

Rapport de projet



GAUTHIER Silvère
LAMEIRA Yannick
PELADAN Cécile

17 février 2015

Table des matières

Table des matières	2
1 Remerciements	5
2 Introduction	7
2.1 Sujet initial	7
3 Cahier des charges	9
3.1 Mécanismes	9
Les Modèles	9
Le Rendu	9
Les Outils de sculpture	9
Les Algorithmes de maillage	10
Interface	10
Les Options	10
3.2 Structure du programme	10
L'API	10
4 Gestion du projet	13
4.1 Gestion de l'équipe	13
4.2 Découpage en tâches	13
4.3 Assignation	14
4.4 Gestion du temps	15
4.5 Choix technologiques	15
Langages de programmation	15
Bibliothèques	15
Représentation du maillage	15
4.6 Gestion des fichiers	16
Format des Fichiers	16
Commentaires	17
Conventions de Nommage	17
Gestion du code source	17
5 Développement	19
5.1 API	19
La structure interne	19
Les méthodes de la classe Mesh	20
Les méthodes de la classe MeshRenderer	23
Les méthodes de la classe MeshProcessing	24

Les méthodes de la classe MeshTool	24
Les méthodes de la classe MeshManager	26
5.2 Diagramme	28
Diagramme de l'interface	28
6 Manuel	29
6.1 Utilisateur	29
6.2 Développeur	32
Ajout d'un maillage modèle	32
Ajout d'un outil	33
Pour aller plus loin...	35
7 Post-Mortem	37
7.1 Fonctionnalités non implémentées	37
7.2 Améliorations réalisables	38
A	39
A.1 Diagramme de Gantt	39
A.2 Comparatif de performances	39
A.3 Diagramme de Classes	39
A.4 Schémas explicatifs	39

Chapitre 1

Remerciements

Un grand merci à Frédéric Boudon et Benjamin Gilles pour leur encadrement. Un remerciement particulier à Frédéric Boudon pour son idée d’outil de subdivision locale.

Chapitre 2

Introduction

2.1 Sujet initial

L'objectif de ce projet est de créer un logiciel de sculpture 3D. L'utilisateur aurait à disposition un maillage déformable, qu'il pourrait modeler avec différents outils tels que déplacement, ajout de matière ou lissage. L'interface devra permettre à l'utilisateur de facilement créer un maillage initial, le visualiser et interagir avec lui à l'aide des différents outils de modelage. Initialement, les premières fonctionnalités à implémenter seront la création d'une sphère ou d'un cube comme maillage de départ, la navigation dans l'espace 3D pour se positionner autour du maillage, puis les outils de déformation cités ci-dessus. Une interface graphique contenant les boutons d'outils sera définie pour que l'utilisateur puisse intuitivement appliquer les différentes opérations proposées.

Les principales difficultés ici seront d'abord de gérer correctement l'interaction 3D de l'utilisateur avec le maillage via le curseur et la fenêtre 2D. Ensuite viendra la mise en place d'une structure de données efficace et robuste de maillage avec l'implémentation des algorithmes de subdivision et de raffinement.

Si le temps le permet, d'autres outils et maillages de base pourront être implémentés, afin d'enrichir le logiciel. On pourra également réfléchir à une manière d'importer et exporter les maillages sous différents formats tels que le OBJ ou le STL par exemple.

Ce logiciel sera développé en C++ avec la bibliothèque OpenGL pour le rendu 3D et la bibliothèque Qt pour définir l'interface.

Chapitre 3

Cahier des charges

Ce chapitre détaille la phase de conception du projet.

3.1 Mécanismes

Cette section détaille succinctement les fonctionnalités de l'application.

Les Modèles

Différents maillages prédéfinis, appelés ici modèles, seront mis à disposition de l'utilisateur.

