

# Partition de l'espace et hiérarchie de cartes généralisées : application aux complexes architecturaux

David FRADIN, Daniel MENEVEAUX, Pascal LIENHARDT

Laboratoire IRCOM-SIC, Université de Poitiers, BP 30179, 86962 Futuroscope-Chasseneuil Cedex, France

{fradin,meneveaux,lienhardt}@sic.sp2mi.univ-poitiers.fr

**Résumé :** *La modélisation d'environnements complexes nécessite de traiter un nombre important d'informations géométriques, topologiques et photométriques. Le traitement de ces informations implique une gestion rigoureuse des diverses structures de données et de la mémoire. Le travail présenté dans cet article concerne la modélisation géométrique à base topologique de bâtiments composés d'un grand nombre de pièces meublées. Nous décrivons une structure topologique correspondant à une extension des cartes généralisées, permettant de représenter à la fois une hiérarchie de niveaux de détails et des partitions multiples pour un même bâtiment. Cette structure est une optimisation d'un modèle général reposant sur l'étiquetage de cellules. Elle définit le noyau d'un modèleur géométrique à base topologique spécialisé dans la construction de bâtiments complexes. Mais elle est essentiellement destinée à la visualisation et à la simulation d'éclairage de bâtiments structurés. En effet, à plus long terme, notre objectif est d'exploiter les propriétés de cette structure topologique pour la visualisation de bâtiments et les calculs de visibilité.*

**Mots-clés :** Complexes architecturaux, cartes généralisées, niveaux de détails, partitions multiples, hiérarchie.

## 1 Introduction

Le domaine de la modélisation géométrique propose des outils permettant de définir des objets à l'aide d'opérations élémentaires. De nombreuses structures dites à base topologique ont été proposées en modélisation par les bords<sup>1</sup> (cf. par exemple [BAU72], [WEI85], [BRI89], [LIE89]). Elles permettent de représenter des subdivisions de l'espace en cellules (sommets, arêtes, faces, volumes) liées entre elles par des relations d'adjacence et d'incidence. Chaque cellule possède également des informations géométriques pour compléter leur description. Les modèles topologiques ont pour atout majeur d'être basé sur des définitions algébriques formelles assurant une fiabilité de la structure et une cohérence de la représentation obtenue.

L'objectif de cet article est de présenter un modèleur dédié aux complexes architecturaux d'intérieur. Il est développé à partir d'un noyau géométrique à base topologique développé au sein du laboratoire IRCOM-SIC, permettant de manipuler des subdivisions de  $\mathbb{R}^3$ . A plus long terme, nous souhaitons tirer profit de ce travail pour réaliser des calculs de rendu réaliste et de simulation d'éclairage par la méthode de radiosité. Traditionnellement, ces algorithmes manipulent des structures moins riches, à base de listes de faces, pour des raisons d'espace mémoire et de simplicité d'utilisation.   l'évidence, le modèle proposé doit donc permettre un accès rapide aux données afin de ne pas ralentir les calculs de visualisation.

Nous intégrons la notion de *niveau de détail*, souvent employée pour réduire le nombre de primitives géométriques à traiter en fonction de la distance entre les objets et le point de vue. Cette notion est également utile pour faciliter la construction d'un environnement complexe. Par ailleurs, pour des raisons de convivialité nous avons également souhaité permettre à l'utilisateur de créer des groupes d'objets à l'intérieur des bâtiments. Par exemple, un bâtiment peut être décomposé à la fois en ailes ou en étages et les pièces sont regroupées suivant leur utilité (bureaux, salles de cours, etc). Pour permettre cette décomposition, notre structure intègre la notion de *partition multiple*.

La prochaine section décrit la problématique traitée. Nous proposons ensuite une structure topologique intégrant les notions de multi-partition et de niveau de détail par étiquetage. Enfin, nous présentons la structure finale ainsi que le mod leur dédié aux environnements architecturaux complexes avant de conclure.

---

<sup>1</sup>En anglais, boundary representation (B-Rep)

## 2 Problématique

La description d'objets complexes nécessite de manipuler une grande diversité de données : forme (attributs géométriques), apparence (matériaux, caractéristiques photométriques), etc. Pour les visualiser de manière réaliste et/ou interactive, deux points fondamentaux doivent être respectés : une gestion rigoureuse de la mémoire et un parcours rapide des différentes cellules de l'objet. Par ailleurs, un travail de construction progressive est fréquemment effectué de manière manuelle, par exemple par les architectes durant la phase de conception des bâtiments. Cela permet d'accroître la lisibilité des informations lors de la construction ; mais souvent les modèles mis à disposition pour la visualisation n'intègrent aucune structure relative à cette organisation.

Notre objectif dans cet article est de proposer une structure permettant de représenter conjointement les notions de partition et de niveau de détails, afin qu'elles puissent être réutilisées au cours des étapes de visualisation ou de simulation d'éclairage. Une partition décrit des groupes de sous-objets pour un objet donné. Dans de nombreuses applications, plusieurs partitions peuvent être utiles pour représenter l'ensemble de la structure des objets. Par exemple, un bâtiment est vu comme un ensemble de pièces regroupées soit par ailes soit par étages. Dans la suite de ce document, nous appelons ce concept *multi-partition* ou *partition multiple*. La figure 1.a montre un exemple de multi-partition d'un objet. Parallèlement, la structure de niveaux de détail<sup>2</sup> permet de représenter les étapes de raffinement successif des objets. Les niveaux de détail sont fréquemment utilisés en visualisation pour accélérer les calculs. La figure 1.b montre un exemple de décomposition progressive d'un étage de bâtiment.

