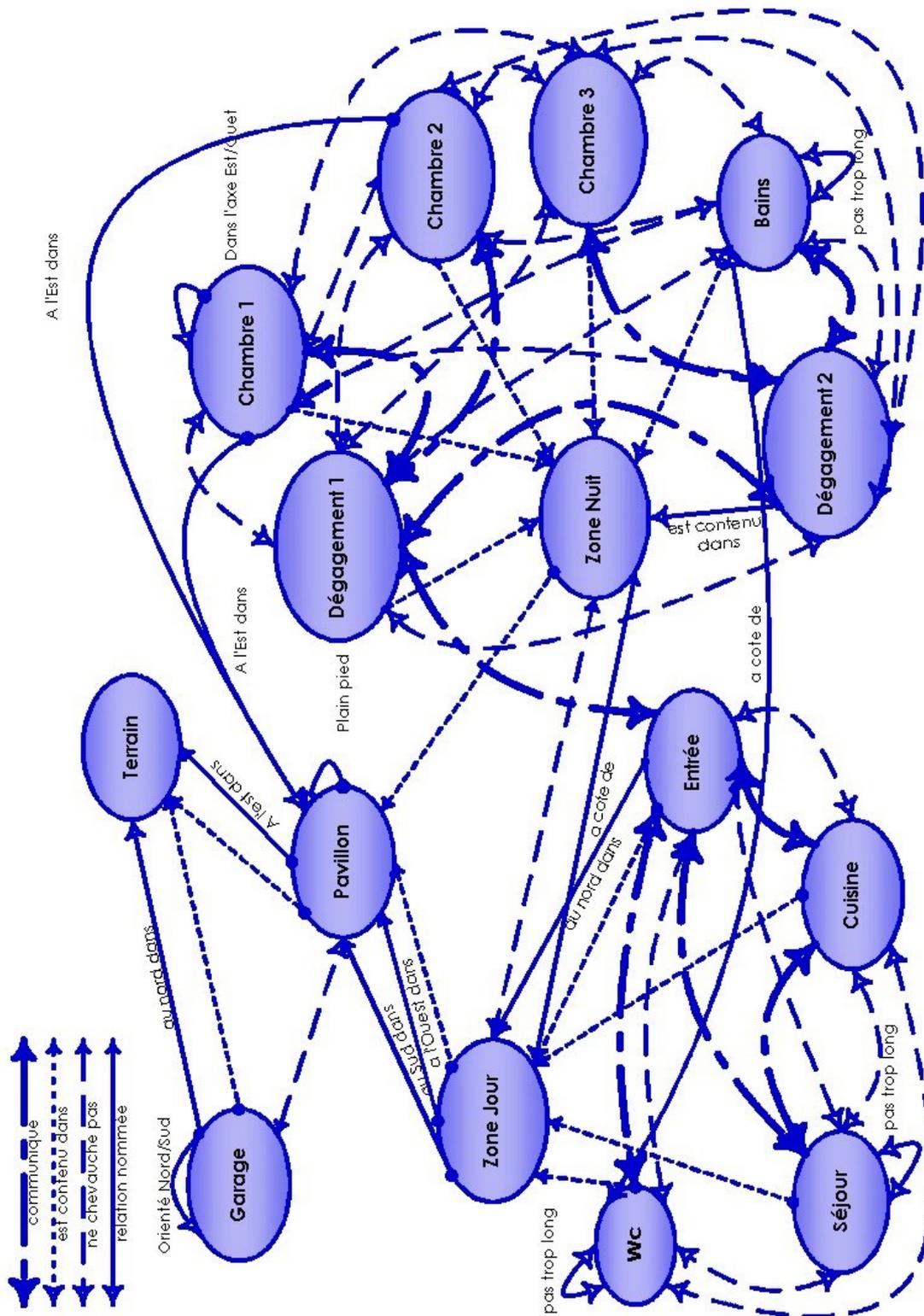


Figure 50 - Graphe des relations entre les espaces

Le fichier de description initiale, présenté en figure 51, qui nous a servi dans les exemples précédents, est directement construit à partir du système d'information. Sa présentation en mode texte est une présentation intermédiaire « légère » que nous avons choisie pour effectuer les tests et vérifier nos descriptions. À terme, le fichier texte disparaîtra au profit d'une liaison directe avec la base d'informations. Le terrain est numéroté 0 et son englobant est 0 par définition.

```

ECHELLE 1 nombre de subdivisions du mètre
  echelle = 2 : pas d'énumération de 50 cm
  echelle = 5 : pas d'énumération de 20 cm
PENITE 1.0 N

% 0 TERRAIN Couleur  Largeur  Longueur  Hauteur  Forme
Terrain blanc 12.0      12.0      2.5      Terrain

%ESPACES
%Nom Coul. Num Englob LargeurMin FacadeMin SurfaceMin HspMin Forme

% 1 PAVILLON contenu dans TERRAIN - 0
Pavillon rouge      1  0  7.0  3.0  90.0  2.5  Fil_de_fer
>a_lest_dans(X1, La1, X0, La0),
>de_plain_pied(Z1, Z0),

%2 ZONE JOUR contenu dans PAVILLON - 1
ZoneJour rouge      2  1  5.0  3.0  42.0  2.5  Fil_de_fer
>au_sud_dans(Z2, Lo2, Z1, Lo1),
>a_louest_dans(X2,X1),

%3 ZONE NUIT contenu dans PAVILLON - 1
ZoneNuit bleu_fonce 3  1  3.5  2.0  40.0  2.5  Fil_de_fer
>a_lest_dans(X3, La3, X1, La1),
>non_chevauche(X2,Y2,Z2,La2,Lo2,Ha2, X3, Y3, Z3, La3, Lo3, Ha3),
>a_cote_de(X3, Y3, Z3, La3, Lo3, X2, Y2, Z2, La2, Lo2),

% 4 GARAGE contenu dans TERRAIN - 0
Garage gris_fonce  4  0  3.0  3.0  11.0  2.5  Mur
>au_nord_dans(Z4, Z0),
>dans_axe_NS(La4, Lo4),
>non_chevauche(X4,Y4,Z4,La4,Lo4,Ha4, X1, Y1, Z1, La1, Lo1, Ha1),
>a_cote_de(X4, Y4, Z4, La4, Lo4, X2, Y2, Z2, La2, Lo2),

%5 CHAMBRE 1 contenu dans ZONE NUIT - 3
Chambre1 turquoise  5  3  3.0  1.5  11.0  2.5  Mur
>dans_axe_EO(La5, Lo5),
>a_lest_dans(X5, La5, X1, La1),

%6 CHAMBRE 2 contenu dans ZONE NUIT - 3
Chambre2 bleu_pale  6  3  3.0  1.5  9.0  2.5  Mur
>a_lest_dans(X6, La6, X1, La1),
>non_chevauche(X5,Y5,Z5,La5,Lo5,Ha5, X6, Y6, Z6, La6, Lo6, Ha6),

%7 BAINS contenu dans ZONE NUIT - 3
Bains vert_clair    7  3  1.5  0.0  5.0  2.5  Mur
>pas_trop_long(La7, Lo7),
>non_chevauche(X7,Y7,Z7,La7,Lo7,Ha7, X5, Y5, Z5, La5, Lo5, Ha5),
>non_chevauche(X7,Y7,Z7,La7,Lo7,Ha7, X6, Y6, Z6, La6, Lo6, Ha6),

```

```

%8 ENTREE contenu dans ZONE JOUR - 2
Entree rose_saumon      8  2  1.5  1.5  3.0  2.5 Mur
>au_nord_dans(Z8, Z2),
>communiquer(X8, Y8, Z8, La8, Lo8, X3, Y3, Z3, La3, Lo3, 1),

%9 CUISINE contenu dans ZONE JOUR - 2
Cuisine rose_tyrien    9  2  3.0  1.5  9.0  2.5 Mur
>non_chevauche(X9,Y9,Z9,La9,Lo9, Ha9, X8, Y8, Z8, La8, Lo8, Ha8),
>communiquer(X9, Y9, Z9, La9, Lo9, X8, Y8, Z8, La8, Lo8, 1),

%10 SEJOUR contenu dans ZONE JOUR - 2
Sejour rouge           10 2  4.5  1.5 25.0  2.5 Mur
>pas_trop_long(La10, Lo10),
>non_chevauche(X10,Y10,Z10,La10,Lo10,Ha10,X8,Y8,Z8,La8,Lo8,Ha8),
>non_chevauche(X10,Y10,Z10,La10,Lo10,Ha10,X9,Y9,Z9,La9, Lo9, Ha9),
>communiquer(X10, Y10, Z10, La10, Lo10, X8, Y8, Z8, La8, Lo8, 1),
>communiquer(X10, Y10, Z10, La10, Lo10, X9, Y9, Z9, La9, Lo9, 1),

%11 WC contenu dans ZONE JOUR - 2
WC jaune               11 2  1.0  1.0  2.0  2.5 Mur
>pas_trop_long(La11, Lo11),
>non_chevauche(X11,Y11,Z11,La11,Lo11,Ha11,X8,Y8,Z8,La8,Lo8,Ha8),
>non_chevauche(X11,Y11,Z11,La11,Lo11,Ha11,X9,Y9,Z9,La9,Lo9,Ha9),
>non_chevauche(X11,Y11,Z11,La11,Lo11,Ha11,X10,Y10,Z10,La10,Lo10,Ha10),
>communiquer(X11, Y11, Z11, La11, Lo11, X7, Y7, Z7, La7, Lo7, 1),
>communiquer(X11, Y11, Z11, La11, Lo11, X8, Y8, Z8, La8, Lo8, 1),

%12 Dégagement 1 contenu dans ZONE NUIT - 3
Degt1 blanc           12 3  1.0  1.0  1.5  2.5 Mur
>non_chevauche(X12,Y12,Z12,La12,Lo12,Ha12,X5,Y5,Z5,La5,Lo5,Ha5),
>non_chevauche(X12,Y12,Z12,La12,Lo12,Ha12,X6,Y6,Z6,La6,Lo6,Ha6),
>non_chevauche(X12,Y12,Z12,La12,Lo12,Ha12,X7,Y7,Z7,La7,Lo7,Ha7),
>communiquer(X12, Y12, Z12, La12, Lo12, X5, Y5, Z5, La5, Lo5, 1),
>communiquer(X12, Y12, Z12, La12, Lo12, X6, Y6, Z6, La6, Lo6, 1),
>communiquer(X12, Y12, Z12, La12, Lo12, X8, Y8, Z8, La8, Lo8, 1),

%13 Dégagement 2 contenu dans ZONE NUIT - 3
Degt2 blanc           13 3  1.0  1.0  1.5  2.5 Mur
>non_chevauche(X13,Y13,Z13,La13,Lo13,Ha13,X5,Y5,Z5,La5,Lo5,Ha5),
>non_chevauche(X13,Y13,Z13,La13,Lo13,Ha13,X6,Y6,Z6,La6,Lo6,Ha6),
>non_chevauche(X13,Y13,Z13,La13,Lo13,Ha13,X7,Y7,Z7,La7,Lo7,Ha7),
>non_chevauche(X13,Y13,Z13,La13,Lo13,Ha13,X12,Y12,Z12,La12,Lo12,Ha12),
>communiquer(X13, Y13, Z13, La13, Lo13, X7, Y7, Z7, La7, Lo7, 1),
>a_cote_de(X12, Y12, Z12, La12, Lo12, X13, Y13, Z13, La13, Lo13),
>assemble(Y12,Y13),

%15 CHAMBRE 3 contenu dans ZONE NUIT - 3
Chambre2 violet       15 3  3.0  1.5 10.0  2.5 Mur
>non_chevauche(X15,Y15,Z15,La15,Lo15,Ha15,X5,Y5,Z5,La5,Lo5,Ha5),
>non_chevauche(X15,Y15,Z15,La15,Lo15,Ha15,X6,Y6,Z6,La6,Lo6,Ha6),
>non_chevauche(X15,Y15,Z15,La15,Lo15,Ha15,X7,Y7,Z7,La7,Lo7,Ha7),
>non_chevauche(X15,Y15,Z15,La15,Lo15,Ha15,X12,Y12,Z12,La12,Lo12,Ha12),
>non_chevauche(X15,Y15,Z15,La15,Lo15,Ha15,X13,Y13,Z13,La13,Lo13,Ha13),
>communiquer(X13,Y13,Z13,La13,Lo13, X15, Y15, Z15, La15, Lo15, 1),

```

Figure 51 – Description des espaces d'un pavillon

2 – 6 Système d'information associé

La description d'un projet s'organise autour d'un ensemble d'informations hétérogènes et de diverses provenances. Nous avons essayé d'en respecter au mieux la richesse et la diversité, bien que le système d'information présenté ici ne corresponde qu'à un sous-ensemble de l'énorme masse de connaissances nécessaires à la conception.

Nous avons organisé les connaissances en deux parties :

- les connaissances génériques, issues de l'enseignement, de l'analyse de la pratique des grands architectes, de l'observation de l'habitat vernaculaire... Elle est complétée par la réglementation en cours dans les domaines énoncés plus haut.
- les informations propres à un projet. Lors de la description d'un projet par l'architecte, celui-ci ira choisir les informations standard dont il a besoin, avec leurs valeurs par défaut. Ce sont les éléments de base de notre système modulaire de construction. Il a la possibilité de les adapter par la suite, en conformité avec les désirs et les besoins de son client, la configuration du terrain, le contexte de la réalisation.

Le système d'information représentant la connaissance architecturale doit être facilement modifiable : pour le moment il n'est qu'au stade de noyau, où l'essentiel existe pour traiter des projets typiques. Il devra rapidement s'enrichir d'une connaissance validée par plusieurs experts, et pouvoir être mis à jour fréquemment.

Un outil d'aide à la conception se doit d'avoir une forte connotation personnelle : les peintres de la Renaissance préparaient eux-mêmes leurs couleurs avec leurs propres ingrédients, ce qui renforçait leur expression personnelle. En ce qui concerne le système d'information proposé, il peut et doit être surchargé par la traduction de la pratique personnelle de chaque architecte.

Enfin, la somme d'informations recueillies doit être partageable. L'insertion de la connaissance architecturale dans MultiCad est la garantie de son évolutivité, de son enrichissement par des chercheurs de pratiques diverses, de l'évolution de sa structure pour s'ouvrir à d'autres volets de la conception en général.

Dans les pages qui suivent, nous présentons la structure des tables de la base de données dédiée à notre système d'information que nous avons construite.

Les connaissances génériques sont regroupées sous le sigle NOMENCLATURE. Les cinq tables suivantes permettent de qualifier les espaces et les règles d'assemblage couramment utilisées pour un projet (sigle UN_PROJET). Enfin, les tables siglées OBJET apportent des éléments nécessaires à la visualisation.

2 – 6 – 1 Repérage des espaces

Le nombre d'espaces intervenant dans la conception est limité. Chaque espace correspond à un usage relativement stable dans nos pays européens : nous parlons de la cuisine, de la chambre... Pour un usage plus exotique, on choisira le nom du pays où il a vu le jour, comme le hammam, le sauna, ou encore le feuillardier limousin.

Une nomenclature collectera ces usages/fonctions d'espaces, et les qualifiera dans les trois langues privilégiées de MultiCad : anglais, français, grec. D'autres langues seront accueillies avec plaisir.

Les espaces habitables usuels sont des espaces terminaux. Ils s'insèrent de façon privilégiée dans un projet type, et il est très souvent possible de nommer leur espace englobant privilégié. Cette indication pourra être modifiée lors de la description du projet par le concepteur.

Description de la table NOMENCLATURE/ESPACES

Description du champ	Format du champ	Clé	Obligatoire	Nom du champ
Numéro d'espace	num	X	Oui	NE_ESP
Numéro d'espace englobant usuel	num			NE_ENG
Nom anglais usuel	alpha		Un champ sur les trois doit être rempli	NE_NAME
Nom français usuel	alpha			NE_NOM
Nom grec usuel	alpha			NE_GRN

2 – 6 – 2 Repérage des types de projet

Parallèlement à la définition de tous les espaces composant la plupart des projets, il faut repérer la plupart des types de projets usuels.

Description de la table NOMENCLATURE/TYPES de PROJETS

Description du champ	Format du champ	Clé	Obligatoire	Nom du champ
Numéro de type de projet	num	X	Oui	NT_TYP
Nom anglais usuel	alpha		Un champ sur les trois doit être rempli	NT_NAME
Nom français usuel	alpha			NT_NOM
Nom grec usuel	alpha			NT_GRN

A chaque type est associé un sous-ensemble d'espaces.

2 – 6 – 3 Propriétés des espaces

Une fois repérés les espaces qui seront les composants de base de notre jeu de construction virtuel, il faut fixer pour chacun ses caractéristiques habituellement en usage.

L'indication du type de projet permet de mieux cerner la description attendue : une cuisine pour un pavillon particulier aura des propriétés différentes d'une cuisine de salle polyvalente.

Description de la table NOMENCLATURE/PROPRIETE des ESPACES

Description du champ	Format du champ	Clé	Obligatoire	Nom du champ
Numéro d'espace	num	X	Oui	NP_ESP
Type de projet	num		Oui	NP_TYP
Surface minimale	num		Oui	NP_SUR
Largeur minimale	num		Oui	NP_LAR
Linéaire façade	num		Oui	NP_FAC
Hauteur sous plafond	num		Oui	NP_HSP

L'unité des valeurs stockées est le centimètre, un nombre entier. Pour les éditions et affichages, les valeurs sont présentées en mètre, unité plus lisible par les acteurs de la conception.

C'est la combinaison des numéros d'espace et de projet qui forme une clé unique lors de la recherche des caractéristiques standard d'un espace. S'il n'existe pas, c'est que cela n'a pas de sens : par exemple essayer de retrouver l'espace « chambre » dans un projet « atelier mécanique » conduira à l'échec.

2 – 6 – 4 Repérage des espaces par projet

Nous avons les espaces, nous avons les projets, encore faut-il indiquer combien d'espaces nous avons par projet. C'est une question qui se pose pour le nombre de chambres dans un pavillon, le nombre de classes pour une maternelle, le nombre de cabines de douche pour les vestiaires d'un équipement sportif.

Description de la table NOMENCLATURE/NOMBRE d'ESPACES par PROJETS

Description du champ	Format du champ	Clé	Obligatoire	Nom du champ
Numéro de type de projet	num	X	Oui	NN_TYP
Numéro de l'espace	num		Oui	NN_ESP
Nombre	num		Oui	NN_NBR

2 – 6 – 5 Repérage des règles d'assemblage utilisables

Les règles d'assemblage définies au chapitre 2-4 correspondent à toutes les règles d'assemblage possibles entre nos composants. Elles sont collectées dans une table, afin d'en offrir le choix au concepteur.

Description de la table NOMENCLATURE/REGLES UTILISABLES

Description du champ	Format du champ	Clé	Obligatoire	Nom du champ
Numéro de règle	num	X	Oui	NU_RGL
Type de projet	num		Oui	NU_TYP
Nombre d'espaces	num		1 par défaut	NU_NBR
Description anglais	alpha		Un champ sur les trois	NU_DESA
Description français	alpha			NU_DESF
Description grec	alpha			NU_DESG
Code associé	alpha		Oui	NU_COD

Le nombre d'espaces est à spécifier si la règle met en jeu deux espaces, comme c'est le cas pour "communique avec" ou "non chevauche".

Le « code associé » permettra de construire le modèle interne en vue de générer les solutions correspondant au projet. Actuellement le code est sous forme de prédicat Prolog à compiler. Par souci d'efficacité, on pourra plus tard indiquer ici l'adresse d'un module déjà compilé. Il n'est pas exclu que d'autres représentations des règles puissent cohabiter.

2 – 6 – 6 Repérage des règles d'assemblage par projet

Pour un type de projet, il faut repérer l'ensemble des règles habituellement en usage.

Description de la table NOMENCLATURE/REGLES par PROJETS

Description du champ	Format du champ	Clé	Obligatoire	Nom du champ
Numéro de type de projet	num	X	Oui	NR_TYP
Numéro de la règle	num		Oui	NR_RGL

Les six premières tables sont initialisées une fois pour toutes, et ne subissent que peu de modifications, sinon celles qui proviennent de l'évolution naturelle des informations de la profession. Elles peuvent être personnalisées par l'architecte pour s'adapter à sa façon de travailler.

Les tables suivantes correspondent à des instanciations de projet et grossiront à chaque nouvelle description de projet.

2 – 6 – 7 Informations relatives à un projet

Il s'agit ici de stocker les informations administratives nécessaires à une bonne gestion des projets. Dans un premier temps, nous nous sommes limités à des informations de base, négligeant la gestion du dossier lui-même (numéros de version, personne de l'agence qui suit l'affaire...) qui peut être prise en charge par un autre logiciel de gestion des clients

Description de la table UN PROJET

Description du champ	Format du champ	Clé	Obligatoire	Nom du champ
Numéro de projet	num	X	Oui	UP_PRO
Type de projet	num		Oui	UP_TYP
Renseignements clients	alpha		Oui	UP_CLI
Enveloppe financière	num		Oui	UP_FIN
Environnement	num		Oui	UP_ENV
Date de création	date		Oui	UP_DAT
Modèle interne	alpha			UP_COD

L'enveloppe financière est obligatoire : c'est un des critères important lors de la première évaluation de faisabilité.

Le champ « Environnement » est une clé vers la table Environnement décrite plus loin correspondant principalement à la description du terrain.

Enfin, le champ « modèle interne » n'existe qu'à partir du moment où une première génération est demandée. Le modèle interne est généré à partir du code des règles utilisées (voir table nomenclature des règles) et des descriptions d'espaces spécifiques au projet, grâce aux tables suivantes.

2 – 6 – 8 Les espaces d'un projet

Cette table reprend les informations de la table nomenclature correspondante, donnant les caractéristiques des espaces du projet. Il y a une ligne par espace d'un projet.

Description de la table UN PROJET/PROPRIETES ESPACES

Description du champ	Format du champ	Clé	Obligatoire	Nom du champ
Numéro de projet	num	X	Oui	PP_PRO
Numéro d'espace	num		Oui	PP_ESP
Numéro d'ordre espace	num		Oui	PP_ORD
Numéro espace englobant	num		Oui	PP_ENG
Surface minimale	num		Oui	PP_SUR
Largeur minimale	num		Oui	PP_LAR
Linéaire façade	num		Oui	PP_FAC
Hauteur sous plafond	num		Oui	PP_HSP

2 – 6 – 9 Les règles d'assemblage d'un projet

Les règles sont activées en fonction de la configuration du projet. Il y a une ligne par règle portant sur un ou deux espaces.

Description de la table UN PROJET/REGLES

Description du champ	Format du champ	Clé	Obligatoire	Nom du champ
Numéro de projet	num	X	Oui	PR_PRO
Numéro de règle	num		Oui	PR_RGL
Numéro espace 1	num		Oui	PR_NE1
Ordre espace 1	num		Oui	PR_OE1
Numéro espace 2	num			PR_NE2
Ordre espace 2	num			PR_OE2
Priorité (entre 0 et 255)	num			

La valeur 255 pour la priorité correspond à une règle obligatoire. Les règles dont la valeur se rapproche le plus de zéro seront désactivées en cas de blocage. Les non chevauchements ont pour priorité 255, les orientations environ 180, les règles sur forme (pas trop long, orienté Nord/Sud) descendent jusqu'à 100. La gestion des priorités n'est pas implémentée de façon automatique.

2 – 6 – 10 L'environnement d'un projet

A un projet correspond un contexte de réalisation. C'est la table qui évoluera certainement le plus dans sa structure et la forme des informations à y stocker. Pour le moment y sont rangées les informations permettant de démarrer sur un exemple d'aide à la conception de projet dans un environnement typique.

Description de la table UN PROJET/ENVIRONNEMENT

Description du champ	Format du champ	Clé	Obligatoire	Nom du champ
Numéro d'environnement	num	X	Oui	PE_ENV
Numéro de projet	num		Oui	PE_PRO
Surface terrain	num		Oui	PE_SUR
Orientation	num		Oui (angle)	PE_OR
Longueur	num		Oui	PE_LO
Largeur	num		Oui	PE_LA
Orientation de Longueur	car		N ou E	PE_ORL
Pente	num		En %	PE_PEN
Orientation pente	2 car		Oui	PE_ORP
Description	alpha			PE_DES

Le terrain représenté ici le sera sous forme rectangulaire, ce qui correspond de façon grossière à la réalité. Un modeleur de terrain à partir d'un document cadastral existe au laboratoire MSI qui permettrait de connaître exactement

l'altitude de chaque point du terrain. L'intégration dans notre travail n'est pas réalisée.

Nous avons pris l'hypothèse que généralement, lors des travaux le terrain est nivelé, pour le rendre constructible, et qu'on se ramène souvent à un terrain de pente uniforme dans une des 8 directions. Pour le moment nous nous contentons de cette modélisation un peu simpliste du terrain, notre but étant le placement correct des espaces, en fonction de l'altitude et de l'orientation. Les calculs restent approximatifs à ce stade, le terrain pouvant ensuite être adapté en fonction de l'implantation du bâtiment.

Il y a des cas où les calculs d'altitude doivent être plus fins, lors de la construction sur un terrain rocheux, ou une élévation sur un bâtiment existant c'est le projet qui doit s'adapter parfaitement à l'existant. Des règles permettent de prendre en compte les altitudes et des gabarits absolus.

Nous considérons également que le terrain est nu. S'il y a un arbre ou un puits, il faudra le décrire comme un espace, avec les contraintes permettant de définir des coordonnées absolues.

Enfin, en ce qui concerne la régularité de la forme, considérons que les solutions produites à la génération sont souples et adaptables et peuvent être modifiées sans trop de perte d'intégrité en fonction d'angles issus du contexte urbain. Dans des terrains plus grands, une fois le plan défini, on pourra encore faire pivoter légèrement le bâtiment pour offrir la meilleure orientation possible.

Le champ « description » est un champ informel. Il rappelle le type de zone urbaine où est situé le terrain s'il y a lieu, le COS et le POS associés, si c'est un site classé, la nature du sol ou toute information dont le concepteur doit avoir connaissance pour maîtriser le projet, ou que le futur re-lecteur du projet doit avoir en tête pour comprendre les choix de solutions qui auront été faits.

2 – 6 – 11 Les solutions d'un projet

A une description de projet correspondent plusieurs solutions, dont seules certaines sont significatives. Il a été choisi ici de conserver les spécifications de position et de dimensionnement des espaces d'une solution (ou de plusieurs solutions), au choix du concepteur. Pour visualiser une scène, on doit chercher tous les espaces associés à un numéro de projet et à un numéro de solution.

Outre le fait que c'est le format le plus économique en place, cette méthode de stockage a pour avantage de permettre des comparaisons entre les différents composants de chaque solution : on peut chercher tous les séjours solutions d'un projet et comparer leurs dimensions.

Il y a d'autres formats représentant une solution ou un ensemble de solutions qui peuvent être stockés de façon exceptionnelle ou complémentaire : ce sont les fichiers textes temporaires qui transitent de programmes en programmes et qui correspondent à divers états d'analyse du projet.

Description de la table UN PROJET/SOLUTION

Description du champ	Format du champ	Clé	Obligatoire	Nom du champ
Numéro de projet	num	X	Oui	PS_PRO
Numéro de solution	num		Oui	PS_SOL
Numéro d'espace	num		Oui	PS_ESP
Numéro d'ordre espace	num		Oui	PS_ORD
X	num		Oui	PS_X
Y	num		Oui	PS_Y
Z	num		Oui	PS_Z
Largeur	num		Oui	PS_LA
Longueur	num		Oui	PS_LO
Hauteur	num		Oui	PS_HA
Couleur	num		Oui	PS_COL
Aspect	num		Oui	PS ASP

2 – 6 – 12 Les objets standard d'un projet

Pour l'étape de visualisation, nous aurons besoin d'objets permettant de rendre les maquettes plus lisibles. Nous avons défini une série d'objets courants, fenêtres ou meubles, qui serviront à n'importe quel projet. Cette table pourra être complétée à loisir. Les programmes de visualisation peuvent se servir d'objets définis sous une forme autonome, c'est pourquoi, les objets peuvent être connus sous la forme d'un nom de fichier à appeler lors de la visualisation. Il est cependant demandé de renseigner l'encombrement et la couleur de l'objet si le fichier n'était pas disponible. Ces renseignements permettront au programme de calcul des points de vue d'éviter de traverser les objets au moment du cheminement entre deux espaces.

Description de la table OBJET_STANDARD

Description du champ	Format du champ	Clé	Obligatoire	Nom du champ
Nom standard	alpha	X	Oui	OS_NOM
Couleur	alpha		Oui	OS_COL
Largeur	num		Oui	OS_LA
Longueur	num		Oui	OS_LO
Hauteur	num		Oui	OS_HA
Allège	num		défaut : 0	OS_ALL
Nom de fichier de visualisation	alpha			OS_FIC
Commentaire	alpha			OS_COM

Dans cette table sont rangées les descriptions des portes, qu'elles soient d'entrée, de garage, de communication intérieure, quelques types de fenêtres de dimensions standard, les lits, les tables, les chaises, appareils sanitaires et autres lampadaires qui illustrent succinctement les espaces habitables.

L'allège correspond à la hauteur de pose par rapport au sol. Une fenêtre de cuisine pour un logement est posée plus haut qu'une fenêtre de chambre, si elle correspond à la position de l'évier.

Nous avons refusé dans un premier temps de recourir à un tel artifice d'habillage des volumes. Pour nous, la maquette de travail d'un architecte est celle qui permet de concentrer son énergie créatrice sur la bonne adéquation fonction/forme uniquement. La matière « brute » du volume nous convenait, porteuse de toutes les possibilités de percement d'ouvertures, de définition de rythmes en façades... Y installer des éléments prédéfinis risquait de limiter la créativité de l'architecte en l'influençant fortement par la pose arbitraire d'éléments standard.

Nous avons cependant tenté l'expérience d'«habiller» une scène. La communication vers les personnes extérieures à la conception du projet en a été grandement facilitée. Si la maquette est aussi un instrument de communication, il fallait donc rajouter l'habillage automatique des scènes par l'adjonction de fenêtres, portes et meubles courants, comme cela se fait sur les plans d'architectes destinés au client. Le problème ne sera pas de bien placer une table dans la cuisine mais de permettre au lecteur de mieux appréhender l'échelle de la représentation du projet.

L'architecte doit pouvoir quand même garder un œil neuf sur son projet, et travailler s'il le désire sur la maquette brute, dont il peut à loisir changer le code de couleur des espaces. Les tests en agence permettront d'affiner ces réflexions et de fournir des outils personnalisables aux architectes.

2 – 6 – 13 Les associations espaces/ objets

Les objets sont décrits indépendamment de leurs futurs emplacements. Il faut indiquer ensuite quels objets seront associés à quels espaces. Nous avons défini ici des listes de fenêtres et des listes de meubles à associer aux espaces. Par exemple pour un garage il y a une porte de garage d'un type particulier. Si la configuration du contour s'y prête, on ajoutera une porte ou une fenêtre haute. De même, à chaque chambre est associé un lit à deux places. Si la surface est réduite, on optera pour un lit une place.

Ces deux types d'informations, associations des fenêtres et des meubles aux espaces, ont la même structure et seront regroupés à terme dans une même table.

Description de la table OBJET /ASSOCIATION

Description du champ	Format du champ	Clé	Obligatoire	Nom du champ
Clé espace	alpha	X	Oui	OA_ESP
Type objet	alpha			OA_TYP
Clé objet 1	alpha			OA_OB1
Clé objet 2	alpha			OA_OB2
Clé objet 3	alpha			OA_OB3
Clé objet 4	alpha			OA_OB4

Le type d'objet permettra de savoir si l'on s'adresse à une porte, une fenêtre, à un objet au sol gênant les déplacements ou un objet suspendu, tel un luminaire ou un tableau.

L'hypothèse de départ est qu'un espace possède quatre murs, donc quatre possibilités maximum de recevoir une fenêtre. Lors de création du code de visualisation, on connaît les contours extérieurs du bâtiment, et l'on peut associer une fenêtre à chaque mur donnant sur l'extérieur si la largeur du pan de mur le permet. Pour les pans de mur restés vides, sont associés des objets meublant l'espace, en fonction de leur largeur et de leur nombre. Par défaut, on ne mettra qu'un lit dans une chambre, de préférence un lit à deux places. On complètera si l'espace le permet par une chaise. C'est ce qu'indique la ligne d'associations suivante, telle qu'elle existe dans les programmes de visualisation :

"Chambre", "LT2", "LT1", "CH1", "",

L'objet de la thèse n'est pas de meubler correctement les espaces habitables à la phase de visualisation, aussi nous sommes nous arrêtés à ce stade des hypothèses. Mais le problème mériterait que l'on s'y attarde plus sérieusement, en ajoutant aux outils de visualisation un éditeur d'associations des espaces et des meubles standard que l'architecte utilise couramment, et un éditeur destiné à parfaire les choix de placements pour le projet en cours.

Le schéma en annexe 14 présente une des dernières évolutions de notre système d'information. Il correspond à la structure des données qui a servi à faire les tests. L'annexe 15 montre un écran de saisie des caractéristiques du terrain d'un projet.

Le système d'information que nous avons bâti a montré toute son efficacité lors des tests, mais nous avons mesuré combien il restait limité à notre étude particulière, et quelle était l'ampleur de la tâche pour le faire évoluer vers un système complet d'aide à la conception. Nous avons accueilli avec un grand intérêt la proposition de Georges MIAOULIS d'intégrer notre travail dans MultiCAD, une plateforme de génération de modèles géométriques à partir de descriptions adaptées.

2 – 6 – 14 Intégration de la connaissance architecturale dans MultiCAD

Dans le cadre d'une collaboration active du laboratoire MSI avec le TEI d'Athènes, il a été décidé d'implémenter notre base de connaissance architecturale dans un système d'information beaucoup plus vaste : MultiCAD, développé par G. MIAOULIS et Dimitri PLEMENOS [MIA 00].

Les paragraphes qui suivent expliquent les avantages que l'on peut tirer d'une telle démarche. Dans un premier temps, nous présentons l'architecture de MultiCAD, puis nous expliquerons comment nous pouvons bénéficier des possibilités d'ouverture du système vers des informations qui participent aux démarches ultérieures à la conception de maquettes. Nous y trouverons un enrichissement au niveau de la typologie des maquettes par la mise en œuvre d'une base de concepts par I. RAVANI [RAV 01]. Nous y gagnerons en variété de la démarche : un autre moteur de production de maquettes est à l'étude par D. MAKRIS [MAK 03]. Enfin, des améliorations portant sur la personnalisation du processus créatif nous ont été proposées.

Un schéma de la base sous sa forme MultiCAD est disponible en annexe 16.

2 – 6 – 14 – 1 MultiCAD

MultiCAD est un système d'information qui supporte la génération de modèles géométriques à partir de la description d'un projet basée sur la modélisation déclarative par décomposition hiérarchique. Ce système est étendu pour gérer aussi des informations multimédia comme images, son et vidéo, attachées à chaque description de projet.

Le modèle conceptuel de son architecture est basé sur le modèle Relationnel Objet Étendu [MIA 02] : la description d'un projet est stocké dans une base de données sous la forme d'« objets » qui possèdent des « propriétés » et qui sont reliés les uns aux autres par des « relations ». Le même schéma de base de données est utilisé pour la description de la connaissance architecturale. MultiCAD utilise un cadre appelé « Declarative Knowledge framework for Architecture-oriented Building Modelling » (DKABM) pour intégrer des règles et des entités de la théorie de l'architecture et pouvoir représenter dans sa base des descriptions d'immeubles cohérentes du point de vue architectural. Dans ce cadre, sont définies certaines entités architecturales et certaines règles obligatoires ou non que ces entités doivent suivre, que chaque architecte peut déterminer selon lui. A la saisie d'une nouvelle description de projet, des mécanismes de cohérence corrigent la description pour qu'elle obéisse au cadre appliqué. De ce processus résulte la description « normalisée » du projet suivant le cadre de connaissances que l'architecte a défini dès le début. La description normalisée est stockée dans la base des Scènes et le cadre DKABM est stocké dans la base de connaissances de MultiCAD.

Ce système d'information a pour particularité d'être très ouvert : si l'on s'en tient à la normalisation des objets définie pour MultiCAD, il est très facile d'étendre le stockage et l'exploitation d'informations sur des domaines connexes au nôtre.

La première des extensions que nous envisagerons est l'intégration de la connaissance des composants nécessaires à la construction réelle des espaces projetés. Au stade d'étude de la maquette où nous travaillons, cette connaissance n'est pas fondamentale, bien qu'elle puisse parfois intervenir dans le dimensionnement des espaces associés à un système constructif. Cependant elle est nécessaire si nous voulons prendre en charge la totalité du processus de conception.

MultiCAD assume le stockage et le partage d'informations multimédia. Le document graphique reste le support d'un langage commun à tous les métiers du design associés à l'architecture et le vecteur incontournable d'une bonne communication. Les photographies sur l'environnement du projet sont indispensables pour le montage des dossiers de permis de construire et pour donner des indications sur l'ambiance, la végétation ou le voisinage relatifs au terrain. Des illustrations de projets types aident le concepteur à mieux choisir l'orientation qu'il veut donner à son projet. Des images de projets réalisés permettent de montrer à un client des solutions techniques ou esthétiques spécifiques. Des documents sonores étayent par exemple la proposition de matériaux isolants phoniques. Le processus de conception dans son ensemble est une collection de documents graphiques dont MultiCAD saura garder la trace.

En ce qui concerne notre démarche, l'enrichissement dont va bénéficier la description de notre projet en s'intégrant dans MultiCAD sera visible pour les traitements qui suivent la génération des solutions. Pour des raisons d'autonomie en phase de test, les résultats que nous présentons dans la partie trois de cette thèse ont été réalisés sur la base de fichiers textes, transférant l'information nécessaire de modules de traitement en modules de visualisation. L'intégration des espaces issus de solutions comme entités dans MultiCAD nous permettra de paramétrer beaucoup plus aisément et d'enrichir le système de filtrage de solutions que nous décrirons plus avant. Cette intégration des informations de pilotage de l'après génération est réalisable mais n'a pas encore été implémentée.

Enfin, l'ouverture de MultiCAD vers d'autres métiers du design tels que la décoration intérieure, le paysagisme ou la conception de meubles, entre autre, enrichira le système d'information non seulement de nouveaux types d'objets pouvant intervenir dans notre univers de production de maquettes, mais surtout nous obligera à confronter notre démarche créative avec d'autres expériences, issues de pratiques diversifiées, et occasionnera la définition éventuelle de nouvelles règles d'assemblage ou de nouveaux critères de personnalisation.

2 – 6 – 14 – 3 L'utilisation des projets types

Lors de la définition de notre système d'information, le typage des projets n'est pas apparu dans un premier temps comme une nécessité. Il est vrai que l'on peut définir de toutes pièces un projet, de l'arbre hiérarchique à la description des propriétés et des règles d'assemblage des espaces. Pour des raisons de commodité pour le concepteur, il a ensuite été décidé de lui proposer un choix de solutions prédéfinies à personnaliser suivant les désirs du client.

La notion de typage d'un projet nous a ensuite servi à qualifier les solutions issues du moteur, par leur proximité ou éloignement à une solution type. C'est un critère discutable, mais il fait partie de ceux que nous proposons pour classer les solutions. Nous présenterons par la suite la méthode de calcul de similitude d'une solution à un projet type.

Enfin, la classification en projets types rentrera pour une part dans la définition des concepts : objets de haut niveau d'abstraction manipulables par les intervenants des métiers du design. C'est l'objet de la thèse de I. RAVANI, étudiante au laboratoire MSI.

2 – 6 – 14 – 4 Diversification des processus de génération

Une autre thèse en cours a des préoccupations proches de la nôtre : celle de D. MAKRIS, également étudiant au laboratoire MSI et intervenant au TEI d'Athènes. Il a préféré s'appuyer sur un moteur à base d'algorithmes génétiques pour générer des maquettes architecturales, dont les contraintes portent plus sur la structure et la forme que sur l'organisation spatiale, comme les nôtres. Nos deux approches sont complémentaires et le partage d'un même système d'information permettra au concepteur d'utiliser les deux modes de résolution et de comparer les résultats.

2 – 6 – 14 – 5 Personnalisation du cadre de conception

La prise en charge de la personnalisation de la connaissance architecturale du concepteur dans notre système initial passe par la re-définition de la base de connaissances en fonction de la pratique personnelle de l'architecte. Dans MultiCAD, l'architecte a la possibilité de définir un cadre de référence qui lui est propre dans la base de connaissances. Il a également le loisir de créer ses projets types personnels. Tout cet environnement a été conçu pour accompagner la démarche de l'architecte plutôt que de lui imposer un cadre théorique universel.

Conclusion

La définition d'un système d'information adapté à notre vision de la conception architecturale, reprenant des informations de diverses sources, fut un processus long et évolutif. Dans les tous premiers temps, pour des raisons d'autonomie, il était implémenté sous forme de fichiers [FRI 98-b]. Puis il a été transféré sur une base Access. Il est important que cette information soit partageable avec d'autres concepteurs, qui peuvent avoir une démarche différente bien que proche de la nôtre ou qui travaillent sur les phases suivantes de la définition du projet. Dans tous les cas, le système d'information supporté par MultiCAD peut assimiler de nouvelles données et les mettre en relation avec l'existant. La manipulation de la connaissance par des concepts de haut niveau, incluant des représentations graphiques, permettra de faire de MultiCAD un outil adapté à tous les métiers du design.

Dans cette deuxième partie de thèse nous avons vu comment, à partir de l'observation de la pratique de l'architecte et de la description des désirs d'un client, nous avons déterminé les composants d'un projet et leurs règles d'assemblage. Nous allons maintenant passer à la phase de génération des solutions et aux différentes visualisations des scènes projetées.

3 – Techniques de production de maquettes

3 – Techniques de production de maquettes

Cette troisième partie explique comment vérifier la faisabilité d'un projet à partir de sa description, puis générer les solutions correspondantes et enfin analyser les scènes sous différents critères afin d'en retenir un nombre limité à communiquer au client et sur lesquelles retravailler à une échelle plus grande.

Le système d'information contient maintenant la description d'un projet. Cette description en intention est saine, les valeurs correspondant aux propriétés des composants ayant été vérifiées. Néanmoins elle peut contenir des souhaits paradoxaux. Une phase de diagnostic préliminaire a été introduite pour analyser la description sous l'angle de la faisabilité.

Dès que cette faisabilité est assurée, la première étape de la génération est la construction du code Prolog associé au projet. La partie entête du code contient la programmation des prédicats correspondant aux règles d'assemblage. La partie évolutive du code fixe les valeurs limites de chaque domaine d'énumération des variables et appelle les prédicats mentionnés dans la description sous forme de règles d'assemblage. Le code est soumis à GNU Prolog. Le programme génère un fichier de solutions.