Nous en prévoyons actuellement cinq, paramétrables par l'utilisateur :

- **Cube** : défini par une largeur, une hauteur et une profondeur.
- **Sphère** : défini par un rayon.
- **Cylindre** : défini par une hauteur et un rayon.
- **Cône** : défini par une hauteur et un rayon.
- **Tore** : défini par un rayon horizontal et un rayon vertical.

Chaque modèle sera aussi paramétré par un pas de discrétisation.

Le Rendu

Le rendu s'effectuera dans une classe spécifique, et permet de synchroniser la structure interne des maillages avec les buffer objects. Il existera également différentes options de rendu telles que l'affichage solide ou en fils de fer, les couleurs, les lumières...etc.

Les Outils de sculpture

Différents outils seront disponibles. Ils auront pour action de modifier le maillage dans la direction des normales de surface, et selon un schéma de modification propre à chaque outil. Nous avons défini deux catégories d'outils : modifications globales et locales des objets (une troisième est destinée au déplacement de la caméra dans la scène en trois dimensions).

- **Modifications Globales :**
 - **GTMove** : Déplacement d'un objet dans le repère scène.
 - **GTRotate** : Rotation d'un objet dans le repère scène.
 - **GTScale** : Mise à l'échelle d'un objet dans le repère scène.
- **Modifications Locales :**
 - **LTAdd** : Ajout de matière à la surface de l'objet.
 - **LTSmooth** : Lissage de la surface de l'objet.
 - **LTMove** : Déplacement d'une partie des points de la surface de l'objet.
 - **LTInflate** : Gonflement de la surface de l'objet.
 - **LTPinch** : Pincement de la surface de l'objet.

Pour plus de détails sur leur fonctionnement, référez-vous à la partie **Développement** (cf page 24).

Les Algorithmes de maillage

Les différents algorithmes de modification de maillages seront regroupés dans une classe statique spécifique. Y seront présentes les fonctions de subdivision et de décimation globale, ainsi qu'une subdivision et une décimation automatique paramétrable avec une longueur (maximale ou minimale) d'arête.

Interface

L'interface de l'application devra être ergonomique et proposer de nombreux raccourcis clavier afin de permettre à l'utilisateur de travailler rapidement. Elle devra également être la plus intuitive possible, car un tel logiciel pourrait devenir très compliqué à appréhender. Cela concernera tant les dispositions que les icônes qui devront suivre une certaine logique.

Les Options

Différentes options seront disponibles, telles que créer un nouveau projet, ouvrir, enregistrer, importer ou exporter un projet, annuler ou refaire une action utilisateur...etc. De même, certaines options de rendu telles que le mode fils de fer seront présentes.

3.2 Structure du programme

Cette partie détaille succinctement la structure globale du logiciel, ce qui couvre les aspects non maîtrisables par l'utilisateur.

L'API

L'application devra contenir une surcouche, ayant pour objectif de rendre notre logiciel facilement extensible par d'autres développeurs, sans qu'ils aient besoin de connaître tous les détails de la structure interne de celui-ci.

La structure interne des maillages retenue ici est la structure par demi-arêtes. Nous auront donc, pour chaque maillage, des listes de points, faces et

demi-arêtes.

Chaque point contiendra des coordonnées en trois dimensions, un indice de position dans la liste afin d'améliorer la vitesse d'accès, ainsi qu'un pointeur vers une demi-arête sortante.

Chaque face contiendra un pointeur vers une demi-arête intérieure, et éventuellement un vecteur normal.

Chaque demi-arête contiendra des pointeurs vers : une face, un point, les demi-arêtes suivantes et précédentes au sein de la même face, et la demi-arête opposé.

Plusieurs méthodes publiques devront être présentes, telles que "ajouter une face", "couper une arête en deux", "fusionner deux arêtes"... et cacher la structure interne (n'agir qu'à l'aide de coordonnées par exemple). Cela permettra dans le futur, si besoin, de changer la structure interne sans modifier le reste de l'application.