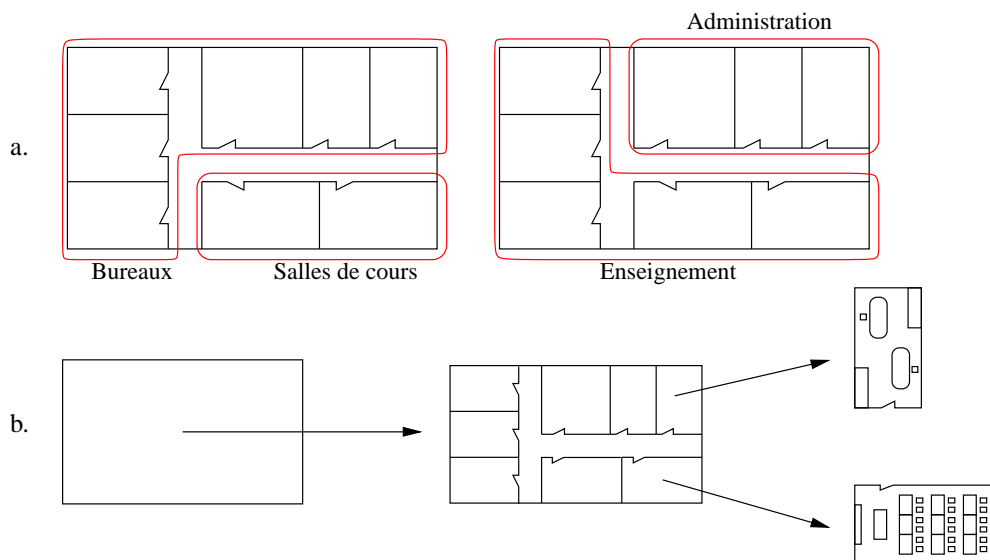


FIG. 1 – a. Partition multiple d'un même objet : un étage est subdivisé de deux manières différentes. Chaque subdivision a sa propre sémantique. La première subdivision représente la séparation entre les bureaux et les salles de cours. La seconde met en évidence les parties réservées à l'enseignement et à l'administration. - b. Décomposition d'un objet par niveaux de détail : un étage rectangulaire est détaillé par l'ensemble des pièces qui le constitue, dont deux sont elles-mêmes précisées (un bureau et une salle de cours).

La structure par niveaux de détail d'un objet peut être interprétée soit comme une décomposition progressive de l'objet, soit comme un regroupement de plusieurs objets détaillés. Une solution évidente est d'assigner un numéro unique à chaque détail de l'objet. Ceci permet d'identifier à la fois les niveaux de détail et les partitions de l'objet. Plus précisément, chaque niveau de détail est décrit à partir de plusieurs objets plus détaillés et chaque identifiant a une sémantique particulière : nom, utilité, etc. Cette structure définie dans la section 3 reste inefficace dans le cadre de notre problématique pour des raisons d'occupation mémoire et d'accès aux données, en particulier pour la visualisation réaliste.

Dans la littérature, la plupart des modèles reposent sur des hiérarchies d'objets et permettent de répartir les traitements selon les différents niveaux de détail. Ces niveaux de détail sont mis en correspondance à l'aide de structures hiérarchiques ([KRO95],[FF88],[CDM<sup>+</sup>94],[PFP95]). Floriani *et al.* proposent un modèle à base topologique

<sup>2</sup>En anglais : Level Of Details (LOD).

appelé *Multiresolution Simplicial Model* [DPM97] présentant une synthèse de la plupart de ces structures. La décomposition d'un objet est représentée par un graphe orienté acyclique de complexes simpliciaux. Chaque état contient une *modification* relative à une partie de l'objet. Cette structure a aussi été généralisée à des complexes cellulaires : *Multiresolution Meshes* [DM01]. D'autres structures hiérarchiques ont été proposées dont certaines reposent sur une structure cellulaire appelée les cartes généralisées [LIE89]. Un travail mis en oeuvre par LEVY [LEV99] concerne la modélisation de couches géologiques à partir d'une hiérarchie à deux niveaux de cartes généralisées de dimension 2 et 3. GUILBERT [GUI00] a élaboré une structure de hiérarchie de cartes généralisées en incluant une technique de *clonage* des objets pour économiser l'espace mémoire.

Notre travail repose également sur les cartes généralisées et permet de représenter des partitions d'objets de  $\mathbb{R}^3$ . Nos contributions concernent les points suivants :

- la **multi-partition** permet de présenter plusieurs décompositions possibles d'un même objet. Par exemple, un bâtiment peut être divisé en ailes ou en étage, mais la description géométrique du bâtiment reste la même ;
- la **multi-hiérarchie**, complémentaire de la structure précédente, met en évidence une représentation du bâtiment par niveaux de détail et permet un chargement partiel des sous-arbres pour un travail localisé ;
- l'**accès aux données** pour la visualisation est simplifié et accéléré par la structure proposée quelle que soit la complexité de l'objet.

Autour de cette structure, nous avons développé un modèleur dédié aux complexes architecturaux d'intérieur. Mais ce modèle se veut suffisamment générique pour pouvoir plus tard être adapté à d'autres contextes (représentation de couches géologiques, industrie automobile, etc).

### 3 Étiquetage et partitions

La multi-partition correspond à une organisation de l'objet en ensemble de cellules, et les niveaux de détail définissent des ensembles d'ensembles. Une manière classique pour représenter cette organisation est l'étiquetage de cellules, servant de base théorique pour la définition de notre structure. Cette section rappelle la notion de cartes généralisées et décrit l'utilisation de l'étiquetage pour la représentation de multi-partitions et de niveaux de détail.

#### 3.1 Rappel sur les cartes généralisées

Les cartes généralisées permettent de modéliser des objets géométriques subdivisés en cellules (sommets, arêtes, faces, etc.) reliées entre elles par des relations d'adjacence et d'incidence. Cette structure fait partie des modèles de représentation par bords<sup>3</sup>. Les cartes généralisées permettent de représenter les objets sur lesquels nous travaillons : des subdivisions de  $\mathbb{R}^3$ . Les définitions qui suivent sont tirées de [LIE89].

**Définition 1** Soit  $n \geq 0$ , une carte généralisée de dimension  $n$  (ou  $n$ -G-Carte) est le  $(n+2)$ -uplet  $G=(B, \alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_n)$  où :

- $B$  est un ensemble fini de brins,
- $\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_n$  sont des applications telles que :
  - $\forall 0 \leq i \leq n, \alpha_i$  est une involution<sup>4</sup>,
  - pour  $\forall 0 \leq i < i + 2 \leq j \leq n, \alpha_i \alpha_j$  est une involution.

À partir des éléments de base appelés brins et des applications  $\alpha$  définies sur ces brins, les cartes généralisées représentent les cellules composant l'objet et leurs relations de bords. La  $i$ -cellule associée à un brin  $b$  donné, est formée de l'ensemble des brins obtenus par composition des involutions  $\alpha_j, j \neq i$  (voir figure 2). De manière générale, toute composition d'involution est appelée *orbite* et est notée  $\langle \alpha_k, \dots, \alpha_p \rangle$ . Pour des informations complètes, le lecteur peut se référer à [LIE94].

#### 3.2 Étiquetage

En modélisation, une structuration précise est nécessaire, en particulier pour regrouper des objets de même sémantique (nom, utilité, matériau, etc.). Une manière classique est d'étiqueter les cellules par l'identifiant du groupe

<sup>3</sup>En anglais, Boundary Representation (B-rep).

<sup>4</sup>Une application  $f$  est une involution signifie que  $f \circ f$  est la fonction identité.

auquel elles appartiennent. Pour grouper des cellules de dimension  $n$ , (des ailes, des étages ou des pièces en dimension 3), nous définissons une fonction de partition  $\phi_n$  associant à chaque cellule son identifiant. Dans le cas des cartes généralisées,  $\phi_n$  est définie sur les brins. La figure 2 montre un exemple d'étiquetage de 2-cellules (faces) sur une 2-G-Carte.