Il peut y avoir énormément de solutions : plusieurs milliers pour un projet comme celui qui est présenté en fin de partie deux. Notre but est de fournir une série réduite de maquettes de travail à l'architecte. Une série de filtres est mis alors à sa disposition pour mettre en valeur les solutions répondant à un critère déterminé. Le nombre de solutions visualisées devrait avoisiner la dizaine, voire moins. Aujourd'hui, en phase de tests, nous proposons des visualisations avec dix-huit solutions. Notre volonté est d'affiner la phase d'analyse afin de parvenir à présenter un panel plus réduit de solutions pertinentes au concepteur.

Nous terminerons cette partie en donnant des exemples de génération de maquettes et montrerons l'utilisation de quelques filtres.

Pour des raisons historiques, nous utiliserons deux repères dans l'espace :

- pour les énoncés du diagnostic, le repère dans l'espace est le suivant : l'axe des x est celui des largeurs, l'axe des z est celui des hauteurs et l'axe des y celui des longueurs (ou profondeur de champ).
- pour la pré-énumération et la visualisation en mode plan et en mode maquette, l'axe des y représentera la hauteur et l'axe des z représentera l'axe des longueurs.

3 – 1 Diagnostic préliminaire

L'étape de diagnostic préliminaire n'est pas obligatoire pour un projet très proche d'un projet type. Elle est par contre nécessaire en cas de blocage : le document produit en fin de diagnostic permet d'identifier le ou les espaces qui posent problème ou qui sont anormalement contraints. Dans un premier temps, il s'agit de faire une première estimation grossière de la faisabilité générale du projet, à l'aide d'un système expert. Puis vient une étape de pré-énumération qui réalise le contrôle des domaines de validité des variables associées aux espaces. La pré-énumération est construite sur la méthode CSP (Constraint Satisfaction Problem), c'est pourquoi dans ce chapitre, nous parlerons de contraintes plutôt que de règles d'assemblage.

Le diagnostic préliminaire renseigne l'architecte sur les différences du projet en cours de réalisation par rapport à un projet type et sur des paradoxes qui peuvent s'avérer bloquants par la suite. Bien avant de donner une côte à un seul espace, cette première vérification de cohérence permet de partir sur une description saine du projet à réaliser.

Nous avons choisi le système expert Kaola[®], développé par un chercheur français, Alain KAESER [KAE 02], qui nous a gracieusement permis de développer nos essais avec son logiciel. Les informations sont issues d'une base de données de type ACCESS, différents calculs sont réalisés, puis les contrôles de cohérence sont pris en charge par la base de connaissance du système expert. La figure 52 détaille l'architecture fonctionnelle du système expert Kaola[®].

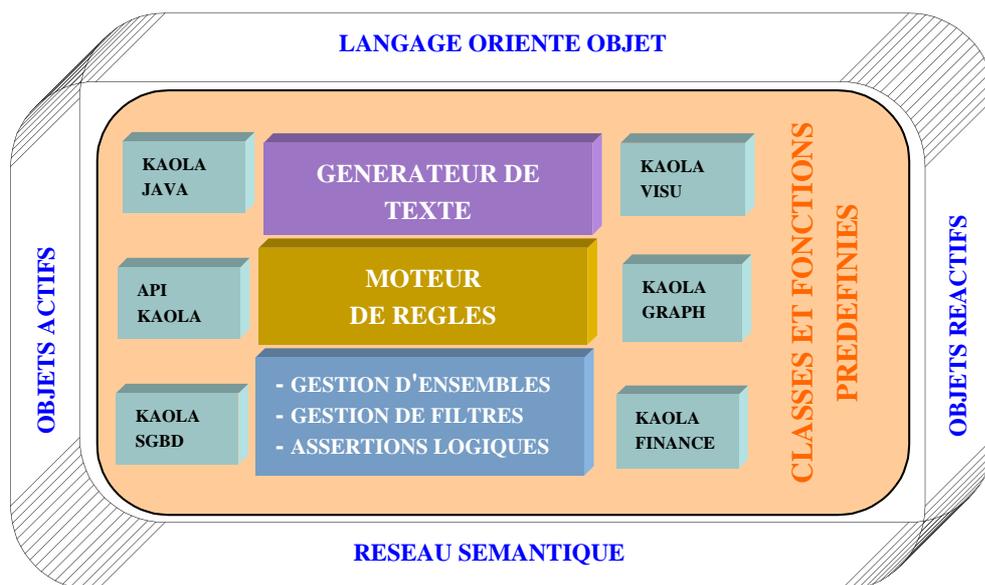


Figure 52 - Architecture fonctionnelle de Kaola[®]

Kaola[®] a l'avantage de pouvoir être codé en français (en anglais également) ce qui rajoute à sa lisibilité. Il s'organise autour d'un moteur d'inférences acceptant des règles d'ordre 0, 1 ou 2 et possède un langage orienté objet.

Différents modules permettent des échanges avec des bases de données ou les utilisateurs.

3 – 1 – 1 Faisabilité générale

Il s'agit de déterminer rapidement, si possible dans la foulée de l'entrevue avec le client, si le projet est viable ou pas, si l'ensemble d'informations est cohérent dans ses grandes lignes, ou encore si l'on n'a pas oublié des paramètres importants pour le projet.

Les premières vérifications de cohérence se font sur les éléments globaux du projet, qui sont la détermination des gabarits en fonction de la zone de construction et des règlements qui y sont associés. Ainsi, on peut diagnostiquer rapidement un dépassement de surface par rapport à ce qui est permis par le Plan d'Occupation de Sols (POS) de la commune.

De la même façon, une comparaison des prix au mètre carré dans le secteur et des possibilités financières du client donne un indice sur la faisabilité du projet.

L'aspect financier n'est pas pris en compte dans la suite de la conception. Ce sera certainement un aspect de la réflexion sur la pratique de l'architecte à développer plus finement. Entre deux solutions constructives, on prend souvent la moins coûteuse et elle n'est pas forcément quantifiable par des calculs sur la topologie du projet : « moins de matériaux, moins d'accidents de façade, donc moins cher » n'est pas toujours vrai. Cela dépend aussi du matériau choisi, de sa mise en œuvre, de l'outillage nécessaire, des données climatiques...

Actuellement, seules quelques vérifications de surface, de linéaire de façade et de similitude interviennent dans les calculs de validité du projet. Il s'agissait surtout dans un premier temps d'étudier l'intérêt un tel procédé. Un enrichissement de l'ensemble des règles et une ouverture à d'autres vérifications sont en projet.

3 – 1 – 1 – 1 Validité des surfaces

Il s'agit de faire le cumul des surfaces de chaque espace projeté pour vérifier si la surface espérée par le client est respectée, dans une fourchette donnée. Il faut tenir compte du fait que certains espaces se chevauchent ou sont facultatifs. Voici un exemple de code Kaola[®] associé à ce contrôle, la partie calcul initialise les variables globales utiles, la partie règles gère les contrôles.

La partie calcul est de facture algorithmique classique. ?X correspond à toute instance de la classe espace dont une description est donnée en annexe 17. surfaceTotale est une variable globale. Le code du cumul des surfaces est présenté en figure 53.

```
// CALCUL DE LA SURFACE PROJETEE

    POURTOUT(    ?X.esp_nom = ?nom
                ?X.esp_asp = "Mur"
                ?X.esp_type <> 1
            )
    FAIRE
        incr (surfaceTotale, ?X.esp_surfmin)
```

Figure 53 – Extrait du code KAOLA : calcul de surface

La partie règle accepte des règles d'ordre 0, 1 ou 2. Ici les sorties vers un document diagnostic sont gérées par le module Kaola TEXTE[®], débutant par "\". La règle présentée en figure 54 permet d'imprimer une ligne de remarque sur le document diagnostic fourni au concepteur à l'issue de la phase de vérification.

```
regle VERIFIE_SURFACE_B
SI
    surfaceTotale <= pTravail.pro_surf_desiree * SEUIL_BAS
ALORS
    \ (
        \STYLE(style_gras)
        La surface projetée ne correspond pas à la surface
        désirée.
        \FIN_STYLE
        \p
    \).insere()
;
```

Figure 54 – Extrait du code KAOLA : règle de contrôle de surface

3 - 1 - 1 - 2 Validité des orientations

Les espaces décrits sont chacun inscrits dans un espace englobant. Il est intéressant de comparer les orientations respectives des uns par rapport aux autres pour vérifier si elles sont compatibles. Sur la figure 55, le placement d'un espace Salon dans la Zone Jour paraît impossible. Ce cas de blocage peut être décelé en étudiant les orientations demandées sur un projet : une accumulation d'espaces sur la même façade doit être signalée.

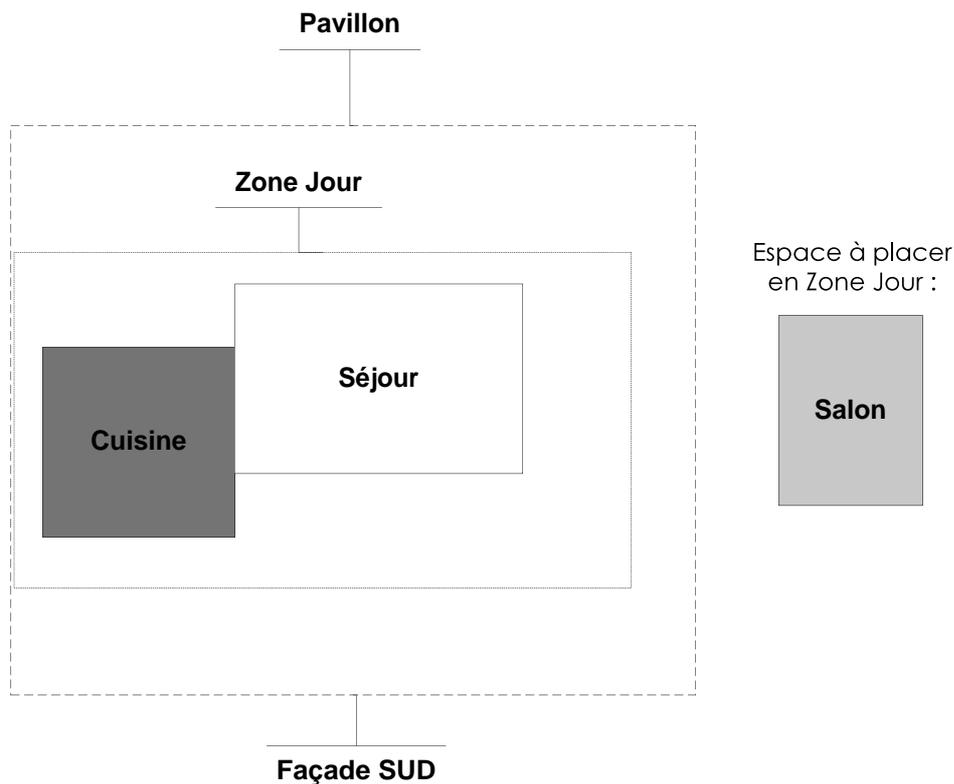


Figure 55 - Exemple de cas de blocage par cumul d'orientations

Sur la figure 55, les espaces terminaux sont tous orientés SUD (séjour, salon, cuisine) et appartiennent à l'espace jour dont la largeur n'est pas suffisante pour accueillir les trois largeurs cumulées des espaces en question. La règle associée est donnée en figure 56.

```
regle VERIFIE_CUMUL_OR_SUD
SI
  cumulSUD >= pTravail.pro_la * SEUIL_HAUT
ALORS
  \(\
    Les pièces orientées au SUD ont un linéaire de façade total
  de \V(cumulSUD, st_nbdec_1) m.
    Le linéaire possible est de \V(pTravail.pro_la, st_nbdec_1)
  m.
  \p
  \).insere()
;
```

Figure 56 - Exemple de règle contrôlant le linéaire SUD d'un projet

3 - 1 - 1 - 3

Validité des linéaires de façade

Cumuler les linéaires de façades, c'est à dire les largeurs de fenêtres demandées pour chaque pièce et les comparer avec la largeur de l'espace englobant, ne donne pas forcément une idée juste de la cohérence de la description. En effet, le découpage des façades du bâtiment peut permettre de pallier l'éventuel manque de linéaire de façade.

Description initiale

Séjour : 3.6 m de linéaire de façade soient deux grandes baies vitrées

Cuisine 1.5 m ou 1 m + 0.5 m

Salon : 3 m demandés soient 2 fois 1,5 m ou 3 fois 1 m

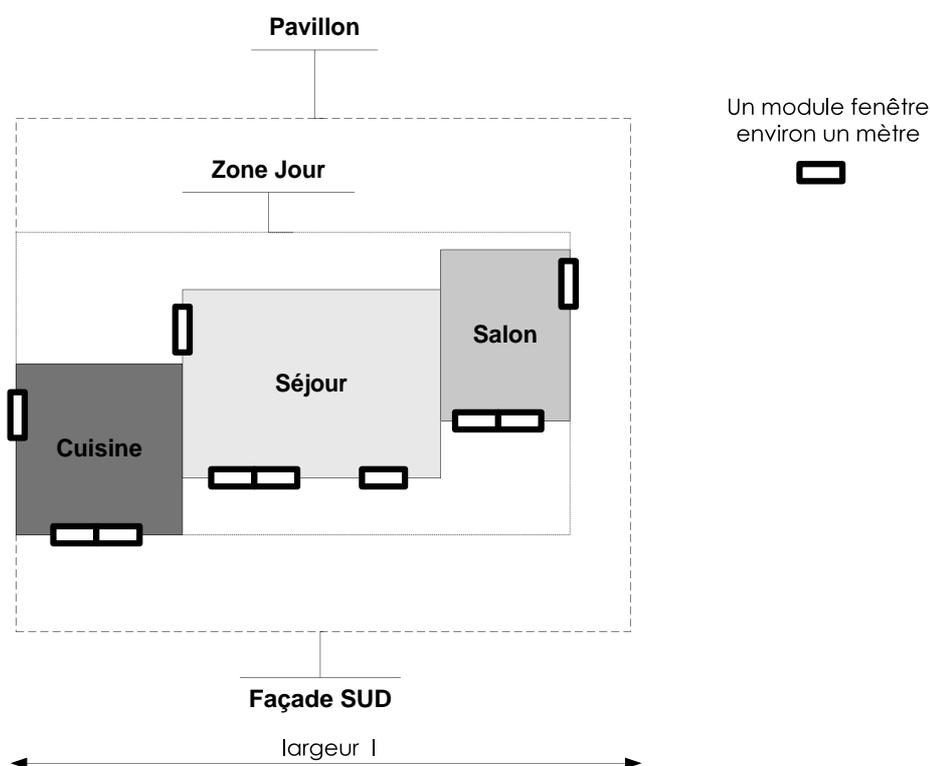


Figure 57 - Exemple de cas possible de blocage par cumul de linéaire de façade

Sur la figure 57, la largeur l n'était pas suffisante pour placer la somme des linéaires de façade demandés en maçonnerie traditionnelle, à cause de l'encombrement des encadrements de fenêtre. Si l'on fait la somme algébrique des linéaires de façade demandés, on arrive à un cas de blocage. En mur rideau, la somme algébrique des fenêtres correspond à peu près au linéaire de façade, et le linéaire de fenêtre en façade SUD est correct pour cet exemple.

Dans l'exemple, la configuration des espaces permet le report des fenêtres sur d'autres façades que la façade SUD. En conséquence, avant la génération des solutions la vérification du linéaire de façade reste grossière : il

faudra attendre la connaissance des contours extérieurs pour se prononcer sur la validité de ce critère.

Le mode de construction détermine le mode de cumul des linéaires de façade. Là encore le système de règles d'un système expert permet d'exprimer relativement simplement différents cas qui peuvent se présenter, et permet à l'architecte de mettre au point ses modes de calculs.

3 – 1 – 1 – 4 Mesure de distance à un projet type

La validité générale d'un projet peut également s'apprécier par comparaison avec un projet classique de même type. Ce rapprochement a pour but de mettre en évidence des oublis grossiers ou des choix délibérés : il y a une salle de bains de plus, la cuisine est plus petite mais elle est intégrée au séjour, il manque l'entrée...

Pour effectuer cette comparaison, nous avons sélectionné des points névralgiques, caractéristiques d'un projet type.

Un diagnostic comparatif rendra compte des différences relevées. Il appartiendra au concepteur de passer outre ou non aux remarques signalées. Rappelons qu'il n'y a pas de projet « juste » dans l'absolu, il y a un ensemble de bonnes réponses que nous voulons faire émerger de nos calculs.

La liste des points repérés comme névralgiques n'est pas exhaustive. Elle nous permet de mesurer un degré de similitude à partir de la comparaison :

- du nombre et de la nature des espaces des deux projets
- leur organisation hiérarchique
- la conformité de leurs dimensions, à un seuil de tolérance près

Nombre et nature des espaces

La première des comparaisons porte sur l'ensemble des espaces projetés par rapport aux espaces prévus dans le projet type classique. Tout espace oublié ou inattendu est signalé. Les espaces facultatifs associés au projet sont signalés et intégrés à la description si l'option de non appartenance n'a pas été cochée à la saisie. Les espaces englobants se comportent de la même façon que les espaces terminaux, représentant des pièces habitables.

Un espace inattendu est un espace existant dans la nomenclature mais habituellement répertorié pour un autre type de projet. Il faut que le concepteur valide le fait que cet espace appartient bien au projet en cours, et que ses dimensions standard sont compatibles avec ce projet. Il peut également les modifier, mais il faut alors se poser la question de la pertinence de la description d'un espace qui ne serait pas utilisé dans son projet-type naturel, et dont on ne garderait pas les dimensions standard.

Un espace inattendu et inconnu sera doublement signalé. Il faudra demander s'il est opportun de l'enregistrer dans la base de connaissances, et dans ce cas, voir pour quels types de projet et avec quelles dimensions il est classiquement utilisé. A cet effet, nous proposons que les enrichissements ou les modifications de nomenclature soient systématiquement signalés aux concepteurs du système d'informations afin d'avoir l'outil le plus complet et le plus adapté possible.

La hiérarchie des espaces

A ce stade, l'arbre hiérarchique n'est pas construit. Il est seulement indiqué par le jeu des appartenances à un espace englobant définies dans la base. Il est cependant possible de signaler l'éventuel glissement d'un espace d'un englobant vers un autre. L'arbre hiérarchique du projet est construit à l'étape suivante : la pré-énumération. La règle codée en figure 58 effectue le rapprochement entre les espaces d'un projet (?E) et les espaces correspondants décrits pour un projet type (?T).

```
regle REPERE_HIERARCHIE
SI
  ?E.esp_nom = ?nom
  ?E.esp_type = 0
  ?T.esp_type = 1
  ?T.esp_nom = ?E.esp_nom
  ?T.esp_englob <> ?E.esp_englob
ALORS
  \(\
    \lb
    \STYLE(style_gras)
      Différence de hiérarchisation des espaces
    \FIN_STYLE
    : \V(?E.esp_nom) est compris dans \V(?E.esp_englob.esp_nom)
    dans le projet type il est intégré dans
    \V(?T.esp_englob.esp_nom)
  \).insere()

  hierdiff <= hierdiff + 1
;
```

Figure 58 - Règle de repérage des différences hiérarchiques entre deux projets

La conformité des espaces (partie non implémentée)

Pour chacun des espaces répertoriés, nous étudierons la vérification de la conformité des espaces en comparant les mesures de surface, largeur, linéaire de façade et hauteur sous plafond minimales, dans la fourchette d'un seuil d'acceptabilité.

Des contraintes d'orientation, de proximité ou autres sont classiquement attachées aux espaces d'un projet type. Il s'agit d'en faire les listes par espace et de les comparer, coté projet typique et coté projet en cours. Là encore on signalera toute différence, plus pour attirer l'attention du concepteur que pour corriger sa description de façon directive.

Dans la liste des différences, on prendra en compte, dans une moindre mesure, des divergences de valeurs pour les priorités associées aux contraintes. De même les valeurs associées aux contraintes (chevauchement de n, a pour longueur l) sont spécifiques qu projet en cours et leur écart par rapport au projet typique est signalé. Par contre, ne seront pas prises en compte dans les comparaisons les contraintes d'orientations, qui sont caractéristiques d'un projet et ne peuvent s'appliquer de manière générale.

Degré de similitude au projet type

Les points de convergence et de divergence sont pondérés de façon à donner une note de similitude au projet en cours, par rapport au projet typique. Cette note renseigne le concepteur sur l'originalité de sa description.

La formule donnée en figure 59 exprime le calcul de la note de similitude (PT Projet type, PR projet en cours) :

<i>Note de similitude =</i>	
<i>valeur absolue (nombre d'espaces PT – nombre d'espaces PR)</i>	<i>x 10</i>
<i>+ nombre de différences entre les deux arbres hiérarchiques</i>	<i>x 10</i>
<i>+ \sum pour chaque espace commun aux deux projets <i>abs(surface esp. PT – surface esp. PR)</i></i>	
<i>+ nombre de contraintes différentes entre les deux projets</i>	<i>x 2</i>

Figure 59 - Formule de calcul de similitude entre deux projets

Ce calcul convient bien aux exemples étudiés. Il demande à être affiné sur un grand nombre de solutions. Plus la note est élevée, plus il y a de différences entre le projet en cours et le projet type qui a été choisi pour débiter la description. La figure 60 montre un extrait de diagnostic.

Chambre 3 : **différence importante de surfaces** : 3 m².

Différence de hiérarchisation des espaces : Garage est compris dans Zone jour dans le projet type il est intégré dans Terrain

Note de similitude : 34

Figure 60 – Exemple de diagnostic illustrant la note de similitude

Il est prévu de fixer des seuils en dessous desquels un projet ne sera plus référencé sous un projet type, car étant trop éloigné de la description de la base. Lorsque la base de concepts sera suffisamment riche dans MultiCAD, un autre type de projet de référence, dont le coefficient de similitude semble plus approprié, sera proposé au concepteur. S'il n'existe pas, il faudra se poser

la question de la pertinence qu'il y a à créer un nouveau concept correspondant à un projet aussi original.

Le diagnostic donne lieu à la création d'un document texte répertoriant seulement les différences du projet par rapport au projet type. Un extrait de ce document est proposé en figure 61.

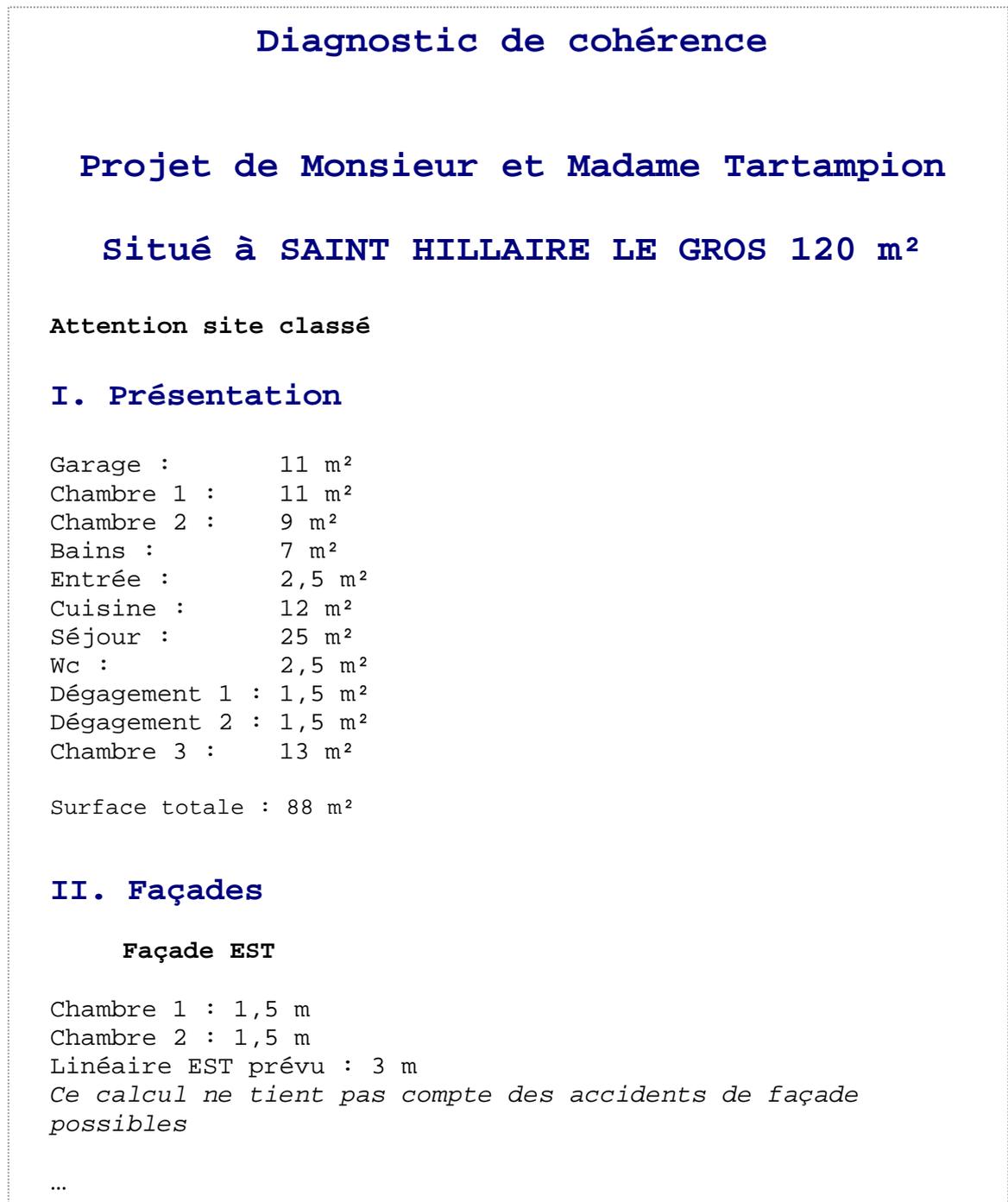


Figure 61 - Extrait du diagnostic - Les informations sur le projet

En sortie de cette première vérification de cohérence les cas de blocages sont décelés, mais les contrôles fins sont impossibles à réaliser tant que les positions et dimensions des espaces ne sont pas connues. Par exemple, les linéaires de façade ne pourront être réellement contrôlés qu'après les calculs de contours, que nous détaillerons plus loin.

Actuellement, toutes les possibilités offertes par un tel système n'ont pas été explorées. Il nous reste à augmenter le nombre et la portée des contrôles, à consolider les calculs des notes de similitudes et à générer des diagnostics sous un format texte plus élaboré en utilisant le module **Kaola TEXTE**[®], générateur de textes en langage naturel.

L'intérêt du système expert **Kaola**[®], réside dans la facilité avec laquelle l'architecte peut relire les règles de la base de connaissance et éventuellement intervenir pour la personnaliser et améliorer le diagnostic. Cette intervention doit cependant être réalisée par un informaticien, mais elle aura toutes les chances d'être aisée et rapide, l'essentiel de la réflexion étant menée en amont, par le concepteur.

Une fois la faisabilité générale du projet assurée, nous prenons en charge les contrôles avant énumération par l'analyse plus fine des espaces organisés sur le principe de la décomposition hiérarchique.

3 – 1 – 2 Construction de l'arbre hiérarchique

La description d'un projet peut se faire à l'aide d'un projet type. L'arbre hiérarchique du projet type est alors associé au projet. Il est valide dans sa présentation initiale, mais le nombre ou la disposition des espaces dans leurs englobants peut être modifiée.

La première étape de la pré-énumération est la construction de l'arbre hiérarchique des espaces. Dans la base de données, on trouve la liste complète des espaces associés au projet, ainsi que leur englobant privilégié.

L'englobant est une notion artificielle : de la description textuelle du projet qui indique les regroupements fonctionnels d'espaces (les circulations, les espaces de service...), on passe ici à un regroupement topologique, privilégiant le regroupement par zones : ce seront par exemple les espaces se trouvant à l'étage, ceux qui correspondent aux services et qui doivent être regroupés pour partager des gaines d'eau ou d'air...

Nous avons illustré les regroupements hiérarchiques fonctionnel et topologique d'un logement par les figures 17 et 18.

Il se peut qu'après manipulation des espaces par l'architecte, l'englobant privilégié fasse défaut. On ajoutera des espaces intermédiaires si besoin est : accoler un séjour, une chambre et son espace bains ne correspond ni à une zone de type "espace nuit" ni à une zone de type "espace jour" mais peut correspondre à la demande d'organisation d'un client. Dans ce cas l'espace englobant intermédiaire porte un nom standard G_n (Global n° n) où n est un indice incrémenté à chaque nouvel espace généré.

Dans l'exemple du logement décrit par le ministère algérien, l'architecte en charge du projet peut décider de regrouper les espaces englobants "Entrée" et "Partie Vie Sociale" pour les traiter différemment des espaces compris dans la "Partie Vie intime". Ce sera par exemple, pour effectuer des cassures de niveaux (si le terrain a un fort dénivelé) ou donner des hauteurs sous plafonds plus généreuses aux zones abritant la vie de jour. La figure 62 montre l'arbre qui pourrait être construit alors, avec l'espace englobant G_0 implicite dans la description de l'architecte, mais nécessaire lors de la construction de l'arbre.

Pour un projet classique, l'arbre hiérarchique construit ressemble fortement à celui du projet référent. Un projet nouveau présente un arbre hiérarchique de profil inconnu jusqu'alors. Il serait intéressant de voir s'il correspond à un nouveau concept et de l'intégrer dans la base de concepts, après avis de l'architecte qui reste seul juge de l'opportunité de la démarche. Cette démarche d'apprentissage n'est pas prise en charge actuellement par le logiciel.

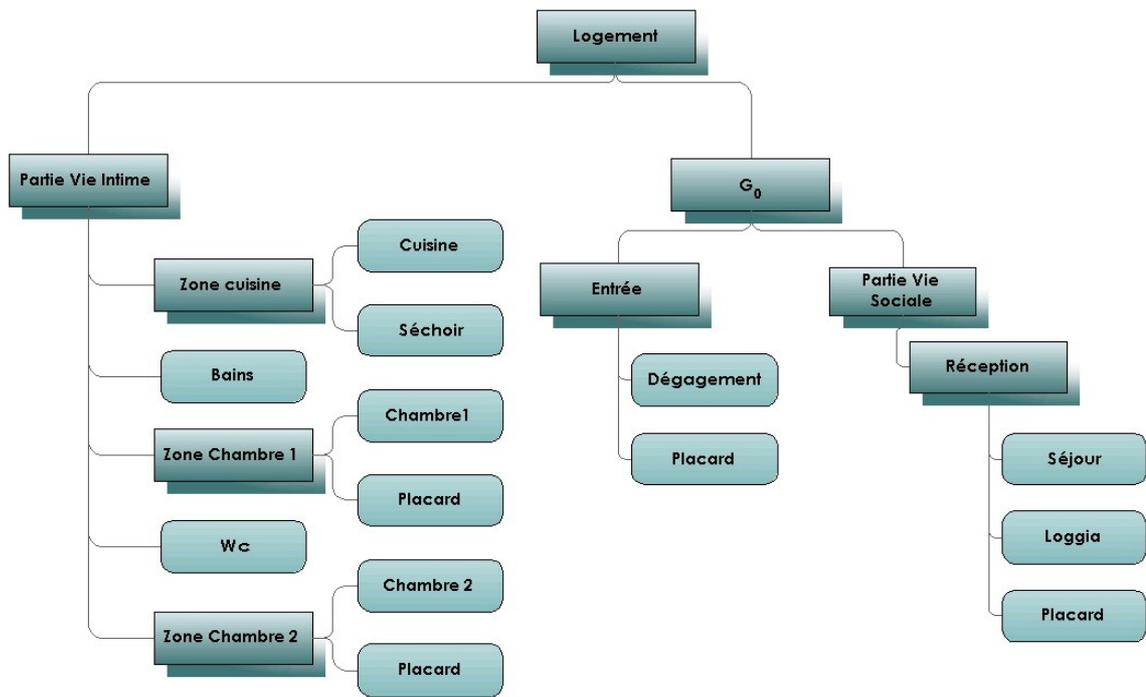


Figure 62 - Arbre topologique avec un espace englobant généré

Pour chaque description de projet, un fichier "initial" est construit à partir du système d'information. Pour chaque espace on retrouve son numéro dans la nomenclature, sa surface minimum en cm², sa largeur minimum, son linéaire de façade minimum, la hauteur sous plafond minimum, le numéro d'englobant et un code de forme. Les tests ont été effectués à partir de fichiers initiaux pour des raisons de commodité. On retrouve dans ces fichiers les informations qualifiant les espaces, présentes dans le système d'information. Voici un extrait "lisible" d'un fichier initial comprenant seulement cinq espaces, et nous servira pour illustrer les principes de la pré-énumération.

0	terrain	70.00 m2	fac	9.0m	la	9.0m	lon	7.5m	hsp	3.0m	0
1	pavillon	60.00 m2	fac	7.0m	la	7.5m	lon	7.5m	hsp	2.5m	0
2	zone jour	16.00 m2	fac	3.0m	la	3.5m	lon	3.5m	hsp	2.5m	1
3	zone nuit	16.00 m2	fac	3.0m	la	3.5m	lon	3.5m	hsp	2.5m	1
15	garage	15.00 m2	fac	2.0m	la	2.5m	lon	2.5m	hsp	3.0m	0

Figure 63 - Image d'un fichier initial associé à un projet

L'arbre hiérarchique associé construit est le suivant :



Figure 64 - Image de l'arbre hiérarchique construit à la pré-énumération

A noter : le terrain est le seul espace qui ait 0 pour englobant.

3 – 1 – 3 Construction des domaines d'énumération

A partir du moment où l'on connaît l'arbre hiérarchique et les dimensions minimum et maximum des espaces, on peut construire leur domaine d'énumération. Les minimum et maximum sont calculés en fonction d'un seuil paramétrable de tolérance : une mesure est valide si elle n'est pas inférieure de 5% au minimum défini dans la base, et si elle n'excède pas de 10% cette même valeur. Les valeurs sont données en centimètres, de façon à avoir une énumération sur des nombres entiers

La pré-énumération calcule les coordonnées et dimensions possibles de chaque espace en fonction de sa place dans l'arbre et des contraintes qui lui sont attachées.

Nous avons programmé une méthode de type CSP avec back-tracking pour ce traitement, afin de passer en revue chaque espace, étudier ses conditions de placement dans son englobant. Chaque placement doit être compatible avec les contraintes d'orientation et de proximité définies pour cet espace.

Nous présentons les principes généraux de la pré-énumération et nous illustrerons la démarche avec un exemple.

3 – 1 – 3 – 1 Principes de la pré-énumération

L'arbre hiérarchique des espaces est parcouru en largeur, niveau par niveau. Chaque placement contient les six informations de base : x, y, z, largeur, longueur, hauteur. Voici un exemple de placements possibles d'un pavillon au Sud d'un terrain. Les dimensions du terrain sont fixes (7 m x 8 m), on sait que le pavillon a une largeur ou longueur minimum de 5 m pour une surface d'environ 35 m². Le pas d'énumération est de 1 m.

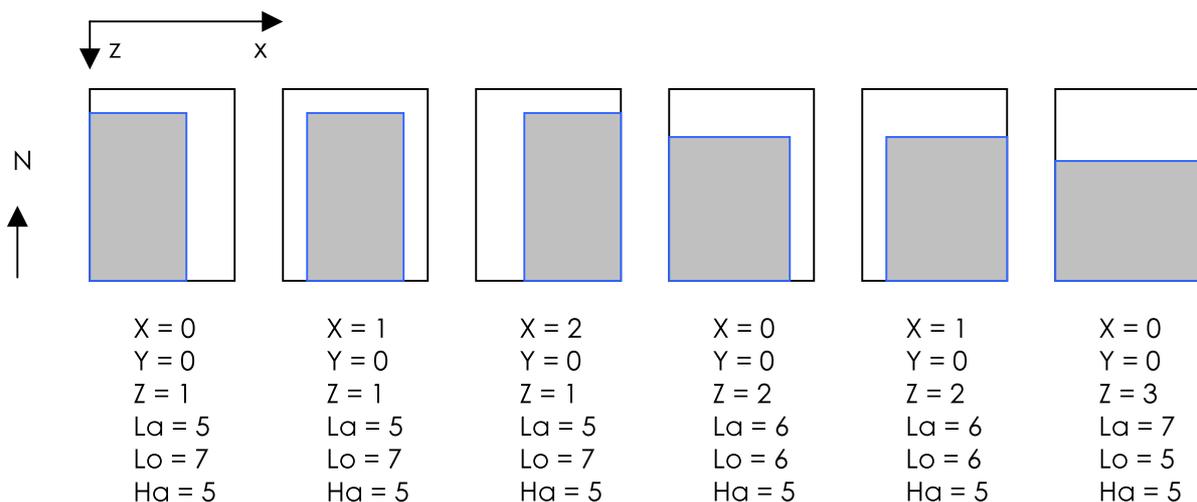


Figure 65. Exemple de placements d'un pavillon sur un terrain
Le pavillon est orienté Sud, de plain pied : 6 placements possibles

Les six placements de la figure 65 sont mémorisés sous forme de listes de coordonnées possibles. Des contraintes binaires peuvent lier deux espaces n'appartenant pas au même niveau de l'arbre. On attendra que le deuxième espace soit instancié pour conclure sur la validité du placement du premier espace. Si le placement n'est pas valide, il sera retiré de l'ensemble des placements de l'espace visité antérieurement.

En fin de pré-énumération, on peut connaître les espaces qui n'ont pas de placement possible, et sur quelles contraintes les retraits ont été faits. Ces informations sont précieuses en cas de blocage.

Ce traitement n'a pas pour but de doubler la génération de solutions qui sera effectuée à l'étape suivante par le moteur GNU-Prolog. L'ensemble des contraintes n'est pas pris intégralement en compte. Nous avons privilégié les contraintes unaires parce qu'elles réduisent rapidement l'univers des énumérations possibles et certaines contraintes binaires de placement, d'orientation et de proximité.

3 – 1 – 3 – 2 Exemple de construction des domaines de validité

Pour cet exemple et dans un souci de minimiser le nombre de solutions, le pas est de 50 cm et le seuil est ramené à sa plus petite valeur, c'est-à-dire 1. Nous prendrons un exemple volontairement réduit à cinq espaces pour illustrer notre démarche. Le terrain a des dimensions fixes et ne participe pas à l'énumération.

Sont construites alors trois listes de coordonnées possibles, pour x, y et z. Le nombre qui précède les listes (14 pour pavillon) correspond au nombre théorique de placements possibles de l'espace, ici $7 \times 1 \times 2$ parce que nous avons 7 valeurs de x possibles, 1 pour y et 2 pour z. Dans la première liste, les triplets correspondent à la valeur de x et les dimensions largeur et longueur associées. Il en est de même pour les triplets de la deuxième liste avec y, longueur et largeur associées. Sur la troisième liste on trouve la valeur de z, un zéro non significatif et la hauteur de l'espace englobant. Les largeurs et longueurs associées varient suivant les coordonnées de l'espace, en l'occurrence, si le terrain a des dimensions stables, le pavillon lui, peut être orienté Nord/Sud ou Est/Ouest.

Les dimensions du terrain sont fixées au départ : 70 m² pour 9 m de large font 7.77 m de long. Le pavillon a une surface de 60 m². Avec un pas de 50 cm, les dimensions possibles se ramènent à 7.5 x 8 ou 8 x 7.5. Il y a 14 façons de placer ce pavillon sur le terrain.

La première solution donne la valeur 150 pour x, avec une longueur de 750 cm (la largeur maximum du terrain est de $150 + 750 = 900$ cm), pour une largeur du pavillon de 800 cm. La surface maximum du pavillon est de 600000 cm², la valeur $800 \times 750 = 600000$ est acceptable. La valeur 800×800 dépasse le seuil autorisé et n'a pas été acceptée. Les dimensions inférieures 700 x 800 ou 750 x 750 sont inférieures au seuil autorisé et ne sont pas retenues également, en fonction du seuil de tolérance réduit que nous avons adopté.

```

pavillon (14) [(150,750,800) (100,800,750) (100,750,800)
( 50,800,750) ( 50,750,800) ( 0,800,750) ( 0,750,800) ]
[( 0,750,800) ] [( 50, 0,300) ( 0, 0,300) ]

garage (10080) [(650,250,600)...] [(500,250,600)...]
[( 50, 0,300) ( 0, 0,300) ]

zone jour (1584) [(550,350,457)...] [( 50, 0,250)...]
[( 50, 0,250) ( 0, 0,250) ]

zone nuit (1584) [(550,350,457)...] [( 50, 0,250)...]
[( 50, 0,250) ( 0, 0,250) ]

ESTIMATION : Il y a 354077982720 solution(s)

```

Figure 66 - Listes des coordonnées possibles en x, y et z pour chaque espace

Une seule solution possible sur y donne l'orientation Est/Ouest obligatoire, en fonction de la longueur maximum du terrain (7.5m).

Le nombre estimatif de solutions est calculé par multiplication des nombres de possibilités de placement de chacun des espaces. Il correspond au nombre d'essais qu'il faudrait réaliser dans une heuristique de type "generate and test".