Chapitre 4

Gestion du projet

Cette partie traite globalement de tout ce qui concerne l'organisation du projet, que ce soit au niveau de la conception, du développement, de l'équipe ou encore de la gestion des fichiers.

4.1 Gestion de l'équipe

Tous les membres se connaissant et étant supposés être capable de travailler en équipe, nous n'avons fait aucune élection préalable de chef de projet. Mais le déroulement du projet nous a imposé ce choix, GAUTHIER Silvère assurera donc ce rôle, afin de garder une cohésion de groupe et assurer la réalisation de nos objectifs. Chaque membre peut tout de même participer activement au projet, autant lors de la conception que du développement. Toutes les décisions seront prises suivant la majorité lors de votes.

Pour ce qui est des réunions de projets, nous avons convenu avec nos tuteurs d'une réunion, allant d'environ trente minutes à une heure, toutes les semaines, afin de mettre au point l'avancement du projet. En parallèle, tous les membres de notre équipe se retrouvent une fois par semaine afin de discuter des points clés effectués ou à venir, donner lieu aux votes pour les prises de décisions, ou encore, lors de la phase de développement, travailler en collaboration afin d'optimiser notre travail.

Au niveau du travail collaboratif, nous avons mis en place un dépôt sur github (adresse à la page 17), contenant tant la documentation que les sources de notre programme. Par ailleurs, nous mettrons sur ce dépôt uniquement les fichiers sources et les images, mais en aucun cas les fichiers temporaires ou les exécutables. Les seuls fichiers binaires disponibles seront les PDF de la documentation, pour un soucis de facilité d'accès et de lecture.

4.2 Découpage en tâches

Afin de préparer le développement du programme, il était nécessaire de séparer les fonctionnalités les unes des autres. Nous avons abouti à ce dia-

gramme, qui résume notre choix de découpage :

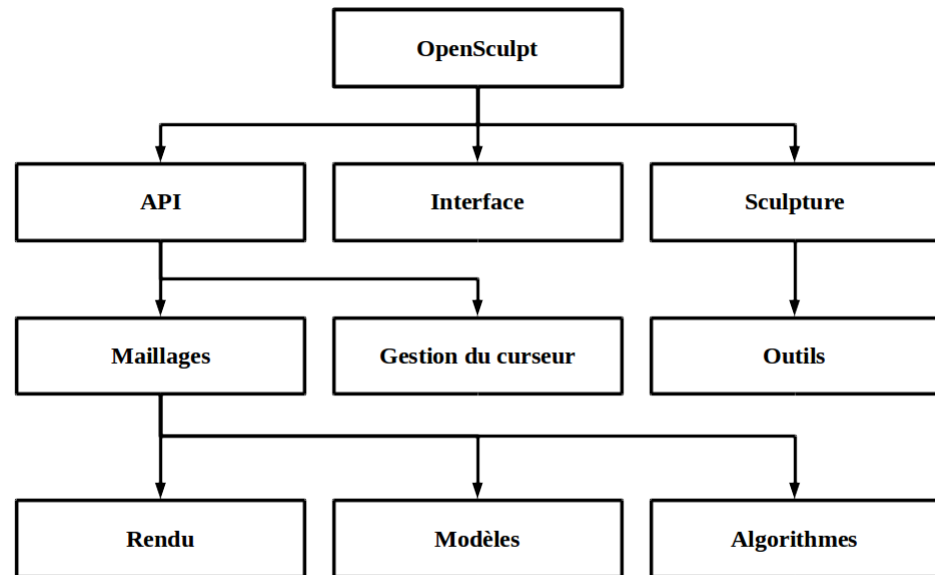


FIGURE 4.1 – Diagramme des tâches du projet

4.3 Assignment

Le projet étant découpé en un certain nombre de modules, il ne restait plus qu'à assigner chaque tâche à un ou plusieurs membres de l'équipe. Nous nous sommes organisés comme ceci :

- **Conception, implémentation et vérifications de l'API** : GAUTHIER Silvère.
- **Mise en place de l'interface** : LAMEIRA Yannick.
- **Implémentation des maillages modèles** : PELADAN Cécile.
- **Conception et implémentation des outils** : GAUTHIER Silvère, LAMEIRA Yannick, PELADAN Cécile.
- **Tests et vérifications de l'application** : GAUTHIER Silvère, LAMEIRA Yannick, PELADAN Cécile.