**Définition 2** Soient  $G_n = (B, \alpha_0, \dots, \alpha_n)$  une carte généralisée de dimension  $n$  et  $\phi_n : B \rightarrow \mathbb{N}$  une fonction de numérotation des brins. On dit que  $\phi_n$  est une fonction de partition de  $G$  en sous-groupes de  $n$ -cellules si et seulement si  $\phi_n$  est la même sur tous les brins d'une  $n$ -cellule, i.e.  $\forall b \in B$ , tous les brins de l'orbite  $\langle \alpha_0, \dots, \alpha_{n-1} \rangle(b)$  ont la même image par  $\phi_n$  que  $b$ .

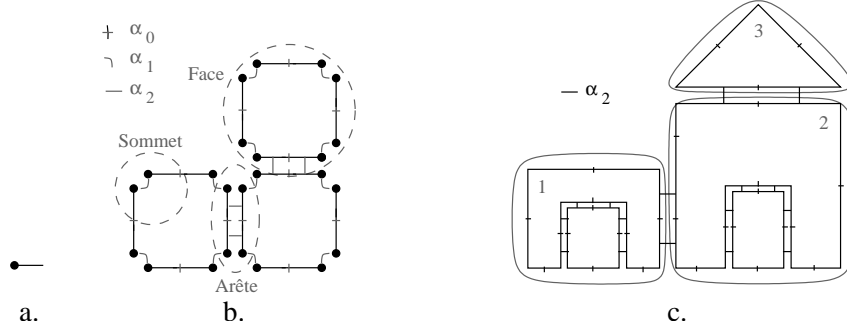


FIG. 2 – a. Schéma représentant un brin. - b. Sur une carte généralisée simple, trois types de cellules sont mise en évidence : une face (orbite  $\langle \alpha_0, \alpha_1 \rangle$ ), une arête (orbite  $\langle \alpha_0, \alpha_2 \rangle$ ) et un sommet (orbite  $\langle \alpha_1, \alpha_2 \rangle$ ). - c. Exemple de partition de l'espace en carte généralisée munie d'un étiquetage. Nous représentons ici une maison subdivisée en trois groupes principaux : l'habitat, le toit et le garage.

### 3.3 Multi-partition et niveaux de détail d'un objet

Dans cette partie, nous décrivons l'utilisation de l'étiquetage pour représenter les mécanismes de multi-partition et de niveau de détail. La multi-partition (voir figure 1) peut être représentée à l'aide de plusieurs étiquetages. La définition suivante ne spécifie aucune contrainte pour la multi-partition, les décompositions de l'objet étant *a priori* indépendantes les unes des autres.

**Définition 3** Soient  $G_n = (B, \alpha_0, \dots, \alpha_n)$  une carte généralisée de dimension  $n$  et  $P$  fonctions de partition  $(\phi_n^p)_{p \in \{1..P\}}$ . On dit que l'ensemble de ces fonctions de partitions  $\Phi_n = \{\phi_n^p\}_{p \in \{1..P\}}$  est une multi-partition.

Un niveau de détail est une suite de partitions de l'objet qui, à la différence de la multi-partition, sont liées entre elles par une relation d'inclusion. Une multi-partition est un ensemble de cellules (un groupe) et les niveaux de détail correspondent à des ensembles d'ensembles (groupes de groupes). Le premier niveau de détail correspond à un regroupement des cellules de l'objet et tous les autres niveaux peuvent être déduits du précédent en réunissant les groupes du niveau de détail plus précis. Un niveau de détail donné peut être considéré comme la réunion de  $n$ -cellules de l'objet initial. Nous pouvons ainsi définir, à partir d'une suite ordonnée d'étiquetages, les niveaux de détail d'un objet, comme le montre la figure 4.a. La définition suivante décrit la relation d'ordre associée à la suite d'étiquetages : les groupes de l'étiquetage d'un niveau de détail donné sont définis à partir des groupes du niveau de détail précédent.

**Définition 4** Soit une carte généralisée de dimension  $n$  représentant un objet. Une famille de  $D$  étiquetages  $(\phi_n^d)_{d \in \{1..D\}}$  représente des niveaux de détail de cet objet si et seulement si chaque groupe étiqueté par  $\phi_n^d$ ,  $d \in 1..D$  correspond à une union des groupes de  $\phi_n^{d-1}$  :

- $\forall d > 1, \phi_n^d \neq \phi_n^{d-1}$  ;
  - et  $\forall id \in \mathbb{N}$  un numéro de groupe de la fonction  $\phi_n^{d-1}$ , tous les brins numérotés par  $id$  appartiennent à un même groupe de  $\phi_n^d$ , i.e.  $\exists id' \in \mathbb{N}$  tel que  $\phi_n^d(\{b \in B / \phi_n^{d-1}(b) = id\}) = \{id'\}$ .
- $\forall d > 1, \phi_n^{d-1}$  est un détail de  $\phi_n^d$ .

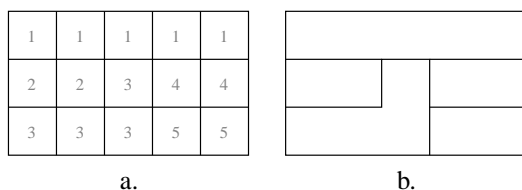


FIG. 3 – a. Un objet détaillé par des 2-cellules (faces) et une fonction d'étiquetage associée. - b. Niveau de simplification déduit de cet étiquetage.

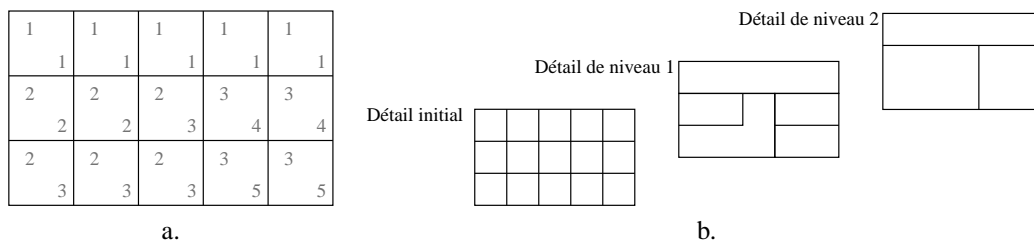


FIG. 4 – a. Un objet détaillé par des 2-cellules (faces) et deux niveaux d'étiquetage donnés par la suite  $(\phi_2^1, \phi_2^2)$ . L'étiquetage  $\phi_2^1$  (dans le coin inférieur droit) correspond à un niveau de détail intermédiaire entre le détail maximal et le niveau de détail le moins précis représenté par  $\phi_2^2$  (affiché dans le coin supérieur gauche des 2-cellules). - b. Niveaux de simplifications correspondant à ces étiquetages.