3 - 1 - 3 - 3 Repérage des contraintes

Le but de l'étape du diagnostic est de communiquer l'état de la description du projet et de signaler des éventuels cas de blocage. Le repérage des contraintes associées aux espaces donne la liste suivante :

```

12 propriétés:

pavillon en façade Est absolu
pavillon de plain pied
terrain au Nord absolu
zone jour ne chevauche pas zone nuit
zone jour de plain pied
zone nuit de plain pied
garage de plain pied
zone jour au Sud absolu
zone nuit au Sud absolu
zone nuit Communique directement avec zone jour
garage ne chevauche pas pavillon
garage Communique directement avec zone nuit

```

Figure 67 - Repérage des contraintes à partir du fichier initial

Pour chaque espace est ensuite construite la liste des contraintes associées, les contraintes binaires étant notées en redondance pour les deux espaces concernés.

```

0 terrain
Unaires au Nord absolu (0)

1 pavillon
Unaires de plainPied (0) en façade Est absolu (0)
Binaires ne chevauche pas (15)

2 zone jour
Unaires au Sud absolu (0) de plainPied (0)
Binaires Communique directement avec (3) ne chevauche pas (3)

3 zone nuit
Unaires au Sud absolu (0) de plainPied (0)
Binaires Communique directement avec (2) Communique directement
avec (15) ne chevauche pas (2)

15 garage
Unaires de plainPied (0)
Binaires Communique directement avec (3) ne chevauche pas (1)

```

Figure 68 - Repérage des contraintes par espace

3 – 1 – 3 – 4 Application des contraintes unaires

Les espaces sont contraints à un positionnement et des dimensions qui les maintiennent à l'intérieur de leur englobant. L'application des contraintes unaires permet de forcer certaines coordonnées ou positionnements en réduisant encore leur domaine de validité. L'exemple le plus probant est ici la contrainte « zone jour en façade sud » qui va obliger l'espace zone jour à s'aligner sur la valeur y de son englobant. Compte tenu des valeurs calculées plus haut pour le pavillon, il n'y aura plus qu'une valeur possible en y pour la zone jour. Ceci réduit considérablement les domaines de validités des coordonnées pour l'espace zone jour, de 1584 on passe à 99 possibilités :

```

Contrainte sur zone jour
zone jour (99)
[ (550,350,457) (500,400,400) (500,350,457) (450,450,355)
(450,400,400) (450,350,457) (400,450,355) (400,400,400)
(400,350,457) (350,450,355) (350,400,400) (350,350,457)
(300,450,355) (300,400,400) (300,350,457) (250,450,355)
(250,400,400) (250,350,457) (200,450,355) (200,400,400)
(200,350,457) (150,450,355) (150,400,400) (150,350,457)
(100,450,355) (100,400,400) (100,350,457) (50,450,355)
( 50,400,400) ( 50,350,457) ( 0,450,355) ( 0,400,400)
( 0,350,457) ]
[ ( 0,450,355) ( 0,400,400) ( 0,350,457) ]
[ ( 0, 0,250) ]
...
ESTIMATION APRES REDUCTION DES UNAIRES : Il y a 98794080
solution(s)

```

Figure 69 - Image des domaines de validité après application des contraintes unaires

3 – 1 – 3 – 5 Croisement des listes de coordonnées

La dernière passe de vérification de faisabilité parcourt à nouveau l'arbre hiérarchique, niveau par niveau et effectue le croisement des trois listes. Il s'agit de rapprocher les couples largeur/longueur identiques et de noter pour ces couples les coordonnées x, y et z possibles. Pour chaque solution valide on retient les six valeurs x, y, z, largeur, longueur, hauteur.

```
1 Valeurs solutions pour pavillon
  (100, 0, 0,800, 750, 300)

301 Valeurs solutions pour garage
  (0, 0, 0,250, 600, 300) ...

27 Valeurs solutions pour zone jour
  (100, 0, 0,350, 457, 250) ...

27 Valeurs solutions pour zone nuit
  (100, 0, 0,350, 457, 250) ...

NOUVELLE ESTIMATION : Il y a 219429 solutions croisées
```

Figure 70 - Image des domaines de validité après croisements des listes

3 – 1 – 3 – 6 Contraintes binaires et énumération

Les propriétés binaires sont difficilement exploitables à cette étape. En effet, l'instanciation n'ayant pas eu lieu, il est difficile a priori de décider si tel espace est en chevauchement avec un autre. On pourrait cependant déceler sur l'ensemble des coordonnées possibles si il y a des cas de non chevauchement, ou non communication.

Il a été décidé de ne pas pousser plus loin la phase de diagnostic, la prochaine étape se chargeant de vérifier toutes les contraintes en cours d'énumération.

Dans la première version de mon outil de création de maquettes virtuelles, la phase de diagnostic comportait également le moteur CSP d'énumération. Pour l'exemple des cinq espaces ci-dessus, en agrandissant la surface du terrain, un ensemble de 949 solutions était retenu, imagé dans la figure 71.

		Solution 1					
		x	y	z	la	lo	ha
0	terrain	0	0	0	900	1111	300
1	pavillon	100	250	0	800	750	300
2	zone jour	100	250	0	350	457	250
3	zone nuit	450	250	0	350	457	250
15	garage	0	0	0	600	250	300

		Solution 2					
		x	y	z	la	lo	ha
0	terrain	0	0	0	900	1111	300
1	pavillon	100	250	0	800	750	300
2	zone jour	100	250	0	350	457	250
3	zone nuit	450	250	0	400	400	250
15	garage	0	0	0	600	250	300

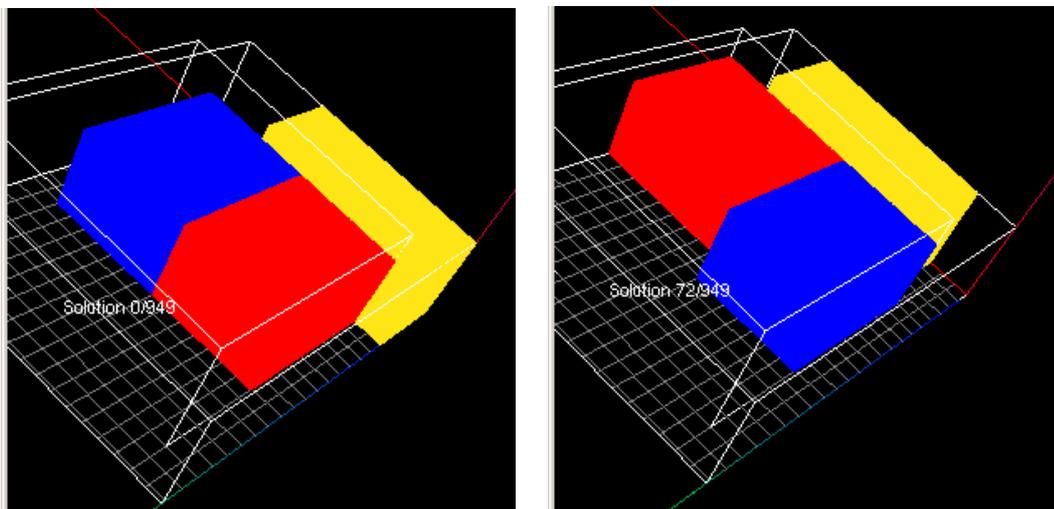
.....

		Solution 949					
		x	y	z	la	lo	ha
0	terrain	0	0	0	900	1111	300
1	pavillon	150	300	0	750	800	300
2	zone jour	550	300	0	350	457	250
3	zone nuit	200	300	0	350	457	250
15	garage	400	0	0	500	300	300

Figure 71 - Image des solutions générées

La visualisation des solutions était accessible après génération des solutions par un module programmé en OpenGL, illustrée par la figure 72. La zone nuit est représentée en bleu, la zone jour est en rouge et le garage en jaune.

Par souci d'universaliser les outils au sein du laboratoire, nous avons décidé d'utiliser le moteur GNU Prolog. Les tests préliminaires en prolog ayant donné de bons résultats, nous n'avons gardé du programme de diagnostic que la phase de vérification de faisabilité.



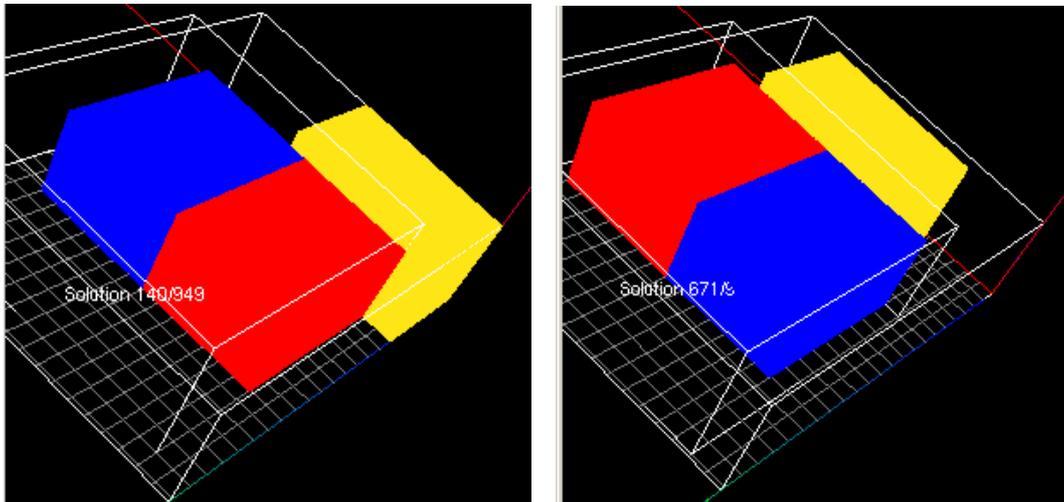


Figure 72 – Visualisation des volumes en phase de diagnostic
Solutions numéros 0, 72, 140 et 671 sur 949

3 – 1 – 3 – 7 Exemple de diagnostic

```

ENUMERATIONS

Echec Evaluation contrainte 14 (Débordement) pour 15 et 0

Il y a 0 solutions

```

Figure 73 – Exemple de diagnostic d'échec

Si l'on garde le premier jeu de valeurs, la surface du terrain est de 70 m² pour y loger un pavillon de 60 m² et un garage de 15m², on obtient un refus sur l'espace numéro 15 (garage), qui déborde de son englobant 0 (terrain).

Le programme en GNU Prolog n'expliquant pas les éventuels cas de blocage, il est intéressant de confronter son projet à l'éditeur de diagnostic si l'on présume un cas de blocage. Un autre intérêt du diagnostic préliminaire est de produire un document texte comportant une image de l'arbre hiérarchique et une liste de tous les espaces du projet, leurs propriétés et règles d'assemblage associées.

Le moteur CSP ayant été abandonné, nous n'avons pas poussé plus loin nos investigations, qui n'enlevaient que peu de solutions potentielles. En effet, les dimensions et les coordonnées n'ayant pas encore été complètement déterminées, seuls les cas invraisemblables étaient rejetés. Nous retrouverons ces critères sous forme de filtres à appliquer sur les solutions, après génération.

L'étape suivante est la production de code GNU-Prolog en vue de l'énumération.

3 – 2 Construction du code GNU Prolog

Le projet étant réputé viable, la phase de génération des solutions est amorcée par la construction du code GNU Prolog associé au projet. Une fois construit, il sera stocké dans la base pour réutilisation. Comme il reste "constructible", il se pourrait que dans le futur nous ne stockions que les codes des projets typiques.

3 – 2 – 1 Choix de GNU Prolog

GNU Prolog, réalisé par Daniel Diaz, n'a été disponible qu'à partir de Juin 2002 pour sa version 1.2.16 [DIA 02]. Auparavant, j'avais travaillé sur des anciennes versions de MultiFormes [PLE 91] dont il fallait que je reprenne le code pour l'adapter à mes besoins. J'avais par la suite travaillé avec le générateur de Pierre-François BONNEFOI [BON 00], du laboratoire MSI. L'expression des contraintes disponibles ne me permettait pas d'exprimer le OU (un espace peut avoir 7 m de large par 5 m de long OU 5 m de large par 7 m de long). J'avais enfin développé mon propre générateur CSP, que j'ai gardé pour la phase de pré-énumération.

Pendant l'été 2002, sous l'influence de Pierre-François BONNEFOI, nous avons décidé d'exprimer et de tester nos contraintes avec GNU Prolog. La puissance du moteur qui peut accepter la multitude de champs à énumérer d'un projet, la simplicité de mise en œuvre et la partageabilité de cet outil avec les autres membres du laboratoire nous a convaincus de l'utiliser pour la phase de génération.

GNU prolog est un compilateur Prolog prenant en charge la résolution de contraintes sur les domaines finis. Le compilateur est basé sur le principe d'une WAM (Warren Abstract Machine) : la compilation fournit un fichier, traduit dans un langage indépendant appelé mini-assembleur, spécialement conçu pour GNU Prolog. Une nouvelle traduction est ensuite opérée vers le langage machine de la machine cible.

Un grand avantage de ce système est de produire un code exécutable natif rapide et réduit : les prédicats non utilisés ne seront pas inclus dans l'exécutable final. Nous nous servons de cette particularité lors de la génération du code correspondant à un projet.

La raison principale du choix de ce compilateur est l'intégration d'outils efficaces de résolution de contraintes sur les domaines finis, supportant les contraintes arithmétiques et booléennes dont nous servons. Les heuristiques d'énumération sont paramétrables.

Un code GNU Prolog est construit pour chaque projet. Il est organisé en deux parties : une partie fixe, correspondant à la définition des prédicats, et une partie spécifique, construite à partir des données du projet. Le module de génération de code Prolog est écrit en Langage C.

3 – 2 – 2 Construction du code fixe

Pour chaque règle d'assemblage ou contrainte intégrée dans le système d'information, on connaît le code Prolog associé (table NOMENCLATURE/CONTRAINTES UTILISABLES). Il est facile de construire une entête de programme regroupant la définition de tous les prédicats utilisables. Nous avons vu dans la présentation de GNU Prolog que seuls les prédicats utiles seraient intégrés au code exécutable lors de l'édition de liens.

L'illustration suivante montre le code associé au prédicat `respecter_surface()` : on y trouve des variables prenant leurs valeurs sur des domaines finis (`La` et `Lo`), des variables à valeur fixe (assimilables à des constantes), ce sont `SurfMin` et `LaMin` correspondant aux valeurs de la surface minimum et de la largeur minimum, issues de la base pour cette espace. On y trouve également des variables Prolog classiques : `LMin`, `SMin` et `SMax`, dont les valeurs sont calculées en fonction de seuils de tolérance demandés à l'utilisateur lors de la génération (ici -5% à +10%). `floor()` et `ceiling()` sont des fonctions prédéfinies qui renvoient l'entier le plus proche, haut ou bas suivant le cas. Les caractères '#' introduisent les opérateurs spécifiques aux variables sur domaines finis.

```
% La surface de la pièce ne doit pas descendre
% sous la valeur de la surface minimum
% donnée à la description de la pièce
% On doit également respecter la largeur minimum

respecter_surface(La, Lo, SurfMin, LaMin) :-
    LMin is floor(LaMin * 0.95),
    La #>=# LMin,
    Lo #>=# LMin,
    SMin is floor(SurfMin * 0.95),
    (La * Lo) #>=# SMin,
    SMax is ceiling(SurfMin * 1.1),
    SMax #>=# (La * Lo).
```

Figure 74 – Exemple de code associé à un prédicat

Le code fixe contient également quelques lignes immuables dont le prédicat principal et la gestion des entrées/sorties sur le fichier des solutions, qui doivent être recopiées dans le programme résultant. Un exemple de code correspondant au pavillon de la partie deux est disponible en annexe 18.

3 – 2 – 3 Construction du code spécifique

Chaque espace est défini par six variables : X, Y, Z, Largeur, Longueur, Hauteur dont il faut préciser les limites de leur domaine d'énumération.

Ces variables auront pour nom X_n , Y_n , Z_n , La_n , Lo_n , Ha_n ou n est le numéro de l'espace dans le système d'information (table UN PROJET/ PROPRIETES ESPACES).

On renseignera des constantes à partir de la même table : surface minimum (S_n), largeur minimum ($LaMin_n$), linéaire de façade minimum ($FacMin_n$), hauteur sous plafond minimum ($HaMin_n$).

Enfin, on appellera les prédicats associés aux règles d'assemblage, suivant la syntaxe et l'arité déterminée par l'entête du prédicat. Ce seront les tables UN PROJET/CONSTRAINTES et NOMENCLATURE/ CONSTRAINTES UTILISABLES qui donneront ces informations.

Certaines contraintes pour fixer les domaines finis d'énumération des variables et respecter l'emboîtement hiérarchique sont codées systématiquement pour chaque espace. Il s'agit des appels aux prédicats `definir_piece()` et `est_contenu_dans()`. Les prédicats `respecter_surface()` ou `respecter_hsp()` (`hsp` : hauteur sous plafond) ne sont appelés que si les valeurs correspondantes sont connues pour les espaces dans la base. Ce n'est pas le cas pour les espaces intermédiaires où la surface peut ne pas être renseignée. La surface d'un espace non obligatoire peut passer de 0 à un domaine classique de définition. Un prédicat, `respecter_surface_n0()` prend en charge la définition d'un tel domaine de validité particulier.

L'illustration suivante présente la série d'appels aux prédicats pour l'espace Séjour, numéroté 10 dans la table UN PROJET/ESPACE. Les espaces 8 et 9 correspondent aux espaces Entrée et Cuisine, tous inclus dans l'espace Jour, numéroté 2.

```
%10 SEJOUR contenu dans ZONE JOUR - 2
%-----
definir_piece(X10, Y10, Z10, La10, Lo10, Ha10, X0, Y0, Z0, La0, Lo0,
Ha0),
est_contenu_dans(X10, Y10, Z10, La10, Lo10, Ha10, X2, Y2, Z2, La2,
Lo2, Ha2),
S10 ==# 25,
LaMin10 ==# 4,
FacMin10 ==# 1,
HaMin10 ==# 2,
respecter_hsp(Ha10, HaMin10),
respecter_surface(La10, Lo10, S10, LaMin10),
non_chevauche(X10, Y10, Z10, La10, Lo10, Ha10, X8, Y8, Z8, La8, Lo8,
Ha8),
non_chevauche(X10, Y10, Z10, La10, Lo10, Ha10, X9, Y9, Z9, La9, Lo9,
Ha9),
communiquer(X10, Y10, Z10, La10, Lo10, X8, Y8, Z8, La8, Lo8, 1),
communiquer(X10, Y10, Z10, La10, Lo10, X9, Y9, Z9, La9, Lo9, 1),
```

Figure 75 – Extrait de code GNU Prolog spécifique à un espace

Le terrain est un espace spécial : il correspond au niveau 0 de l'arbre hiérarchique par définition, puisqu'il détermine les domaines maximum d'énumération des variables des espaces qui y sont définis. Les coordonnées x_0 , y_0 et z_0 représentent l'origine de l'énumération, qui se fait toujours par pas positifs. Elles correspondent au coin Nord Ouest du terrain lors de la visualisation. Pour le terrain, les variables de largeur (L_a0), longueur (L_o0) et hauteur (H_a0) auront une valeur fixe, issue de la table UN PROJET/ENVIRONNEMENT.

Dans cette table, il y a également une information sur la pente du terrain et l'orientation de cette pente suivant les 8 directions (Sud, Sud-Est, Est...) Cette information doit être transmise au module de visualisation qui modélise grossièrement le terrain. Les tests ayant été réalisés à l'aide de fichiers textes qui transmettent l'information de programmes en programmes, nous avons choisi de passer des informations générales telles que cette pente du terrain par mots clés. Nous trouverons donc la ligne de commentaire suivante

```
%PENNE      1.00  N
```

qui sera décodée aux phases ultérieures par les modules de visualisation.

De la même façon, pour effectuer les tests de mise en place des prédicats, nous avons choisi de paramétrer l'échelle, ce qui influe sur le pas d'incrémentation lors de l'exploration du domaine de validité des variables. Cette échelle est transmise aux modules de visualisation par mot clé. Elle sera utile pour calculer le point de vue adapté lors de la prise de connaissance d'une solution ou pour intégrer un objet de la base de connaissances (un meuble par exemple) aux dimensions correspondant à l'échelle du projet. La ligne

```
%ECHELLE    1.00
```

indique que le pas d'énumération est de 1 mètre. La valeur du paramètre ECHELLE correspond au nombre de découpages effectués dans un mètre linéaire. L'idéal est d'arriver à un pas de 10 cm. Au stade de la maquette, un espace peut être défini avec des dimensions à 10 centimètres près. La valeur de l'échelle est fixée par le concepteur avant construction du code GNU Prolog. Les seuils sont définis de la même façon, avant génération. Ils n'apparaissent pas dans le fichier car ils ne sont utiles aux modules de visualisation.

Un autre paramètre est disponible dans la table UN PROJET/ ENVIRONNEMENT, mais non utilisé actuellement : c'est l'orientation du terrain. Il permettrait aux modules de visualisation de modéliser le terrain avec son orientation réelle. Cette option a été prévue pour intégrer les calculs d'ombre en fonction d'une date et d'un lieu donné.

3 - 2 - 4 Exécution du code

Le code ainsi construit est compilé par GNU Prolog puis exécuté. Si des solutions existent, elles sont inscrites dans un fichier texte sous le format suivant :

```
# ---- [ Ouverture du fichier - time 328 ]
Pavillon Décembre 2002
ECHELLE 2.00
PENTE 1.00 ORIENTATION N

#----- [ Début scène ]
Terrain blanc 0 0 0 24 24 5 Terrain
Pavillon rouge 5 0 0 19 18 5 Fil_de_fer
ZoneJour rouge 5 0 0 10 18 5 Fil_de_fer
ZoneNuit bleu_fonce 15 0 0 9 12 5 Fil_de_fer
Garage gris_fonce 0 0 0 5 9 5 Mur
Chambre1 turquoise 15 0 0 9 5 5 Mur
Chambre2 bleu_pale 19 0 5 5 7 5 Mur
Bains vert_clair 15 0 6 4 5 5 Mur
Entree rose_saumon 13 0 0 2 6 5 Mur
Cuisine rose_tyrien 6 0 0 7 5 5 Mur
Sejour rouge 5 0 5 8 12 5 Mur
WC jaune 13 0 6 2 4 5 Mur
Degt blanc 15 0 5 4 1 5 Mur
#----- [ Fin scène ]

#----- [ Début scène ]
Terrain blanc 0 0 0 24 24 5 Terrain
Pavillon rouge 5 0 0 19 18 5 Fil_de_fer
ZoneJour rouge 5 0 0 10 18 5 Fil_de_fer
ZoneNuit bleu_fonce 15 0 0 9 12 5 Fil_de_fer
Garage gris_fonce 0 0 0 5 9 5 Mur
Chambre1 turquoise 15 0 0 9 5 5 Mur
Chambre2 bleu_pale 19 0 5 5 7 5 Mur
Bains vert_clair 15 0 6 4 5 5 Mur
Entree rose_saumon 13 0 0 2 6 5 Mur
Cuisine rose_tyrien 6 0 0 7 5 5 Mur
Sejour rouge 5 0 5 8 12 5 Mur
WC jaune 14 0 6 1 7 5 Mur
Degt blanc 15 0 5 4 1 5 Mur
#----- [ Fin scène ]
```

Figure 76 – Extrait du fichier des solutions généré par GNU Prolog

Pour renseigner au mieux les modules de visualisation, nous avons gardé le nom complet de l'espace, associé à une couleur et à un aspect. Les modules de visualisation ne peuvent reconstruire l'arbre hiérarchique, et l'aspect dépend directement de la position de l'espace dans l'arbre, pour le moment. Le terrain a une modélisation spéciale, les englobants sont visualisés sous forme fil de fer, les espaces terminaux ont la forme de pièces dont les murs sont coupés à un mètre de hauteur. D'autres types d'aspects (transparences) sont envisageables.

Pour chaque espace, la série de 6 entiers définit les coordonnées X, Y et Z, la largeur, la longueur et la hauteur de l'espace. Ce sont les données minimum nécessaires à une première visualisation en « mode plan ».

Pour des raisons de commodité, là encore nous avons privilégié la production de fichiers textes, plutôt que l'intégration immédiate dans la base de données.

3 – 2 – 5 Présentation des solutions en « mode plan »

Nous travaillons avant tout sur une bonne organisation des espaces entre eux. La vue en mode plan est privilégiée pour une première vérification visuelle. Les choix graphiques de ce mode ont été présentés plus haut. Voici ce que l'architecte peut obtenir après description et vérification d'un projet, puis demande de génération des solutions associées :



Figure 77 - Exemple de visualisation en mode plan

Nous avons choisi pour le moment de visualiser les solutions par groupe de dix-huit. Pour chaque solution, balisée par [Début scène] et [Fin scène] nous associons un fichier VRML dont le point de vue initial est calculé en fonction des dimensions du terrain et de l'échelle, ce qui permet d'avoir une présentation homogène pour tous les projets. C'est un programme écrit en C qui construit du code VRML permettant la visualisation en mode plan.

L'écueil de la visualisation en mode plan est qu'elle montre une vue des étages en priorité. Pour les essais actuels portant sur des logements individuels,

cela ne gêne en rien la vérification visuelle de l'architecte. Il faudra sans doute adapter le calcul du point de vue initial pour des projets de plus grande envergure.

Cette première visualisation en mode plan permet à l'architecte d'avoir une première idée des organisations des espaces qu'il a décrits. A ce stade, il peut se rendre compte qu'il a oublié une contrainte de communication entre deux espaces, ou que le garage est mal orienté. Il a alors le loisir de modifier sa description et de recommencer le cycle de génération jusqu'à ce que la visualisation en mode plan lui semble acceptable.

L'étape suivante porte sur la véritable analyse des solutions.

3 – 3 Analyse des solutions

La génération produit de nombreuses solutions, trop nombreuses pour être exploitables en une seule visualisation. Nous proposons plusieurs outils de filtrage à l'architecte qui ont pour rôle d'opérer une sélection ou de classer les solutions suivant différents critères et de ne faire remonter à la visualisation que les solutions répondant au mieux à ces critères. Pour l'aider, des règles de visualisation mettent en évidence les points importants à ses yeux. Enfin, lorsque l'architecte a fait son choix de solutions intéressantes, il est possible de les « habiller » avec divers objets, de façon à présenter au client une vue lisible des espaces du projet.

3 – 3 – 1 Règles de visualisation en mode plan

La cinquantaine de règles d'assemblages définies en partie deux suffit à concevoir un projet architectural de logement. Il n'est pas exclu d'ajouter à la demande de nouvelles règles de placement ou de dimensionnement.

L'illustration suivante montre le code VRML associé à la visualisation d'un espace :

```
# Garage gris_fonce 1 0 0 5 9 5 Mur
une_piece
{
  ma_couleur 0.100 0.100 0.100
  mes_points [
    0.875 0.000 -0.125      6.125 0.000      -0
    6.125 0.000 9.125      0.875 0.000 9.125
    1.125 0.000 0.125      5.875 0.000 0.125
    5.875 0.000 8.875      1.125 0.000 8.875
    0.875 1.000 -0.125     6.125 1.000 -0.125
    6.125 1.000 9.125     0.875 1.000 9.125
    1.125 1.000 0.125     5.875 1.000 0.125
    5.875 1.000 8.875     1.125 1.000 8.875
  ]
  mes_points_sol [
    1.000 0.000 0.000      6.000 0.000 0.000
    6.000 0.000 9.000      1.000 0.000 9.000 ]
}
```

Figure 78 – Extrait du code VRML de visualisation en mode plan

La ligne de commentaire introduite par # rappelle les coordonnées et dimensions de l'espace du fichier solution généré par GNU Prolog. `une_piece` correspond à un prototype que nous avons prédéfini, auquel trois paramètres peuvent être passé. Les points au sol indiquent les coordonnées des quatre points de la surface au sol. Cette surface est colorée comme l'indique le paramètre `ma_couleur`. Le paramètre `mes_points` donne une liste de 16 points correspondant aux contours extérieurs et intérieurs de l'espace, à l'altitude au sol de l'espace et pour une hauteur de mur de un mètre. Les murs ont une épaisseur de 25 cm par défaut, dont l'axe est sur la frontière de l'espace. Les contours sont situés à une demie épaisseur de mur, soit à l'extérieur de la frontière d'espace, soit à l'intérieur de cette frontière. Pour

deux espaces contigus, l'enveloppe est donc créée deux fois sur la portion de mur qu'ils ont en commun. L'épaisseur de mur est paramétrable.

Dans la visualisation en mode plan, les espaces sont représentés comme des boîtes, assimilables aux "patates" qui précèdent la plupart des développements d'esquisses. Cependant, la visualisation des solutions apparaîtra bien pauvre à tout autre que le concepteur lui-même qui n'aurait pas les règles de lecture de l'objet présenté.

C'est pourquoi nous avons rajouté des règles de visualisation, qui permettent une lecture du projet plus aisée. Nous les présentons dans la partie dédiée à la prise de connaissance parce qu'elles n'ajoutent rien à la validité des solutions générées, et c'était là notre problème majeur. Elles ont l'avantage cependant, une fois la première visualisation de contrôle effectuée, de permettre au concepteur de mettre en évidence un espace avec une couleur donnée, d'inclure une forme, indiquer un angle dans le but de retravailler la matière première de notre maquette : l'organisation des espaces entre eux.

Actuellement pour utiliser ces règles, il faut les intégrer dans la description initiale et relancer la génération de solutions. Un éditeur de solutions permettrait de changer les caractéristiques de visualisation après génération, sans relancer le traitement, puisque aucun de ces paramètres ne nécessite d'énumération et n'engendre de solution nouvelle. L'éditeur de solutions reste à faire.

Dans les exemples en mode plan qui suivent, nous avons rajouté une visualisation en mode maquette, bien que ce mode soit explicité plus tard dans le manuscrit. Le mode plan sert à vérifier la bonne organisation des espaces entre eux. L'architecte voit le plan, mais l'image mentale qui lui correspond est en trois dimensions. Le mode plan n'est qu'une trace au sol, l'architecte travaille directement en volume. La visualisation en mode maquette a pour objectif de représenter une image mentale correspondant au projet. Nous présentons nos excuses aux architectes pour le graphisme très pauvre que nous avons utilisé ici. C'est un des axes d'amélioration de l'outil de prise de connaissance que d'enrichir la bibliothèque des attributs visuels des maquettes.

3 - 3 - 1 - 1 Couleur

Le premier code de lecture repose sur la couleur, en l'occurrence ici la couleur des sols. Nous avons représenté ici tout espace terminal sous forme de pièce dont les murs sont par défaut uniformes, qu'ils représentent des cloisons, des murs porteurs ou encore une séparation immatérielle entre deux espaces. Le terrain est vert gazon, les espaces extérieurs sont gris, les espaces de la zone à vivre sont rouges (séjour, salon) à jaune (entrée), les espaces de la zone nuit sont bleus (les chambres) à vert tendre (salles de bains). Pour des espaces plus nombreux ou plus complexes, un nouveau code doit être composé.

Si les couleurs par défaut ne conviennent pas, il est possible de les changer avec la règle `couleur()`, qui ne s'applique qu'à la couleur des sols.

3 – 3 – 1 – 2 Aspect des frontières des espaces

Pour la visualisation, il a fallu faire le choix de représenter ou non les murs séparateurs. Dans la description initiale, les espaces et leurs enveloppes sont immatériels, dans la maquette il faut les représenter avec l'indication de leurs frontières. Nous avons choisi par défaut, de cerner chaque espace terminal d'un mur dont l'épaisseur est de 25 cm, ce qui donne une certaine matérialité à l'espace représenté, mais ne correspond ni à l'épaisseur d'un mur extérieur (généralement 33 cm), ni à une cloison intérieure (entre 7 et 15 cm). Ce mur vient surchapper les surfaces dédiées aux pièces. Au stade APD, il faudra rectifier le dessin en fonction de la réelle épaisseur du mur, s'il existe, et afin de respecter les surfaces réelles des espaces du projet.

Pour améliorer la lecture des espaces, on peut jouer sur l'aspect des frontières d'espaces, en variant les types de frontières. La règle `aspect()` permet de modifier l'aspect d'un espace. A ce niveau de visualisation, le découpage en murs n'est pas réalisé. Aussi la règle s'applique-t-elle aux quatre frontières de l'espace en question.

On peut également donner des indications de transparence. Nous avons choisi un autre mode de visualisation pour les espaces intermédiaires : ils seront représentés par leur contour de type fil de fer par défaut. Leur visualisation est importante en phase de mise au point du plan : il est important de déceler rapidement une incompatibilité de positionnement aux niveaux les plus hauts de l'arborescence en cas de blocage. On peut les éliminer du champ de visualisation avec la règle `aspect()`.

Le travail sur des portions d'arbre hiérarchique effectue un changement de qualification des espaces et donc de mode de visualisation : un espace qui était terminal peut être développé et devenir lui-même englobant. Le changement d'échelle et de niveaux de travail est pris en charge lors de la demande de génération de solutions.

Voici une image de solution d'un petit projet :

Terrain	blanc	0	0	0	22	17	5	Terrain
Pavillon	bleu_fonce	4	0	2	14	8	3	Mur
Balcon	rouge	7	0	10	8	3	2	Mur
Puits	jaune	20	0	15	1	1	1	Mur

Modifions les aspects des frontières d'espaces :

Terrain	blanc	0	0	0	22	17	5	Rien
Pavillon	bleu_fonce	4	0	2	14	8	3	Mur
Balcon	rouge	7	0	10	8	3	2	Balcon
Puits	jaune	20	0	15	1	1	1	Plein

En mode plan, `rien` désactive le module de représentation de l'espace, les balcons sont représentés de couleur blanche, avec une frontière fine, le puits devient un objet `plein`.

La figure 79a correspond à la visualisation en mode plan originale. Sur la figure 79b on peut voir les frontières d'espaces modifiées. La figure 79c donne un aperçu de la visualisation 3D en mode maquette qui suivra.

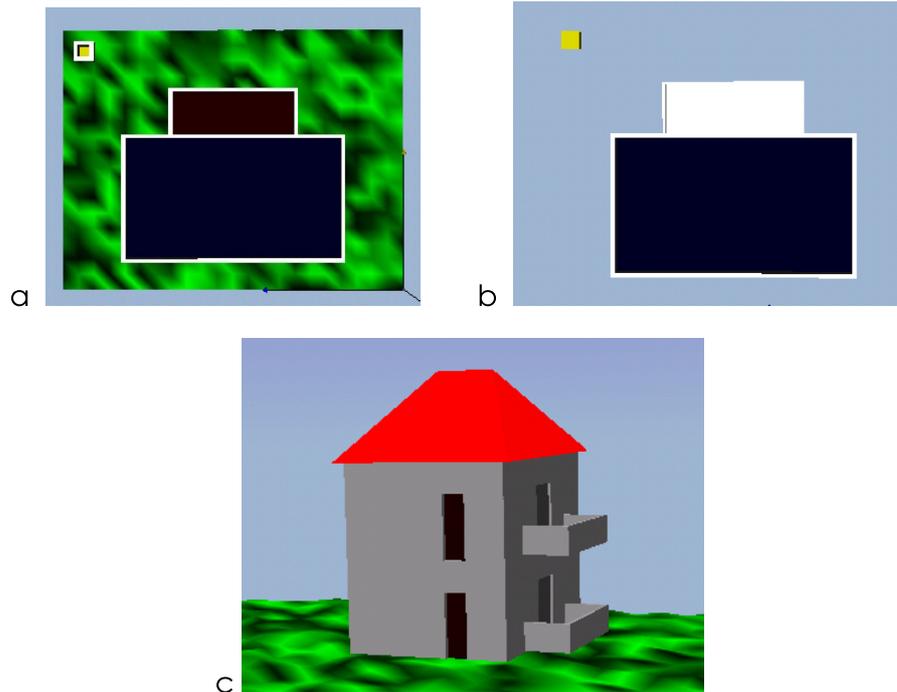


Figure 79 – Modification d'aspect des frontières d'espace

3 – 3 – 1 – 3 Forme

La maîtrise des couleurs et des frontières d'espaces permet de donner une vision plus lisible du projet, lors du travail sur l'esquisse, mais ne doit pas influencer le concepteur. Il existe cependant une contrainte qui peut être demandée par le client, et qui doit être respectée à la visualisation : la forme.

Le placement des volumes s'organise autour de boîtes englobantes, suivant deux axes privilégiés, ce qui n'autorise pas une grande diversité de formes, et appauvrit l'image du projet si l'on s'en tient à la visualisation initiale brute. Il faut pouvoir prendre en compte des demandes particulières telles que « je veux une serre hexagonale », « j'aimerais adoucir les angles »... Ces demandes seront naturellement prises en charge lors du travail de l'architecte sur l'esquisse à partir d'une proposition de plan généré par nos soins. Cependant, pour l'étape de visualisation, il est important d'avoir une idée des volumes, et éventuellement de répondre à la demande de formes simples rompant avec la traditionnelle boîte.

Des contraintes de formes permettent d'associer une forme particulière à un espace. Cette forme sera générée dans les limites de la boîte le représentant,

sans souci de raccordement aux autres volumes. Il n'y a pas de vérification de bonne adéquation de la forme dans les contraintes du projet, il y a seulement une visualisation d'un espace « patatoïde » tel que le concepteur l'imagine, dans une forme spécialement voulue par le client ou par la bonne intégration du projet dans l'environnement extérieur. Là encore, le danger est d'oublier que le vrai problème à ce stade est de choisir la distribution la plus correcte des volumes, dont l'enveloppe n'est pas encore complètement figée, et non la joliesse du rendu qui n'est pas garante de la qualité du projet.

La figure 80 illustre l'avantage de lisibilité que l'on peut trouver à forcer une forme dès la visualisation en mode plan. La forme est conservée ensuite lors de la visualisation en mode maquette.

Terrain blanc		0	0	0	25	25	5	Terrain
Aile1	bleu_fonce	12	0	10	6	4	4	Mur
Aile2	turquoise	8	0	14	4	6	4	Mur
Rotule	vert_clair	9	0	11	3	3	3	Cylindre

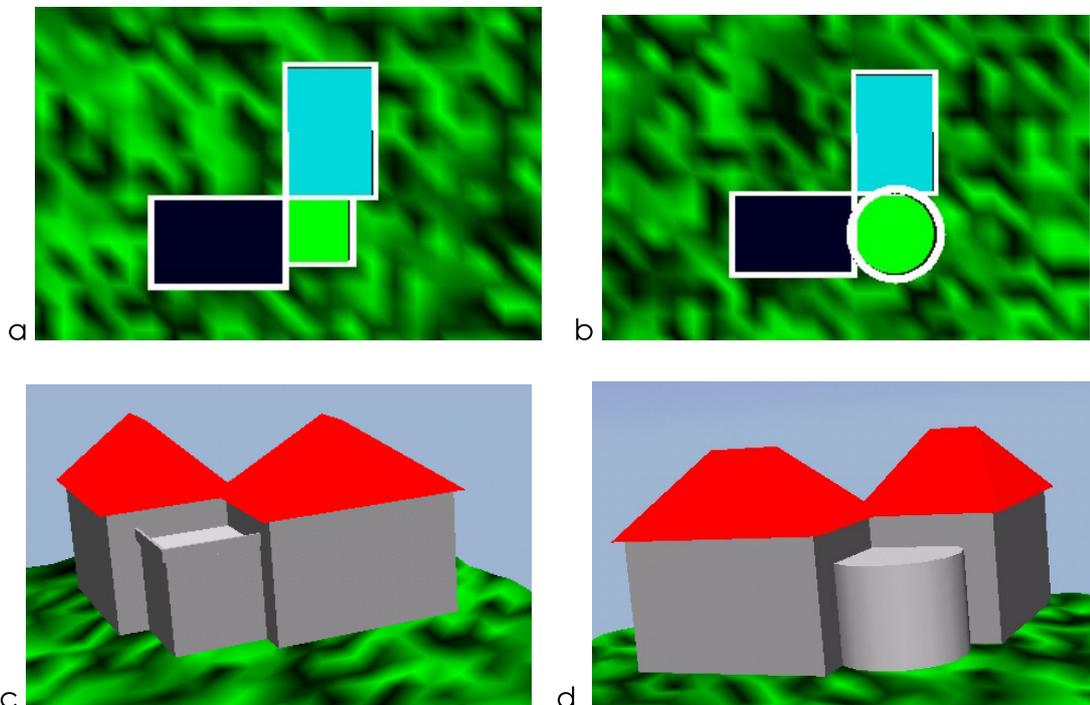


Figure 80 – Modification d'une forme d'espace
a) Sans la règle forme() – b) Avec la règle forme(cylindre)
c) et d) vues en mode maquette des plans a et b

De la même façon, la multiplicité des espaces rectangulaires occasionne de nombreux angles et cassures en façade. Faut-il laisser le soin à l'architecte de reprendre ces défauts mineurs pour les magnifier, ou faut-il de façon directive, lisser les façades lorsqu'il y a trop d'angles ? Faut-il casser les angles droits et les remplacer par de courbes ou des angles plus doux à l'œil ?

Cette question sur la maîtrise de l'aspect en façade mérite d'être posée, notre travail actuel ne permet pas d'y répondre pour l'instant. Nous

envisageons cependant de proposer des contraintes de formes et d'adoucissement des angles afin de lancer le débat avec des architectes utilisateurs sur les limites à ne pas dépasser. Plus on donnera d'indications visuelles de forme tôt, plus on risque de limiter l'émergence de formes possibles dans l'imaginaire de l'architecte.

3 – 3 – 1 – 4 Angle

Que serait l'arche de la défense sans le « déhanchement » de la structure intérieure ? Il n'est pas envisageable pour l'instant de prendre en compte des boîtes complexes disposées suivant différents angles. La structure simple des informations que nous manipulons devrait être modifiée. W. RUCHAUD a étudié les possibilités d'énumération sur volumes orientés [RUC 02].

Pour la production de maquettes représentant des espaces bâtis, qui est notre problème majeur, nous avons observé que le système des boîtes englobantes est satisfaisant dans la majorité des cas. Les découpages en façades apportent une richesse de volumétrie intéressante. Il faut cependant prendre en compte le fait qu'un bâtiment peut être conçu de plusieurs ailes orientées avec les angles privilégiés des tables à dessin : 30, 45 et 60 degrés, ou qu'un accident naturel oblige un mur à suivre un certain angle.

La règle `angle()` n'a d'incidence qu'à la visualisation. On peut décider qu'un espace sera disposé avec un certain angle par rapport à son axe naturel dans la maquette. Nous laissons le libre choix de l'angle au concepteur. Les calculs de pénétrations de volumes, de modifications de surfaces ou autres effets de bord ne sont pas pris en charge : il s'agit simplement d'améliorer la visualisation.

L'exemple suivant montre un espace de circulation en rotule entre deux ailes de bâtiment. Les organisations internes ont été étudiées dans des boîtes, la boîte de circulation a été surdimensionnée par le concepteur en prévision de la rotation d'une des ailes.

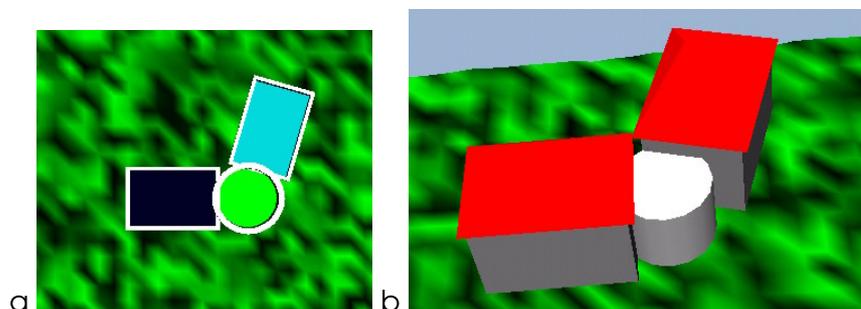


Figure 81 – Modification d'un angle - a) vue mode plan - b) vue mode maquette

3 – 3 – 2 Extraction de solutions

Nous avons choisi de représenter dix-huit solutions sur un écran. Avant d'arriver à ce stade, il est demandé à l'architecte de choisir son mode d'extraction : il peut afficher la première solution en plein écran, les dix-huit premières solutions par pas de 1, 10 ou 100, dix-huit solutions réparties de façon homogène sur l'ensemble des solutions ou demander une extraction sur critère.