Bien entendu, les membres pourront évidemment faire appel aux autres pour trouver une solution à un problème par exemple.

Le détail complet des tâches et assignations se situe dans la section Gestion du temps, page 15.

4.4 Gestion du temps

Afin de clarifier notre gestion du temps, deux diagrammes de Gantt (prédictif et final) sont disponibles en annexe (cf page 40) et dans la documentation de notre projet.

4.5 Choix technologiques

Afin de pouvoir développer correctement notre logiciel, il a fallu définir tout ce que nous allons utiliser en terme de langages et bibliothèques selon notre logique de conception.

Langages de programmation

Pour des besoins de performances, nous avons comparé différents langages. Pour réduire le temps de recherche et de comparaison, nous nous sommes appuyé sur des tests déjà effectués par d'autre.

Des tests de performances concernant un large panel de langages, comparés dans quatre contextes différents, sont fournis en annexe, page 41.

Nous pouvons observer que globalement, le langage le plus rapide est ici C++. L'utilisation de ce langage étant très fréquente dans les applications en temps réel, de part sa réputation d'un des langages les plus performants, et tous les membres de notre équipe sachant l'utiliser, nous avons fait le choix de programmer le logiciel en C++.

Bibliothèques

Pour la gestion graphique de l'interface et de l'affichage de l'objet, nous avons cherché une bibliothèque relativement simple d'utilisation mais surtout performante afin de garder la fluidité gagnée avec le choix des langages de programmation.

Connaissant la bibliothèque OpenGL, qui est bas niveau et performante dans les affichages deux et trois dimensions, nous nous sommes tournés vers une bibliothèque utilisant OpenGL : Qt.

Représentation du maillage

Nous cherchons ici à comparer différentes techniques permettant de représenter un maillage, afin de choisir celle qui sera la plus adaptée à nos opérations. Voici un tableau récapitulatif de cette étude comparative :

Représentation	Avantages	Inconvénients
Octree ou KDTree	<ul style="list-style-type: none"> - Hiérarchie des résolutions - Rendu volumique possible - Construction et parcours simples 	<ul style="list-style-type: none"> - Visualisation surfacique difficile - Coût de stockage excessif - Recalculer à chaque modification
Arbre CSG	<ul style="list-style-type: none"> - Historique de construction - Approche fonctionnelle 	<ul style="list-style-type: none"> - Non unicité - Opérations complexes - Domaine insuffisant
G-maps	<ul style="list-style-type: none"> - Opérations de topologie simples - Plongements multiples 	- Séparation topologie / plongement
Liste de triangles	- Opérations simples	- Stockage non optimisé
Sommets partagés	<ul style="list-style-type: none"> - Opérations simples - Stockage correct 	
Bandes de triangles	- Stockage correct	<ul style="list-style-type: none"> - Chaque sommet est visité deux fois - Opérations de déplacement délicates
Structure par faces	<ul style="list-style-type: none"> - Chaque face pointe sur ses sommets - Une face connaît les faces adjacentes 	- Pas d'accès direct aux arêtes
Structure par demi-arêtes	- Parcours de maillage très pratiques	- Coût de stockage excessif
Vertex Array (VAO)	<ul style="list-style-type: none"> - Optimisé pour le rendu OpenGL - Simple d'utilisation 	- Utilise le CPU et la RAM
Vertex Buffer Object (VBO)	<ul style="list-style-type: none"> - Optimisé pour le rendu OpenGL - Utilise le GPU et la VRAM 	

TABLE 4.1 – Tableau comparatif de méthodes de représentation de maillage 3D

L'étude comparative montre qu'il serait judicieux d'utiliser conjointement des Vertex Buffer Objects (VBOs) afin d'optimiser les performances d'affichage et une classe personnalisée pour aisément gérer nos données par une surcouche de méthodes. La structure interne des maillages sera donc une structure de type demi-arêtes, afin de faciliter les opérations de voisinage.