Étant donnée une G-Carte et un niveau de détail, nous pouvons en déduire une G-Carte simplifiée, correspondant à une fusion des cellules de même étiquette (cf. figures 3.b et 4.b). Cela implique non seulement la fusion de cellules de dimension  $n$ , mais aussi des cellules de dimension inférieure. Pour définir formellement cette opération, nous utilisons l'étiquetage pour des  $i$ -cellules ( $i$  de 1 à  $n$ ) et des opérations de fusion de ces cellules. Pour un modéleur de bâtiments, nous pouvons utiliser au choix un processus automatique (à partir de tests de coplanarité des faces et d'alignement des segments) ou une description manuelle des regroupements de cellules. Sur l'exemple de la figure 5, nous illustrons la simplification d'un escalier. De manière automatique, il est uniquement possible de déduire la simplification (c) à partir de l'objet initial (a). Alors qu'avec la numérotation des  $i$ -cellules (faces et arêtes), l'utilisateur peut pousser la simplification jusqu'à remplacer l'escalier par le plan incliné (d).

Pour un niveau de détail  $d$  donné, l'étiquetage des  $i$ -cellules (des  $n - 1$  hyperplans jusqu'aux arêtes) est donné par la fonction  $\phi_i^d$  (avec  $i$  respectivement de  $n - 1$  à 1). La figure 5 illustre la notion de simplification définie par un étiquetage.

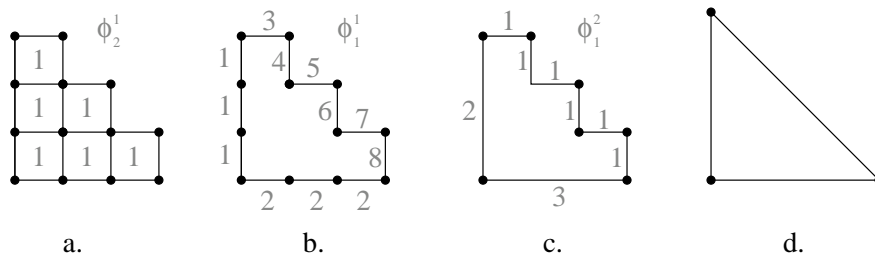


FIG. 5 – a. Détail initial d'un escalier (de précision maximale) et fonction d'étiquetage  $\phi_2^1$  (des faces) indiquant le niveau de détail suivant. - b. Simplification intermédiaire mettant en évidence l'étiquetage  $\phi_1^1$  (des arêtes). - c. Niveau de détail déduit des étiquetages précédents  $(\phi_2^1, \phi_1^1)$ , et nouvel étiquetage des arêtes pour la simplification suivante  $\phi_1^2$  - d. Détail le plus simple de l'escalier déduit de  $\phi_1^2$ .

## 4 Structure finale : hiérarchie de multi-partitions

L'étiquetage est un mécanisme simple pour définir une structure théorique intégrant les notions de multi-partition et de niveau de détail. Néanmoins, notre objectif est de définir une structure optimisée pour la modélisation et la visualisation d'environnements architecturaux complexes. Les contraintes imposées par la gestion de la mémoire et les temps de calcul doivent être prises en compte. En effet, le modèle d'un bâtiment meublé nécessite le stockage d'un nombre très important de partitions, de niveaux de détail et de brins.

Pour parvenir à une occupation mémoire raisonnable et conserver l'efficacité des parcours, nous proposons deux optimisations. D'une part, un marquage des liaisons  $\alpha_n$  est utilisé pour représenter les multi-partitions (détails dans la sous-section 4.1). D'autre part, les niveaux de détails peuvent être représentés l'aide d'une hiérarchie de cartes généralisées (sous-section 4.2).

### 4.1 Optimisation pour les multi-partitions : liaisons groupantes

Pour les complexes architecturaux, les objets modélisés sont composés de groupes de  $n$ -cellules *connexes*. Par exemple, les murs et les sols délimitent des pièces et celles-ci sont connectées par des ouvertures. Nous avons donc opté pour une solution médiane entre coût mémoire et accès aux données : le marquage des liaisons  $\alpha$ . En effet, les liaisons  $\alpha_n$  relient les  $n$ -cellules entre elles. Ainsi, une marque booléenne sur chaque liaison  $\alpha_n$  nous permet d'indiquer qu'elle est groupante, c'est à dire qu'elle relie deux  $n$ -cellules du même groupe (voir le premier schéma de la figure 6).

**Définition 5** Soit une carte généralisée  $G_n = (B, \alpha_0, \dots, \alpha_n)$  et une fonction de partition  $\phi_n$ .  $\phi_n$  représente une partition de  $G_n$  en groupes connexes si et seulement si  $\forall b_1, b_2 \in B$  deux brins tels que  $\phi_n(b_1) = \phi_n(b_2)$ , alors il existe un chemin allant de  $b_1$  à  $b_2$  en ne passant que par des brins ayant pour numéro de partition  $\phi_n(b_1)$ . Dans ce cas, nous définissons l'involution groupante  $\alpha_n^g$  défini par  $\alpha_n$  restreinte aux partitions de la fonction  $\phi_n$ , i.e. soient deux brins  $b_1$  et  $b_2$  cousus par  $\alpha_n$  :

- si  $\phi_n(b_1) = \phi_n(b_2)$ , alors  $\alpha_n^g(b_1) = b_2$  et  $\alpha_n^g(b_2) = b_1$ .
- sinon,  $\alpha_n^g(b_1) = b_1$  et  $\alpha_n^g(b_2) = b_2$ .

La définition des cellules groupantes permet de créer de nouvelles orbites, que nous appelons *orbites de groupes*, sur lesquelles nous pouvons stocker une sémantique, par exemple des caractéristiques de matériau ou des attributs de nomenclature. Dans les rares cas où l'étiquetage ne définit pas des groupes connexes de cellules, une étiquette peut être ajoutée parmi ces caractéristiques pour définir un numéro de groupe. Cette définition est suffisamment générale pour permettre une extension à plusieurs partitions dans une même carte généralisée. A chaque partition est associée une liaison groupante.

**Définition 6** Soient une carte généralisée  $G_n = (B, \alpha_0, \dots, \alpha_n)$  et  $p$  fonctions de partition  $\phi_n^1, \dots, \phi_n^p$ . Pour chaque fonction  $\phi_n^k$  avec  $1 \leq k \leq p$ , nous posons l'involution  $\alpha_n^{gk}$  telle que :

- $\alpha_n^{gk}(b) = \alpha_n(b)$  si  $\phi_n^k(b) = \phi_n^k(\alpha_n(b))$
- et  $\alpha_n^{gk}(b) = b$  sinon.