Pour une première prise de connaissance, la répartition homogène semble la plus adaptée. Pour une analyse plus fine, l'architecte choisira l'extraction sur critère. Les critères correspondent chacun à une caractéristique globale à une solution, calculée pour chacune d'entre elle à la façon d'une note. Les scores obtenus sont triés en ordre croissant et décroissant. Seuls les dix-huit meilleurs scores sont gardés pour chaque critère.

Voici le choix actuel des critères proposés à l'architecte :

- le nombre de pièces
- le linéaire du contour extérieur
- le linéaire de baies possible
- le cumul des surfaces
- la mesure des circulations internes
- le nombre d'étages
- la similitude par rapport à un projet type
- la combinaison de plusieurs critères

3 – 3 – 3 Présentation des différents filtres

La notation des solutions en fonction d'un critère simule l'effet d'un filtre qui ne laisserait passer que les dix-huit solutions maximisant ou minimisant chacun des critères.

Le fichier des solutions est entièrement balayé, de façon à calculer les mesures de performance de chaque solution pour chacun des filtres. Ces notes sont ensuite triées par ordre croissant et décroissant, de façon à présenter au module d'extraction les 18 numéros de solutions les plus performantes pour chaque critère.

Lorsqu'il y a égalité des notes, le choix des 18 solutions s'effectue sur une répartition homogène sur l'ensemble des solutions éligibles.

Le nombre de dix-huit solutions est paramétrable. Notre désir initial était de proposer une dizaine de solutions à l'architecte. Les tests ont montré que l'ensemble actuellement visualisé de dix-huit solutions est interprétable par un concepteur.

3 – 3 – 3 – 1 Le nombre de pièces

Le nombre de pièces varie si l'on a inclus des espaces non obligatoires. L'architecte peut privilégier les solutions se rapprochant au mieux des désirs du client, gourmand en espaces le plus souvent. C'est un critère peu sélectif car les écarts sont faibles entre paquets de solutions. Ce critère doit être combiné à d'autres.

Ne sont pas comptabilisés les espaces de circulation.

3 – 3 – 3 – 2 Le linéaire du contour extérieur

Plus il y a d'accidents de façade, plus la volumétrie est riche, plus la construction risque de coûter cher. L'architecte peut visualiser les solutions potentiellement les plus intéressantes visuellement, ou les moins chères. Ce calcul est réalisé sur le contour du rez-de-chaussée.

Les deux extractions suivantes montrent des solutions issues du même projet.

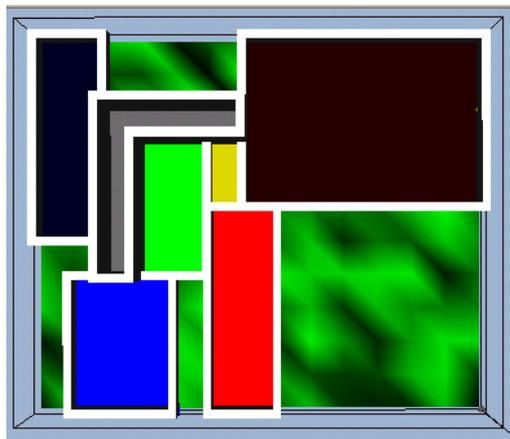


Figure 82 – La solution ayant le contour le plus long

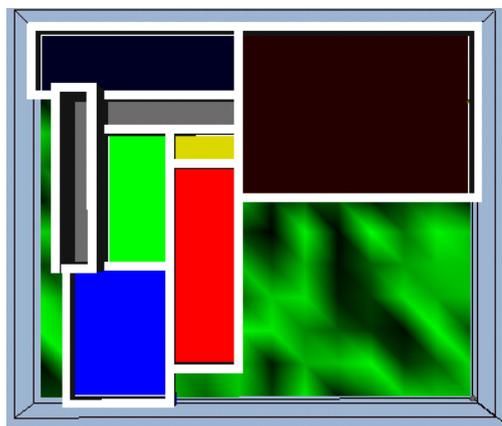


Figure 83 – La solution ayant le contour le moins long

3 – 3 – 3 – 3 Le linéaire de baies possible

Ce calcul diffère du précédent. On étudie chaque pan de mur extérieur et l'on décide si potentiellement il peut recevoir une baie ou non. Il s'agit de repérer les solutions qui proposent le maximum d'éclairage naturel.

Pour le moment le calcul reste grossier : des seuils et des forfaits sont proposés, qui sont fixés en fonction du type de projet. Pour des ateliers d'usine, les forfaits de linéaire de façade sont élevés : 40% du linéaire du pan de mur par défaut. Pour un logement, un pan de mur qui mesure entre 3 et 5 mètres accueille potentiellement une porte-fenêtre standard de 1,4 m, par exemple. Ce critère demanderait à être affiné en fonction des espaces sur lesquels donnent les murs extérieurs, et de l'orientation des baies, pour une étude plus approfondie de l'efficacité de l'éclairage naturel d'une solution.

3 – 3 – 3 – 4 Le cumul des surfaces

Le but d'une bonne conception est de maximiser les surfaces à vivre. Ne sont pas comptabilisées les surfaces des espaces de circulation ou de service de type WC et bains.

3 – 3 – 3 – 5 La mesure des circulations internes

Ce critère intéresse spécialement les clients handicapés ou âgés qui veulent minimiser leurs déplacements dans un logement. Le calcul des trajets reste approximatif, le placement des portes de communication n'ayant pas encore été réalisé. Nous cumulons les distances des centres de chaque pièce à vivre au centre de l'entrée. Cette distance est calculée étage par étage. On cumule ensuite par étage la distance des centres des espaces par rapport au centre d'un espace de circulation référent, et on ajoute enfin les distances des centres des espaces référents au centre de l'entrée (ce qui correspond à peu près aux hauteurs des circulations verticales). Ce calcul donne plus une idée du regroupement des espaces qu'une réelle approximation des circulations.

Un éditeur de solution permettrait, dans le cas de déplacements spécifiques, pour les circuits de nourriture dans un restaurant par exemple, de sélectionner un type de déplacement à étudier particulièrement et de faire remonter dans nos dix-huit solutions visualisables, celles qui maximisent ou minimisent ce critère.

3 – 3 – 3 – 6 Le nombre d'étages

Pour un terrain assez étendu, les solutions peuvent se présenter avec un nombre d'étages divers. Comme ce critère n'est pas très sélectif en lui même, l'architecte le combinera certainement avec un autre critère. Nous étudierons la possibilité de l'intégrer à terme dans le critère de mesure des circulations internes.

3 – 3 – 3 – 7 La similitude par rapport à un projet type

Comment mesurer la distance d'un projet par rapport à son idéal, cet idéal n'ayant aucune matérialité puisqu'on ne connaît pas ses coordonnées exactes ? C'est une question qui s'est posée à la phase de diagnostic pour mesurer les écarts entre les descriptions d'un projet type et d'un projet en cours. Le problème est posé ici différemment : on connaît les dimensionnements et les positions des espaces du projet en cours.

Les données relatives au projet type dont nous disposons, et qui font de lui un projet type, choisi par le concepteur en début de phase de description du projet, sont les suivantes :

- nombre de pièces
- organisation hiérarchique des espaces
- caractéristiques et contraintes sur chaque espace
- linéaire idéal de circulations internes
- linéaire idéal de baies
- linéaire idéal de contour
- nombre d'étages idéal
- surface idéale par étage

Les trois premiers critères ont déjà servi, à l'étape de vérification de faisabilité, lors du calcul de distance entre deux descriptions de façon à produire un diagnostic au concepteur.

Les cinq critères suivants sont fixés dans un premier temps par l'architecte responsable de la connaissance dans le système d'informations, puis peuvent être rajustés au cours de l'exploration d'un grand nombre de solutions, en vue de l'établissement d'un concept véritable, correspondant au projet type. On pourrait également disposer d'un module d'apprentissage automatique proposant des valeurs en fonctions des projets précédents.

Actuellement la note de similitude est calculée par le cumul de éléments suivants (PT : Projet Type - PS : Projet Solution)

- différence du nombre de pièces au carré
- différence de linéaire de circulation au carré
- différence de linéaire de baies au carré
- différence de linéaire du contour au carré
- différence de surface des espaces entre eux au cube
- différence de surface par niveau au cube

$$\begin{aligned}
\text{Note de similitude_pour_filtre} = & \\
& (\text{valeur absolue (nombre de pièces PT – nombre de pièces PS) })^2 \\
& + (\text{valeur absolue (linéaire circulation PT – linéaire circulation PS) }) \\
& + (\text{valeur absolue (linéaire baies PT – linéaires baies PS) })^2 \\
& + (\text{valeur absolue (linéaire contour PT – linéaire contour PS) }) \\
& + (\sum_{\text{pour chaque espace commun aux deux projets}} \text{abs(surface esp. PT – surface esp. PS) })^3 \\
& + (\sum_{\text{pour chaque niveau}} \text{abs(surface niveau. PT – surface niveau. PS) })
\end{aligned}$$

Figure 84 - Formule de calcul de similitude entre deux projets pour filtrage

Les mesures sont données en mètres ou mètres carrés. Moins la note est élevée, plus la solution est proche de l'idéal. Le calcul de la note de similitude s'effectue une fois que les autres critères sont pondérés. Voici une image du résultat des calculs pour la solution 0, repérée dans cet exemple comme étant celle correspondant au projet type (sa note de similitude est nulle).

[Solution 0 - Debut scene]									
Terrain	0	0	0	24	24	5	blanc	Terrain	
Pavillon	5	0	0	19	18	5	rouge	Fil_de_fer	
ZoneJour	5	0	0	10	18	5	rouge	Fil_de_fer	
ZoneNuit	15	0	1	9	12	5	bleu_fonce	Fil_de_fer	
Garage	0	0	0	5	9	5	gris_fonce	Mur	
Chambre1	15	0	1	9	5	5	turquoise	Mur	
Chambre2	19	0	6	5	7	5	bleu_pale	Mur	
Bains	15	0	7	4	5	5	vert_clair	Mur	
Entree	13	0	0	2	7	5	rose_saumon	Mur	
Cuisine	6	0	0	7	5	5	rose_tyrien	Mur	
Sejour	5	0	5	8	13	5	rouge	Mur	
WC	14	0	7	1	7	5	jaune	Mur	
Degt	15	0	6	4	1	5	blanc	Mur	
[Notes]									
Nombre d'espaces				13					
Lineaire du contour				110 m					
Nombre de points				20					
Lineaire de baies				21 m					
Surface				77.25 m2					
Circulation				58 m					
Nombre de niveaux	1			Niv 0			77.25		
Coeff. de similitude				0					
[Solution 0 - Fin scene]									

Figure 85 - Exemple de solution avec critères de filtre pondérés

Pour calculer le linéaire du contour et celui des baies, il a fallu d'abord repérer quels sont les points significatifs du contour. Ce calcul sera expliqué au chapitre 3 - 3 - 4.

Des tableaux récapitulent les 18 valeurs retenues pour chaque filtre. La figure 86 en représente un extrait. Pour cet exemple, j'ai travaillé sur un fichier de 14 solutions seulement.

TABLEAUX DES CRITERES

TABLEAU 1 - NOMBRE D'ESPACES - CROISSANT . . .

TABLEAU 2 - NOMBRE D'ESPACES - DECROISSANT . . .

TABLEAU 3 - LINEAIRE CONTOUR - CROISSANT

Notes	96	96	98	98	108	108	110	110	110	*
Adresse	714	4944	2832	7056	5472	1248	1776	167	6000	*
Notes	110	112	112	112	114	0	0	0	0	*
Adresse	3360	2304	6528	3888	4416	0	0	0	0	*

TABLEAU 4 - LINEAIRE CONTOUR - DECROISSANT

Notes	114	112	112	112	110	110	110	110	108	*
Adresse	4416	3888	6528	2304	3360	6000	167	1776	1248	*
Notes	108	98	98	96	96	0	0	0	0	*
Adresse	5472	7056	2832	4944	714	0	0	0	0	*

TABLEAU 5 - NOMBRE DE POINTS DU CONTOUR - CROISSANT

Notes	16	16	16	6	18	18	18	18	18	*
Adresse	714	2832	4944	7056	1248	3360	3888	4416	1776	*
Notes	18	18	18	18	20	0	0	0	0	*
Adresse	5472	6000	6528	2304	167	0	0	0	0	*

TABLEAU 6 - NOMBRE DE POINTS DU CONTOUR - DECROISSANT . . .

TABLEAU 7 - LINEAIRE BAIES - CROISSANT

Notes	20	20	21	21	21	23	23	23	23	*
Adresse	714	2832	167	4944	7056	1248	3360	3888	4416	*
Notes	23	23	24	24	24	0	0	0	0	*
Adresse	1776	2304	6000	6528	5472	0	0	0	0	*

TABLEAU 8 - LINEAIRE BAIES - DECROISSANT . . .

TABLEAU 9 - SURFACE - CROISSANT

Notes	7350	7375	7375	7400	7475	7500	7500	7525	7575	*
Adresse	5472	4944	6000	6528	1248	714	1776	2304	7056	*
Notes	7675	7700	7700	7725	7725	0	0	0	0	*
Adresse	3360	3888	2832	4416	167	0	0	0	0	*

TABLEAU 10 - SURFACE - DECROISSANT . . .

TABLEAU 11 - CIRCULATIONS INTERNES - CROISSANT

Notes	55	55	55	55	56	57	57	57	57	*
Adresse	714	2832	4944	7056	5472	3888	1776	1248	6000	*
Notes	57	57	58	58	58	0	0	0	0	*
Adresse	6528	3360	4416	2304	167	0	0	0	0	*

TABLEAU 12 - CIRCULATIONS INTERNES - DECROISSANT . . .

TABLEAU 13 - NOMBRE DE NIVEAUX - CROISSANT . . .

TABLEAU 14 - NOMBRE DE NIVEAUX - DECROISSANT . . .

TABLEAU 15 - SIMILITUDE - CROISSANT

Notes	0	1300	1600	2400	2500	15000	52800	52900	53600	*
Adresse	167	3360	3888	4416	2832	7056	1776	1248	2304	*
Notes	54100	65900	66100	66600	66800	0	0	0	0	*
Adresse	714	6000	5472	4944	6528	0	0	0	0	*

TABLEAU 16 - SIMILITUDE - DECROISSANT . . .

Figure 86 - Extrait du tableau des critères

On remarque que les notes de similitude s'étendent de 1300 à 66800. Le but était de bien marquer les écarts, ce qui est le cas sur cette série de solutions. Il nous faudra compléter ces tests et rajuster, si besoin est, les modes de calcul par l'exploration d'un plus grand nombre de solutions.

Ce critère est intéressant dans le cadre de marchés publics par exemple, où l'architecte doit convaincre le maître d'ouvrage, maire ou président d'un office d'HLM, que les logements qu'il a conçus répondent à des normes strictes.

3 – 3 – 3 – 8 La combinaison de plusieurs filtres

Il s'agit ici de faire remonter dans la visualisation des dix-huit solutions, les solutions répondant au mieux aux critères choisis par l'architecte. On gardera en priorité les solutions qui sont citées le plus souvent dans les dix-huit meilleures solutions par critère, et on complètera s'il y a lieu, avec les premières suivantes dans pour chacun des critères retenus.

Cette fonction n'est pas programmée actuellement.

3 – 3 – 3 – 9 Filtres complémentaires

Nous nous sommes arrêtés là quant à la définition des filtres actifs sur nos solutions. Cependant, pour l'éditeur de solution dont la réalisation devrait suivre ce travail, nous proposons des filtres complémentaires, toujours dans le but d'aider le concepteur à choisir les solutions qui répondent le mieux à ses préoccupations.

Les filtres complémentaires demandent une analyse plus poussée de la géométrie de chaque solution proposée.

Lors de la génération des solutions apparaissent quelques fois des effets de bord que le concepteur pouvait difficilement prévoir au départ. C'est par exemple un espace mal proportionné, ce qui peut arriver lorsque l'échelle est à un niveau bas. Sur l'exemple suivant, l'espace en jaune correspond à des toilettes (WC et lavabo). La surface et le placement sont corrects, la largeur, à l'échelle 2, a été ramenée à 50 cm. On peut utiliser des contraintes de largeur exactes (ici ce serait effectivement une bonne solution que de fixer la largeur minimale des WC à 1m), mais on se prive des possibilités novatrices d'une énumération. Ici, cet espace invivable n'est pas concevable, la solution doit être déclassée, voire éliminée, ainsi que toutes celles qui présentent un tel défaut.

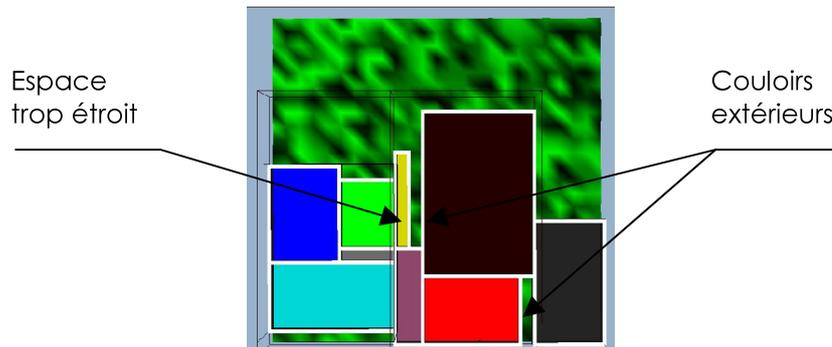


Figure 87 – Exemple d'une solution avec défauts

Le premier filtre complémentaire que nous proposons est une recherche de motif sur espace qualifié d'invalidé, ce qui aurait pour effet d'éliminer la solution. Des validations peuvent être demandées au concepteur avant suppression définitive des solutions.

Le deuxième filtre complémentaire est aussi une recherche de motif, mais pas sur les espaces eux-mêmes, plutôt sur une configuration d'espaces. Ici, dans cet exemple décidément mauvais, on remarque deux « couloirs extérieurs », agrémentant dans une certaine mesure la façade, mais n'étant pas acceptables à l'échelle d'un logement. Coûteux à produire, inefficaces au niveau de l'éclairage naturel, difficiles à maintenir et à nettoyer, en un mot : inutiles. Toutes les solutions présentant un tel motif, dont il faudrait fixer les proportions, devrait être éliminée.

Enfin, un troisième filtre moins « agressif » permettrait le repérage de groupes de solutions et l'extraction d'une solution moyenne par groupe. On est proche de la classification opérée par L. CHAMPCIAUX pour améliorer la prise de connaissance [CHA 98]. Pour certains espaces prépondérants d'un projet (pour un pavillon on choisira par exemple le séjour, les chambres et le garage), il s'agit de calculer le centre de gravité pondéré de la solution sur le terrain. La pondération de chaque espace est au choix du concepteur. Chaque solution suivante est notée ainsi. On rapproche toutes les solutions ayant la même note, à un seuil plus ou moins grand près, de façon à déterminer des groupes de solutions représentatifs, dont la solution moyenne serait par exemple l'élément médian de l'intervalle.

En fonction du nombre d'intervalles ainsi formés, le concepteur peut décider de modifier le seuil à partir duquel on passe d'un groupe à l'autre de solutions. Chacune des solutions représentant un groupe doit être visualisée, comme autant de réponses à un projet donné. Dans notre exemple avec garage, on trouvera le groupe des solutions où le garage est à l'Est du pavillon, et le séjour est traversant (double orientation). Puis on aura le groupe des solutions avec le garage à l'Ouest, avec les deux chambres alignées. Pour faire son choix et retenir une solution pertinente, le concepteur doit pouvoir passer en revue un groupe et choisir la solution représentative lui-même. L'individu médian représentant un groupe de solutions correspond au concept de solution topologique défini par B. MEDJDOUB et B. YANNOU [MED00].

Les filtres complémentaires ne sont pas implémentés à l'heure actuelle. Parmi les filtres présentés, il y en a un qui occasionne une série de calculs spécifiques : l'extraction des contours.

3 – 3 – 4 Mode d'extraction des contours

La connaissance des contours extérieurs du bâtiment intervient dans différents filtres. Ce calcul est effectué avec en entrée les seules informations de base connues d'une solution : x, y, z, largeur, longueur et hauteur de chacun des espaces du projet. Nous avons choisi de travailler en deux dimensions (x et z) sur le contour du rez de chaussée.

Dans un premier temps nous projetons les coordonnées des coins des espaces sur deux droites horizontales et verticales entourant le bâtiment. Puis nous construisons une liste de points de contours. Cette liste est lissée de façon à éliminer les points indésirables qui ne correspondent pas à un point de rupture de l'enveloppe. Puis la liste est triée, pour ranger les points dans l'ordre de contour de l'enveloppe.

Prenons un exemple de trois espaces

Terrain blanc	0	0	0	8	4	5	Terrain
Espace_1 vert_clair	0	0	2	2	2	2	Mur
Espace_2 turquoise	2	0	0	5	4	2	Mur
Espace_3 bleu_pale	7	0	3	1	1	2	Mur

Figure 88 – Image d'une solution dont on veut chercher les contours

qui correspond à cette visualisation en mode plan :

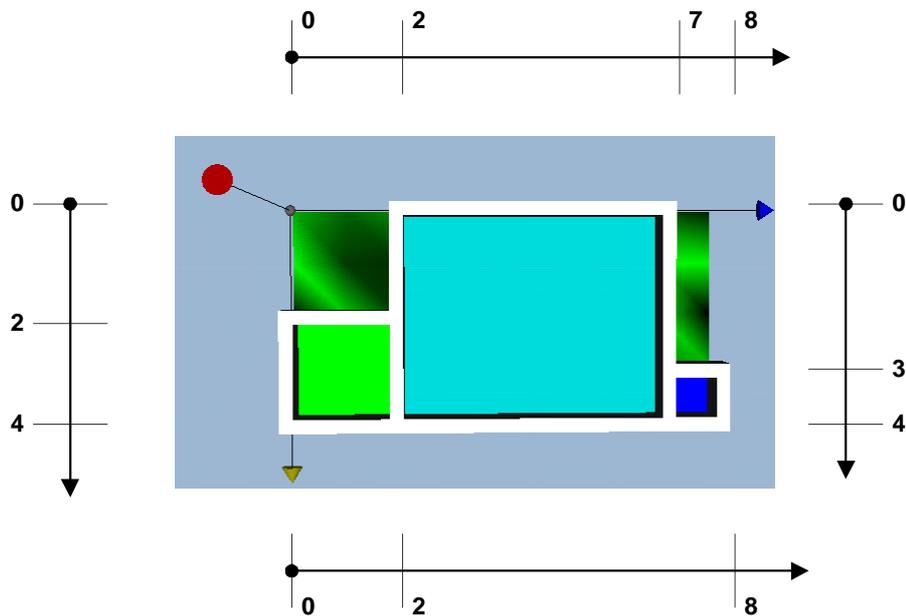


Figure 89 – Expression des coordonnées de la solution

3 – 3 – 4 – 1 Projections

Les coordonnées en x et z de chaque espace sont systématiquement balayées. Dans le tableau horizontal haut on range les plus petites valeurs de z, dans le tableau horizontal bas, on range les plus grandes valeurs de z, dans le tableau vertical de gauche seront rangées les petites valeurs de x, dans le tableau vertical de droite seront rangées les plus grandes valeurs de x.

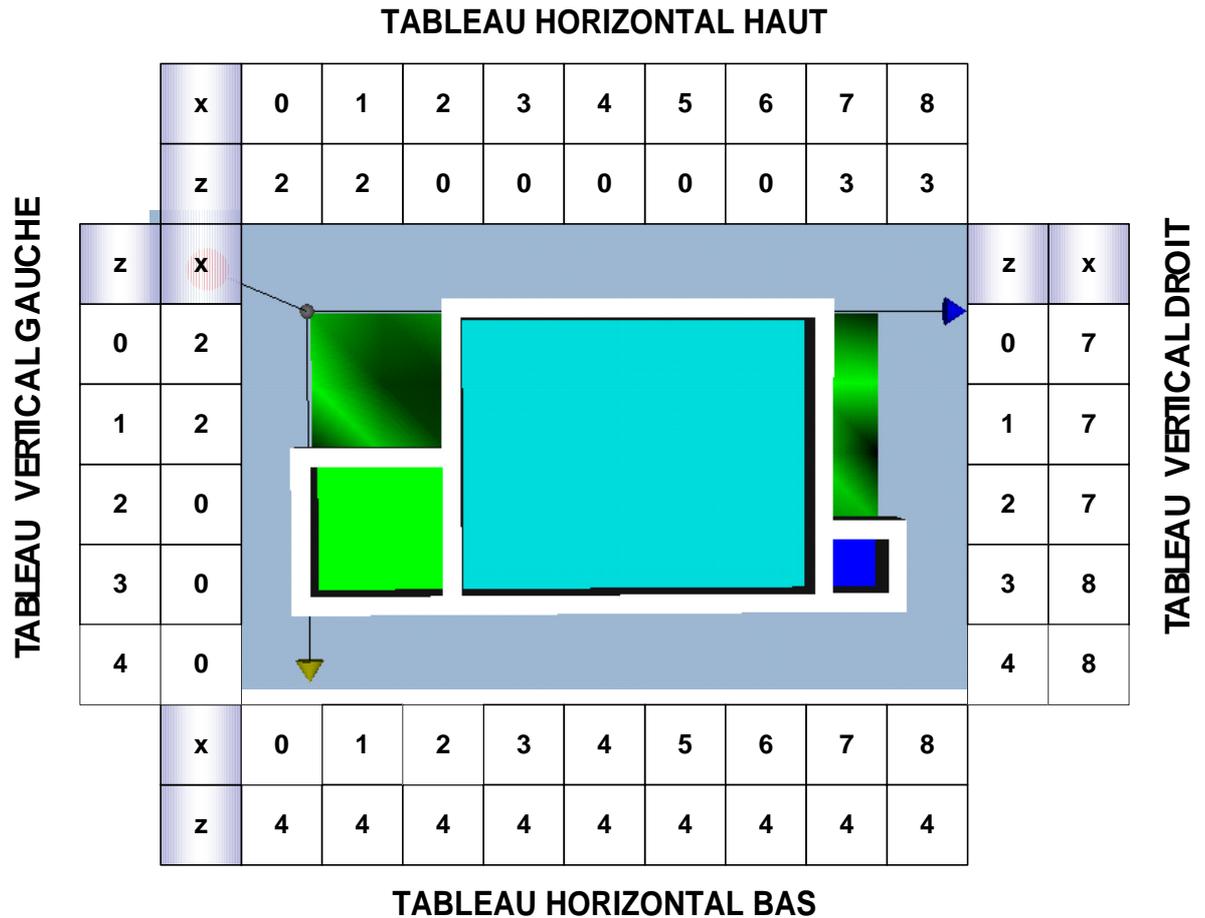


Figure 90 – Tableaux des projections des coordonnées des contours

3 – 3 – 4 – 2 Construction d'une liste de points

Sont sélectionnés les premiers et derniers points significatifs des tableaux, et ceux qui sont au voisinage d'une rupture (points notés en grisé). Pour chaque rupture deux points sont créés, avec soit le même x pour un tableau horizontal, soit le même z pour un tableau vertical

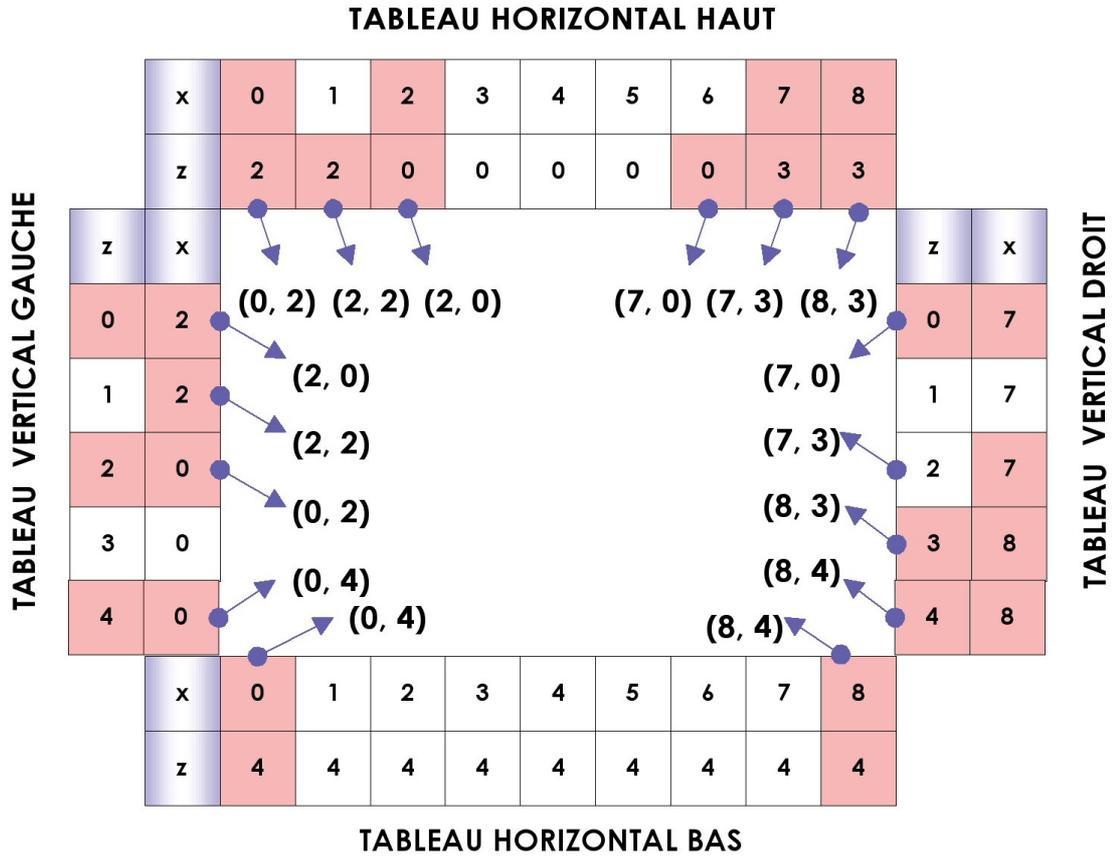


Figure 91 – Mode de construction des listes de points du contour

A partir de la lecture du tableau horizontal haut :

(0 , 2) (2 , 2) (2 , 0) (7 , 0) (7 , 3) (8 , 3)

A partir de la lecture du tableau horizontal bas :

(0 , 4) (8 , 4)

A partir de la lecture du tableau vertical gauche :

~~(2, 0)~~ ~~(0, 2)~~ ~~(2, 2)~~ ~~(0, 4)~~

A partir de la lecture du tableau vertical droit :

~~(7, 0)~~ ~~(7, 3)~~ ~~(8, 3)~~ ~~(8, 4)~~

Les doublons (barrés) ne sont pas insérés, les points sont triés dans l'ordre des x croissants, ce qui réduit la liste à :

```
Point 0 2
Point 0 4
Point 2 0
Point 2 2
Point 7 3
Point 7 0
Point 8 3
Point 8 4
```

3 – 3 – 4 – 3 Lissage de la liste de points

Il reste à enlever des points indésirables, qui correspondent à des coins d'espaces, mais pas à une rupture de continuité de l'enveloppe extérieure. On les décèle en comptant le nombre de points ayant la même abscisse ou la même ordonnée. Ce nombre doit être pair (2 ou 4 pour notre système de projection à quatre tableaux). S'il est impair, il faut éliminer les points intermédiaires. S'il est pair avec deux points indésirables, cela a pour effet de segmenter inutilement un mur long en trois tronçons, sans effet sur les calculs suivants.

3 – 3 – 4 – 4 Tri de la liste de points

Enfin la liste des points est triée en prenant alternativement un point ayant la même abscisse que son précédent, puis la même ordonnée, en rebouclant sur le premier. Voici le tracé de l'exemple simple étudié ci-dessus.

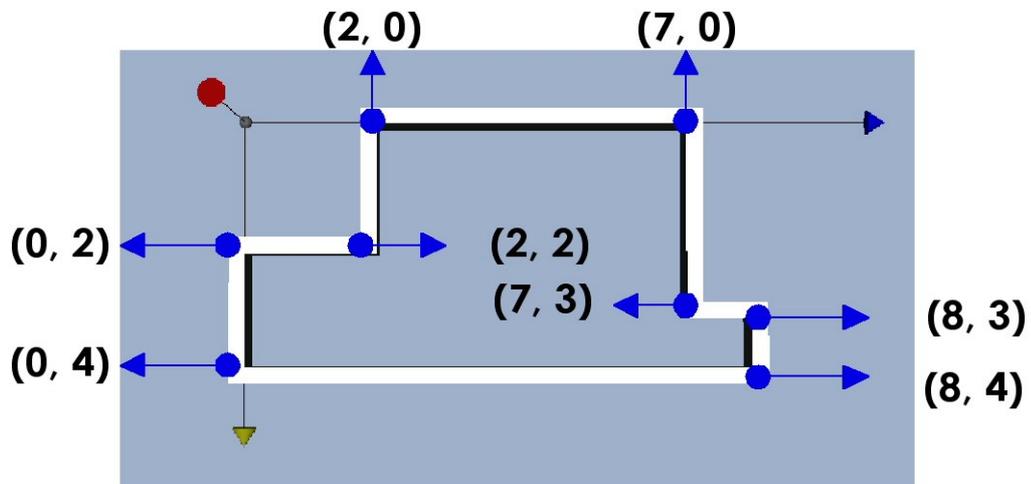


Figure 92 - Extraction du contour de la solution

3 – 3 – 4 – 5 Cas particuliers

Il nous a fallu tenir compte également des cas particuliers tels que les espaces intérieurs englobés (patio, atrium, cour...) ou les espaces en redents nécessitant des lignes de projection plus nombreuses. Avec nos quatre lignes de projection et compte tenu des informations minimum dont nous disposons, les redents intérieurs ne sont pas décelables.

a)	Terrain	0	0	0	8	4	5	blanc	Terrain
	Espace_1	0	0	2	3	2	2	vert_clair	Mur
	Espace_2	2	0	0	3	2	2	turquoise	Mur
	Espace_3	3	0	3	5	1	2	bleu_pale	Mur
	Espace_4	6	0	0	1	3	2	jaune	Mur

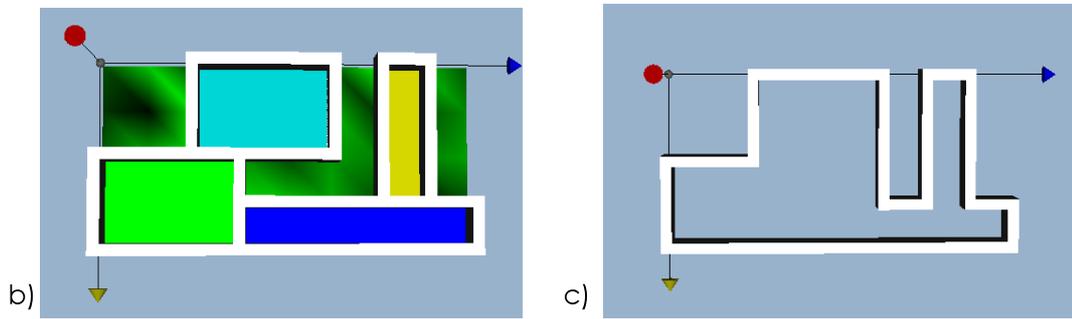


Figure 93 – Cas particulier de contour avec redent intérieur
 a) solution b) visualisation mode plan c) visualisation mode contour

Le problème peut se régler par le traitement particulier des espaces ouverts intérieurs (patio, atrium, cour...), à condition que l'architecte définisse de façon explicite l'espace ouvert entouré par les espaces habitables. A notre description antérieure nous rajouterons un espace « cour » afin que le redent soit correctement traité. C'est une démarche qui semble cohérente, le concepteur pouvant en mode plan s'apercevoir qu'il a la possibilité de créer une cour (qui devient un espace obligatoire) entre deux bâtiments, puis rajouter des règles de visualisation qui permettent de traiter l'espace cour comme un espace à part entière, ce qui ajustera les calculs sur contours.

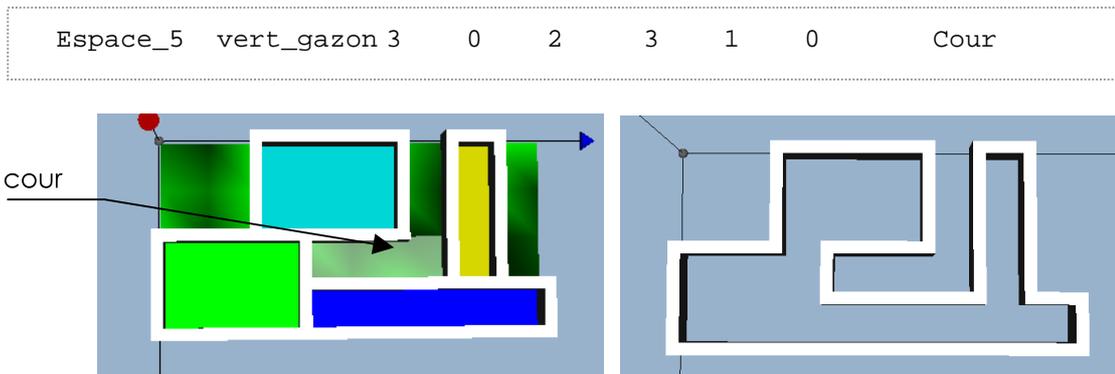


Figure 94 – Traitement du redent intérieur par ajout d'une cour

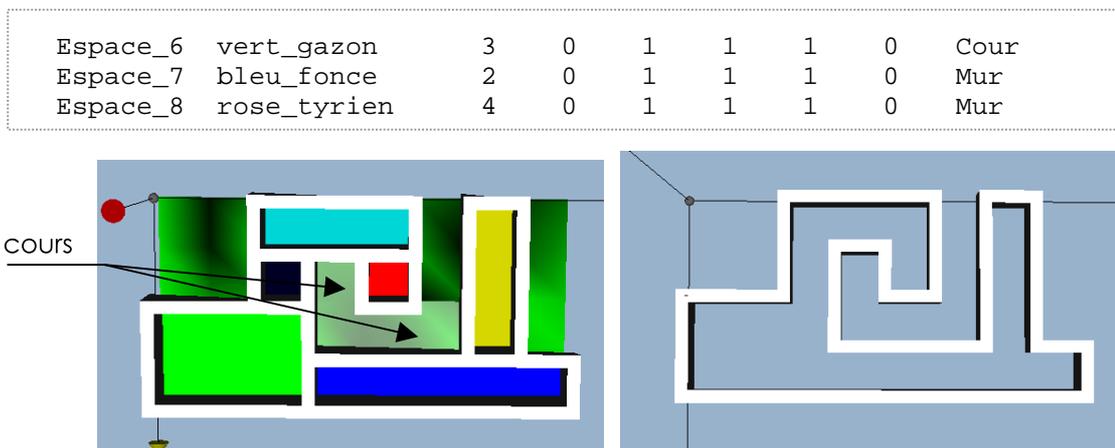


Figure 95 – Traitement du redent intérieur par ajout de deux cours

3 – 3 – 4 – 6 Vue en mode contours

Une vue associée à la visualisation en mode plan est disponible afin de mieux étudier les contours de certaines solutions. Une vue individuelle plein écran pour une seule solution est également prévue.

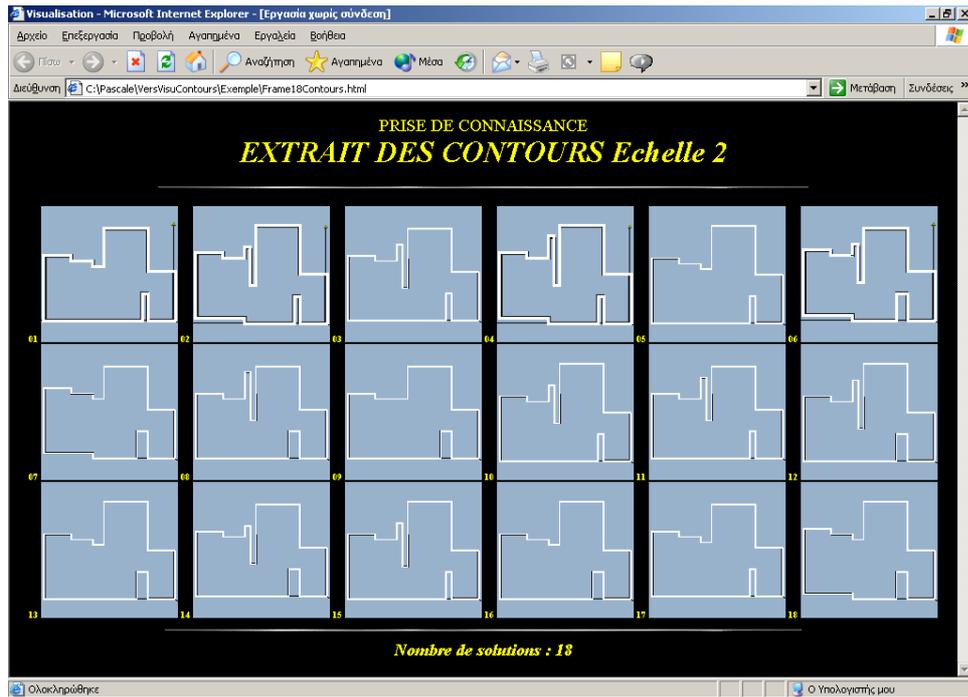


Figure 96 – Ecran d'étude des contours

3 – 3 – 5 Visualisation en mode maquette volumétrique

Nous en arrivons maintenant au stade ultime de confection de la maquette : un ensemble de solutions a été retenu et il s'agit d'ajouter graduellement de l'information sur les visualisations en mode plan, pour qu'elles prennent l'aspect de véritables maquettes.

Nous proposons une visualisation volumétrique, avec des murs en vraie hauteur, une toiture, des portes et de fenêtres, des textures plaquées sur les murs, des meubles et une visite guidée de l'ensemble.

3 – 3 – 5 – 1 Toiture

Une maison sans sa toiture, c'est difficile à imaginer ! Nous allons proposer dans le module de visualisation en mode maquette des portes et des fenêtres standard, il est difficile de ne pas aller jusqu'à proposer une toiture standard, dernier élément, avant les fleurs sur le balcon, qui habillent la visualisation. Là encore, nous laissons le problème entier. Décider d'une forme de toiture est une tâche non négligeable du travail de conception, qui obéit à des contraintes issues des règlements cadastraux, des règles de l'art, des règles

de bonne intégration dans le paysage, des règles d'esthétismes propres au concepteur. On pourra consulter à ce sujet le travail de B. BOUCHAREB, au sein du laboratoire GAMSAU, qui a mis en œuvre un système expert sur la typologie des toitures [BOU 95]. Il faudrait doubler les contraintes initialement présentées au début du chapitre pour prendre en charge une bonne modélisation de toiture correspondant au projet. Nous nous sommes arrêtés à la proposition d'une toiture standard, au risque d'une visualisation appauvrie. La encore il faut faire un compromis entre la production d'une maquette de travail dont le but est de correctement définir les composants espaces du projet à l'échelle de l'esquisse, et la résolution de problèmes qui ne seront résolus qu'au stade APS, voire APD.