4.6 Gestion des fichiers

Nous avons beaucoup de fichiers à gérer dans ce projet, et nous devons établir des conventions ou des moyens afin de les gérer correctement.

Format des Fichiers

Le code étant écrit en C++, nous utiliserons des fichiers d'en-tête au format H et des fichiers de définition au format CPP. Toutes les images nécessaires au logiciel seront au format PNG afin de pouvoir utiliser la transparence et garder la pleine qualité d'image (contrairement à JPEG qui perd de l'information à la compression).

Sauvegarde

Une façon judicieuse de sauvegarder nos données serait d'avoir un format spécial pour enregistrer un projet complet contenant une liste d'objets, ainsi qu'une possibilité d'exportation de chaque objet ou scène dans un format connu tel que STL ou OBJ.

Commentaires

Si une méthode ou fonction (voir même un bloc) dépasse une certaine taille ou devient trop compliquée, un commentaire sera ajouté avant celle-ci expliquant brièvement son processus :

```
/** Description :  
*** Entrée : ...  
*** Sortie : ...  
**/
```

Quelques commentaires précieux pour le travail collaboratif seront également présents :

Marqueur spécifique	Signification
TODO	A mettre à la place du code d'une fonctionnalité à implémenter
RECODE	A mettre au dessus du bloc d'une fonctionnalité à refaire ou à optimiser
FIXME	A mettre au dessus du bloc d'une fonctionnalité contenant un bug

TABLE 4.2 – Forme et usage des commentaires

Conventions de Nommage

Pour la lisibilité et la bonne pratique du développement de l'application, il est nécessaire de suivre des règles établies au sein de l'équipe de projet, appelées conventions. Ainsi, nous avons choisi d'écrire le code en anglais uniquement, mis à part pour les commentaires utiles aux développeurs préférant le français. De même, au moins une ligne de commentaire est requise avant chaque déclaration de classe ou de fonction, afin d'en expliquer brièvement son fonctionnement (sauf dans le cas de méthodes simples avec des noms explicites).

Voici un tableau récapitulatif des conventions de nommages pour les noms de variables, classes et méthodes :

Type de variable	Format du nom
Classe	Majuscule suivit de minuscules
Méthode et Fonction	Minuscules (pour les mots composés, chaque mot suivant est une majuscule suivit de minuscules)
Attribut de classe	Précédé par m_
Variable globale	Précédé par g_
Variable statique	Précédé par s_

TABLE 4.3 – Conventions de nommage

Gestion du code source

Afin de faciliter le travail collaboratif, nous utilisons un dépôt utilisant le gestionnaire de version GIT, hébergé sur le site :

<https://github.com/slvrgauthier/OpenSculpt>

Sur ce dépôt seront présents tous les fichiers sources nécessaires au développement du programme ainsi que les documentations au format \LaTeX , ODT et PDF (même si aucun fichier binaire ne devrait être présent, il est plus pratique de récupérer directement un tel fichier que de le compiler soit-même). De plus, y seront stockées toutes les données utilisées par le programme telles que les images et autres ressources. Seuls les fichiers temporaires, exécutables et fichiers de sauvegarde ne seront pas stockés.

Chapitre 5

Développement

Ce chapitre est une sorte de carnet de bord. Il détaille tout ce qui concerne le développement de l'application.

5.1 API

Le principe d'une API est de fournir au développeur une surcouche permettant d'encapsuler les calculs et représentations internes à l'intérieur d'un certain nombre de méthodes. Ces méthodes seront par la suite utilisables par le développeur afin de faciliter l'implémentation. Un diagramme de classes est disponible en annexe (cf page 42).