La figure 6 montre un exemple simple d'utilisation des multi-partitions sur une carte généralisée de dimension 2. Notons que notre représentation prend en compte le cas (non illustré sur la figure) où deux liaisons  $\alpha_n^{g_i}$  sont superposées. En effet, le marquage d'une involution groupante est réalisé à l'aide d'un booléen. Nous pouvons ainsi avoir plusieurs marquages sur une même liaison, tout en conservant un coût mémoire acceptable (un octet pour huit partitions différentes).

### 4.2 Optimisation pour les niveaux de détails : hiérarchie

Pour la représentation des niveaux de détail d'un objet par une hiérarchie, l'objet le plus simple est situé au niveau de la racine, et chaque sous-arbre correspond à un détail d'une partie de l'objet. Nous utilisons ce principe avec les cartes généralisées pour éviter un étiquetage explicite. La structure que nous proposons permet de travailler localement sur une partie de l'objet (sous-arbre) afin de réduire l'occupation mémoire par une technique de chargement

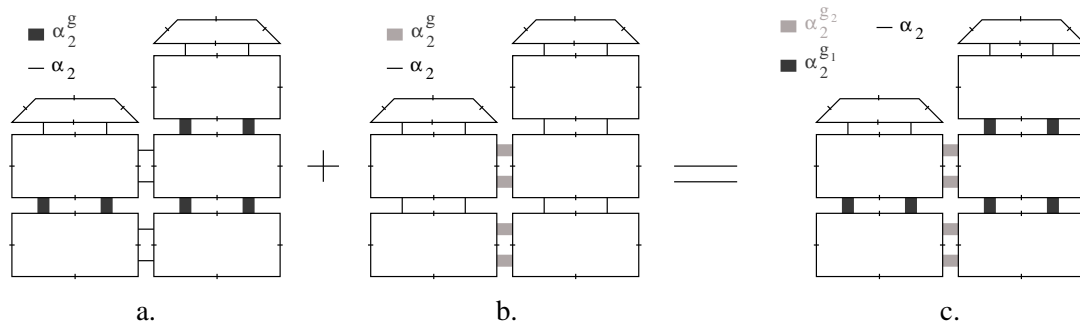


FIG. 6 – Liaisons groupantes : à gauche sont représentées deux partitions différentes d’un même bâtiment. - a. Une première décomposition en deux ailes - b. Une seconde en trois étages. - c. La G-Card bi-partitionnée correspondante.

partiel des données en mémoire (*swap*). De la même manière, elle facilite l’utilisation d’algorithmes de visualisation multi-échelle. Notons toutefois que cette structure impose une définition précise de la relation de filiation et des critères de cohérence. Dans cet article, nous présentons les contraintes uniquement de manière intuitive, à partir de la définition de niveau de détail par étiquetage.

**Définition informelle 1** Soient une carte généralisée détaillée  $G^0$  et un niveau d’étiquetage  $(\phi_i^1)_{i \in (1..n)}$  exprimant un niveau de simplification. Nous appelons  $G^1$  la carte simplifiée de  $G^0$  issu de l’étiquetage  $(\phi_i^1)_{i \in (1..n)}$ , la carte généralisée obtenue après une succession d’opérations de fusion des  $i$ -cellules suivant un ordre décroissant des dimensions (de  $n$  à 1).

Dans ce cas, nous posons l’application injective<sup>5</sup>  $\eta$ , appelé liaison hiérarchique, qui relie chaque brin de  $G^1$  avec le brin de  $G^0$  correspondant.

L’opération de fusion, classique en topologie, a récemment été redéfinie de manière précise pour les cartes généralisées en dimension quelconque par Damiani et Lienhardt [DL02] (voir également [ELT94]). La figure 7.a montre un exemple de succession de fusions pour obtenir une simplification d’objet.

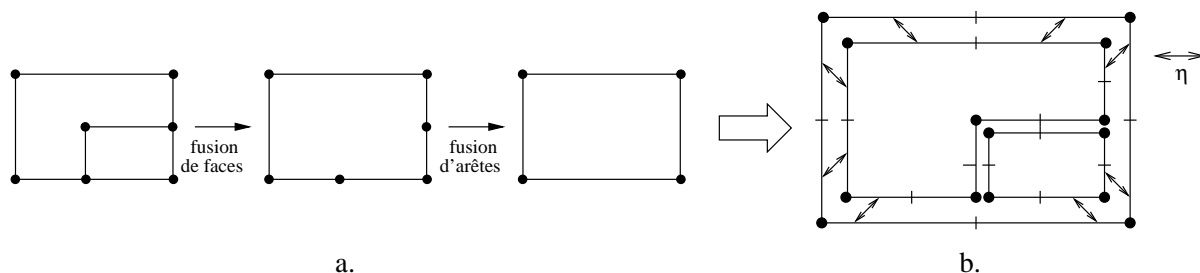


FIG. 7 – a. Simplification d’un objet par une série de fusions de cellules : un couple de faces, puis deux couples d’arêtes. - b. Mise en évidence de la liaison hiérarchique  $\eta$  qui relie les brins de la simplification à son détail.

La notion de simplification est directement issue de la relation d’ordre qui existe entre  $\phi_n^i$  et  $\phi_n^{i-1}$ . Cette relation nous aide à définir les contraintes de filiation entre deux cartes généralisées. Afin d’éviter les redondances, lorsqu’une G-Card  $G^1$  est une simplification de la carte  $G^0$ , nous supprimons dans  $G^0$  les  $i$ -cellules ( $i > 1$ ) communes à  $G^0$  et  $G^1$ . Dans  $G^0$ , les composantes connexes résultantes de cette opération forment chacune une nouvelle G-Card appelée *détail* de  $G^1$ . Toutes ces G-Cards représentent les fils de  $G^1$ . Certaines  $i$ -cellules redondantes ne sont néanmoins pas supprimées lorsqu’elles permettent à un niveau de détail de conserver toutes les informations nécessaires à sa représentation. Cela permet d’éviter des parcours coûteux de la hiérarchie. Notons que dans le cadre particulier de la modélisation de bâtiments, les calculs de visualisation sont réalisés en dimension 3 pour des

<sup>5</sup>L’application est une injection, car l’ensemble des brins de  $G^0$  a plus d’éléments que celui de  $G^1$  et chaque brin de  $G^0$  possède au plus un antécédent dans  $G^1$ .

volumes. Par conséquent, la structure hiérarchique que nous avons mise en place concerne des niveaux de détail de cellules de dimension 3.