Néanmoins, la toiture est un composant volumétrique important de la maquette. Nous proposons différentes formes standard que le concepteur manipulera comme l'on manipule les pièces d'un LEGO : une idée de toiture s'adaptant plus ou moins bien aux boîtes sur lesquelles elles reposent.

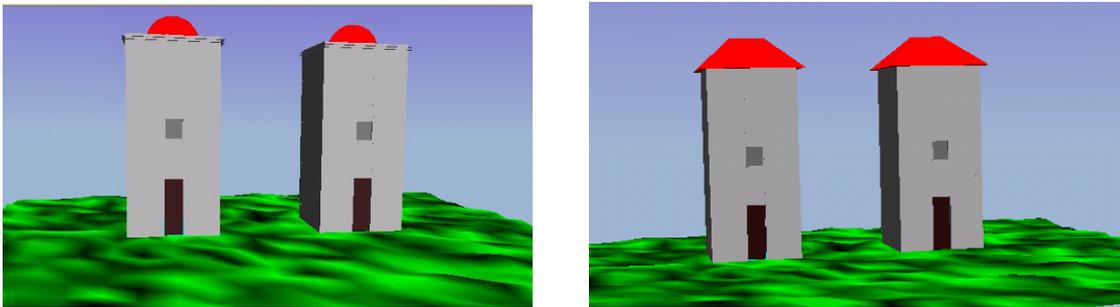


Figure 97 – Exemples de toitures interchangeables

3 – 3 – 5 – 2 Indication des baies

Pour une meilleure vérification visuelle de l'habitabilité des espaces, l'indication des percements est fondamentale : ce sont les percements dans les volumes qui déterminent les rythmes en façade par l'alternance de pleins et de vides, d'ombres et de lumières. Nous considérons l'enveloppe des espaces, au stade de l'esquisse, encore immatérielle (sera-ce une cloison de 7 cm d'épaisseur, un mur en briques isolé et crépi, un simple voilage qui délimitera l'espace ?). Cependant, dans cette enveloppe, nous proposons d'indiquer des baies par défaut : portes et fenêtres standard, le choix des dimensions précises, des placements et des modénatures apparaissant à l'étape ultérieure de la conception.

L'information sur le projet dont nous disposons à cette étape est toujours la même : les espaces sont définis par six variablesinstanciées. Dans le système d'information, nous ferons appel à une base d'objets prédéfinis, reliés chacun à un espace, en fonction d'un projet type. Par exemple, chaque cuisine doit avoir au moins une fenêtre avec une allège haute pour être placée sur l'évier, puis, si l'on peut et par ordre de priorité, on placera une porte fenêtre, puis, s'il reste des pans de mur disponibles et suffisamment larges, on placera des fenêtres plus communes.

Il s'agit d'idées de fenêtres : le concepteur choisira plus tard le modèle qui conviendra le mieux au projet. Les associations standard entre les espaces et les fenêtres par défaut peuvent être personnalisées. Pour un architecte donné ou un projet-type donné, il sera peut-être plus pertinent de placer en priorité une porte fenêtre à un vantail plutôt qu'une fenêtre à allège haute.

Dans le même ordre d'idées, les portes de communication intérieure mesurent, dans le système d'information, un mètre de large et sont placées dans l'axe du mur (probable) recevant la communication. Pour les fenêtres ou portes-fenêtres, des dimensions standard sont proposées. Elles seront également positionnées dans l'axe du mur intérieur les recevant.

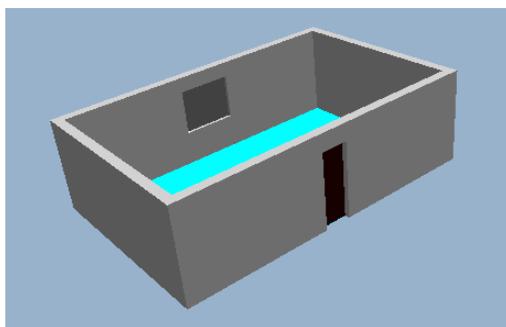


Figure 98 – Placement automatique d'une porte et d'une fenêtre standard

Ce mode de distribution des baies est pernicieux : l'architecte décide des formes, dimensions, positions et habillages des fenêtres en regardant surtout la façade concernée, pour qu'elle garde un aspect équilibré. Ce ne sera pas le cas dans le mode de visualisation choisi ici. On touche les limites de l'outil : lors de l'esquisse, ce sont des « idées » de baies qui sont dessinées. Une instanciation standard risque de fausser l'image que l'on peut avoir du projet. Comment serait perçue la tour Montparnasse avec des fenêtres standard en façade ?

Notre dessein est véritablement de proposer à l'architecte une aide à la bonne conception du plan et à l'émergence des formes. Le problème de l'équilibre et de l'esthétisme des façades reste entier. Une prolongation de notre travail serait certainement d'étudier les contraintes qui lient plan et façades, de façon à mieux gérer les objets placés automatiquement. Nous avons préféré rester dans une optique relativement objective pour ce travail. Les particularités du style, légitimes, doivent être traitées dans un deuxième temps.

La figure suivante montre un projet avec deux rythmes de façades différents. Les baies ont été placées manuellement pour cet exemple, pour montrer que le même projet peut prendre des allures différentes si les proportions et les placements des baies changent. En figure a, les baies accentuent l'impression d'un gros pavillon, en figure b, c'est plutôt d'un petit site industriel dont il s'agit.

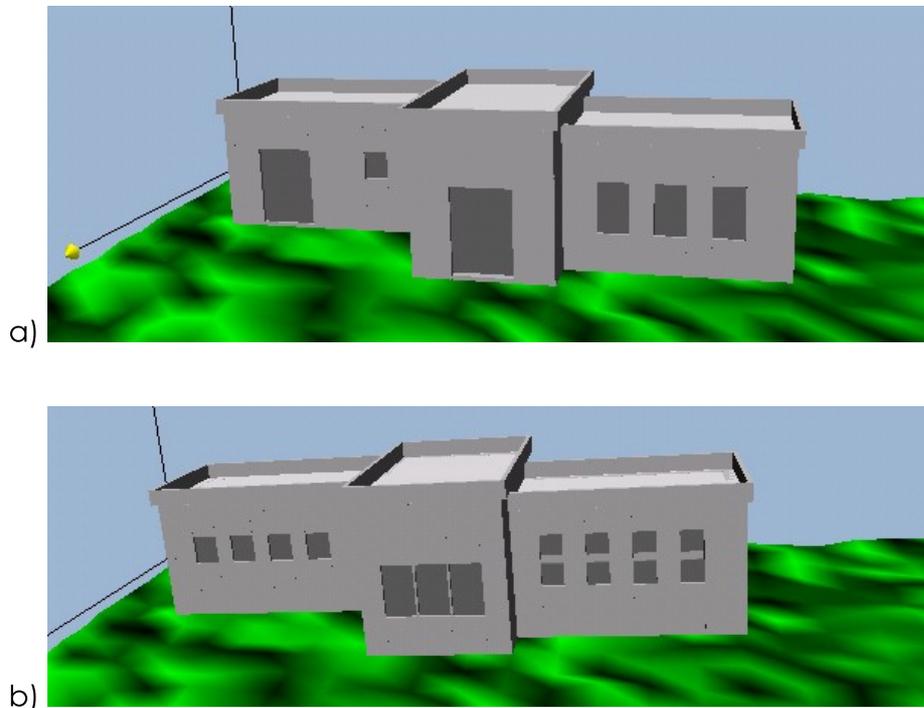


Figure 99 – Etude de rythme en façade

Pour calculer l'implantation des baies, il faut tenir compte des murs, éléments avec lesquels nous n'avons pas encore travaillé. Le jeu de construction initial, combinant les espaces, s'enrichit d'un nouveau composant dont le rôle reste cantonné à la visualisation terminale.

Le module de visualisation en mode maquette crée de l'information sur les baies associées aux espaces et les place dans l'axe des frontières d'espaces. Du coup, les enveloppes, d'immatérielles qu'elles étaient jusqu'à présent, deviennent des murs. Par hypothèse, un espace est composé de quatre pans de murs. Chaque pan recevant une porte ou une fenêtre est décomposé en trois ou quatre pans individuels, avant la baie, sur la baie (linteau), éventuellement sous la baie s'il y a une allège, et après la baie. Les portes de communication communes à deux espaces sont calculées deux fois, une fois pour chaque espace concerné.

Voici une solution extraite d'un ensemble de solutions générées par GNU Prolog, puis retenue par le concepteur, et enrichie par un module de préparation à la visualisation en mode maquette. Dans ce mode de visualisation, nous avons éliminé la trace des éléments intermédiaires englobants.

```
# Garage
Garage gris_fonce 0 0 0 5 9 5 Mur
Porte 5.00 2.04 4.50 PC1 ELEM027 porte de communication
Porte 2.50 2.04 9.00 PG1 ELEM001 porte de garage
Porte 2.50 2.04 0.00 PG1 ELEM000 porte de garage
Fenetre 5.00 3.50 2.50 FE4N ELEM003 fen. de salle de bains
Fenetre 0.00 3.50 4.50 FE4N ELEM002 fen. de salle de bains
```

Figure 100 – Enrichissement d'un espace d'une solution

L'espace garage doit avoir au moins une porte de garage. Ici, la configuration des contours a fait que l'on a pu en placer deux, en face l'une de l'autre. Il était indiqué, dans le descriptif initial, que le garage communiquait avec le séjour : on a créé une porte de communication dans l'axe de la partie commune aux deux espaces. Enfin, Après avoir pris connaissance du projet en mode maquette, j'ai rajouté à l'étage, par calcul manuel, deux fenêtres identiques à celles de la salle de bains et du dégagement pour animer un peu la façade.



Figure 101 – Etude des percements en façade

Lors de l'association d'une baie à un espace, le découpage en pans de murs est effectué et le percement correspond bien à un évidement de la matière. A la génération du code VRML, est rajouté l'appel à un fichier VRML décrivant l'objet standard à intégrer dans le percement. La figure suivante montre un extrait de code généré VRML de visualisation en mode maquette où chaque espace est décomposé en plusieurs pans de murs.

```
# ----- ESPACE CHAMBRE1
un_sol {
  ma_couleur 0.00 0.60 0.60
  mes_points_sol
  [ 3.000 0.000 0.000 11.000 0.000 0.000 11.000 0.000
    5.000 3.000 0.000 5.000]
}
un_plafond {
  ma_couleur 0.00 0.60 0.60
  mes_points_plafond
  [ 3.000 2.450 0.000 11.000 2.450 0.000 11.000 2.450
    5.000 3.000 2.450 5.000]
}
#--- [ Objet_Fenetre ] ---
un_objet {
  mes_dimensions 1.400 1.200 0.080
  ma_couleur 0.300 0.300 0.300
  ici 7.000 1.500 5.000
}
#--- [ Objet_Porte ] ---
un_objet {
  mes_dimensions 0.650 1.990 0.040
  ma_couleur 0.100 0.000 0.000
  ici 7.000 1.020 0.000
}
```

```

#--- [ un mur ] ---
un_mur_opaque {
  mes_dimensions 0.250 2.500 5.250
  ici 3.000 1.250 2.500
}
#--- [ Avant_fenetre ] ---
un_mur_opaque {
  mes_dimensions 3.425 2.500 0.250
  ici 4.587 1.250 5.000
}
#--- [ Sur_fenetre ] ---
un_mur_opaque {
  mes_dimensions 1.400 0.400 0.250
  ici 7.000 2.300 5.000
}
#--- [ Allege_fenetre ] ---
un_mur_opaque {
  mes_dimensions 1.400 0.900 0.250
  ici 7.000 0.450 5.000
}
#--- [ Apres_fenetre ] ---
un_mur_opaque {
  mes_dimensions 3.425 2.500 0.250
  ici 9.412 1.250 5.000
}
#--- [ un mur ] ---
un_mur_opaque {
  mes_dimensions 0.250 2.500 5.250
  ici 11.000 1.250 2.500
}
#--- [ Avant_porte ] ---
un_mur_opaque {
  mes_dimensions 3.775 2.500 0.250
  ici 4.763 1.250 0.000
}
#--- [ Sur_porte ] ---
un_mur_opaque {
  mes_dimensions 0.700 0.460 0.250
  ici 7.000 2.270 0.000
}
#--- [ Apres_porte ] ---
un_mur_opaque {
  mes_dimensions 3.775 2.500 0.250
  ici 9.237 1.250 0.000
}
}

```

Figure 102 – Extrait de code VRML représentant les pans de mur d'un espace

3 – 3 – 5 – 3 Equipement de la maison

Avec le même principe que pour les portes et les fenêtres, nous avons associé dans une table d'objets des séries de meubles standard à placer devant les pans de murs. Le découpage précédent a construit une liste de pans de murs par espace. Pour chacun on connaît ses coordonnées et ses dimensions, et l'on essaie de lui associer un meuble si sa largeur le permet. Dans l'exemple qui suit, le module de préparation à la visualisation a enrichi l'espace chambre1 d'une chaise et d'un lit, dont il indique les coordonnées seulement. Les dimensions des objets standard sont connues dans la table des objets.

Dans l'extrait de code de la figure 103 nous avons dissocié les objets au sol, qui peuvent entraver la marche lors de la visite des espaces, et les objets suspendus (tableaux, luminaires) qui n'encombrent pas l'espace.

```

a) # Chambrel
Chambrel turquoise 15 0 1 9 5 5 Mur
Porte 17.00 2.04 6.00 PC1 ELEM042 porte communication
Fenetre 24.00 3.00 3.50 FE1N ELEM005 fen. std 2 ouvrants
Fenetre 19.50 3.00 1.00 FE1E ELEM004 fen. std 2 ouvrants
Objet_sol 15.65 0.89 3.50 CH1E ELEM007 chaise E->O
Objet_sol 19.50 0.40 3.75 LT2N ELEM006 petit lit standard

```

```

b) #--- [ Objet_sol ] ---
Transform {
  translation 7.82 0.44 1.75
  children DEF Chair Inline
  { url "c:\Pascale\Objets\chaise1.wrl" }
}
#--- [ Objet_sol ] ---
un_objet {
  mes_dimensions 0.900 0.400 2.000
  ma_couleur 0.900 0.000 0.000
  ici 9.750 0.200 1.875
}

```

Figure 103 – Exemple de placement de meubles dans l'espace chambre1
a) enrichissement du fichier solution b) code VRML associé à l'objet chaise

En ce qui concerne les objets standard, la chaise est codée dans un fichier annexe, pour le lit, le fichier n'étant pas disponible, c'est une boîte aux dimensions et à la couleur indiquées dans la table qui sera représentée. Il y a toujours un volume associé à un objet par défaut dans la table des objets.

Il arrive que des clients aient des contraintes très personnelles ayant rapport avec l'encombrement de leur mobilier.

« mon armoire fait 2,5 m de large et je voudrais la placer sur un pan de mur qui la mette en valeur »
« je suis cuisinier et j'ai besoin d'un linéaire de paillasse qui mesure au moins 1,5m »
« je voudrais construire ma maison autour de cet arbre, ou de ce puits »

Il est possible de décrire l'équipement en question comme un objet, mais nous avons vu que le placement des objets n'intervient pas dans la génération des solutions. Or, les contraintes citées plus haut doivent être prises en compte avant la génération.

Pour les objets influant sur le placement des espaces, il est possible de les décrire comme des espaces classiques, en leur associant des règles d'assemblage fixant leurs dimensions et éventuellement leur placement s'il est immuable (cas de l'arbre ou du puits).

Nous avons préféré garder ce mode de fonctionnement seulement pour les équipements contraignants (baignoire obligatoire dans la salle de bains, mobilier exceptionnel). Les placards sont traités comme des espaces habitables avec une porte de communication standard. Il ne faut pas se tromper d'échelle. L'équipement d'une cuisine se fait à l'échelle 1/50^{ème} sur

un plan définitif. L'équipement d'une cuisine au stade de l'esquisse ne signifie rien, encombre la résolution par des contraintes qui peuvent masquer le vrai problème qui est de placer correctement la cuisine dans le projet, en fonction des contraintes de communication avec le garage à tel niveau et le séjour à un autre niveau par exemple, tout en respectant la vue sur le jardin pour surveiller les ébats des enfants, et en ayant des dimensions suffisantes pour que la famille y mange au grand complet.

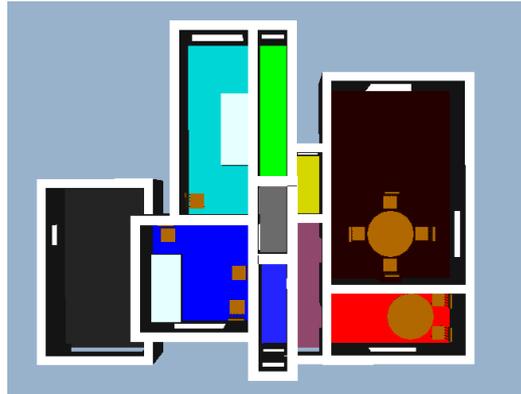


Figure 104 – Exemple d'aménagement par défaut d'un projet

Les règles de visualisation n'interviennent pas dans le placement des espaces mais permettent une meilleure lecture du projet. Pour ce qui concerne l'aménagement spatial ou la décoration intérieure, de nombreux autres logiciels offrent des capacités de rendu bien supérieure à notre système de visualisation.

3 – 3 – 5 – 4 Texture

L'amélioration de la lisibilité peut se faire en texturant certains composants du projet. Nous avons pris l'hypothèse de travailler sur l'espace au début de notre réflexion, et plaquer une texture sur un mur pour indiquer qu'il est en briques nous obligerait à revenir à un mode de pensée par composants constructifs, ce qui n'est pas le but ici. Néanmoins, par souci de lisibilité pour les néophytes, nous avons permis le plaquage de texture standard (parements de briques, différents crépis, lambrisage...).

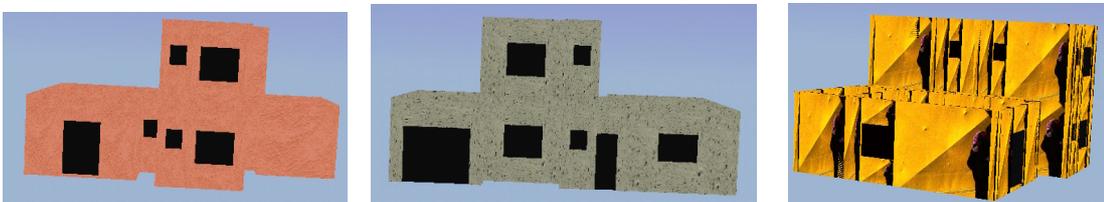


Figure 105 – Exemples d'application de texture

La maquette, qu'elle soit virtuelle ou pas, est un excellent outil de travail pour contrôler quelques hypothèses faites au moment de la prise du parti architectural. Ces hypothèses portent sur les éclairages, les accès, les impressions que le futur visiteur aura en cheminant sur telle portion du projet. Lors de mes études, un atelier d'architecture proposait d'ailleurs comme thème l'analyse d'un projet à partir d'une bande vidéo tournée par une petite caméra (similaire à celles qui sont employées en chirurgie) dans une maquette faite de carton ou de balsa.

Les contrôles qui suivent ne sont pas implémentés mais devront faire partie de l'éditeur de solutions dont nous avons parlé plus haut. En visualisation mode plan, cet éditeur devrait prendre en charge la composition des filtres permettant de faire émerger les meilleures solutions, en mode maquette, son rôle est de permettre de travailler sur une solution à la fois, rajouter les attributs de type baies, toitures ou équipements divers, mais aussi de contrôler des aspects spécifiques du projet.

3 – 3 – 6 – 5 Contrôle de l'éclairage naturel et de l'ensoleillement

Le mode maquette propose des baies standard sur les façades. L'architecte disposera d'un éditeur lui permettant de modifier ou d'affiner les choix effectués.

Dès lors que les surfaces vitrées sont quantifiées, il est possible de calculer des coefficients d'éclairage naturel, en fonction de la surface des pièces concernées. Ce calcul est très important pour les salles de classe, par exemple, où les directives sur ce sujet sont impératives.

Les calculs théoriques (ratio : surface vitrée sur surface au sol) doivent être modulés par la qualité de l'ensoleillement reçu par le bâtiment. Dans le cadre d'une modélisation complète du terrain, qui a juste été ébauchée à l'heure actuelle, nous connaissons les différents bâtiments mitoyens, arbres ou autres reliefs naturels qui accompagnent notre projet. Il faudrait alors pouvoir visualiser les ombres portées à une date et une heure précises pour se rendre compte de l'impact que peut avoir l'environnement sur le projet lui-même.

Cette technique permet aussi d'étudier la meilleure orientation à donner à un bâtiment en fonction des désirs exprimés dans le premier entretien avec le client. Il peut vouloir profiter du premier rayon de soleil dans sa chambre, le matin quand il se lève à sept heures...

Les informations acquises à ce stade occasionneront quelquefois des retours arrière vers le mode plan, afin de choisir une autre configuration de base maximisant tel redent ayant pour rôle d'apporter plus d'ombre à la terrasse... Il doit être possible à tout moment de garder en mémoire les choix de baies, d'orientation, et de les appliquer à une autre solution.

3 – 3 – 6 – 6 Contrôle de l'adaptation au terrain

Le terrain doit être modélisé, ainsi que le contexte environnant, nous l'avons vu pour le contrôle des éclairages.

Le mode maquette est une façon de se rendre compte de l'adaptation du projet au terrain. Les coupes remplissent ce rôle, dans le processus traditionnel. Il existe cependant des cas, pour les terrains ayant une double pente, où il est difficile de construire mentalement l'image des futurs niveaux de terrain à partir de deux ou trois coupes.

Les préoccupations de l'architecte en visualisant sa maquette sur la reconstitution du terrain sont de plusieurs ordres :

- esthétique : quel sera l'impact visuel de la construction dans le paysage ? C'est la question majeure que s'est posée Jean NOUVEL quand il a conçu le génoscope de Boisseuil (proche de Limoges), par exemple. C'est à ce stade qu'on peut proposer un agencement de l'éclairage extérieur mettant en valeur un aspect de la construction, accompagnant le visiteur dans sa découverte des lieux.
- pratique : avant d'entreprendre tout terrassement, il faut régler les problèmes d'accès au bâtiment : accès piétons, handicapés, véhicules légers, véhicules de services, véhicules lourds, véhicules de pompiers, véhicules de chantier pour la construction...
- économique : nous retrouvons là un aspect de la conception qui se dessine en filigrane tout au long de ce travail. Une différence de niveau de dix centimètres correspond à un cubage non négligeable de matériau de remplissage à transporter, puis étaler, en cas de remblai.

Il existe d'autres contrôles à mettre en œuvre : l'adéquation au système constructif (contrôle des portées), le respect des normes acoustiques, la validation de la fluidité des mouvements des personnes à l'intérieur du bâtiment... Chacun de ces contrôles nécessite une étude approfondie et un dialogue productif entre les professionnels du bâtiment (architectes, bureaux de contrôles, ingénieurs concernés ou organismes de labellisation) et les informaticiens qui prendront en charge ces traitements.

Notre éditeur de maquette devra offrir plusieurs vues complémentaires du même projet à son concepteur et aux intervenants divers qui participent à l'élaboration du projet, en fonction des hypothèses à vérifier.

3 – 4 Résultats comparatifs

Il était tentant de comparer nos résultats à ceux issus des études proches des nôtres. C'est ce que nous avons effectué en reprenant l'exemple du pavillon de 11 espaces de R. MACULET [MAC 91], repris pour leurs tests par B. MEDJDOUB et B. YANNOU [MED 00]. Les hypothèses de départ étant légèrement différentes, j'ai indiqué à chaque fois comment j'ai adapté mon traitement au problème donné.

Dans ce dernier chapitre, nous appellerons MOSAICA (MOdeleur Spatial d'Assistance Informatisée à la Conception Architecturale) l'environnement d'assistance à la conception présenté dans ce travail.

3 – 4 – 1 Définition des espaces du pavillon test

Le tableau suivant rappelle les dimensions des espaces indiquées par B. MEDJDOUB et B. YANNOU à partir du problème initial de R. MACULET.

<i>Espace</i>	<i>Surface</i>	<i>Largeur minimum</i>	<i>Longueur minimum</i>
<i>Floor</i>	<i>[120,120]</i>	<i>12</i>	<i>10</i>
<i>Séjour</i>	<i>[33,42]</i>	<i>4</i>	<i>4</i>
<i>Cuisine</i>	<i>[9,15]</i>	<i>3</i>	<i>3</i>
<i>Bains</i>	<i>[6,9]</i>	<i>2</i>	<i>2</i>
<i>WC</i>	<i>[1,2]</i>	<i>1</i>	<i>1</i>
<i>Corridor1</i>	<i>[1,12]</i>	<i>1</i>	<i>1</i>
<i>Corridor2</i>	<i>[1,12]</i>	<i>1</i>	<i>1</i>
<i>Chambre 1</i>	<i>[11,15]</i>	<i>3</i>	<i>3</i>
<i>Chambre 2</i>	<i>[11,15]</i>	<i>3</i>	<i>3</i>
<i>Chambre 3</i>	<i>[11,15]</i>	<i>3</i>	<i>3</i>
<i>Chambre 4</i>	<i>[15, 20]</i>	<i>3</i>	<i>3</i>

Figure 106 - Dimensions des espaces du pavillon test

Dans notre approche, nous ne connaissons qu'une largeur minimale par espace, ceux-ci étant bidirectionnels. Nous avons cependant la possibilité de fixer une dimension de largeur ou de longueur précisément, ce que nous ferons pour l'espace "Floor", pour lequel longueur et largeur ont des valeurs différentes.

Par contre, dans l'exemple, les surfaces sont définies par un intervalle de valeurs, alors que dans notre logiciel nous travaillons sur une surface minimale et des seuils à lui appliquer pour recréer cet intervalle. Nous observons que l'écart entre les deux bornes de l'intervalle varie entre 20% et 30% pour les espaces les plus significatifs. Nous pourrions prendre une valeur moyenne et fixer les seuils à -13% et + 13% pour reproduire ce phénomène. Nous avons préféré modifier légèrement notre programme en ajoutant une information de plus : la surface maximale. Grâce à la souplesse de la programmation Prolog, cette modification fut rapide et aisée.

3 – 4 – 2 Définition des contraintes sur les espaces du pavillon test

Nous avons traduit les contraintes dans le formalisme proche de la description que nous avons employée jusqu'à présent.

*Le séjour est orienté sud-ouest.
(Ou au sud OU à l'ouest, suivant les articles. Nous avons choisi le cas le plus contraint, qui correspond aux résultats graphiques présentés dans les articles.)
La cuisine est orientée sud **OU** nord.
La chambre 1 est orientée sud **OU** nord.
La chambre 2 est orientée sud **OU** nord.
La chambre 3 est orientée sud **OU** nord.
La chambre 4 est orientée sud.
Tous les espaces communiquent avec l'un des deux corridors (**OU** les deux), sauf la cuisine.
Le séjour communique avec la cuisine.
La cuisine est à coté de la salle de bains.
Les WC sont à coté de la cuisine **OU** de la salle de bains.
Les deux corridors communiquent.
L'entrée se fait par le séjour.
Aucun espace ne chevauche un autre.
Aucune place n'est perdue.*

Figure 107 - Contraintes sur les espaces du pavillon test

Nous avons là encore enrichi notre logiciel avec des contraintes portant sur la double orientation et la double communication pour prendre en charge la description ci-dessus.

La gestion des proximités, des communications et des non-chevauchements est classiquement réalisée par notre logiciel.

Seules deux contraintes ne sont pas traitées :

L'entrée se fait par le séjour.

Dans notre description de projet, cela peut se traduire par l'inclusion d'un espace Entrée que l'on contraint à être sur une façade du séjour (a_louest_dans par exemple). Dans cet exemple nous n'avons pas rajouté d'entrée, afin de conserver un même nombre d'espaces compatible avec celui du test.

Aucune place n'est perdue.

La différence fondamentale dans la philosophie des deux approches est traduite par la dernière contrainte : "*Aucune place n'est perdue.*". La priorité de notre étude n'est pas d'occuper au mieux le rectangle correspondant à la surface du pavillon au sol, mais d'organiser au mieux les espaces du projet afin de permettre l'émergence de formes intéressantes construites sur un plan sain. Les espaces résiduels (« trous ») que l'on peut observer entre les espaces

peuvent être utilisés comme placards dans cet exemple. D'autre part, des filtres sur motif, non développés à l'heure actuelle, permettront d'éliminer les solutions présentant un trou si le projet ne peut l'accepter. Dans notre approche respectant au plus près le processus de la conception architecturale, le fait de traiter en priorité l'élimination de la place perdue ne nous est pas apparu comme fondamental. Cette dernière contrainte ne sera donc pas prise en charge avant la génération de solutions.

3 – 4 – 3 Mise en œuvre et résultats partiels

Les modifications des prédicats Prolog et des programmes générant les codes associés furent très rapide. Ce qui nous a vraiment posé problème, ce sont les performances de GNU Prolog pour ces espaces non hiérarchisés et fortement contraints. Le temps de résolution est extrêmement long (de l'ordre de plusieurs jours) sans pouvoir rapidement déceler s'il y a une solution au moins. Nous avons testé plusieurs configurations de code. La dernière version est donnée en annexe 19. Nous recherchons encore actuellement à trouver une solution à ce problème de performance, quitte à changer de moteur Prolog.

La figure 108 présente un résultat partiel donnant un aperçu des 10527 solutions obtenues après 24 heures d'exécution. Les solutions choisies sont réparties de façon homogène dans l'espace actuel des solutions.

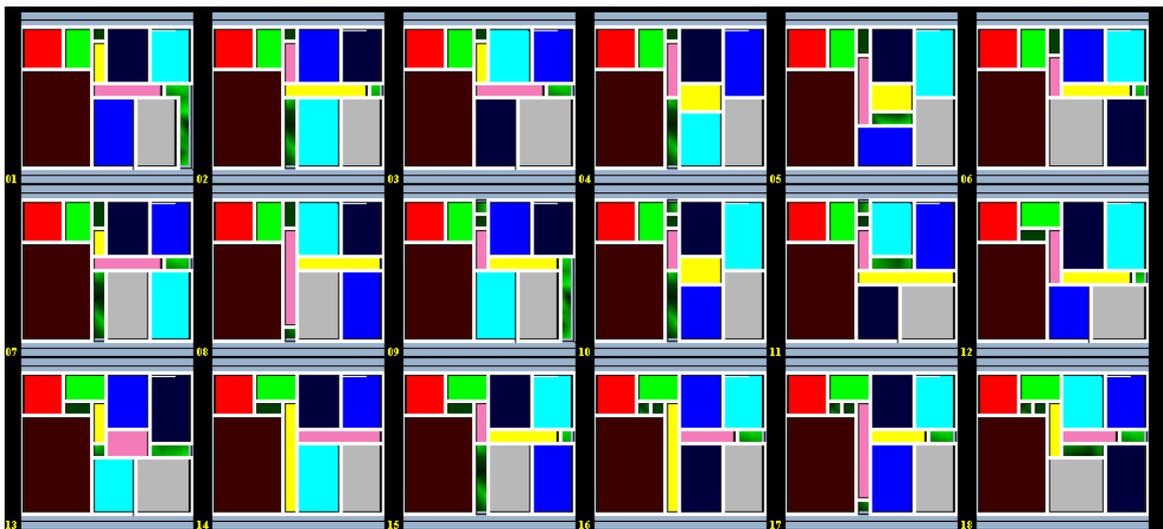


Figure 108 – Quelques solutions du problème des 11 espaces de Maculec

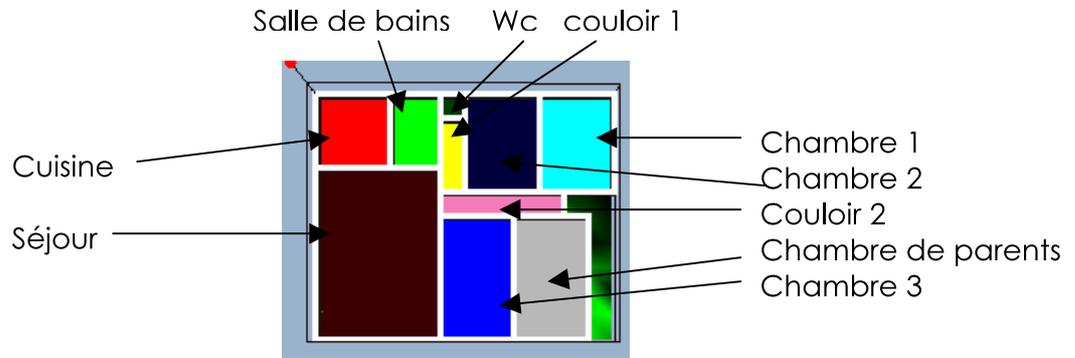


Figure 109 – Code des couleurs sur la première solution extraite

Code de lecture et contraintes

"Floor" représente la boîte englobante principale (aspect fil de fer), et correspond exactement aux dimensions du terrain : 12 m de large sur 10 m de profondeur. Le terrain est visualisé en vert avec des reflets.

Séjour (couleur grenat ou rouge foncé), entre 33 et 42 m², au Sud - l'Ouest, communique avec la cuisine (rouge vif), communique avec l'un des corridors (jaune ou rose).

Cuisine (rouge vif), entre 9 et 15 m², au sud ou au nord du terrain, communique avec le séjour

Salle de bains (vert clair), entre 6 et 9 m², communique avec l'un des corridors, est placé à côté de la cuisine

WC (vert foncé, ici peu lisible, pouvant se confondre avec la place restée libre et laissant voir le terrain dessous), entre 1 et 2 m², placé à côté de la cuisine ou de la salle de bains, communique avec l'un des corridors

Les trois Chambres (bleu roi, bleu clair et bleu foncé), entre 11 et 15 m², placées au nord ou au sud. Elles communiquent avec l'un des deux corridors.

Chambre des parents (gris), entre 15 et 20 m², placée au sud. Elle communique avec un des deux corridors.

Les deux corridors (rose et jaune), entre 1 et 12 m², adjacents l'un à l'autre.

Les résultats obtenus sont partiels : il manque une série de solutions où la cuisine peut être située au Sud, toujours à côté du séjour, et où les trois chambres bleues peuvent alors se placer au Nord. Nous espérons obtenir ces résultats prochainement. Nous ne disposons pas toujours de matériel pour tester sur de longues périodes nos programmes. Nous proposons nos hypothèses sur des problèmes à quatre ou cinq espaces, pour lesquels nous avons des temps de réponse de l'ordre de la demie-heure. Nous vérifions ensuite sur des problèmes plus complets ou bien contraints, comme celui du problème des onze espaces de Maculet.

Nous donnons pour information les solutions topologiques des auteurs cités plus haut [MED 00]. Rappelons que dans leur étude, les solutions topologiques préfigurent des types d'organisation, et qu'à partir d'une solution topologique dériveront d'autres solutions dites géométriques, où l'on étudiera les dimensions de chaque espace, pour une configuration donnée.

En comparant les deux planches de résultats (même avec un résultat partiel), une différence notable provient de la recherche de la minimisation de la place perdue, souci qui peut être légitime lors de la réhabilitation d'un immeuble par exemple. Dans notre approche, les solutions ont des contours libres, et présentent une volumétrie plus riche. On voit ici deux objectifs de conception différents, deux pratiques qui doivent cohabiter si l'on veut proposer une véritable assistance aux architectes.

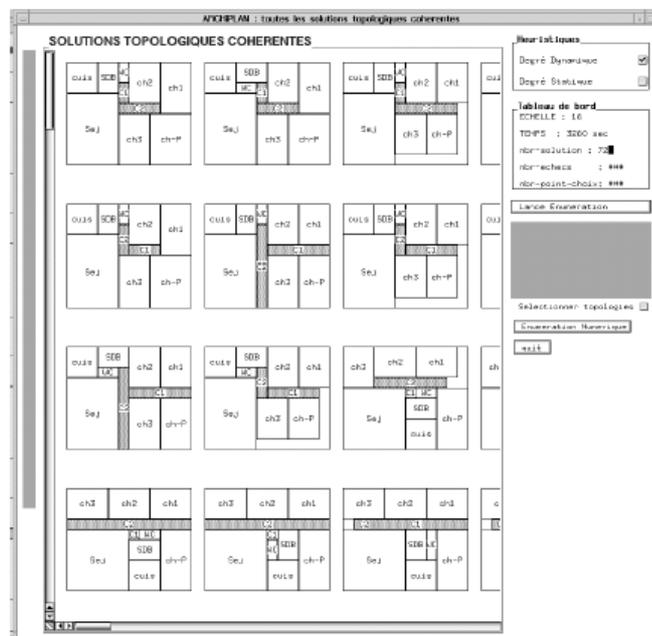


Figure 110 - Extrait des 72 solutions topologiques de B. MEDJDOUB et B. YANNOU

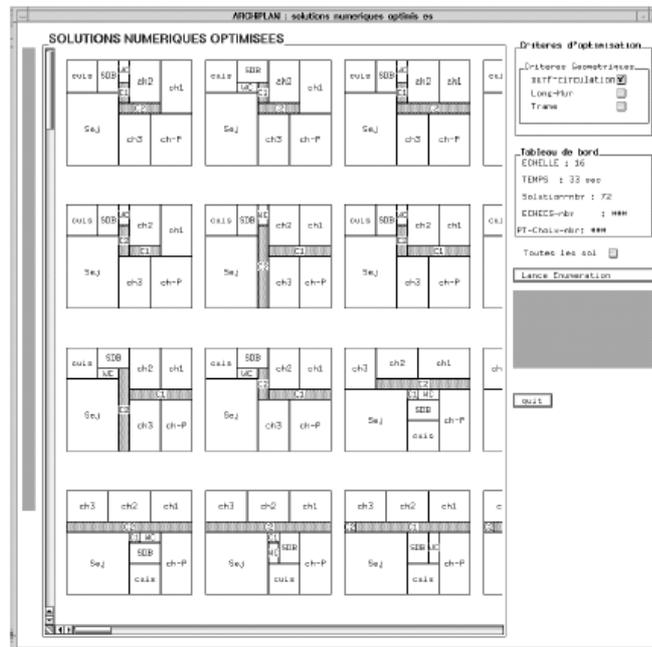


Figure 111 - Extrait des solutions géométriques de B. MEDJDOUB et B. YANNOU

3 – 4 – 4 Extraction des topologies

Ce sujet de thèse devenant un des axes du laboratoire de recherche de 3IL, un nouveau chercheur s'est joint à nous à partir de Septembre 2003 : Jérôme GRASSET. Son premier travail a été d'extraire les différentes topologies d'une série de solutions. Notre cheminement est ainsi inverse des auteurs cités ci-dessus, qui gèrent d'abord l'organisation topologique et ensuite la géométrie précise des espaces en minimisant la place perdue.

Nous persistons à garder cette façon de faire qui nous semble prometteuse : pour le moment, les tests se font à l'échelle 1, notre but étant de parvenir à un pas d'énumération de 10 à 20 cm (échelles 4 ou 5). Il se peut que nouvelles topologies apparaissent pour des découpages d'espaces plus fins. Devant les performances actuelles, ces tests ont été différés.

Pour extraire les topologies, nous avons décidé dans un premier temps de prendre les 3 chambres ayant les mêmes caractéristiques comme des espaces différents ainsi que de considérer les deux couloirs comme deux espaces de circulations à part entière. Nous étudions la possibilité de prendre les espaces ayant les mêmes caractéristiques comme équivalents, ce qui permettrait d'avoir un nombre moins important de topologies, en éliminant deux solutions qui diffèrent simplement par le nom de l'espace : chambre 1 au lieu de chambre 2, couloir 1 au lieu de couloir 2. Actuellement sur 10527 solutions répertoriées, nous avons 1620 topologies différentes. Ce nombre comprend les solutions redondantes, déjà répertoriées à une permutation d'espaces équivalents près.

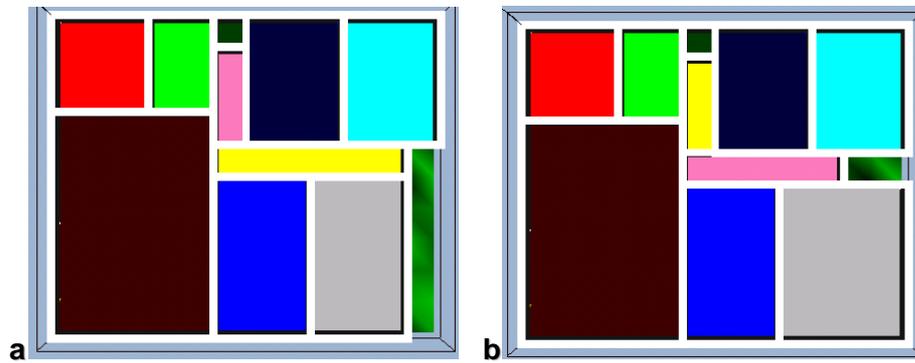


Figure 112 – Deux solutions à même topologie si l'on considère que les deux couloirs (jaune et rose) sont interchangeables

La figure 113 montre deux solutions (a et b) qui diffèrent seulement par la longueur du couloir rose, orienté Est/Ouest. La solution c n'a pas la même topologie, les espaces voisins à la grande chambre (en gris) étant différents à ceux des solutions a et b.

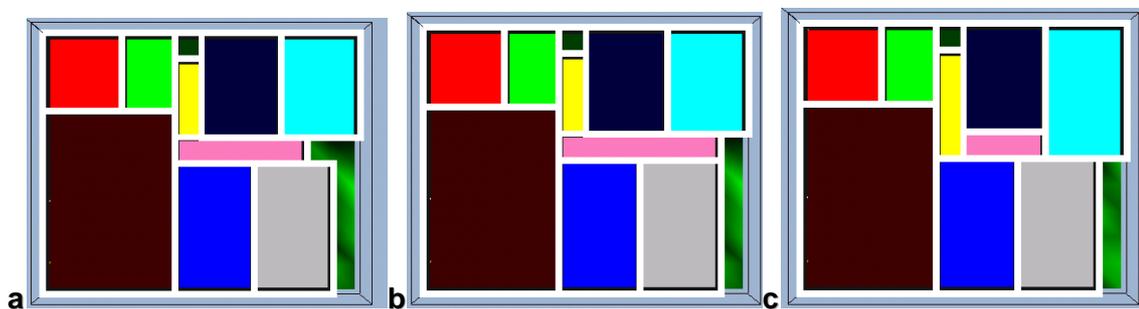


Figure 113 – Trois solutions pour deux topologies

Un autre élément viendra limiter le nombre de topologies : le non traitement des espaces résiduels. Comme le montre l'image 113, les espaces résiduels peuvent donner lieu à des accidents de façade s'ils sont en périphérie, ou devenir des placards, s'ils sont intégrés à l'espace habitable. Leur rôle étant secondaire, il faudrait pouvoir les éliminer (à la demande) lors du calcul des espaces voisins pour la construction des topologies.