**Définition 7** Un arbre de cartes généralisées  $H$  est soit vide soit un triplet  $(G, \Gamma, \eta)$ , appelé noeud, où :

- $G$  est une carte généralisée de dimension  $n$ , appelée racine ;
- $\Gamma$  est un ensemble de sous-arbres disjoints, tel que  $\forall \gamma$  une carte généralisée racine d'un sous-arbre de  $\Gamma$ ,  $\gamma$  est un détail de  $G$  ;
- $\eta$  est la fonction de correspondance décrivant l'ensemble des liaisons hiérarchiques entre les  $i$ -cellules de la carte parent  $G$  et les  $G$ -Cartes de détails, racines des sous-arbres de  $\Gamma$ .

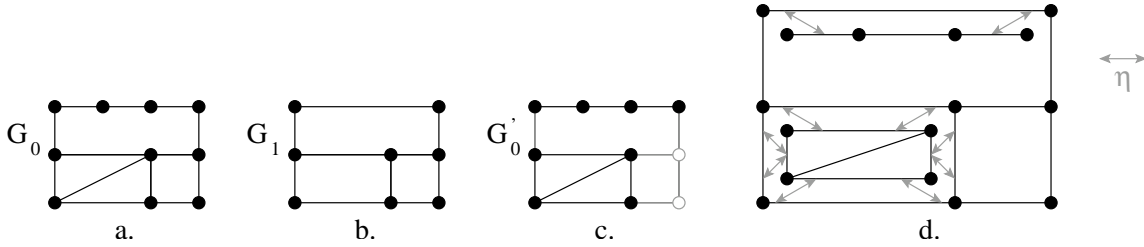


FIG. 8 – a. Un objet représenté à un niveau détaillé par une carte  $G_0$ . - b. Une simplification  $G_1$  de cet objet. - c. Pour construire la hiérarchie, nous supprimons dans  $G_0$  les cellules en commun avec  $G_1$  pour obtenir une carte  $G'_0$ . - d. Les composantes connexes de  $G'_0$  sont ensuite mis en correspondance avec la simplification  $G_0$  pour former la hiérarchie de détail.

Finalement, la structure proposée intègre à la fois les niveaux de détail et la multi-partition d'un objet, tout en respectant les impératifs de faible occupation mémoire et de rapidité d'accès. À ce stade, notre structure se rapproche de la notion de graphe orienté acyclique<sup>6</sup> de simplexes proposée par De Florian *et al* [FM01].

## 5 Résultats

Autour de la structure présentée dans la section précédente, nous avons développé un ensemble d'opérations dédiées à la construction de complexes architecturaux ainsi qu'une interface graphique pour un premier prototype de modèleur de bâtiment. Cette section est dédiée à la présentation de ces opérations et du modèleur. À cette fin, nous illustrons les étapes de modélisation pour un bâtiment très simple, puis montrons avec un exemple les capacités du modèleur à créer un complexe architectural plus réaliste.

La première étape de construction correspond à la définition d'un contour servant de base à l'édifice (voir figure 9.a). Une première  $G$ -Carte généralisée, racine de la hiérarchie, reçoit l'enveloppe extérieure du bâtiment 3D obtenue par une première extrusion (figure 9.b). Puis le premier détail, défini dans une seconde  $G$ -carte, correspond à une copie du contour auquel une seconde opération d'extrusion est appliquée pour obtenir l'épaisseur des murs (figure 9.b). Cette figure forme les fondations du bâtiment. Un premier étage est obtenu par extrusion des fondations, puis recopié autant de fois que le souhaite l'utilisateur. Les copies sont superposées pour finaliser le premier détail du bâtiment (figure 9.d).

L'interface graphique permet de détailler indépendamment chacun des étages. Pour cela, l'utilisateur sélectionne un étage, automatiquement recopié dans une carte généralisée fille, pour créer un nouveau niveau de détail (figure 9.e). L'étage est alors visualisé comme sur un plan en deux dimensions à l'aide d'une projection orthogonale. L'utilisateur peut alors dessiner des murs (figure 9.f) et des ouvertures telles que des portes ou des fenêtres (figure 9.g). Chaque pièce déduite de la création des murs peut à son tour être précisée dans une nouvelle carte généralisée fille. Une fonction d'importation d'objets depuis des fichiers décrivant des listes de faces (comme le format VRML 1.0 / Inventor) permet d'insérer des meubles dans les pièces. À tout moment, l'utilisateur peut se déplacer dans la hiérarchie à l'aide de l'arborescence du bâtiment (figure 10. a), ou afficher la totalité du bâtiment (figures 9.h et 10.b). Les affichages sont réalisés à l'aide de parcours en profondeurs de la hiérarchie. Par ailleurs, il est également possible pour chaque  $G$ -Carte de la hiérarchie de définir des groupes de volumes (pièces, murs, etc.)

<sup>6</sup>En anglais, Directed Acyclique Graph (DAG).



pour créer des partitions du bâtiment. Les multi-partitions peuvent être mises en évidence soit lors de la sélection explicite d'un groupe, soit lors de l'affichage des liaisons groupantes.

Pour finir, la figure 10 illustre un exemple complet de complexe architectural créé à l'aide de notre modèleur. Il est inspiré du bâtiment hébergeant notre laboratoire : le SP2MI sur le site du Futuroscope.

## 6 Conclusion

La difficulté principale de la gestion de complexes architecturaux en synthèse d'image concerne la quantité de données à prendre en compte et à traiter aussi bien lors de la modélisation que pour la visualisation. Dans cet article, nous présentons une structure de données à base topologique pour la modélisation et la visualisation de grands bâtiments. La structure proposée étend le modèle des cartes généralisées et intègre deux notions qui nous paraissent essentielles : (1) la multi-partition permettant de représenter plusieurs décompositions d'un objet donné, par exemple le regroupement des pièces d'un bâtiment selon leurs sémantiques, et (2) la notion de niveau de détail souvent utilisée pour la visualisation et permettant également la construction d'un bâtiment par décomposition progressive.

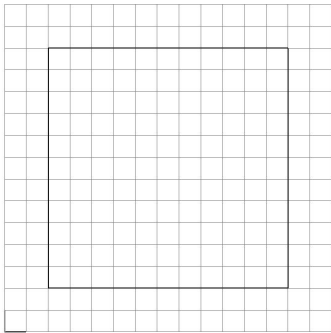
Les perspectives de ce travail peuvent être réalisées selon deux axes principaux : l'utilisation de la structure pour la visualisation et l'intégration du modèle à d'autres domaines de la modélisation. Le premier axe, en cours d'étude actuellement, consiste à intégrer notre modèle à un outil de simulation d'éclairage et de visualisation interactive. Nous allons étudier de manière approfondie l'apport des informations topologiques et des niveaux de détail aux phases de pré-calcul de visibilité dans une scène complexe. Le second point concerne les opérations de construction pour l'instant dédiées aux bâtiments. En l'état, le modèle est intrinsèquement lié aux environnements architecturaux. Il nous semble cependant que la structure est suffisamment générale pour des utilisations dans d'autres domaines (géologie, conception automobile) ou pour des dimensions supérieures (animation), à condition de compléter les opérations associées. Pour cela, certains points importants doivent être étudiés en priorité. Par exemple, pour le moment le déplacement des objets ou des murs dans une pièce peut engendrer des modifications topologiques importantes non prises en compte au niveau de la hiérarchie. Le traitement de ces modifications nécessite de définir des contrôles de cohérence sur la structure, impliquant l'utilisation d'opérations telles que le co-raffinement.

Pour affiner la structure, quelques compléments sont envisagés. Par exemple, le clonage (très souvent utilisé en modélisation) peut participer à la réduction du nombre d'objets mémorisés dans la structure. Cependant, l'intégration de cette notion implique une modification de la définition et des traitements de la structure car un noeud de la hiérarchie peut posséder plusieurs parents. Un autre complément concerne la gestion de plongements non linéaires, permettant d'obtenir une compression des informations géométriques de notre structure (une suite de segments formant une courbe peut être remplacée par une seule arête topologique dotée d'une équation).

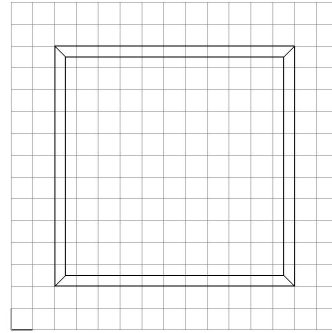
## Références

- [BAU72] Bruce BAUMGART. Winged-edge polyhedron representation. In *Technical Report CS-320, Stanford University, CA*, 1972.
- [BRI89] Erik BRISSON. Representing geometric structures in d dimensions : topology and order. In *Proceedings of 5th ACM Symposium of Computational Geometry, Saarbrücken, Germany*, pages 218–227, 1989.
- [CDM<sup>+</sup>94] Paolo CIGNONI, Leila De FLORIANI, Claudio MONTANI, Enrico PUPPO, and Roberto SCOPIGNO. Multiresolution modeling and visualization of volume data based on simplicial complexes. *Symposium on Volume Visualization*, pages 19–26, 1994.
- [DL02] Guillaume DAMIAND and Pascal LIENHARDT. Removal and contraction for n-dimensional generalized maps. In *Computer Vision Winter Workshop*, pages 208–221, Bad Aussee, Austria, february 2002.
- [DM01] Leila De FLORIANI and Paola MAGILLO. Multiresolution modeling of three-dimensional shapes. Chapter 2 in *3D Synthetic Environment Reconstruction*, M. Abdelguerfi (Ed.), Kluwer Academic Publishers, Boston, 2001. pp. 35-59.

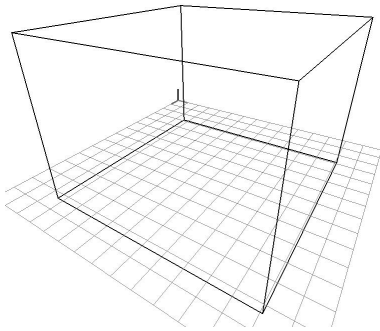
- [DPM97] Leila De FLORIANI, Enrico PUPPO, and Paola MAGILLO. A formal approach to multiresolution hypersurface modeling. In W. Straßer, R. Klein, and R. Rau, editors. *Geometric Modeling : Theory and Practice*. Springer Verlag., 1997.
- [ELT94] Hervé ELTER. *Etude de structures combinatoires pour la représentation de complexes cellulaires*. PhD thesis, Université Louis Pasteur de Strasbourg, 1994.
- [FF88] Leila De FLORIANI and Bianca FALCIDIENO. A hierarchical boundary model for solid object representation. *ACM Transactions on Graphics*, 7(1) :42–60, 1988.
- [FM01] Leila De FLORIANI and Paola MAGILLO. Multiresolution meshes, principles of multiresolution in geometric modeling. Primus01 summer school Munich, August 2001. pp. 193-234.
- [GUI00] Oskar GUILBERT. *Un Modèle Hiérarchique pour la Modélisation Géométrique à Base Topologique*. PhD thesis, Université Louis Pasteur de Strasbourg, Janvier 2000.
- [KRO95] Walter KROPATSCH. Building irregular pyramids by dual graph contraction. In *IEEE Proceedings. Vision, Image and Signal Processing*, volume 142, pages 366–374, 1995.
- [LEV99] Bruno LEVY. *Topologie Algorithmique : Combinatoire et Plongement*. PhD thesis, Institut National Polytechnique de Lorraine, Octobre 1999.
- [LIE89] Pascal LIENHARDT. Subdivisions of n-dimensional spaces and n-dimensional generalized maps. In *Symposium on Computational Geometry*, pages 228–236, 1989.
- [LIE94] Pascal LIENHARDT. N-dimensional generalized combinatorial maps and cellular quasi-manifolds. *International Journal of Computational Geometry and Applications*, 4(3) :275–324, 1994.
- [PFP95] Valerio PASCUCCI, Vincenzo FERRUCCI, and Alberto PAOLUZZI. Dimension-independent convex-cell based hierarchical polyhedral complex : Representation scheme and implementation issues. In *SMA '95 : Proceedings of the Third Symposium on Solid Modeling and Applications*, pages 163–174, 1995.
- [WEI85] Kevin WEILER. Edge-based data structures for solid modeling in curved-surface environments. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 5(1) :21–40, Janvier 1985.



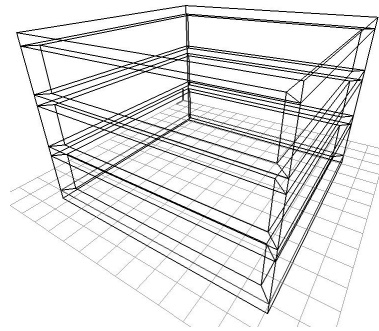
a. Définition du contours du bâtiment.



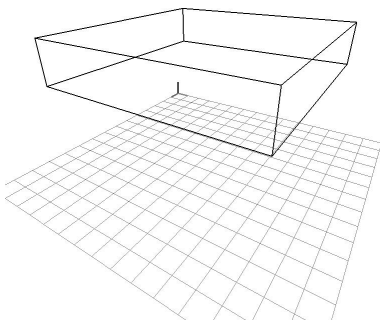
b. Positionnement des murs extérieurs.