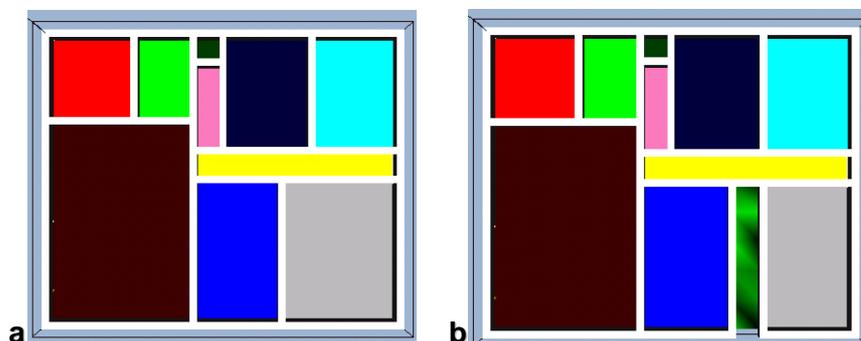


Figure 114 – Deux solutions à même topologie avec espace résiduel entre les deux chambres au Sud.

Dans le cas de la figure 114, nous pourrions considérer que les deux solutions sont issues d'une même topologie, en ignorant l'espace résiduel entre les deux chambres au sud.

De plus, nous avons mis en place la possibilité de définir des espaces non obligatoires. Dans ce cas du problème des 11 espaces du problème de R. MACULET, on peut définir une troisième zone de circulation non obligatoire, qui permettrait si besoin est, d'avoir une circulation en U ou en S, apportant une nouvelle richesse topologique, et une souplesse dans le plan.

Pour le moment nous préférons travailler à l'amélioration des performances de notre moteur avant de régler plus avant les enrichissements à apporter à MOSAICA. A l'heure actuelle, nous n'avons pas de résultat sur les essais aux échelles fines et avec les espaces non obligatoires sur le problème de R. MACULET.

3 – 4 – 5 Conclusions sur le problème des 11 espaces de R. Maculet

Les solutions proposées par MOSAICA sont incomplètes par manque de performances du moteur choisi. Nous n'avons pas exclu que ce manque de performances puisse provenir d'une maladresse de codage de notre part. En désespoir de cause nous avons contacté le concepteur de GNU Prolog, Daniel DIAZ, et attendons une réponse.

Néanmoins nous espérons que ce test, lorsqu'il sera mené à terme, permettra de mettre en évidence la réelle prise en charge des préoccupations des architectes dans notre étude. L'article [MED 00] indique que les architectes regrettent que les pièces restent rectangulaires ou que le nombre d'espaces soit fixé à l'avance. Sur ces deux points notre approche répond avec succès : la contrainte `assemble` permet de définir des formes en T ou en L, voire plus complexes, la prise en charge de d'espaces facultatifs autorise un nombre d'espaces variable. Notre préoccupation principale reste aujourd'hui la performance du moteur : GNU Prolog nous a permis de développer et de tester nos hypothèses, il faudra sans doute chercher un moteur plus puissant ou reprendre notre première piste de travail présentée pour le diagnostic préliminaire. Cette dernière solution aurait le gros inconvénient d'être trop spécialisée sur un domaine donné, alors que l'intégration de MOSAICA dans MultiCAD requiert un outil souple d'utilisation, partageable et efficace.

Conclusion

Cette troisième partie a montré comment l'architecte passe d'une description de projet à une maquette virtuelle en contrôlant les phases intermédiaires d'élaboration de la maquette.

Le diagnostic met en valeur les spécificités de son projet et ses éventuelles faiblesses. La génération des solutions est suivie de la visualisation en mode plan. A ce stade, l'architecte a tout loisir d'éliminer des solutions qui présentent un défaut relatif au contexte du projet en cours. Il peut également définir et appliquer des filtres qui ont pour objet de mettre en avant les solutions répondant le mieux à un critère donné. Enfin, son choix effectué, il travaille sur la globalité de son projet en mode maquette, définissant un choix d'attributs visuels qui permettent une meilleure lecture du projet. A tout moment, il peut revenir à l'étape précédente pour modifier une description ou améliorer un choix de solution.

Conclusion générale

Nous avons présenté un outil d'assistance à la conception architecturale qui se rapproche le plus possible de la pratique professionnelle. Notre outil permet de :

- décrire un projet, y compris son contexte de réalisation (terrain, règlements associés, ...)
- de vérifier la cohérence de la description
- de générer un modèle interne, aujourd'hui sous forme de code GNU Prolog mais qui évoluera sans doute pour des raisons de performance
- d'obtenir un ensemble de solutions traduites visuellement sous forme de plans, de maquettes, habillées ou non d'éléments structurant, décoratifs ou meublant
- de trier et choisir quelques solutions parmi cet ensemble en indiquant des critères de choix, portant sur de surfaces, distances, configuration d'espaces ou tout autre pondération d'éléments calculables du projet
- de travailler sur la représentation visuelle du projet en modifiant des couleurs, formes, textures, ou en mettant en évidence certaines particularités d'une solution

Notre travail se présente plus comme un étude de faisabilité d'un outil d'assistance à la conception architecturale plutôt que comme un produit fini. Certains thèmes demandent à être retravaillés en vue d'un enrichissement des possibilités et pour y gagner en performances. Citons quelques pistes d'études qui vont en ce sens :

- l'intégration complète dans MultiCAD : si nous voulons un outil fiable et évolutif, il faut un système d'information à la mesure de nos ambitions. MultiCAD semble convenir à notre description actuelle : il peut absorber facilement de nouvelles propriétés et contraintes sur les espaces, pourra assumer plusieurs modes de générations de solutions et a le grand avantage d'être le support de travail de nombreuses études proches de la nôtre sur la conception 3D.
- l'enrichissement de la maquette de faisabilité : le partage d'expériences professionnelles, rendu possible autour de cette première ébauche de MOSAICA, va permettre de développer de nouvelles règles d'assemblage, de nouveaux filtres, des vues et des procédures de contrôles de maquettes que nous avons laissés de côté.
- l'amélioration des performances : l'intégration de contraintes sur les mêmes espaces, liées par le OU ou le OUEX (OU exclusif) semble être un impératif à court terme. Il nous faudra également améliorer les temps de génération des solutions. Nous avons l'intention de ré-écrire notre premier

programme d'énumération (en langage C) et de le paralléliser pour rendre son exécution plus rapide.

- une meilleure gestion des solutions : une piste de travail serait de se rapprocher de la définition du modèle topologique de B. MEDJDOUB et B. YANNOU, afin de mettre en place un système de classification efficace sur l'ensemble de nos solutions. D'autre part, en accord avec les chercheurs travaillant sur la formation de concepts et l'apprentissage lors de la conception, nous trouverons certainement des pistes pour éliminer des solutions, ou mieux, éviter de les générer.
- l'exportation des solutions choisies vers un modeleur géométrique pour assurer les étapes suivantes du processus de conception. Cette amélioration saura d'autant plus efficace si le système d'information supporte les données relatives aux phases suivant l'esquisse, et assure une continuité entre les divers modes de traitement du projet architectural.
- le soin des interfaces : MOSAICA doit devenir un outil efficace et d'utilisation facile. Cet aspect n'a que peu été développé jusqu'à présent et il est grand temps de d'écrire des interfaces conviviales dignes de la puissance des outils dont nous disposons pour alimenter le WEB.

Et de façon plus personnelle :

J'ai eu beaucoup de plaisir à réaliser cette thèse.

Plaisir à partager mes réflexions. Convaincre, démontrer, étayer ses propos, faire machine arrière lorsque j'ai été trop vite dans mes conclusions, partager la joie des premiers résultats, les angoisses des avancées à tâtons, la volonté ne pas décevoir les personnes qui ont misé leur confiance sur mes études : la vie intellectuelle et affective du chercheur est riche de mille événements quotidiens.

Plaisir à me replonger dans la fabrication de maquettes. Qu'elles soient réelles ou virtuelles, elles correspondent à une transformation dynamique de l'information, représentent le devenir du projet qui est en train de prendre forme : c'est le moment que je trouve le plus exaltant dans la conception.

Plaisir à construire MOSAICA. Comme dans la conception pure, ne surtout pas s'enfermer dans des modélisations à priori, laisser la forme naître, respirer, enfler, devenir évidente et s'imposer, ne jamais croire que tout est joué. Cela demande une attention de tous les instants, une rigueur implacable pour assurer de bonnes fondations, de l'énergie créative pour rechercher les solutions adaptées, un regard de visionnaire pour garder le cap sans se laisser distraire.

Plaisir à concevoir avec MOSAICA. C'était inattendu et je souhaite à tous les architectes d'avoir les mêmes sensations que moi lorsque les définitions textuelles que l'on a tête sont traduites directement en formes palpables, et

qu'elles correspondent à la représentation mentale que l'on s'était faite du projet. Quel plaisir également de découvrir de nouvelles alternatives de solutions, d'explorer et d'épuiser plus rapidement une piste pour mieux se consacrer à une autre, plus productive.

Bibliographie

- [d'A 94] Hors série « d'A » : « La loi MOP, mode d'emploi ». Décembre 1994.
Notes sur les éléments de la mission de base. Page 27.
(MOP : Maîtrise d'Ouvrage Publique)
- [ADO 96] Luc ADOLPHE
Maîtrise des ambiances - Enjeux et stratégies
In les cahiers de la recherche architecturale n°37
Editions Parenthèses - Premier semestre 1996
- [AME 00] Farid AMEZIANE
" An Information System For Building Production Management "
in International Journal of Production Economics - Volume 1 -
1999 - Published by ElsevierScience B. V. pages 345 to 358,
Amsterdam, Netherlands.
- [AME 01] Farid AMEZIANE, Michel FLORENZIANO
La CAO en Architecture - Historique, état des lieux et perspectives
MICAD 2001 - 20ème Conférences Internationales de la CFAO et des Nouvelles technologies de Conception et de Fabrication, Paris (France). Conférence C2 - Projet Architectural et Outils Numériques. Paris, du 6 au 8 mars 2001
- [BOI 96] Olivier BOISSIERE (auteur)
Jean NOUVEL
Editions Terrail - 1996
- [BON 00] Pierre-François BONNEFOI, Dimitri PLEMENOS
Constraint satisfaction techniques for declarative scene modelling by hierarchical decomposition.
International Conference 3IA'2000, Limoges (France), May 3-4, 2000.
- [BOR 84] Mario BORILLO
Informatique pour les sciences de l'Homme
Limites de la formalisation du Raisonnement
Mardaga Editeur Bruxelles 1984
- [BOU 71] Philippe BOUDON
Sur l'espace architectural
Essai d'épistémologie de l'architecture
Collection Aspects de l'urbanisme Dunod 1971
- [BOU 81] Philippe BOUDON
Introduction à une sémiotique des lieux
Presses de l'Université de Montréal - 1981

- [BOU 95] Boubaker BOUCHAREB
Développement d'un générateur de toitures
Le projet REMUS (Laboratoire GAMSAU)
MARSEILLE'95 - Juin 95
- [BOU 01] Philippe BOUDON, Philippe DESHAYES,
Frédéric POUSIN, Françoise SCHATZ
Enseigner la conception architecturale
Cours d'architecturologie
Editions de la Villette Septembre 2001
- [CAL 96] Michel CALLON
Le travail de la conception en architecture
In les cahiers de la recherche architecturale n°37
Editions Parenthèses - Premier semestre 1996
- [CAR 94] Gianfranco CARRARA, Yehuda E. KALAY, Gabriele NOVEMBRI
Knowledge-Based Computational Support for Architectural
Design.
Elsevier Science B.V., Amsterdam, NL (1994)
- [CEL 02] Olivier CELNIK, Emmanuel COSTE, Pierre VINCENT
Internet pour l'architecture et le bâtiment
Co-édition : Jean-Michel PLACE / Istudio - Juin 2002
- [CHA 94] Danièle CHAUVAT
"Le projet VoluFormes : un exemple de modélisation déclarative
avec contrôle spatial" Thèse de Doctorat.
IRIN Université de Nantes-Ecole Centrale de Nantes (1994)
- [CHA 98] Laurent CHAMPCIAUX
Introduction de techniques d'apprentissage en modélisation
Déclarative. Thèse de Doctorat.
Ecole des Mines de Nantes, 2 Juin 1998
- [CIR 87] Henri CIRIANI
in "Architecture Aujourd'hui" 1987, n°252 pages 56-57
Fugues et variations sur un thème Corbuséen
Propos recueillis par François Chaslin et Marie- Jeanne Dumont
- [COL 98] Christian COLIN, Emmanuel DESMONTILS,
Jean-Yves MARTIN, Jean-Philippe MOUNIER
Working modes with a declarative modeler.
Computer Networks 30(20-21) : 1875-1886 (1998)
- [COL 96] Christian COLIN
La prise de connaissance en modélisation déclarative.
Quatrième journée du groupe de travail GEODE, IRIN,
Nantes, Mars 1996.

- [DES 98] Emmanuel DESMONTILS
Thèse de Doctorat de l'Université de Nantes
Faculté des sciences et des techniques
Laboratoire Institut de Recherche en Informatique de Nantes
14 janvier 1998
- [DES 95] Emmanuel DESMONTILS, Michel LUCAS
Les modeleurs déclaratifs
Revue internationale de CFAO et d'informatique graphique
Volume 10, n°6 - 1995
- [DIA 02] Daniel DIAZ
GNU PROLOG user's manual
A Native Prolog Compiler with Constraint Solving over Finite
Domains - Edition 1.7, for GNU Prolog version 1.2.16
September 25, 2002
- [DOR 01] Guillaume DORME
Etude et réalisation de techniques de prise de connaissance de
scènes tridimensionnelles.
Thèse de Doctorat - Limoges 2001
- [DOR 98] Guillaume DORME
Modélisation déclarative de la patine des monuments
Mémoire de DEA Laboratoire MGII de Nantes 1998
- [EAS 95] Charles M. EASTMAN, Anastassios SIABIRIS
A generic building product model incorporating building type
information
Automation in Construction 3 (1995) pages 283-304 Elsevier
Science
- [FLE 95] U. FLEMMING, R. WOODBURY
Software environment to support early phases in building design
(SEED) : Overview
in Journal of Architectural Engineering, ASCE, 1(4): 147-152.
(1995)
- [FOU 1829] Charles FOURIER
Le nouveau monde industriel ou
Invention du procédé d'industrie attrayante et naturelle
distribuée en séries passionnées
Première édition : 1929
Éditions Flammarion, 1973, 568 pages. Collection : Nouvelle
bibliothèque romantique.
- [FRI 98-a] Pascale FRIBAULT, Dimitri PLEMENOS
Projet architectural et modélisation déclarative par
décomposition hiérarchique
Congrès AFIG - Décembre 1998

- [FRI 98-b] Pascale FRIBAULT
Modélisation d'un projet architectural : définition d'un outil de description
Rapport de recherche MSI 98 – 09
Université de Limoges, Octobre 1998
- [JAR 97] F. JARDILLIER
Une Approche de la Modélisation Déclarative de Mouvements de Caméra
Rapport de stage DEA Informatique IRIN 1996-1997 - Août 1997
- [KAY 02] Alain KAESER
Manuel de Prise en Main Version 3.30
Manuel KAOLA TEXTE - Manuel KAOLA VISU
Cognitive Relation – Novembre 2002
- [KHE 98] Lachmi KHEMLANI, Anne TIMERMAN
Beatrice BENNE – Yehuda E. KALAY
Intelligent Representation for Computer-Aided Building Design
Department of Architecture, University of California at Berkeley
Published in Automation in Construction 8(1) pages 49-72,
November 1998
- [KRI 82] Rob KRIER
De l'architecture
Academy Editions - 1982
- [KRO 84] Lucien KROLL
Composants - Faut-il industrialiser l'architecture ?
Editions SOCOREMA Bruxelles 1984
- [KWA 98] Ghassan KWAITER
Modélisation déclarative de scènes : étude et réalisation de solveurs de contraintes
Thèse de doctorat - Décembre 1998
Institut de Recherche en Informatique de Toulouse
- [LEB 83] Jean-Charles LEBAHAR
Le dessin d'architecte
Simulation graphique et réduction d'incertitude
Editions Parenthèses 1983
- [LEC 23] LE CORBUSIER
"Vers une architecture"
Coll. Champs Ed Flammarion - 1923
- [MAC 97] Pierre MACE, Olivier LHOMME, Phil KUZO.
Un Formalisme Géométrique pour une Modélisation Déclarative
Journées "Modeleurs Géométriques", Grenoble,
17-19 Septembre 1997, France

- [MAC 91] Robert MACULET
Représentation des connaissances spatiales - Intelligence Artificielle et Conception assistée par ordinateur en Architecture
Thèse de doctorat Paris VI Décembre 1991
- [MAK 03] Dimitrios MAKRIS, Ioanna RAVANI, Georges MIAOULIS, Christos SKOURLAS, Pascale FRIBAULT, Dimitri PLEMENOS
Towards a domain-specific knowledge intelligent information system for computer-aided architectural design.
International Conference 3IA'2003, Limoges (France), May 14-15, 2003
- [MAR 88] Philippe MARTIN, Dominique MARTIN
An expert system for polyhedra modeling
Eurographics'88. Nice. 1988
- [MED 00] Benachir MEDJDOUB, Bernard YANNOU
Separating topology and geometry in space planning
Computer Aided Designe 2000; 32(1) p 39-61
- [MEN 02] Kene MENIRU, Claude (Bédard)BEDARD, Hugues RIVARD
Early Building Design using Computers
International Council for Research and Innovation in Building and Construction
CIB w78 conference 2002
Aarhus School of Architecture, 12-14 June 2002
- [MER 01] Pierre MERCKLE
Le socialisme, l'utopie ou la science ? La " science sociale " de Charles Fourier et les expérimentations sociales de l'Ecole sociétaire au XIXe siècle
Thèse de sociologie - Lyon 2 - 17 décembre 2001
- [MIA 02] MIAOULIS Georges
Contribution à l'étude des systèmes d'information multimédia et intelligents dédiés a la conception déclarative assistée par ordinateur – Le projet MultiCAD.
Thèse de doctorat, Université de Limoges, 2002.
- [MIA 00] Georges MIAOULIS, Dimitri PLEMENOS, Dimitri MAGOS, Christos SKOURLAS
The MultiCAD project: Towards an intelligent multimedia information system for CAD. Short paper.
International Conference WSCG'2000, Plzen (Czech Republic), February 7-11, 2000.
- [MIA 96] Georges MIAOULIS, Dimitri PLEMENOS
Propositions pour un système d'information multimédia Intelligent dédié à la CAO : le projet MultiCAD.
Rapport de recherche MSI 96-03. Limoges, Juillet 1996

- [MIC 97] Micro Application
Manuel utilisateur du logiciel Architecte 3D
Up Vision Computergrafik, Juin 97
- [MIN 03] Ministère de l'Habitat et de l'Urbanisme Algérien
Conception du logement social urbain en location vente
<http://www.mhu.gov.dz/presinscription.htm> (consulté en 2003)
- [MON 75] Fernando MONTAGU
Une vision cybernétique du processus de création architecturale
Revue Summa n°85 janvier 1975
- [MUD 96] Ljubica MUDRI
Aide à la conception de l'éclairage naturel dans la phase
d'esquisse architecturale et son impact sur l'énergie du bâtiment
Thèse de doctorat en énergétique – Décembre 1996
Laboratoire EVCAU – Ecole d'architecture, Paris, Val de Marne
- [NIC 99] Pierre-Alexandre NICOLAS
Le secret des cathédrales
Arcadis Editions - 1999
- [NEG 70] Nicholas NEGROPONTE
The Architecture machine
MIT Press – Cambridge – Massachussets 1970
- [ORM 1648] Philibert DE L'ORME
Architecture
Edition intégrale de 1648 - Editeur : Pierre MARDAGA (1981)
- [PAJ 94] Laurence PAJOT-DUVAL
Modélisation déclarative de configurations de segments de
Droite : application aux tableaux de fils.
Infographie Interactive et Intelligence Artificielle 3IA'94 Limoges
- [PLE 91] Dimitri PLEMENOS
Contribution à l'étude et au développement des techniques de
modélisation, génération et visualisation de scènes
Le projet MultiFormes
Thèse de doctorat d'état, Nantes, Novembre 1991
- [POU 96] Frédéric POUSIN
Trois points de vue sur la conception
In les cahiers de la recherche architecturale n°37
Editions Parenthèses - Premier semestre 1996
- [QUI 85] Paul QUINTRAND, Jacques AYTRAN, Michel FLORENZIANO,
Marius FREGIER, Jacques ZOLLER
Conception assistée par ordinateur en architecture
Editions HERMES 1985

- [RAV 01] Ioanna RAVANI
The notion of concept in MultiCAD
Rapport de recherche MSI 01-02
Université de Limoges Octobre 2001
- [REN 95] Alain RENIER
Rituels sociaux de l'habiter, parcours de l'habitant, dispositifs spatiaux de l'habitat, et les ingénieries de leur conception
in Cahiers du LAUA N°2, école d'architecture de Nantes, 1995
- [REN 92] Alain RENIER
La segmentation significative de l'espace et ses implications dans la conception du projet
in Séminaire sur les processus de conception
Plan construction et architecture – 1992
- [RUC 02] William RUCHAUD, Dimitri PLEMENOS
MultiFormes: a declarative modeller as a 3D scene sketching tool.
International Conference ICCVG'2002, Zakopane (Poland), September 25-29, 2002
- [SIR 97] Daniel SIRET
Propositions pour une approche déclarative des ambiances dans le projet architectural. Application à l'ensoleillement.
Thèse de doctorat – Juin 1997
Laboratoire CERMA Ecole d'Architecture de Nantes
- [SOC 93] SOCOTEC - Département Information
Les règles de l'art dans le bâtiment
Collection Répertoires - 1993
- [SUM 81] John SUMMERSON
Le langage de l'architecture classique
Editions L'Equerre - 1981 - Première publication : 1963
- [VEN 72] Robert VENTURI, Steven IZENOUR, Denise SCOTT BROWN
Learning from Las Vegas
Cambridge, MA, MIT Press, 1972
Traduction : L'enseignement de Las Vegas ou le symbolisme oublié de la forme architecturale
coll. Architecture + Recherches, Bruxelles - P. Mardaga, 1987
- [VEN 66] Robert VENTURI, Steven IZENOUR, Denise SCOTT BROWN
Complexity and Contradiction in Architecture - New York, 1966
Traduction : De l'ambiguïté en architecture
coll. Aspects de l'urbanisme, Paris - Dunod, 1980
- [VIR 84] Paul VIRILIO
L'espace critique
Christian Bourgeois Editeur - 1984

[ZEV 59]

Bruno ZEVI
Apprendre à voir l'architecture
Editions de Minuit - Paris 1959

Liste des illustrations

Illustration	Légende	Page
Figure 1	Exemple de croquis : studies of station building de Venturi, Rauch, Scott Brown con/with Williams, O'Brien Associates pour Hannepin Avenue, Minneapolis - Revue Lotus International n°39 1983	13
Figure 2	Répartition indicative de la rémunération pour chaque élément de mission [d'A94].	14
Figure 3	Les étapes de création d'un mur enveloppe et d'un mur perpendiculaire à l'aide d'une grille de fond	15
Figure 4	Des paramètres de définition d'un toit	16
Figure 5	Exemple de menu de paramétrage de la forme d'un toit	16
Figure 6	Des paramètres de définition d'un escalier	17
Figure 7	Définition en plan et visualisation d'un escalier	17
Figure 8	Visualisation d'un mur et ses ouvertures en plan et en perspective éclatée.	18
Figure 9	Exemple de programme LISP associé à AutoCAD	21
Figure 10	Boîte de démonstration de BATIBOX	23
Figure 11	Planche de communication d'un projet – Logiciel Form Z Projet de CGLS Architects, Inc. Young Ho Yoon Atlanta, Georgia	25
Figure 12	Exemple de vues prises en charge par la norme STEP	26
Figure 13	Représentation géométrique des espaces dans ARCHiPLAN	33
Figure 14	Contraintes assurant la consistance des espaces dans ARCHiPLAN	33
Figure 15	Figure xx - Hiérarchisation des espaces dans ARCHiPLAN	33
Figure 16	Exemple de traduction d'un croquis en volumes géométriques	34
Figure 17	Arbre hiérarchique fonctionnel d'un logement	50
Figure 18	Arbre hiérarchique topologique d'un logement	51
Figure 19	Représentation d'une pièce unique, terrain et axes	51
Figure 20	Représentation d'un espace englobant et des ses 4 espaces associés	52
Figure 21	Modélisation d'un terrain accidenté	54
Figure 22	Modélisation du terrain avec 5% de pente vers le Nord	54
Figure 23	Exemple de pièce terminale avec différentes baies	56
Figure 24	Contraintes d'orientation "au_nord_dans "	60
Figure 25	Contraintes d'orientation "au_nord_de "	61

Figure 26	Différents cas de proximité entre deux espaces	62/63
Figure 27	Contraintes de communication	64
Figure 28	Exemple de visualisation d'une porte de communication	65
Figure 29	Exemple de règles de non chevauchement	65
Figure 30	Etude du chevauchement de deux espaces : division horizontale	66
Figure 31	Etude du chevauchement de deux espaces : division verticale	66
Figure 32	Traduction GNU Prolog de la règle de non-chevauchement	67
Figure 33	Illustration de la règle <code>non_chevauche</code> sur deux espaces à l'ouest	67
Figure 34	Contrainte <code>chevauche</code> sur deux espaces à l'ouest avec séparateur	68
Figure 35	Contrainte <code>chevauche</code> sur deux espaces à l'ouest sans séparateur	69
Figure 36	Contrainte <code>assemble</code> sur deux espaces à l'ouest	69
Figure 37	Contrainte <code>assemble</code> sur trois espaces	70
Figure 38	Contrainte d'orientation axiale	71
Figure 39	Contrainte d'englobement	71
Figure 40	Contrainte d'empilement	72
Figure 41	Contrainte d'altitude	73
Figure 42	Règles d'alignement	74
Figure 43	Règles de symétrie	75
Figure 44	Règle de centrage	75
Figure 45	Règle de dimensionnement relatif : plus grand	76
Figure 46	Règle de dimensionnement relatif : plus haut	77
Figure 47	Règles de dimensionnement et positionnement absolus	78
Figure 48	Logo MOSAICA	79
Figure 49	Arbre hiérarchique topologique du projet	80
Figure 50	Graphe des relations entre les espaces	81
Figure 51	Description des espaces d'un pavillon	83
Figure 52	Architecture fonctionnelle de Kaola	100
Figure 53	Extrait du code KAOLA : calcul de surface	102
Figure 54	Extrait du code KAOLA : règle de contrôle de surface	102
Figure 55	Exemple de cas de blocage par cumul d'orientations	103
Figure 56	Exemple de règle contrôlant le linéaire SUD d'un projet	103
Figure 57	Exemple de cas possible de blocage par cumul de linéaire de façade	104
Figure 58	Règle de repérage des différences hiérarchiques entre deux projets	106
Figure 59	Formule de calcul de similitude entre deux projets	107

Figure 60	Exemple de diagnostic illustrant la note de similitude	107
Figure 61	Extrait du diagnostic - Les informations sur le projet	108
Figure 62	Arbre topologique avec un espace englobant généré	111
Figure 63	Image d'un fichier initial associé à un projet	111
Figure 64	Image de l'arbre hiérarchique construit à la pré-énumération	111
Figure 65	Exemple de placements d'un pavillon sur un terrain	112
Figure 66	Listes des coordonnées possibles en x, y et z pour chaque espace	114
Figure 67	Repérage des contraintes à partir du fichier initial	114
Figure 68	Repérage des contraintes par espace	115
Figure 69	Image des domaines de validité après application des contraintes unaires	115
Figure 70	Image des domaines de validité après croisements des listes	116
Figure 71	Image des solutions générées	117
Figure 72	Visualisation des volumes en phase de diagnostic	118
Figure 73	Exemple de diagnostic d'échec	118
Figure 74	Exemple de code associé à un prédicat	120
Figure 75	Extrait de code GNU Prolog spécifique à un espace	121
Figure 76	Extrait du fichier des solutions généré par GNU Prolog	123
Figure 77	Exemple de visualisation en mode plan	124
Figure 78	Extrait du code VRML de visualisation en mode plan	126
Figure 79	Modification d'aspect des frontières d'espace	129
Figure 80	Modification d'une forme d'espace	130
Figure 81	Modification d'un angle	131
Figure 82	La solution ayant le contour le plus long	133
Figure 83	La solution ayant le contour le moins long	133
Figure 84	Formule de calcul de similitude entre deux projets pour filtrage	136
Figure 85	Exemple de solution avec critères de filtre pondérés	136
Figure 86	Extrait du tableau des critères	137
Figure 87	Exemple d'une solution avec défauts	139
Figure 88	Image d'une solution dont on veut chercher les contours	140
Figure 89	Expression des coordonnées de la solution	140
Figure 90	Tableaux des projections des coordonnées des contours	141
Figure 91	Mode de construction des listes de points du contour	142
Figure 92	Extraction du contour de la solution	143
Figure 93	Cas particulier de contour avec redent intérieur	144
Figure 94	Traitement du redent intérieur par ajout d'une	144

	cour	
Figure 95	Traitement du redent intérieur par ajout de deux cours	144
Figure 96	Ecran d'étude des contours	145
Figure 97	Exemples de toitures interchangeables	146
Figure 98	Figure 98 – Placement automatique d'une porte et d'une fenêtre standard	147
Figure 99	Etude de rythme en façade	148
Figure 100	Enrichissement d'un espace d'une solution	148
Figure 101	Etude des percements en façade	149
Figure 102	Extrait de code VRML représentant les pans de mur d'un espace	150
Figure 103	Exemple de placement de meubles dans l'espace chambre1	151
Figure 104	Exemple d'aménagement par défaut d'un projet	152
Figure 105	Exemple d'application de texture	152
Figure 106	Dimensions des espaces du pavillon test	155
Figure 107	Contraintes sur les espaces du pavillon test	156
Figure 108	Quelques solutions du problème des 11 espaces de R. Maculet	157
Figure 109	Code des couleurs sur la première solution extraite	158
Figure 110	Extrait des 72 solutions topologiques de B. MEDJDOUB et B YANNOU	159
Figure 111	Extrait des solutions géométriques de B. MEDJDOUB et B YANNOU	160
Figure 112	Deux solutions à même topologie si l'on considère que les deux couloirs sont interchangeables	161
Figure 113	Trois solutions pour deux topologies	161
Figure 114	Deux solutions à même topologie avec espace résiduel entre les deux chambres au Sud	161

Liste des annexes

Illustration	Légende	Page
Annexe 1	Extrait du décret n° 93-1268 du 29 Novembre 1993 relatif aux missions de maîtrise d'oeuvre confiées par des maîtres d'ouvrage publics à des prestataires de droit privé	173
Annexe 2	Exemple d'article de descriptif provenant de la société XELLA Thermopierre (Société résultant de la fusion de YTONG et SIPOREX).	174
Annexe 3	10 thèses sur l'architecture de Rob KRIER	175
Annexe 4	Extrait de réglementation du P.O.S. pour la commune de Ferney-Voltaire	176
Annexe 5	Extrait de réglementation pour Etablissement Recevant du Public	177
Annexe 6	Le style en Architecture : Etude de façades de R. Venturi et D. S. Brown	178
Annexe 7	Implantation des cathédrales	179
Annexe 8	Exemple de conseil sur le positionnement des chambres d'après Philibert de l'Orme .	180
Annexe 9	Description du phalanstère de Charles Fourier	181
Annexe 10	Extrait du décret n° 87-149 du 6 mars 1987 sur les conditions d'habitabilité des logements	182
Annexe 11	Exemple de système constructif	183
Annexe 12	Exemple de mise en œuvre de carreaux de plâtre	184
Annexe 13	Récapitulatif des règles d'assemblage disponibles	185 à 186
Annexe 14	Schéma du système d'information initial	187
Annexe 15	Ecran de description du terrain d'un projet	188
Annexe 16	Structure de base d'un système d'information de type MultiCAD pour la conception de maquettes virtuelles en architecture	189 à 193
Annexe 17	Extrait de code KAOLA - définition de la classe ESPACE	194
Annexe 18	Exemple de code GNU Prolog	195 à 202
Annexe 19	Code GNU Prolog pour les 11 espaces du problème de R. Maculet	212 à 215

Annexes

Annexe 1 : Extrait du décret n° 93-1268 du 29 Novembre 1993 relatif aux missions de maîtrise d'oeuvre confiées par des maîtres d'ouvrage publics à des prestataires de droit privé :

Section I Mission de maîtrise d'oeuvre pour les ouvrages de bâtiment.

Sous-section I Eléments de mission de maîtrise d'oeuvre pour les opérations de construction neuve de bâtiment.

Article 3

Les études d'esquisse ont pour objet :

- a) *De proposer une ou plusieurs solutions d'ensemble, traduisant les éléments majeurs du programme, d'en indiquer les délais de réalisation et d'examiner leur compatibilité avec la partie de l'enveloppe financière prévisionnelle retenue par le maître de l'ouvrage et affectée aux travaux ;*
- b) *De vérifier la faisabilité de l'opération au regard des différentes contraintes du programme et du site.*

Article 4

Les études d'avant-projet comprennent des études d'avant-projet sommaire et des études d'avant-projet définitif.

I Les études d'avant-projet sommaire ont pour objet :

- a) *De préciser la composition générale en plan et en volume ;*
- b) *D'apprécier les volumes intérieurs et l'aspect extérieur de l'ouvrage ;*
- c) *De proposer les dispositions techniques pouvant être envisagées ;*
- d) *De préciser le calendrier de réalisation et, le cas échéant, le découpage en tranches fonctionnelles ;*
- e) *D'établir une estimation provisoire du coût prévisionnel des travaux.*

II. Les études d'avant-projet définitif ont pour objet :

- a) *De déterminer les surfaces détaillées de tous les éléments du programme ;*
- b) *D'arrêter en plans, coupes et façades les dimensions de l'ouvrage, ainsi que son aspect ;*
- c) *De définir les principes constructifs, les matériaux et les installations techniques ;*
- d) *D'établir l'estimation définitive du coût prévisionnel des travaux, décomposés en lots séparé ;*
- e) *De permettre au maître de l'ouvrage d'arrêter définitivement le programme ;*
- f) *De permettre l'établissement du forfait de rémunération dans les conditions prévues par le contrat de maîtrise d'oeuvre.*

Pour les ouvrages de construction neuve de logements, les études d'avant-projet sommaire et d'avant-projet définitif peuvent être exécutées en une seule phase d'études.

III. Les études d'avant-projet comprennent également l'établissement des dossiers et les consultations relevant de la compétence de la maîtrise d'oeuvre et nécessaires à l'obtention du permis de construire et des autres autorisations administratives, ainsi que l'assistance au maître de l'ouvrage au cours de leur instruction.

Article 5

Les études de projet ont pour objet :

- a) *De préciser par des plans, coupes et élévations, les formes des différents éléments de la construction, la nature et les caractéristiques des matériaux et les conditions de leur mise en oeuvre ;*
- b) *De déterminer l'implantation, et l'encombrement de tous les éléments de structure et de tous les équipements techniques ;*
- c) *De préciser les tracés des alimentations et évacuations de tous les fluides ;*
- d) *D'établir un coût prévisionnel des travaux décomposés par corps d'état, sur la base d'un avant-métré ;*
- e) *De permettre au maître de l'ouvrage, au regard de cette évaluation, d'arrêter le coût prévisionnel de la réalisation de l'ouvrage et, par ailleurs, d'estimer les coûts de son exploitation ;*
- f) *De déterminer le délai global de réalisation de l'ouvrage.*

Annexe 2 : Exemple d'article de descriptif provenant de la société XELLA Thermopierre (Société résultant de la fusion de YTONG et SIPOREX).

V.1.2 Murs de refends

Description

Les matériaux utilisés seront les suivants :

Blocs YTONG SIPOREX

Dimensions : longueur : 62.5 cm, hauteur 25 cm, largeur 20.25 ou 30 cm

Profil à poignées et emboîtement (TPE) et lisse à poignée(TP), suivant la norme NFP 14306 ou similaire

Mise en œuvre

La pose sera effectuée par du personnel qualifié. Le montage est réalisé à joints minces de mortier colle de type PREOCOL ou similaire, avec un premier rang posé sur une arase de mortier hydrofugé servant de coupure de capillarité, ou sur une arase de mortier incluant un feutre bitumé de type 36 « S ». Les joints seront croisés et collés 4 faces. Le rebouchage des trous et épaufrures éventuels sera réalisé à l'avancement, avec du mortier de rebouchage.

Les prescriptions particulières seront conformes au DTU 20.1, aux règles de l'art et aux règles parasismiques en vigueur.

Localisation

Mur de séparation entre les deux logements (largeur : 30 cm)

Mur de séparation entre séjour et chambre 1 pour chaque logement (largeur : 20.25 cm)

ROB KRIER

10 THESES SUR L'ARCHITECTURE

1 FONCTION, CONSTRUCTION ET FORME sont des facteurs équivalents et qui, réunis, constituent l'architecture. Aucun ne devrait primer sur l'autre.

2 FONCTION ET CONSTRUCTION sont des éléments utiles qu'il faut bien sûr intégrer dans toute construction. Ce n'est que la sublimation esthétique de ces éléments qui permet au bâtiment d'être qualifié d'architecture.

3 LES MOYENS DE SUBLIMATION ESTHETIQUE SONT :

- la proportion
- la composition
- l'emploi de matériaux et de la couleur et leur expression artistique

4 DIMENSION ESTHETIQUE - La beauté véritable en architecture revient à exprimer ce besoin qu'à l'homme de conférer à ses objets utiles une dimension poétique, et qui témoignera aussi de l'"esprit" de l'époque auprès des générations suivantes.

5 LA GEOMETRIE est la base de toute articulation architecturale. Expression géométrique organisée, l'architecture puise sa force d'expression dans le contraste qu'elle affirme par rapport à la nature, et non dans son ajustement formel. C'est une création de l'homme.

6 L'ECHELLE en architecture doit être fonction de la taille du corps humain et de ses schémas de comportement, de perception et de sensibilité. Elle ne doit pas donc être dictée uniquement par des principes techniques, structurels ou économiques.

7 L'ESPACE URBAIN - Toute nouvelle planification urbaine doit respecter l'ensemble du tissu urbain et apporter une solution formelle à l'organisation spatiale existante.

8 L'ARCHITECTURE DE LA VILLE a été négligée dans l'urbanisme du XXème siècle. Nos villes nouvelles se présentent comme des alignements de bâtiments. Cinq mille années d'histoire urbaine ont démontré que ces structures complexes de rues et de place sont en fait des zones de communication et des lieux d'identification. De même, les concepts traditionnels d'espace urbain ont leur raison d'être au sein de la ville moderne.

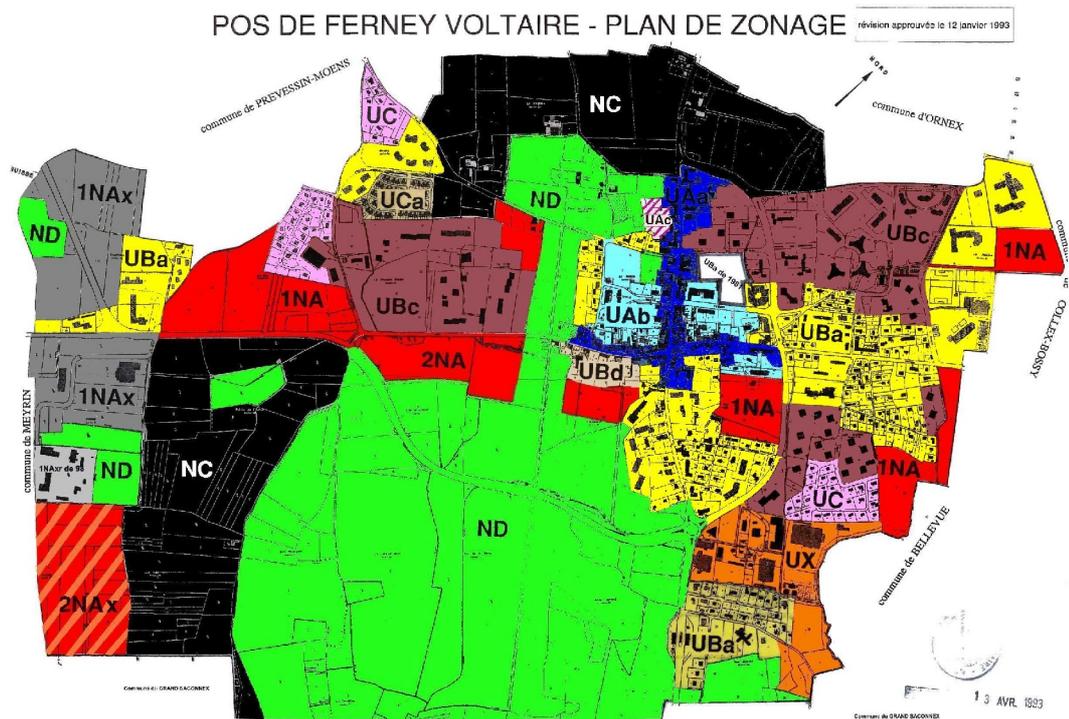
9 L'HISTOIRE - Une évaluation exacte de l'héritage légué par l'histoire filtre les expériences passées au profit de la planification à venir.

10 LA RESPONSABILITE DE L'ARCHITECTE - Il est l'unique responsable du produit qui surgit de sa planche à dessin, et qui porte sa signature. Aucun politicien et aucun financier n'assumera la responsabilité culturelle de l'architecte vis-à-vis d'un environnement mal planifié. Nos écoles se doivent de préparer les futures générations d'architectes à cette tâche lourdement éthique et morale.

Note : Rob KRIER est né en 1938 au Luxembourg. Il a émigré en Autriche, et a été professeur à l'Université Technique de Vienne.

Annexe 4 : Extrait de réglementation du P.O.S. pour la commune de Ferney-Voltaire(Ain) (<http://www.cc-pays-de-gex.fr/mairies/ferney>)

La commune est découpée en plusieurs secteurs dans lesquels des dispositions particulières sont applicables



Article U.B.10 – HAUTEUR MAXIMUM DES CONSTRUCTIONS

- *La hauteur des constructions est mesurée à partir du sol préexistant jusqu'au sommet du bâtiment, à l'exclusion des ouvrages techniques, des cheminées et des autres superstructures.*
- *La hauteur maximale est définie comme suit :*

· secteur UBc : $R + 5$

Dans tous les secteurs, la reconstruction à l'identique après sinistre est autorisée.

Article U.B.11– ASPECT EXTERIEUR

- *L'aspect d'ensemble et l'architecture des constructions, installations et de leurs dépendances doivent être en concordance avec le paysage bâti environnant et le caractère général du site.*

**CHAPITRE VI - ETABLISSEMENTS DU TYPE R : ETABLISSEMENTS
D'ENSEIGNEMENT, COLONIES DE VACANCES**

Article R 14 - Dégagements des écoles maternelles (Arrêté du 12 décembre 1984)

Par extension aux dispositions de l'article CO 38 (§ 1,a), les locaux situés en mezzanine des écoles maternelles doivent être pourvus d'une ou plusieurs issues permettant une évacuation directe :

soit vers l'extérieur ;

soit au même niveau vers une circulation horizontale ou un local contigu.

Article R 15 – Escaliers

En aggravation aux dispositions des articles CO 49 et CO 52 (§ 3) :

a) La distance maximale à parcourir, de tout point d'un local, pour gagner un escalier protégé est de 40 mètres ; cette distance est réduite à 30 mètres si on se trouve dans une partie de l'établissement formant cul-de-sac.

b) L'absence de protection des escaliers est admise dans les seuls cas suivants :

- dans un bâtiment ne comportant qu'un étage sur rez-de-chaussée, et sous réserve que le nombre de personnes admises à l'étage ne dépasse pas 150 ;

- pour un seul escalier supplémentaire desservant deux étages sur rez-de-chaussée au plus.

Dans les deux cas prévus au b, aucun local réservé au sommeil ne doit être aménagé dans le bâtiment.

Annexe 6 : Le style en Architecture : Etude de façades de R.Venturi et D.S Brown [VEN 72].

A voir sur le site <http://www.vsba.com/projects/index.html>

Annexe 7 : Sur l'implantation des cathédrales - Extrait de [NIC 99]

Pierre-Alexandre NICOLAS – Le Secret des Cathédrales – Arcadis Editions

(...)

Il ne semblera pas étonnant, au regard des données ci dessus, de constater que le plan des églises et cathédrales s'élabore, notamment, à partir du premier rayon du soleil. Comme si les anciens savaient qu'en ce premier rayon toutes les énergies du lieu se réveillent pour lui donner sa teinte maximum.

(...)

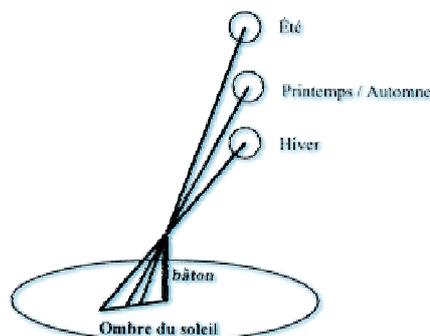
Ce qui semble alors important pour le bâtisseur, en cette aurore, est cette douce lumière solaire dont il faudra capter le premier rayon qui donnera l'orientation de la cathédrale. Par ailleurs, ce géomètre de l'espace n'aura pu être qu'impressionné, imprégné, par la position des étoiles à leur couchant, dont un fin relevé pourra plus tard donner l'orientation des constructions liées à la cathédrale.

Œuvre solaire ou œuvre stellaire ? La cathédrale est une combinaison des deux. Néanmoins, de par l'aspect diurne de l'être humain, la cathédrale est avant tout une œuvre solaire. C'est le jour que l'homme vit et c'est aussi le jour qu'il prie Dieu de lui accorder ses faveurs. Les rituels chrétiens sont d'ailleurs des rituels de jour et non des rituels de nuit (sauf la sainte messe de Noël)... L'antique tradition chrétienne voulait que le Christ apparaisse au point du Levant pour son retour. Il est donc logique que le lieu de culte chrétien se tourne vers ce point pour pouvoir mieux accueillir son rédempteur.

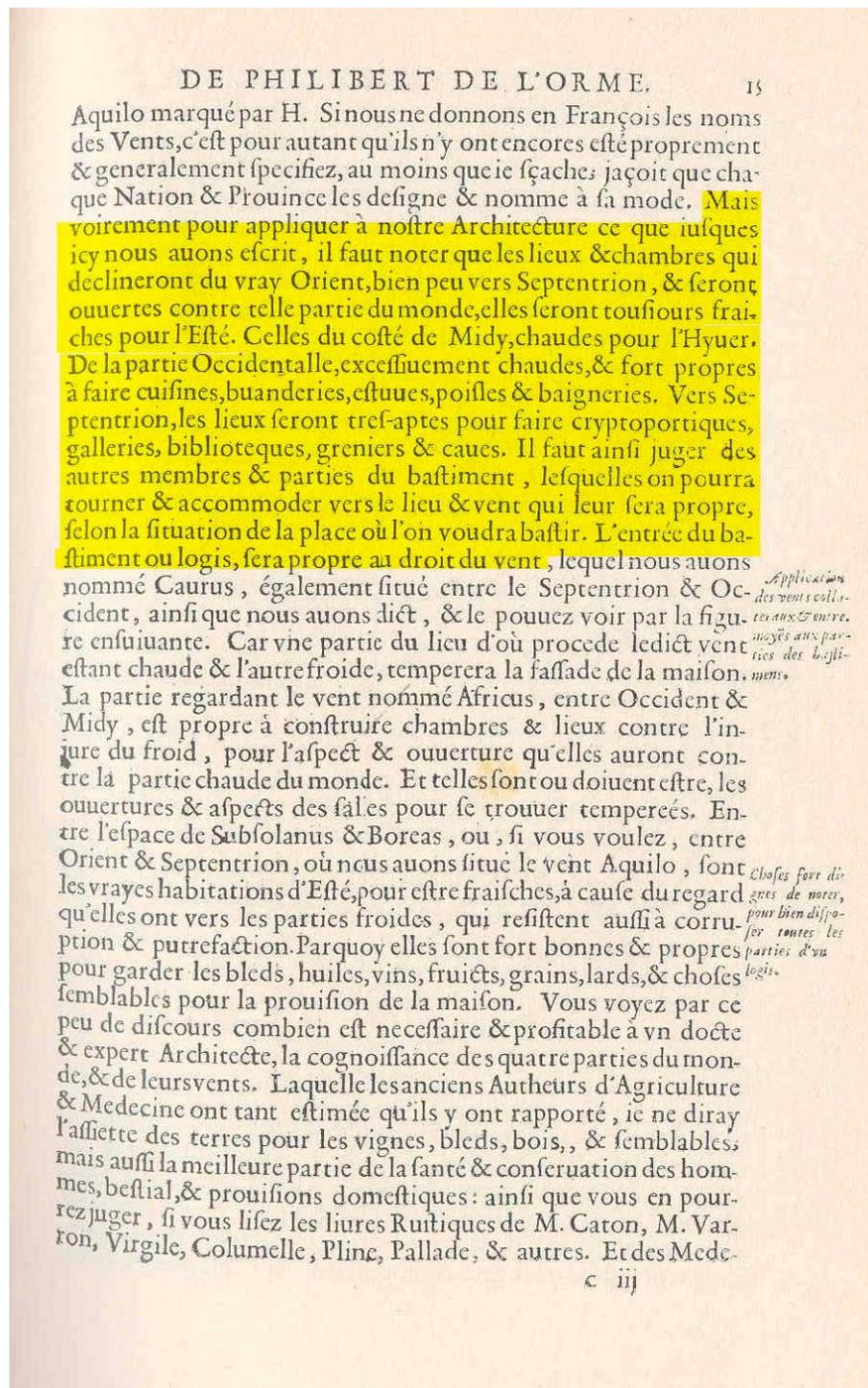
Notons que les temples des autres traditions ont fort souvent pour direction celle du lever du soleil qui paraît avoir été un axe fondamental pour l'élaboration des lieux sacrés.

(...)

Au lever du soleil, le jour de la dédicace, un bâton planté projette son ombre sur le sol. La direction de cette ombre indique l'axe de construction de la cathédrale. Cet axe est dénommé le decumanus. A midi solaire le même jour, l'ombre projetée détermine le point de passage d'un autre axe qui sera perpendiculaire au premier: le cardo.



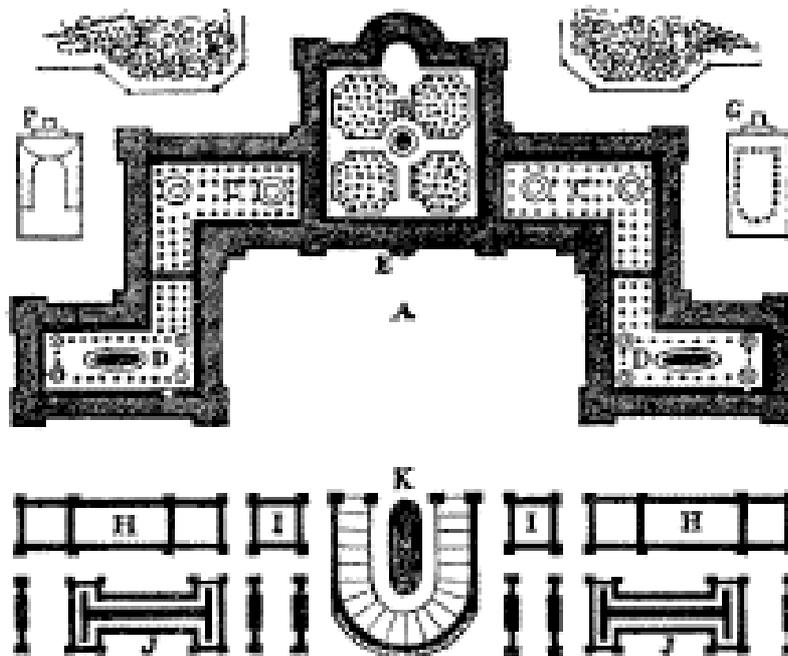
Annexe 8 : Exemple de conseil sur le positionnement des chambres.
D'après Philibert de l'Orme (1648) [ORM 1648]



Annexe 9 : Description du phalanstère de Charles Fourier , commentée par Pierre MEKLE [MER 01]

Enfin, le dernier ensemble de prescriptions préparatoires porte sur les conditions architecturales de l'expérience : Fourier ne se contente pas de décrire l'implantation géographique et la composition sociologique de la Phalange, il la dote d'un bâtiment, à la fois lieu de vie et de travail. De tous les néologismes inventés par Fourier, celui par lequel il désigne ce lieu est sans doute un des rares qui a laissé une trace durable dans le langage commun : il s'agit en effet du "Phalanstère", mot créé par Fourier à partir du radical phalan(ge), et du suffixe emprunté à (mona)stère. L'ensemble des prescriptions architecturales contenues dans les descriptions fouriéristes du Phalanstère ne vise qu'un seul et même but, faciliter les relations interindividuelles afin de permettre le déploiement intégral des effets de l'attraction passionnée : de cette ambition témoignent la volonté de rapprocher les différents bâtiments les uns des autres, la multiplication des "rues-galeries", passages abrités et chauffés destinés à faciliter la circulation, ou encore la multiplication des salles de réunions — ou "séristères" — de toutes tailles. En 1822, Fourier n'a pas eu la possibilité d'insérer dans son traité les plans du Phalanstère qu'il imaginait, plans qu'il jugeait pourtant "indispensables quand il s'agit de dispositions inusitées en architecture". Ce n'est donc qu'en 1829, dans *Le nouveau monde industriel*, que ces plans furent reproduit.

Plan d'ensemble du phalanstère - Illustration tirée de [FOU 1829]



LÉGENDE

- A. Grande place de parade au centre du Phalanstère.
- B. Jardin d'hiver, planté d'arbres verts, environné de serres chaudes, etc.
- C. D. Cours intérieures de service, avec arbres, jets d'eau, bassins, etc.
- E. Grande entrée, grand escalier, tour d'ordre, etc.
- F. Théâtre.
- G. Église.
- H. I. Grands ateliers, magasins, greniers, hangars, etc.
- J. Étables, écuries et bâtiments ruraux.
- K. Basse-cour.

Annexe 10 : Extrait du décret n° 87-149 du 6 mars 1987 sur les conditions d'habitabilité des logements

Les logements à usage d'habitation ou la partie de locaux à usage mixte professionnel et d'habitation destinée à l'habitation doivent présenter les caractéristiques ci-après :

a) Composition et dimensions :

Un logement comprend au minimum une pièce d'habitation et les pièces de service attenantes suivantes : cuisine ou coin cuisine, salle d'eau et cabinet d'aisances, celui-ci pouvant être situé dans la salle d'eau ; cette pièce d'habitation doit avoir au moins neuf mètres carrés lorsque la cuisine est séparée ou au moins douze mètres carrés lorsqu'il existe un coin cuisine.

La hauteur sous plafond des pièces d'habitation et de la cuisine est égale au moins à deux mètres vingt. Toutefois, celle-ci peut être inférieure à deux mètres vingt, sans être inférieure à deux mètres, à condition que le logement n'ait pas subi de division en hauteur depuis le 1er septembre 1948

b) Ouverture et ventilation :

Toute pièce d'habitation est pourvue d'un ouvrant donnant à l'extérieur du bâtiment permettant une aération et un éclairage suffisants et assurant le bon usage du logement et la conservation du bâtiment.

Toute pièce de service est pourvue d'un ouvrant donnant à l'extérieur du bâtiment ou, à défaut, est équipée d'un système d'évacuation débouchant à l'extérieur du bâtiment et assurant le bon usage du logement et la conservation de ce bâtiment.

c) Cuisine ou coin cuisine :

La cuisine ou le coin cuisine est intérieur et comprend un évier avec siphon raccordé à une chute d'eaux usées, sur lequel sont installées l'eau potable froide et l'eau chaude. La cuisine ou le coin cuisine est aménagé de manière à pouvoir recevoir un appareil de cuisson (à gaz ou électrique) ou possède un conduit d'évacuation de fumée en bon état.

d) Salle d'eau et cabinet d'aisances :

La salle d'eau est intérieure au logement, constitue une pièce séparée et comporte une baignoire ou une douche et un lavabo munis de siphons et alimentés en eau chaude et froide.

Le cabinet d'aisances est intérieur au logement, constitue une pièce séparée, à moins qu'il ne fasse partie de la salle d'eau, et est pourvu d'une cuvette à l'anglaise et d'une chasse d'eau. S'il est équipé d'une fosse étanche, la chasse d'eau peut être remplacée par un simple effet d'eau.

Le cabinet d'aisances est séparé de la cuisine et de la pièce où sont pris les repas. Les sols sont étanches et les parois situées autour de la douche et de la baignoire sont protégées contre les infiltrations.

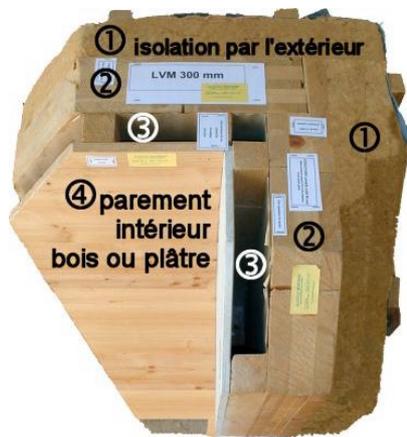
Descriptif des maisons Méga Bois

*Le système constructif est exclusif avec une structure en panneaux contre-collés d'épaisseur 94 mm de la hauteur d'un étage et jusqu'à 16m de longueur. La colle **non toxique** est contrôlée par le bureau suisse EMPA et l'Institut de Biologie du Bâtiment Allemand.*

Isolation par l'extérieur (100mm de laine de bois), avec lame d'air de 25mm et bardage en mélèze ou red cédar ou parement crépi minéral à la chaux naturelle.

Isolation de toiture constituée des éléments suivants (de l'intérieur vers l'extérieur : Fermacell ou lambris, laine de bois 160mm, puis sous toiture rigide laine de bois latex 18mm, tuiles en terre cuite).

Finitions intérieures en plaques de plâtre Fermacell ou en lambris de 18mm.



Vue en coupe d'un mur Méga Bois

- (1) Isolation des murs par l'extérieur, fibre de bois (pavatherm 80 mm + isoroof 18 mm)
- (2) Murs porteurs et murs de refend en panneaux de bois massif contre-collé d'épaisseur 94 mm
- (3) vide technique sur tous les murs, épaisseur 35 ou 40 mm
- (4) finition intérieure en lambris ou en plaques de plâtre Fermacell.

Annexe 12 : Exemple de mise en œuvre de carreaux de plâtre

http://www.bpbplaco.com/dyn/bpbplaco/pdtsys/promise.asp?pr_id=30

Société : CAROPLATRE

Traçage - Une fois les mesures prises, tracez au sol, au mur et au plafond l'emplacement de la cloison à l'aide d'un cordeau bleu (ou laser).

Pose des règles à vérin - Afin de vérifier l'alignement des carreaux pendant le montage de la cloison, posez des règles à vérin, à intervalles réguliers (tous les 2 mètres par exemple) et à chaque extrémité de la cloison, côté intérieur du montage.

Piquage - Pour une bonne adhérence des carreaux sur les murs existants, piquez préalablement les murs déjà enduits.

Gâchage de la colle – Utilisez la colle Placol 1 heure ou 2 heures (voir mode d'emploi au dos du sac). La colle obtenue doit être parfaitement homogène.*

Pose des carreaux – Encollez régulièrement la mortaise et le bord du carreau touchant le sol, le mur ou le poteau de départ.

Posez le carreau selon le tracé sur le sol, mortaise vers le bas et maintenez le fortement afin d'assurer une bonne adhérence au sol et au mur de départ.

Poursuivez la pose des carreaux en encollant les tenons et mortaises puis en les emboîtant. Serrez fortement les carreaux jusqu'au reflux de la colle. Pour une bonne rigidité et une planéité parfaite de la cloison décalez les joints d'une rangée sur deux.

Pose du dernier carreau – Le dernier carreau est coupé pour que subsiste un vide (environ 1cm) entre le mur et le carreau.

Remplissez de colle l'espace resté vide.

Liaison plafond - cloison. La pose d'une bande en liège ou de mousse polyuréthane est indispensable, sauf lorsque le plafond est en plaques de plâtre.

Tableau quantitatif

<i>Épaisseur des carreaux (cm)</i>	4	5	6	7	10
<i>Carreaux Caroplastre* (m)</i>	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03
<i>Colle Placol* (kg)</i>	1,1	1,4	1,6	1,8	2,5
<i>Blocage (plâtre + colle) (kg) + bande résiliente (m)</i>	1,1	1,4	1,6	1,8	2,5
	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
<i>ou Mousse polyuréthane</i>	1 bombe de 0,6 l permet de traiter 12 à 15 m de cloison de 7 cm				
<i>Bande à joint 75 mm (m)</i>	0,4 en doublage				
	0,8 en cloison				
<i>Pattes à vis pour fenêtre de bois et huisserie</i>	4 par fenêtre				
	6 par huisserie				
<i>Cornière de renfort d'angle</i>	2,50 m par angle				

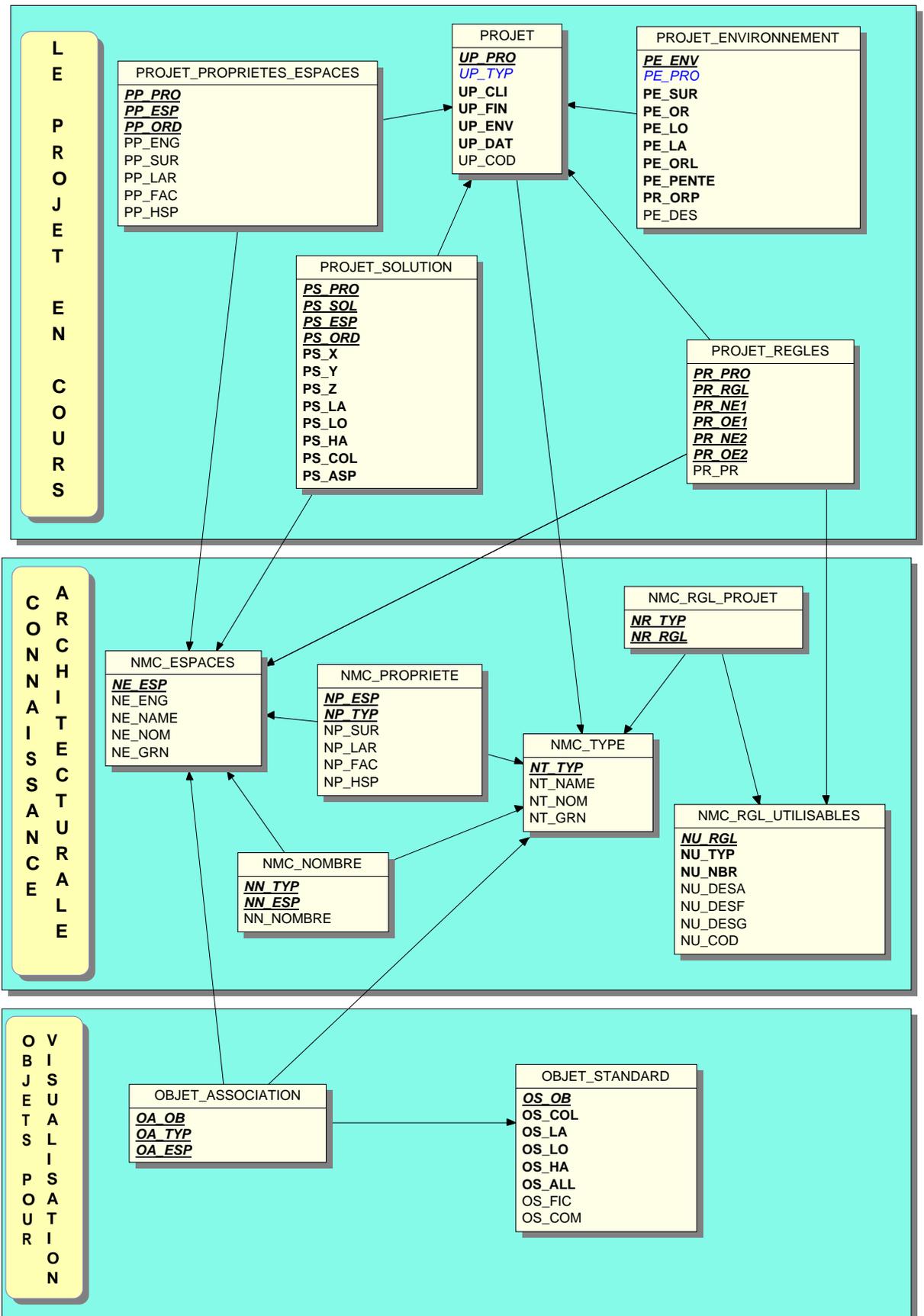
Quantités nécessaires pour réaliser 1 m² de cloison

Annexe 13 : Récapitulatif des règles d'assemblage des espaces disponibles pour le concepteur décrivant une scène

Caractérisation d'un espace	1	definir_piece
Intégrité	2	respecter_surface
	3	respecter_hsp
Orientation	3	a_lest_de
	4	a_lest_dans
	5	a_louest_de
	6	a_louest_dans
	7	au_nord_de
	8	au_nord_dans
	9	au_sud_de
	10	au_sud_dans
Proximité	11	communiquer
	12	a_cote_de
Chevauchement	13	non_chevauche
	14	chevauche
	15	assemble
Axialité	16	dans_axe_NS
	17	dans_axe_EO
Positionnement relatif	18	est_contenu_dans
	19	au_dessus_de
	20	au_dessous_de
Altitude	21	de_plain_pied
	22	altitude
	23	empile_sur
	24	au_centre
	25	aligne_nord
	24	aligne_sud
	25	aligne_est
	26	aligne_ouest
Symétrie	27	symetrique_NS
	28	symetrique_EO
Dimensionnement relatif	29	plus_grand
	30	plus_petit
	31	plus_large
	32	plus_long
	33	plus_haut
	34	plus_eleve
	35	moins_eleve
	36	meme_ouplus_altitude
	37	meme_largeur
	38	meme_longueur
	39	meme_altitude
	40	meme_hauteur
	41	meme_surface
	42	memes_dim

Coordonnées et dimensions absolues	43	pour_x
	44	pour_y
	45	pour_z
	46	pour_largeur
	47	pour_longueur
	48	pour_hauteur
	49	pour_largeur_longueur
	50	surface_exacte
Contrôle de forme	51	pas_trop_long
	52	tres_long
	53	est_carre

Annexe 14 : Schéma du système d'information initial



Annexe 15 : Ecran de description du terrain d'un projet dans le système d'information initial

The screenshot shows a window titled "Terrain" with the following sections:

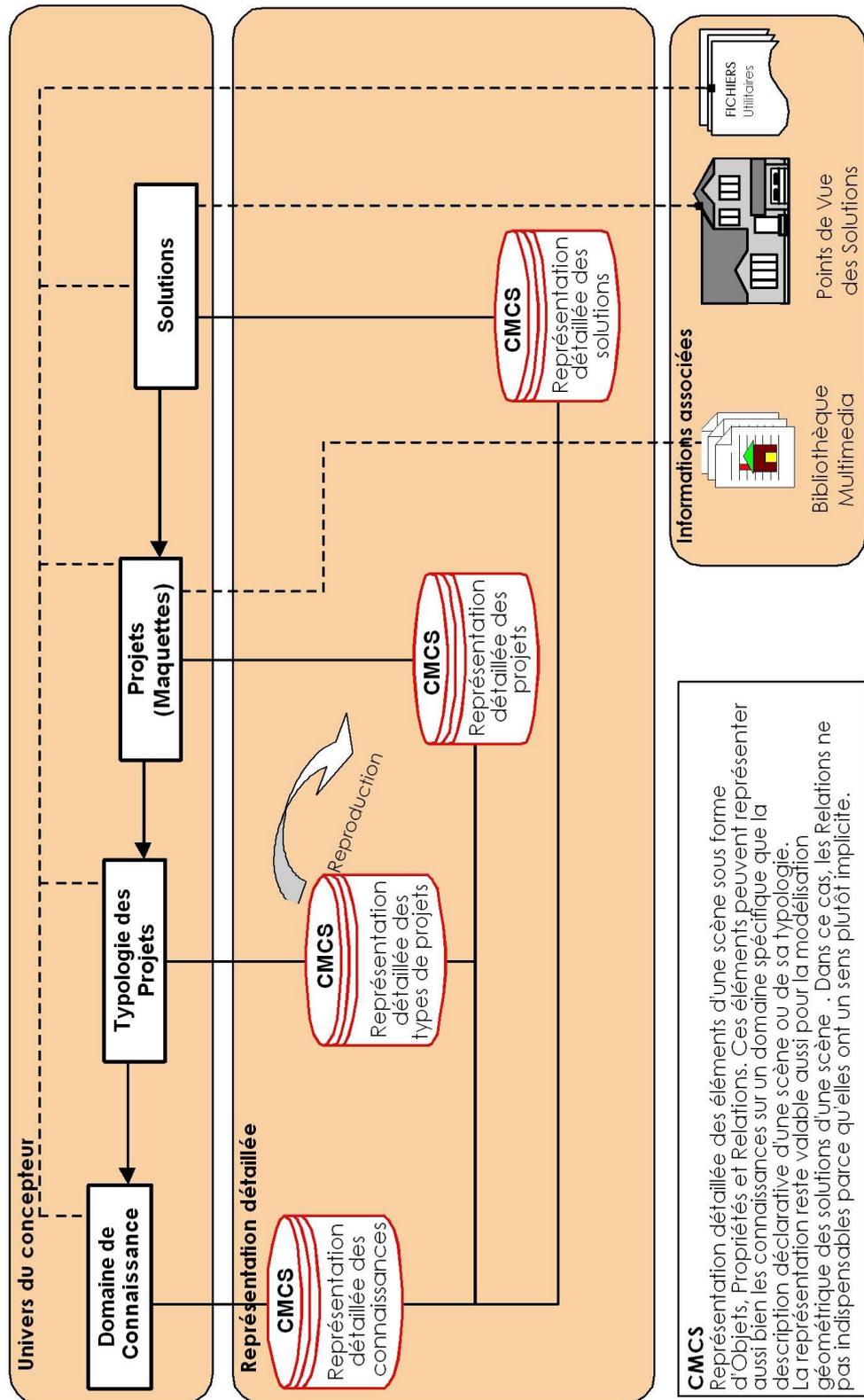
- Surface du terrain**: Three input fields for "Surface" (100), "Longueur" (10), and "Largeur" (10).
- Orientation du terrain en °**: An input field containing "15".
- Orientation de la longueur**: Radio buttons for "Nord" (selected) and "Est", with a green vertical bar to the right.
- Pente du terrain**: An input field for "en %" containing "5".
- Orientation de la pente du terrain**: A compass rose with directions N, N-O, N-E, O, S-O, S, and S-E. The "N-O" direction is selected with a diamond.
- Description du terrain**: A text area containing "Site classé" and "COS = 1".
- Que voulez-vous faire ?**: Two buttons, "Enregistrer" and "Annuler".

Un grand merci aux étudiants de deuxième année à 3IL en 2003, Isabelle APPLAINCOURT et Michaël GHERAB qui ont défini cet écran avec le formalisme KAOLA VISU.

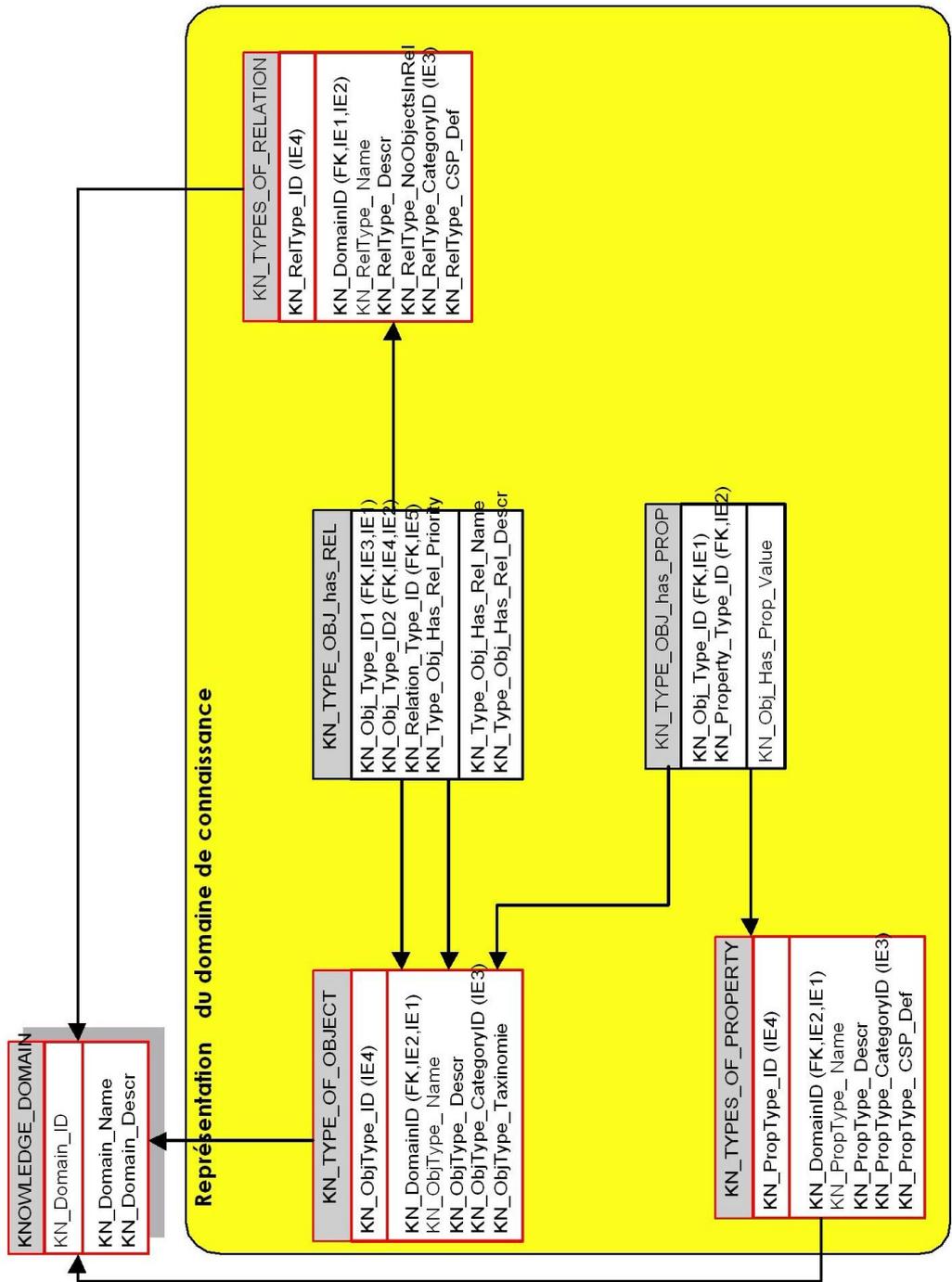
Annexe 16 : Structure de base d'un système d'information de type MultiCAD pour la conception de maquettes virtuelles en architecture

Annexe 16 a) - Structure générale

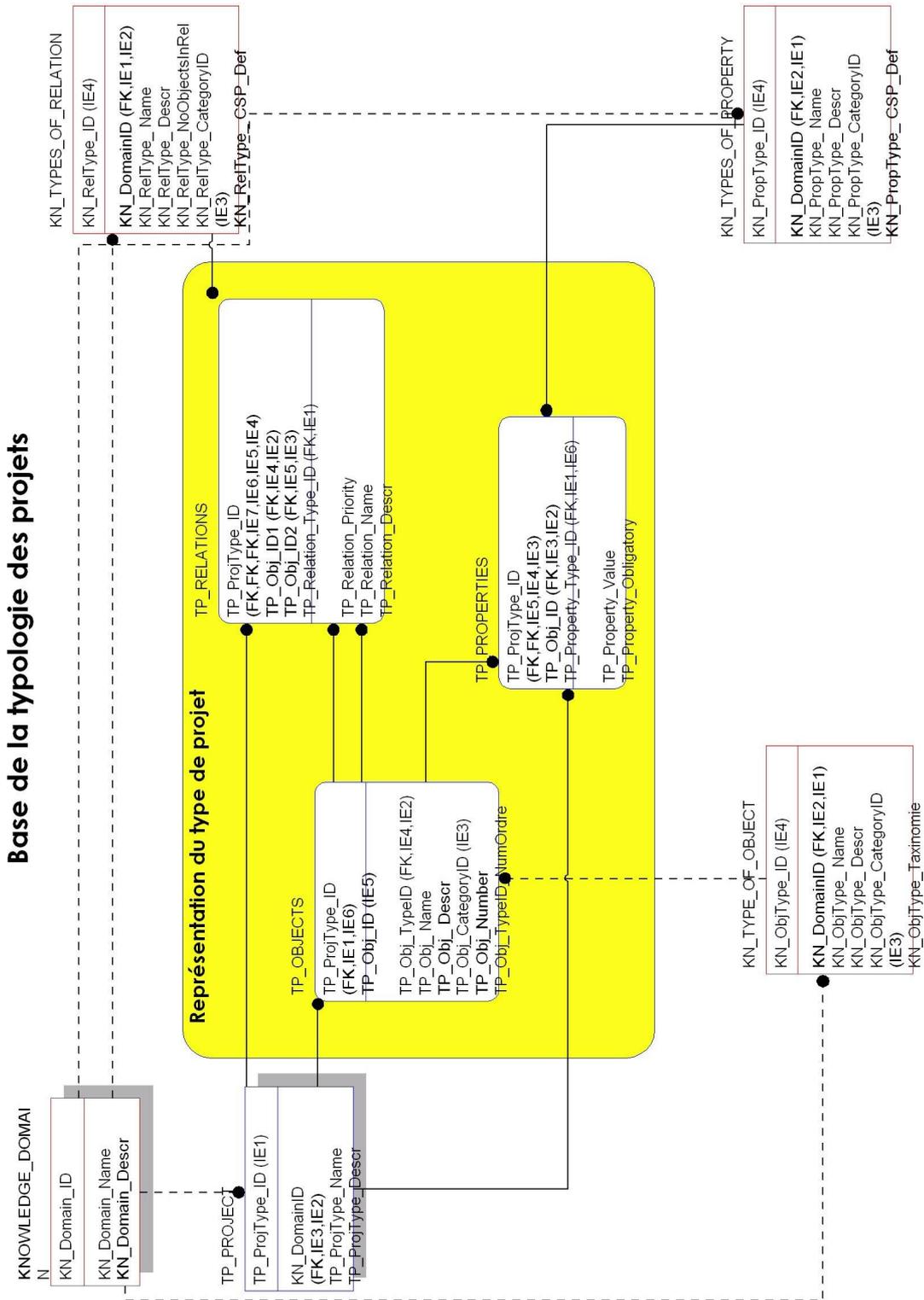
Structure de Base d'un Système d'Information du type MultiCAD pour la conception des maquettes en Architecture



Base des Connaissances

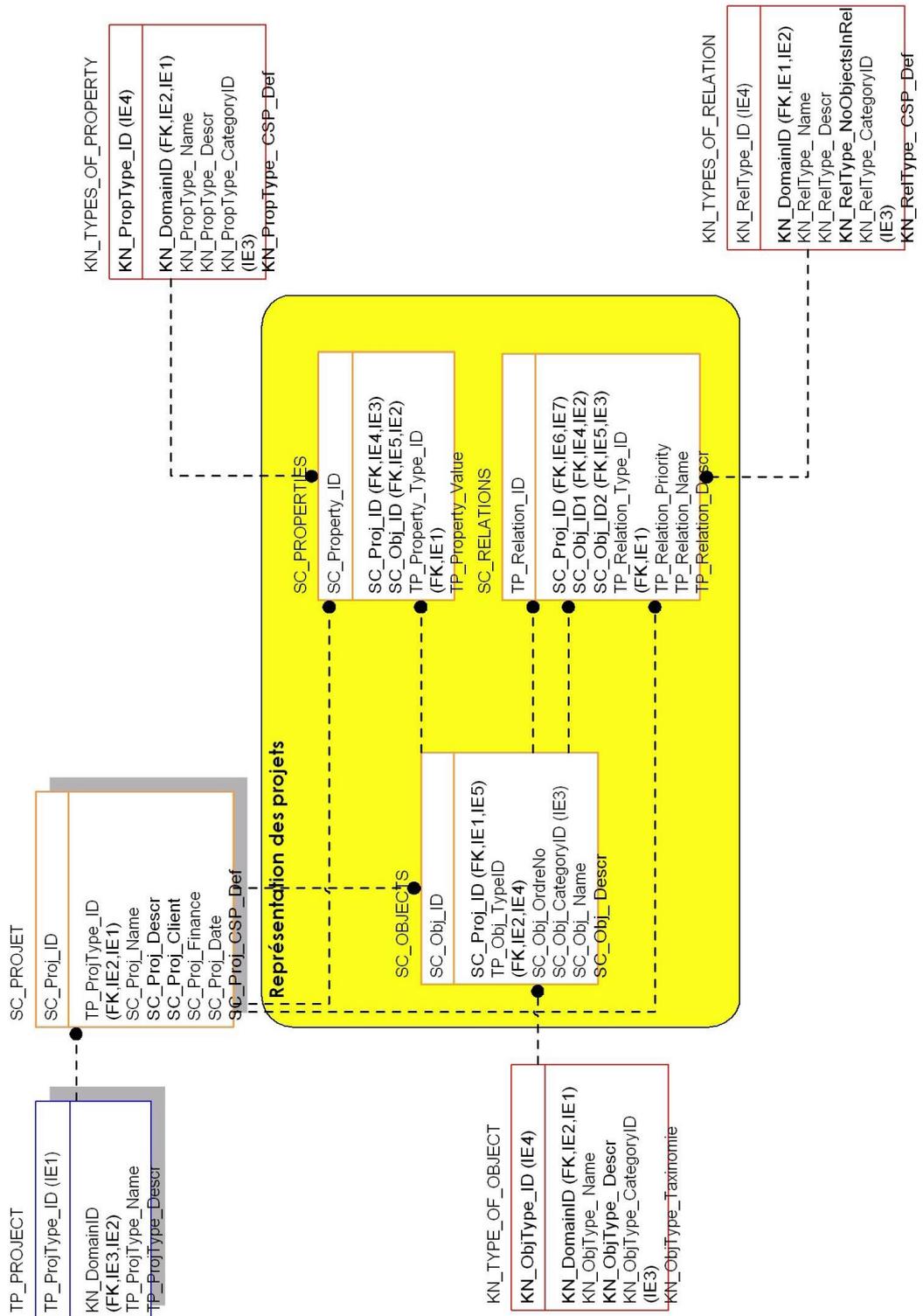


Annexe 16 c) - Base de la typologie des projets



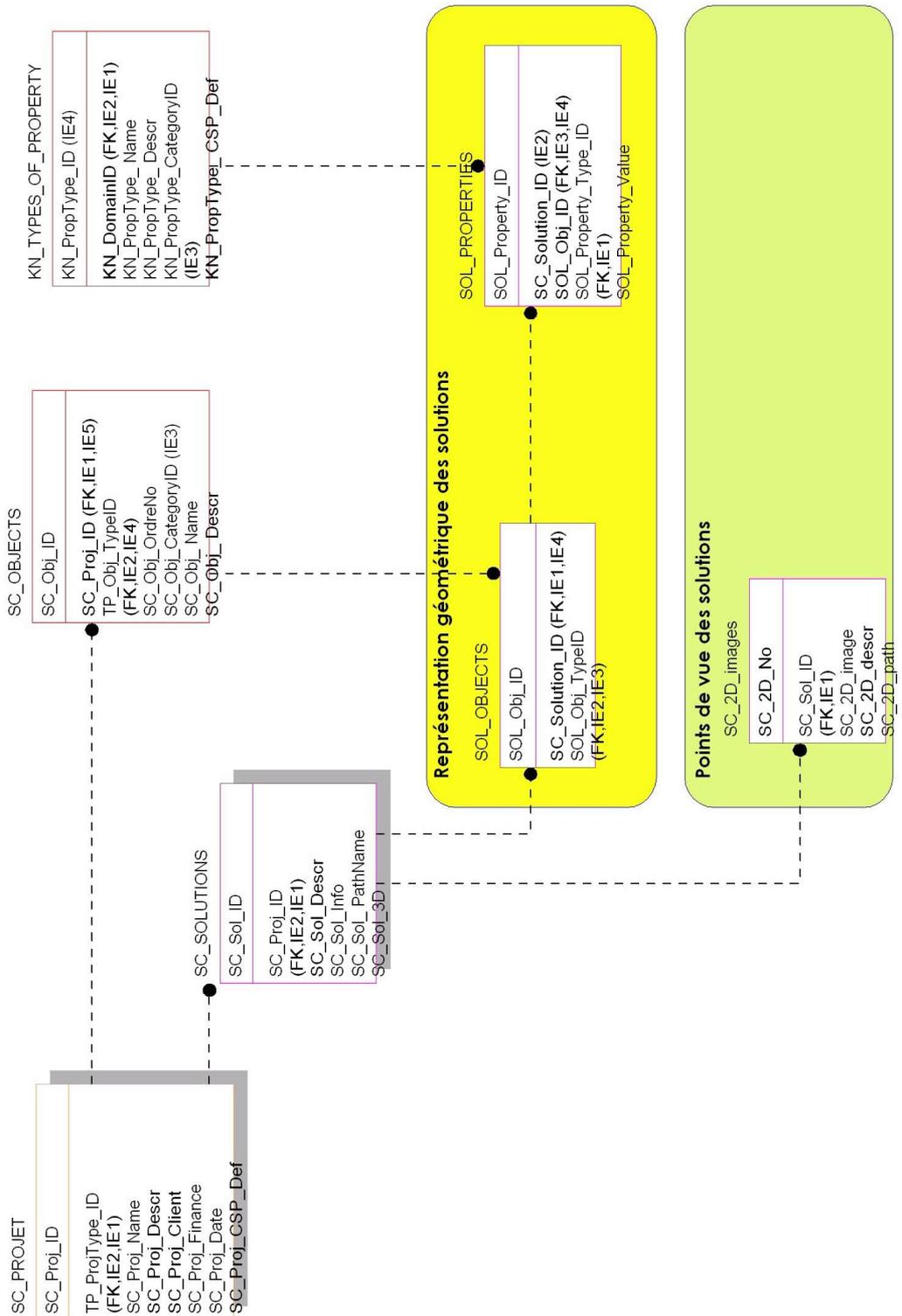
Annexe 16 d) - Base des projets

Base des projets



Annexe 16 e) - Base des solutions

Base de la typologie des projets



Annexe 17 : Extrait de code KAOLA - définition de la classe ESPACE

```
Specifications      UN_ESPACE

champ ESP_NOM
--> domaine_valeurs      alpha

champ ESP_TYPE
--> domaine_valeurs      numerique

champ ESP_NUM
--> domaine_valeurs      numerique

champ ESP_ENGLOB
--> domaine_valeurs      un_espace

// Caractéristiques

champ ESP_SURFMIN
--> domaine_valeurs      numerique

champ ESP_LAMIN
--> domaine_valeurs      numerique

champ ESP_FACMIN
--> domaine_valeurs      numerique

champ ESP_HSPMIN
--> domaine_valeurs      numerique

champ ESP_COUL
--> domaine_valeurs      alpha

champ ESP_ASP
--> domaine_valeurs      un_aspect

// Propriétés

champ ESP_FACADE
--> domaine_valeurs      {est, ouest, nord, sud}
--> multivalue           vrai

champ ESP_COMM
--> domaine_valeurs      un_espace
--> multivalue           vrai
--> symetrique           vrai

champ ESP_CONT
--> domaine_valeurs      {pas_trop_long, plain_pied,
                           oriente_ns, forme, respecter_surface}
--> multivalue           vrai
;

classe UN_ESPACE
;
```