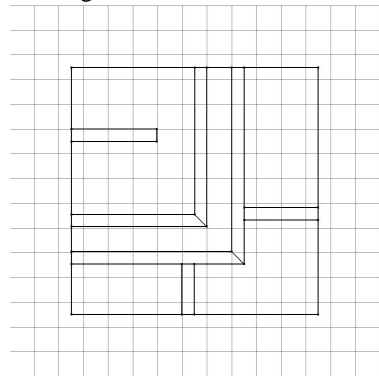
c. Extrusion du contours (*a*) pour obtenir le profil de bâtiment.



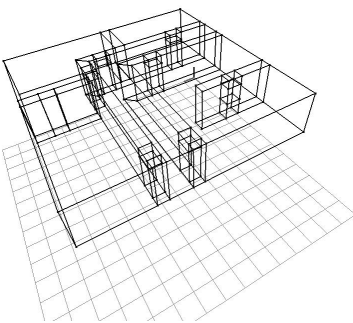
d. Extrusion des murs (*b*) pour obtenir chacun de ses étages.



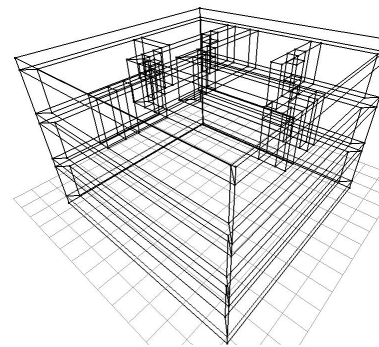
e. Description indépendante de chaque étage.



f. Mise en place des murs intérieurs d'un étage.

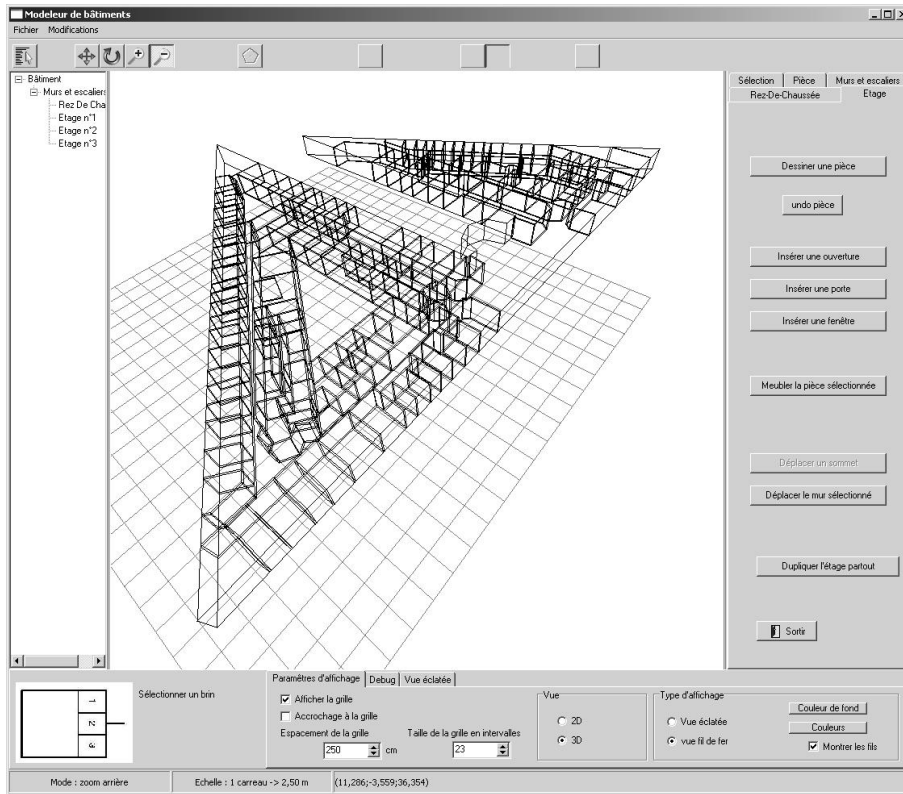


g. Mise en place des ouvertures (portes).

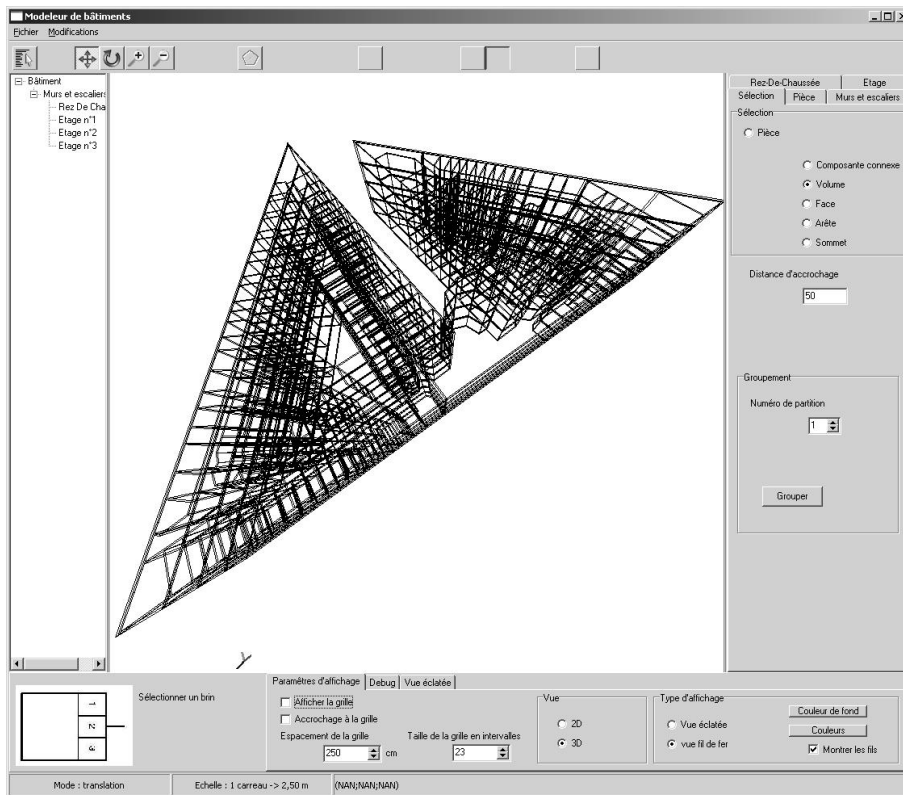


h. Affichage complet du bâtiment.

FIG. 9 – Étapes de construction d'un bâtiment.



a.



b.

FIG. 10 – Bâtiment inspiré par les plans du SP2MI : a. vue d'un étage. - b. vue du bâtiment complet.