Annexe 18 : Exemple de code GNU Prolog permettant de générer des solutions de placement pour les espaces d'un pavillon

```
% ce programme génère un fichier de solutions

% ATTENTION : système VRML
% x ---> vers la droite (largeur) vers l'EST
% y ---> en hauteur (hauteur)
% z ---> vers l'observateur (longueur ou profondeur) vers le SUD

% ==> les dimensions lues dans le fichier DescrInitiale
% sont converties en découpage sur le mètre, par exemple
% ECHELLE = 5, soit un pas d'énumération de 20 cm

% certaines parties de ce fichier doivent être générées par
% l'éditeur de projet architectural (ou urbanistique)
% à partir d'informations contenues dans la base de données projet
%
%-----
ouverture_fichier(Flux):-
  open('Description.txt', write, Flux,[]),
  statistics(runtime,[_,Y]),
  write(Flux,'# ---- [ Ouverture du fichier - time '),
  write(Flux, Y),
  write(Flux, ' ]'),
  write(Flux, '\n').
%-----
fermeture_fichier(Flux):-
  statistics(runtime,[_,Y]),
  write(Flux, '\n');
  write(Flux,'# ---- [ Fermeture du fichier - time '),
  write(Flux, Y),
  write(Flux, ' ]'),
  close(Flux).
%-----
% les coordonnées d'une pièce sont définies dans les
% limites de son espace englobant

definir_piece(X, Y, Z, La, Lo, Ha, XG, YG, ZG, LaG, LoG, HaG) :-
  Limite1 #=# XG + LaG,
  fd_min(XG, Lmin1),
  fd_max(Limite1, Lmax1),
  fd_domain(X, Lmin1, Lmax1),
  Limite2 #=# YG + HaG,
  fd_min(YG, Lmin2),
  fd_max(Limite2, Lmax2),
  fd_domain(Y, Lmin2, Lmax2),
  Limite3 #=# ZG + LoG,
  fd_min(ZG, Lmin3),
  fd_max(Limite3, Lmax3),
  fd_domain(Z, Lmin3, Lmax3),
  fd_max(LaG, Lmax4),
  fd_domain(La, 1, Lmax4),
  fd_max(LoG, Lmax5),
  fd_domain(Lo, 1, Lmax5),
  fd_max(HaG, Lmax6),
  fd_domain(Ha, 1, Lmax6).

%-----
% la pièce ne doit pas dépasser la hauteur sous plafond
% minimum ( à -5% et +10% près)
% HaMin est donné dans la description des pièces
% Ha est énuméré

respecter_hsp(Ha, HaMin) :-
  Hmin is round(HaMin * 0.95),
  Ha #>=# Hmin,
```

```

    Hmax is round(HaMin * 1.1),
    Hmax #>=# Ha.
%-----
%
% La surface de la pièce ne doit pas descendre
% sous la valeur de la surface minimum
% donné à la description de la pièce
% seuils : -5% et +10%
% On doit également respecter la largeur minimum

respecter_surface(La, Lo, SurfMin, LaMin) :-
    LMin is floor(LaMin * 0.95),
    La #>=# LMin,
    Lo #>=# LMin,
    SMin is floor(SurfMin * 0.95),
    (La * Lo) #>= SMin,
    SMax is ceiling(SurfMin * 1.1),
    SMax #>= (La * Lo).
%-----
%
% un espace reste contenu dans son englobant
% resserre le domaine de variation défini au départ
% car les coordonnées de l'englobant évoluent

est_contenu_dans(X, Y, Z, La, Lo, Ha, XG, YG, ZG, LaG, LoG, HaG) :-
    X #>=# XG,
    Y #>=# YG,
    Z #>=# ZG,
    XG + LaG #>=# X + La,
    YG + HaG #>=# Y + Ha,
    ZG + LoG #>=# Z + Lo.
%-----
%
% altitude de l'espace = altitude de l'englobant
% soit un plain_pied relatif

de_plain_pied(Y, YG) :-
    Y ==# YG.
%-----
%
% non chevauchement de deux espaces
% vérifié en 2D uniquement
% A AMELIORER : Compléter pour la 3D

non_chevauche(X, Z, La, Lo, XP, ZP, LaP, LoP) :-
    X #>= XP + LaP #\ /
    XP #>= X + La #\ /
    Z #>= ZP + LoP #\ /
    ZP #>= Z + Lo.
%-----
%
% espace 1 est plus grand en surface que espace 2

plus_grand(La1, Lo1, La2, Lo2) :-
    La1 * Lo1 #>=# La2 * Lo2.
%-----
%
% espace à l'EST dans son englobant
a_lest_dans(X, La, XG, LaG) :-
    X + La ==# XG + LaG.
%-----
%
% espace1 à l'EST de l'espace 2
a_lest_de(X1, X2, La2) :-
    X1 #>=# X2 + La2.
%-----
%
% espace à l'OUEST dans son englobant
a_louest_dans(X, XG) :-
    X ==# XG.
%-----
%
% espace1 à l'OUEST de l'espace 2
a_louest_de(X1, La1, X2) :-
    X2 #>=# X1 + La1.
%-----

```

```

%     espace au NORD dans son englobant
au_nord_dans(Z, ZG) :-
    Z ==# ZG.
%-----
%     espace1 au NORD de l'espace 2
au_nord_de(Z1, Lo1, Z2) :-
    Z2 #>=# Z1 + Lo1.
%-----
%     espace au SUD dans son englobant
au_sud_dans(Z, Lo, ZG, LoG) :-
    Z + Lo ==# ZG + LoG.
%-----
%     espace1 au SUD de l'espace 2
au_sud_de(Z1, Z2, Lo2) :-
    Z1 #>=# Z2 + Lo2.
%-----
%     proportions équilibrées (* 2 serait mieux - A AMELIORER)

pas_trop_long(La, Lo) :-
    La #># Lo,
    3 * Lo #>=# La.
pas_trop_long(La, Lo) :-
    Lo #># La,
    3 * La #>=# Lo.
%-----
%     Dans l'axe NS ou EO

dans_axe_NS(La, Lo) :-
    Lo #># La.
dans_axe_EO(La, Lo) :-
    La #># Lo.

%-----
%     espace 1 communique avec espace 2
%     vérifie qu'on peut percer une porte
%     cloison commune sur 1 m          (<-- attention à l'ECHELLE)
%     en 2D SEULEMENT

communique(X1, Z1, La1, Lo1, X2, Z2, La2, Lo2) :-
    X1 + La1 ==# X2,
    Z2 #>=# Z1,
    Lo2 #>=# 1,
    La2 #>=# 1,
    Z1 + Lo1 #>=# Z2 + 1.
communique(X1, Z1, La1, Lo1, X2, Z2, La2, Lo2) :-
    X1 + La1 ==# X2,
    Lo1 #>=# 1,
    La2 #>=# 1,
    Z1 #>=# Z2,
    Z2 + Lo2 #>=# Z1 + 1.
communique(X1, Z1, La1, Lo1, X2, Z2, La2, Lo2) :-
    X2 + La2 ==# X1,
    Lo1 #>=# 1,
    La1 #>=# 1,
    Z1 #>=# Z2,
    Z2 + Lo2 #>=# Z1 + 1.
communique(X1, Z1, La1, Lo1, X2, Z2, La2, Lo2) :-
    X2 + La2 ==# X1,
    Lo2 #>=# 1,
    La1 #>=# 1,
    Z2 #>=# Z1,
    Z1 + Lo1 #>=# Z2 + 1.
communique(X1, Z1, La1, Lo1, X2, Z2, La2, Lo2) :-
    Z1 + Lo1 ==# Z2,
    X2 #>=# X1,
    X1 + La1 #>=# X2 + 1,
    La2 #>=# 1,

```

```

    Lo2 #>=# 1.
communiquer(X1, Z1, La1, Lo1, X2, Z2, La2, Lo2) :-
    Z1 + Lo1 ==# Z2,
    X1 #>=# X2,
    X2 + La2 #>=# X1 + 1,
    La1 #>=# 1,
    Lo2 #>=# 1.
communiquer(X1, Z1, La1, Lo1, X2, Z2, La2, Lo2) :-
    Z2 + Lo2 ==# Z1,
    X1 #>=# X2,
    X2 + La2 #>=# X1 + 1,
    Lo1 #>=# 1,
    La1 #>=# 1.
communiquer(X1, Z1, La1, Lo1, X2, Z2, La2, Lo2) :-
    Z2 + Lo2 ==# Z1,
    X2 #>=# X1,
    X1 + La1 #>=# X2 + 1,
    La2 #>=# 1,
    Lo1 #>=# 1.
%-----
%
%   Afficher un espace
%
espace(Flux) :- write(Flux, ' ').
%-----
%
%   Format de la ligne
%   Nom espace, couleur, x, y, z, la, lo, ha, Transp -->
%   0 terrain, 1 pièce terminale, entre 0 et 1: intermédiaire
%
afficher_boite(Flux, X, Y, Z, La,Lo, Ha, Piece, Couleur, Transp) :-
    write(Flux, Piece), espace(Flux),
    write(Flux, Couleur), espace(Flux),
    write(Flux, X),espace(Flux),
    write(Flux, Y), espace(Flux),
    write(Flux, Z),espace(Flux),
    write(Flux, La),espace(Flux),
    write(Flux, Lo),espace(Flux),
    write(Flux, Ha),espace(Flux),
    write(Flux, Transp),
    write(Flux, '\n').
%-----
%
pavillon(Flux) :-
%-----
%----- le code qui suit est généré -----
%-----
%
% PARAMETRES -----
%
%ECHELLE    1.00
%PENTE      1.00  N
%
% 0 TERRAIN
%-----
X0 ==# 0,
Y0 ==# 0,
Z0 ==# 0,
La0 ==# 12,
Lo0 ==# 12,
Ha0 ==# 2,
%
% 1 PAVILLON contenu dans TERRAIN - 0
%-----
definir_piece(X1, Y1, Z1, La1, Lo1, Ha1, X0, Y0, Z0, La0, Lo0, Ha0),
est_contenu_dans(X1, Y1, Z1, La1, Lo1, Ha1, X0, Y0, Z0, La0, Lo0, Ha0),
S1 ==# 78,

```

```

LaMin1 ==# 7,
FacMin1 ==# 3,
HaMin1 ==# 2,
respecter_hsp(Ha1, HaMin1),
respecter_surface(La1, Lo1, S1, LaMin1),
a_lest_dans(X1, La1, X0, La0),
de_plain_pied(Z1, Z0),

%2 ZONE JOUR contenu dans PAVILLON - 1
%-----
definir_piece(X2, Y2, Z2, La2, Lo2, Ha2, X0, Y0, Z0, La0, Lo0, Ha0),
est_contenu_dans(X2, Y2, Z2, La2, Lo2, Ha2, X1, Y1, Z1, La1, Lo1, Ha1),
S2 ==# 45,
LaMin2 ==# 5,
FacMin2 ==# 3,
HaMin2 ==# 2,
respecter_hsp(Ha2, HaMin2),
respecter_surface(La2, Lo2, S2, LaMin2),
au_sud_dans(Z2, Lo2, Z1, Lo1),
a_louest_dans(X2,X1),

%3 ZONE NUIT contenu dans PAVILLON - 1
%-----
definir_piece(X3, Y3, Z3, La3, Lo3, Ha3, X0, Y0, Z0, La0, Lo0, Ha0),
est_contenu_dans(X3, Y3, Z3, La3, Lo3, Ha3, X1, Y1, Z1, La1, Lo1, Ha1),
S3 ==# 25,
LaMin3 ==# 3,
FacMin3 ==# 2,
HaMin3 ==# 2,
respecter_hsp(Ha3, HaMin3),
respecter_surface(La3, Lo3, S3, LaMin3),
non_chevauche(X2, Z2, La2, Lo2, X3, Z3, La3, Lo3),
communique(X3, Z3, La3, Lo3, X2, Z2, La2, Lo2),

% 4 GARAGE contenu dans TERRAIN - 0
%-----
definir_piece(X4, Y4, Z4, La4, Lo4, Ha4, X0, Y0, Z0, La0, Lo0, Ha0),
est_contenu_dans(X4, Y4, Z4, La4, Lo4, Ha4, X0, Y0, Z0, La0, Lo0, Ha0),
S4 ==# 11,
LaMin4 ==# 3,
FacMin4 ==# 3,
HaMin4 ==# 2,
respecter_hsp(Ha4, HaMin4),
respecter_surface(La4, Lo4, S4, LaMin4),
au_nord_dans(Z4, Z0),
dans_axe_NS(La4, Lo4),
non_chevauche(X4, Z4, La4, Lo4, X1, Z1, La1, Lo1),
communique(X4, Z4, La4, Lo4, X2, Z2, La2, Lo2),

%5 CHAMBRE 1 contenu dans ZONE NUIT - 3
%-----
definir_piece(X5, Y5, Z5, La5, Lo5, Ha5, X0, Y0, Z0, La0, Lo0, Ha0),
est_contenu_dans(X5, Y5, Z5, La5, Lo5, Ha5, X3, Y3, Z3, La3, Lo3, Ha3),
S5 ==# 11,
LaMin5 ==# 3,
FacMin5 ==# 1,
HaMin5 ==# 2,
respecter_hsp(Ha5, HaMin5),
respecter_surface(La5, Lo5, S5, LaMin5),
dans_axe_EO(La5, Lo5),
a_lest_dans(X5, La5, X1, La1),

%6 CHAMBRE 2 contenu dans ZONE NUIT - 3
%-----
definir_piece(X6, Y6, Z6, La6, Lo6, Ha6, X0, Y0, Z0, La0, Lo0, Ha0),
est_contenu_dans(X6, Y6, Z6, La6, Lo6, Ha6, X3, Y3, Z3, La3, Lo3, Ha3),
S6 ==# 9,

```

```

LaMin6 ==# 3,
FacMin6 ==# 1,
HaMin6 ==# 2,
respecter_hsp(Ha6, HaMin6),
respecter_surface(La6, Lo6, S6, LaMin6),
a_lest_dans(X6, La6, X1, La1),
non_chevauche(X5, Z5, La5, Lo5, X6, Z6, La6, Lo6),

%7 BAINS contenu dans ZONE NUIT - 3
%-----
definir_piece(X7, Y7, Z7, La7, Lo7, Ha7, X0, Y0, Z0, La0, Lo0, Ha0),
est_contenu_dans(X7, Y7, Z7, La7, Lo7, Ha7, X3, Y3, Z3, La3, Lo3, Ha3),
S7 ==# 5,
LaMin7 ==# 1,
FacMin7 ==# 0,
HaMin7 ==# 2,
respecter_hsp(Ha7, HaMin7),
respecter_surface(La7, Lo7, S7, LaMin7),
pas_trop_long(La7, Lo7),
non_chevauche(X7, Z7, La7, Lo7, X5, Z5, La5, Lo5),
non_chevauche(X7, Z7, La7, Lo7, X6, Z6, La6, Lo6),

%8 ENTREE contenu dans ZONE JOUR - 2
%-----
definir_piece(X8, Y8, Z8, La8, Lo8, Ha8, X0, Y0, Z0, La0, Lo0, Ha0),
est_contenu_dans(X8, Y8, Z8, La8, Lo8, Ha8, X2, Y2, Z2, La2, Lo2, Ha2),
S8 ==# 3,
LaMin8 ==# 1,
FacMin8 ==# 1,
HaMin8 ==# 2,
respecter_hsp(Ha8, HaMin8),
respecter_surface(La8, Lo8, S8, LaMin8),
au_nord_dans(Z8, Z2),
communique(X8, Z8, La8, Lo8, X3, Z3, La3, Lo3),

%9 CUISINE contenu dans ZONE JOUR - 2
%-----
definir_piece(X9, Y9, Z9, La9, Lo9, Ha9, X0, Y0, Z0, La0, Lo0, Ha0),
est_contenu_dans(X9, Y9, Z9, La9, Lo9, Ha9, X2, Y2, Z2, La2, Lo2, Ha2),
S9 ==# 8,
LaMin9 ==# 3,
FacMin9 ==# 1,
HaMin9 ==# 2,
respecter_hsp(Ha9, HaMin9),
respecter_surface(La9, Lo9, S9, LaMin9),
non_chevauche(X9, Z9, La9, Lo9, X8, Z8, La8, Lo8),
communique(X9, Z9, La9, Lo9, X8, Z8, La8, Lo8),

%10 SEJOUR contenu dans ZONE JOUR - 2
%-----
definir_piece(X10, Y10, Z10, La10, Lo10, Ha10, X0, Y0, Z0, La0, Lo0, Ha0),
est_contenu_dans(X10, Y10, Z10, La10, Lo10, Ha10, X2, Y2, Z2, La2, Lo2,
Ha2),
S10 ==# 25,
LaMin10 ==# 4,
FacMin10 ==# 1,
HaMin10 ==# 2,
respecter_hsp(Ha10, HaMin10),
respecter_surface(La10, Lo10, S10, LaMin10),
non_chevauche(X10, Z10, La10, Lo10, X8, Z8, La8, Lo8),
non_chevauche(X10, Z10, La10, Lo10, X9, Z9, La9, Lo9),
communique(X10, Z10, La10, Lo10, X8, Z8, La8, Lo8),
communique(X10, Z10, La10, Lo10, X9, Z9, La9, Lo9),

```

```

%11 WC contenu dans ZONE JOUR - 2
%-----
definir_piece(X11, Y11, Z11, La11, Lo11, Ha11, X0, Y0, Z0, La0, Lo0, Ha0),
est_contenu_dans(X11, Y11, Z11, La11, Lo11, Ha11, X2, Y2, Z2, La2, Lo2,
Ha2),
S11 #=# 2,
LaMin11 #=# 1,
FacMin11 #=# 1,
HaMin11 #=# 2,
respecter_hsp(Ha11, HaMin11),
respecter_surface(La11, Lo11, S11, LaMin11),
pas_trop_long(La11, Lo11),
non_chevauche(X11, Z11, La11, Lo11, X8, Z8, La8, Lo8),
non_chevauche(X11, Z11, La11, Lo10, X9, Z9, La9, Lo9),
non_chevauche(X11, Z11, La11, Lo11, X10, Z10, La10, Lo10),
communiquer(X11, Z11, La11, Lo11, X7, Z7, La7, Lo7),
communiquer(X11, Z11, La11, Lo11, X8, Z8, La8, Lo8),

%12 Dégagement contenu dans ZONE NUIT - 3
%-----
definir_piece(X12, Y12, Z12, La12, Lo12, Ha12, X0, Y0, Z0, La0, Lo0, Ha0),
est_contenu_dans(X12, Y12, Z12, La12, Lo12, Ha12, X3, Y3, Z3, La3,
Lo3, Ha3),
S12 #=# 1,
LaMin12 #=# 1,
FacMin12 #=# 1,
HaMin12 #=# 2,
respecter_hsp(Ha12, HaMin12),
respecter_surface(La12, Lo12, S12, LaMin12),
non_chevauche(X12, Z12, La12, Lo12, X5, Z5, La5, Lo5),
non_chevauche(X12, Z12, La12, Lo12, X6, Z6, La6, Lo6),
non_chevauche(X12, Z12, La12, Lo12, X7, Z7, La7, Lo7),
communiquer(X12, Z12, La12, Lo12, X5, Z5, La5, Lo5),
communiquer(X12, Z12, La12, Lo12, X6, Z6, La6, Lo6),
communiquer(X12, Z12, La12, Lo12, X7, Z7, La7, Lo7),
communiquer(X12, Z12, La12, Lo12, X8, Z8, La8, Lo8),

fd_labeling([X0, Y0, Z0, La0, Lo0, Ha0,
             X1, Y1, Z1, La1, Lo1, Ha1,
             X2, Y2, Z2, La2, Lo2, Ha2,
             X3, Y3, Z3, La3, Lo3, Ha3,
             X4, Y4, Z4, La4, Lo4, Ha4,
             X5, Y5, Z5, La5, Lo5, Ha5,
             X6, Y6, Z6, La6, Lo6, Ha6,
             X7, Y7, Z7, La7, Lo7, Ha7,
             X8, Y8, Z8, La8, Lo8, Ha8,
             X9, Y9, Z9, La9, Lo9, Ha9,
             X10, Y10, Z10, La10, Lo10, Ha10,
             X11, Y11, Z11, La11, Lo11, Ha11,
             X12, Y12, Z12, La12, Lo12, Ha12]),

write(Flux, '\n#----- [ Début scène ]\n'),

afficher_boite(Flux, X0, Y0, Z0, La0, Lo0, Ha0, 'Terrain', 'blanc',
'Terrain'),
afficher_boite(Flux, X1, Y1, Z1, La1, Lo1, Ha1, 'Pavillon', 'rouge',
'Fil_de_fer'),
afficher_boite(Flux, X2, Y2, Z2, La2, Lo2, Ha2, 'ZoneJour', 'rouge',
'Fil_de_fer'),
afficher_boite(Flux, X3, Y3, Z3, La3, Lo3, Ha3, 'ZoneNuit', 'bleu_fonce',
'Fil_de_fer'),
afficher_boite(Flux, X4, Y4, Z4, La4, Lo4, Ha4, 'Garage', 'gris_fonce',
'Mur'),
afficher_boite(Flux, X5, Y5, Z5, La5, Lo5, Ha5, 'Chambre1', 'turquoise',
'Mur'),
afficher_boite(Flux, X6, Y6, Z6, La6, Lo6, Ha6, 'Chambre2', 'bleu_pale',
'Mur'),

```

```
afficher_boite(Flux, X7, Y7, Z7, La7, Lo7, Ha7, 'Bains', 'vert_clair',
'Mur'),
afficher_boite(Flux, X8, Y8, Z8, La8, Lo8, Ha8, 'Entree', 'rose_saumon',
'Mur'),
afficher_boite(Flux, X9, Y9, Z9, La9, Lo9, Ha9, 'Cuisine', 'rose_tyrien',
'Mur'),
afficher_boite(Flux, X10, Y10, Z10, La10, Lo10, Ha10, 'Sejour', 'rouge',
'Mur'),
afficher_boite(Flux, X11, Y11, Z11, La11, Lo11, Ha11, 'WC', 'jaune',
'Mur'),
afficher_boite(Flux, X12, Y12, Z12, La12, Lo12, Ha12, 'Degt', 'blanc',
'Mur'),
write(Flux, '#----- [ Fin scène ]\n'),
flush_output(Flux).

%-----

depart :-
ouverture_fichier(Flux),
write(Flux, 'Pavillon Décembre 2002\n'),
write(Flux, 'ECHELLE 1.00\n'),
write(Flux, 'PENTE 1.00 ORIENTATION N\n'),
pavillon(Flux).
```

Annexe 19 : Code GNU Prolog pour les 11 espaces du problème de Maculet

```
% Problème des 11 espaces de R. Maculet par P. FRIBAULT
. . . (prédicats) . . .
%-----
%----- le code qui suit est généré -----
%-----
% PARAMETRES -----
%
%ECHELLE 1.00
%PENTE 1.00 N
% 0 TERRAIN
%-----
X0 #=# 0,
Y0 #=# 0,
Z0 #=# 0,
La0 #=# 12,
Lo0 #=# 10,
Ha0 #=# 3,
%1 FLOOR contenu dans TERRAIN - 0
%-----
definir_piece(X1, Y1, Z1, La1, Lo1, Ha1, X0, Y0, Z0, La0, Lo0, Ha0),
est_contenu_dans(X1, Y1, Z1, La1, Lo1, Ha1, X0, Y0, Z0, La0, Lo0, Ha0),
SMin1 #=# 120,
SMax1 #=# 120,
LaMin1 #=# 12,
HaMin1 #=# 3,
respecter_hsp(Ha1, HaMin1),
respecter_largeur_exacte(La1, LaMin1),
respecter_surface_intervalle(La1, Lo1, SMin1, SMax1, LaMin1),
de_plain_pied(Y1, Y0),

%2 SEJOUR contenu dans Floor - 1 Surface : entre 33 et 42 m² largeur min
12, longueur min 10
%-----
definir_piece(X2, Y2, Z2, La2, Lo2, Ha2, X0, Y0, Z0, La0, Lo0, Ha0),
est_contenu_dans(X2, Y2, Z2, La2, Lo2, Ha2, X1, Y1, Z1, La1, Lo1, Ha1),
SMin2 #=# 33,
SMax2 #=# 42,
LaMin2 #=# 4,
HaMin2 #=# 2,
respecter_hsp(Ha2, HaMin2),
respecter_largeur_longueur_min(La2, Lo2, LaMin2),
respecter_surface_intervalle(La2, Lo2, SMin2, SMax2, LaMin2),
a_louest_dans(X2, X1),
au_sud_dans(Z2, Lo2, Z1, Lo1),
de_plain_pied(Y2, Y1),

%3 CUISINE contenu dans Floor - 1 Surface : entre 9 et 15 m² largeur min 3
%-----
definir_piece(X3, Y3, Z3, La3, Lo3, Ha3, X0, Y0, Z0, La0, Lo0, Ha0),
est_contenu_dans(X3, Y3, Z3, La3, Lo3, Ha3, X1, Y1, Z1, La1, Lo1, Ha1),
SMin3 #=# 9,
SMax3 #=# 15,
LaMin3 #=# 3,
HaMin3 #=# 2,
respecter_hsp(Ha3, HaMin3),
respecter_largeur_longueur_min(La3, Lo3, LaMin3),
respecter_surface_intervalle(La3, Lo3, SMin3, SMax3, LaMin3),
non_chevauche(X3, Y3, Z3, La3, Lo3, Ha3, X2, Y2, Z2, La2, Lo2, Ha2),
de_plain_pied(Y3, Y1),
```

```

au_sud_ou_nord_dans(Z3, Lo3, Z1, Lo1),
communique(X3, Y3, Z3, La3, Lo3, X2, Y2, Z2, La2, Lo2, 1),

%4 SDB contenu dans Floor - 1 Surface : entre 6 et 9 m² largeur min 2
%-----
definir_piece(X4, Y4, Z4, La4, Lo4, Ha4, X0, Y0, Z0, La0, Lo0, Ha0),
est_contenu_dans(X4, Y4, Z4, La4, Lo4, Ha4, X1, Y1, Z1, La1, Lo1, Ha1),
SMin4 #=# 6,
SMax4 #=# 9,
LaMin4 #=# 2,
HaMin4 #=# 2,
respecter_hsp(Ha4, HaMin4),
respecter_largeur_longueur_min(La4, Lo4, LaMin4),
respecter_surface_intervalle(La4, Lo4, SMin4, SMax4, LaMin4),
non_chevauche(X4, Y4, Z4, La4, Lo4, Ha4, X2, Y2, Z2, La2, Lo2, Ha2),
non_chevauche(X4, Y4, Z4, La4, Lo4, Ha4, X3, Y3, Z3, La3, Lo3, Ha3),
de_plain_pied(Y4, Y1),
communique(X4, Y4, Z4, La4, Lo4, X3, Y3, Z3, La3, Lo3, 1),

%5 WC contenu dans Floor - 1 Surface : entre 1 et 2 m² largeur min 1
%-----
definir_piece(X5, Y5, Z5, La5, Lo5, Ha5, X0, Y0, Z0, La0, Lo0, Ha0),
est_contenu_dans(X5, Y5, Z5, La5, Lo5, Ha5, X1, Y1, Z1, La1, Lo1, Ha1),
SMin5 #=# 1,
SMax5 #=# 2,
LaMin5 #=# 1,
HaMin5 #=# 2,
respecter_hsp(Ha5, HaMin5),
respecter_largeur_longueur_min(La5, Lo5, LaMin5),
respecter_surface_intervalle(La5, Lo5, SMin5, SMax5, LaMin5),
non_chevauche(X5, Y5, Z5, La5, Lo5, Ha5, X2, Y2, Z2, La2, Lo2, Ha2),
non_chevauche(X5, Y5, Z5, La5, Lo5, Ha5, X3, Y3, Z3, La3, Lo3, Ha3),
non_chevauche(X5, Y5, Z5, La5, Lo5, Ha5, X4, Y4, Z4, La4, Lo4, Ha4),
de_plain_pied(Y5, Y1),
communique_OU(X5, Y5, Z5, La5, Lo5, X4, Y4, Z4, La4, Lo4, X3, Y3, Z3, La3,
Lo3,1),

%6 CHAMBRE 1 contenu dans Floor - 1 Surface : entre 11 et 15 m² la min 3
%-----
definir_piece(X6, Y6, Z6, La6, Lo6, Ha6, X0, Y0, Z0, La0, Lo0, Ha0),
est_contenu_dans(X6, Y6, Z6, La6, Lo6, Ha6, X1, Y1, Z1, La1, Lo1, Ha1),
SMin6 #=# 11,
SMax6 #=# 15,
LaMin6 #=# 3,
HaMin6 #=# 2,
respecter_hsp(Ha6, HaMin6),
respecter_largeur_longueur_min(La6, Lo6, LaMin6),
respecter_surface_intervalle(La6, Lo6, SMin6, SMax6, LaMin6),
non_chevauche(X6, Y6, Z6, La6, Lo6, Ha6, X2, Y2, Z2, La2, Lo2, Ha2),
non_chevauche(X6, Y6, Z6, La6, Lo6, Ha6, X3, Y3, Z3, La3, Lo3, Ha3),
non_chevauche(X6, Y6, Z6, La6, Lo6, Ha6, X4, Y4, Z4, La4, Lo4, Ha4),
non_chevauche(X6, Y6, Z6, La6, Lo6, Ha6, X5, Y5, Z5, La5, Lo5, Ha5),
de_plain_pied(Y6, Y1),
%au_sud_ou_nord_dans(Z6, Lo6, Z1, Lo1),

%7 CHAMBRE 2 contenu dans Floor - 1 Surface : entre 11 et 15 m² la min 3
%-----
definir_piece(X7, Y7, Z7, La7, Lo7, Ha7, X0, Y0, Z0, La0, Lo0, Ha0),
est_contenu_dans(X7, Y7, Z7, La7, Lo7, Ha7, X1, Y1, Z1, La1, Lo1, Ha1),
SMin7 #=# 11,
SMax7 #=# 15,

```

```

LaMin7 #=# 3,
HaMin7 #=# 2,
respecter_hsp(Ha7, HaMin7),
respecter_largeur_longueur_min(La7, Lo7, LaMin7),
respecter_surface_intervalle(La7, Lo7, SMin7, SMax7, LaMin7),
non_chevauche(X7, Y7, Z7, La7, Lo7, Ha7, X2, Y2, Z2, La2, Lo2, Ha2),
non_chevauche(X7, Y7, Z7, La7, Lo7, Ha7, X3, Y3, Z3, La3, Lo3, Ha3),
non_chevauche(X7, Y7, Z7, La7, Lo7, Ha7, X4, Y4, Z4, La4, Lo4, Ha4),
non_chevauche(X7, Y7, Z7, La7, Lo7, Ha7, X5, Y5, Z5, La5, Lo5, Ha5),
non_chevauche(X7, Y7, Z7, La7, Lo7, Ha7, X6, Y6, Z6, La6, Lo6, Ha6),
de_plain_pied(Y7, Y1),
au_sud_ou_nord_dans(Z7, Lo7, Z1, Lo1),

```

```

%8 CHAMBRE 3 contenu dans Floor - 1 Surface : entre 11 et 15 m² la min 3
%-----

```

```

definir_piece(X8, Y8, Z8, La8, Lo8, Ha8, X0, Y0, Z0, La0, Lo0, Ha0),
est_contenu_dans(X8, Y8, Z8, La8, Lo8, Ha8, X1, Y1, Z1, La1, Lo1, Ha1),
SMin8 #=# 11,
SMax8 #=# 15,
LaMin8 #=# 3,
HaMin8 #=# 2,
respecter_hsp(Ha8, HaMin8),
respecter_largeur_longueur_min(La8, Lo8, LaMin8),
respecter_surface_intervalle(La8, Lo8, SMin8, SMax8, LaMin8),
non_chevauche(X8, Y8, Z8, La8, Lo8, Ha8, X2, Y2, Z2, La2, Lo2, Ha2),
non_chevauche(X8, Y8, Z8, La8, Lo8, Ha8, X3, Y3, Z3, La3, Lo3, Ha3),
non_chevauche(X8, Y8, Z8, La8, Lo8, Ha8, X4, Y4, Z4, La4, Lo4, Ha4),
non_chevauche(X8, Y8, Z8, La8, Lo8, Ha8, X5, Y5, Z5, La5, Lo5, Ha5),
non_chevauche(X8, Y8, Z8, La8, Lo8, Ha8, X6, Y6, Z6, La6, Lo6, Ha6),
non_chevauche(X8, Y8, Z8, La8, Lo8, Ha8, X7, Y7, Z7, La7, Lo7, Ha7),
de_plain_pied(Y8, Y1),
au_sud_ou_nord_dans(Z8, Lo8, Z1, Lo1),

```

```

%9 CHAMBRE_PARENTS contenu dans Floor - 1 Surface : entre 15 et 20 m²
largeur min 3
%-----

```

```

definir_piece(X9, Y9, Z9, La9, Lo9, Ha9, X0, Y0, Z0, La0, Lo0, Ha0),
est_contenu_dans(X9, Y9, Z9, La9, Lo9, Ha9, X1, Y1, Z1, La1, Lo1, Ha1),
SMin9 #=# 15,
SMax9 #=# 20,
LaMin9 #=# 3,
HaMin9 #=# 2,
respecter_hsp(Ha9, HaMin9),
respecter_largeur_longueur_min(La9, Lo9, LaMin9),
respecter_surface_intervalle(La9, Lo9, SMin9, SMax9, LaMin9),
non_chevauche(X9, Y9, Z9, La9, Lo9, Ha9, X2, Y2, Z2, La2, Lo2, Ha2),
non_chevauche(X9, Y9, Z9, La9, Lo9, Ha9, X3, Y3, Z3, La3, Lo3, Ha3),
non_chevauche(X9, Y9, Z9, La9, Lo9, Ha9, X4, Y4, Z4, La4, Lo4, Ha4),
non_chevauche(X9, Y9, Z9, La9, Lo9, Ha9, X5, Y5, Z5, La5, Lo5, Ha5),
non_chevauche(X9, Y9, Z9, La9, Lo9, Ha9, X6, Y6, Z6, La6, Lo6, Ha6),
non_chevauche(X9, Y9, Z9, La9, Lo9, Ha9, X7, Y7, Z7, La7, Lo7, Ha7),
non_chevauche(X9, Y9, Z9, La9, Lo9, Ha9, X8, Y8, Z8, La8, Lo8, Ha8),
de_plain_pied(Y9, Y1),
au_sud_dans(Z9, Lo9, Z1, Lo1),

```

```

%10 COULOIR 1 contenu dans Floor - 1 Surface : entre 1 et 12 m² la min 1
%-----

```

```

definir_piece(X10, Y10, Z10, La10, Lo10, Ha10, X0, Y0, Z0, La0, Lo0, Ha0),
est_contenu_dans(X10, Y10, Z10, La10, Lo10, Ha10, X1, Y1, Z1, La1, Lo1,
Ha1),
SMin10 #=# 1,

```

```

SMax10 ## 12,
LaMin10 ## 1,
HaMin10 ## 2,
respecter_hsp(Ha10, HaMin10),
respecter_largeur_longueur_min(La10, Lo10, LaMin10),
respecter_surface_intervalle(La10, Lo10, SMin10, SMax10, LaMin10),
non_chevauche(X10, Y10, Z10, La10, Lo10, Ha10, X2, Y2, Z2, La2, Lo2, Ha2),
non_chevauche(X10, Y10, Z10, La10, Lo10, Ha10, X3, Y3, Z3, La3, Lo3, Ha3),
non_chevauche(X10, Y10, Z10, La10, Lo10, Ha10, X4, Y4, Z4, La4, Lo4, Ha4),
non_chevauche(X10, Y10, Z10, La10, Lo10, Ha10, X5, Y5, Z5, La5, Lo5, Ha5),
non_chevauche(X10, Y10, Z10, La10, Lo10, Ha10, X6, Y6, Z6, La6, Lo6, Ha6),
non_chevauche(X10, Y10, Z10, La10, Lo10, Ha10, X7, Y7, Z7, La7, Lo7, Ha7),
non_chevauche(X10, Y10, Z10, La10, Lo10, Ha10, X8, Y8, Z8, La8, Lo8, Ha8),
non_chevauche(X10, Y10, Z10, La10, Lo10, Ha10, X9, Y9, Z9, La9, Lo9, Ha9),
de_plain_pied(Y10, Y1),

%11 COULOIR 2 contenu dans Floor - 1 Surface : entre 1 et 12 m² la min 1
%-----
definir_piece(X11, Y11, Z11, La11, Lo11, Ha11, X0, Y0, Z0, La0, Lo0, Ha0),
est_contenu_dans(X11, Y11, Z11, La11, Lo11, Ha11, X1, Y1, Z1, La1, Lo1,
Ha1),
SMin11 ## 1,
SMax11 ## 12,
LaMin11 ## 1,
HaMin11 ## 2,
respecter_hsp(Ha11, HaMin11),
respecter_largeur_longueur_min(La11, Lo11, LaMin11),
respecter_surface_intervalle(La11, Lo11, SMin11, SMax11, LaMin11),
non_chevauche(X11, Y11, Z11, La11, Lo11, Ha11, X2, Y2, Z2, La2, Lo2, Ha2),
non_chevauche(X11, Y11, Z11, La11, Lo11, Ha11, X3, Y3, Z3, La3, Lo3, Ha3),
non_chevauche(X11, Y11, Z11, La11, Lo11, Ha11, X4, Y4, Z4, La4, Lo4, Ha4),
non_chevauche(X11, Y11, Z11, La11, Lo11, Ha11, X5, Y5, Z5, La5, Lo5, Ha5),
non_chevauche(X11, Y11, Z11, La11, Lo11, Ha11, X6, Y6, Z6, La6, Lo6, Ha6),
non_chevauche(X11, Y11, Z11, La11, Lo11, Ha11, X7, Y7, Z7, La7, Lo7, Ha7),
non_chevauche(X11, Y11, Z11, La11, Lo11, Ha11, X8, Y8, Z8, La8, Lo8, Ha8),
non_chevauche(X11, Y11, Z11, La11, Lo11, Ha11, X9, Y9, Z9, La9, Lo9, Ha9),
non_chevauche(X11, Y11, Z11, La11, Lo11, Ha11, X10, Y10, Z10, La10, Lo10,
Ha10),
de_plain_pied(Y11, Y1),
communique(X11, Y11, Z11, La11, Lo11, X10, Y10, Z10, La10, Lo10, 1),
% le séjour :
communique_OU(X2, Y2, Z2, La2, Lo2, X10, Y10, Z10, La10, Lo10, X11, Y11,
Z11, La11, Lo11,1),
% WC et SDB
%communique_OU(X4, Y4, Z4, La4, Lo4, X10, Y10, Z10, La10, Lo10, X11, Y11,
Z11, La11, Lo11,1),
%communique_OU(X5, Y5, Z5, La5, Lo5, X10, Y10, Z10, La10, Lo10, X11, Y11,
Z11, La11, Lo11,1),
% les chambres :
communique_OU(X6, Y6, Z6, La6, Lo6, X10, Y10, Z10, La10, Lo10, X11, Y11,
Z11, La11, Lo11,1),
communique_OU(X7, Y7, Z7, La7, Lo7, X10, Y10, Z10, La10, Lo10, X11, Y11,
Z11, La11, Lo11,1),
%communique_OU(X8, Y8, Z8, La8, Lo8, X10, Y10, Z10, La10, Lo10, X11, Y11,
Z11, La11, Lo11,1),
%communique_OU(X9, Y9, Z9, La9, Lo9, X10, Y10, Z10, La10, Lo10, X11, Y11,
Z11, La11, Lo11,1),

```

This document was created with Win2PDF available at <http://www.daneprairie.com>.
The unregistered version of Win2PDF is for evaluation or non-commercial use only.