La structure interne

Nous avons conçu trois structures C++, représentant respectivement les demi-arêtes, les points et les faces. Ces trois structures utilisées ensemble définissent la représentation des maillages par demi-arêtes :

```
typedef struct HalfEdge {
    Vertex* vertex;
    Face* face;
    HalfEdge* next;
    HalfEdge* opposite;
    HalfEdge* previous;
} HalfEdge;

typedef struct Vertex {
    QVector3D coords;
    HalfEdge* outgoing;
    int index;
} Vertex;

typedef struct Face {
    HalfEdge* edge;
} Face;
```

Cette structure est certes relativement gourmande en stockage, mais très performante pour tous les algorithmes de transformations basés sur le voisinage. Nous utilisons ici le voisinage non seulement pour le rendu, mais également dans chaque outil de sculpture et chaque fonction telle que la subdivision. Nous avons d'ailleurs ajouté un entier dans la structure des points afin d'obtenir des accès immédiats lors du rendu.

Pour utiliser cette structure tout en séparant bien les types d'interaction, nous avons créé un certain nombre de classes, dont chacune a un rôle spécifique :

- **Mesh** : contient le maillage et toutes les méthodes de création de celui-ci (cf page 20).
- **MeshRenderer** : contient des buffer objects permettant le rendu d'un maillage (cf page 23).
- **MeshProcessing** : contient des méthodes statiques de modification de maillage (cf page 24).
- **MeshTool** : contient les méthodes outils permettant la sculpture de l'objet (cf page 24).
- **MeshManager** : contient et gère l'ensemble des objets de la scène (cf page 26).

Toutes ces classes sont ensuite utilisées au sein de l'interface, notamment dans le widget OpenGL.

Les méthodes de la classe Mesh

Génération des modèles prédéfinis

Comme expliqué précédemment (cf page 9), nous avons plusieurs maillages prédéfinis. Pour chacun d'entre eux, il existera une unique méthode, dans la classe Mesh, permettant de le générer :

```
void makeCone(float height, float radiusUp, float radiusDown, int discretization);  
void makeCube(float width, float height, float depth, int discretization);  
void makeCylinder(float height, float radius, int discretization);  
void makeSphere(float radius, int discretization);  
void makeTorus(float radiusH, float radiusV, int discretization);
```

Chaque maillage prédéfini comporte des paramètres géométriques, (par exemple largeur, hauteur et profondeur pour le cube ou rayon pour la sphère) et un paramètre définissant le pas de discrétisation. Celui-ci permet de donner une résolution de base à l'objet, afin de l'affiner selon la formule géométrique de celui-ci (par exemple, les bords d'un cylindre seront plus lisses).

Ajout d'une face

Il est possible de créer une face d'un maillage grâce à la fonction suivante :

```
bool addFace(QVector<QVector3D> vertices);
```

En entrée, la méthode prend une liste de points, supposés ordonnés dans le sens direct. Ensuite, la méthode détecte les points déjà existants et crée les

autres. Enfin, la face est créée sous forme d'un TRIANGLE_FAN (éventail), dont la base sera le premier point de la liste. Il est alors possible de compléter l'éventail par ajout d'une copie du second point à la fin de la liste. Un booléen est renvoyé pour attester du bon déroulement de celle-ci.

Découpage d'une arête

Il est possible de couper une arête en deux parts égales avec cette méthode :

```
bool cutEdge(QVector3D vertex1, QVector3D vertex2);
```

Si l'arête joignant les deux points passés en paramètres existe, alors la méthode crée un point intermédiaire (au milieu de l'arête) et reforme les deux arêtes. Pour garder une certaine intégrité au sein du maillage, ce point intermédiaire est relié au troisième sommet de chacun des deux triangles séparés par l'arête initiale.

Un booléen est renvoyé pour attester du bon déroulement de celle-ci.

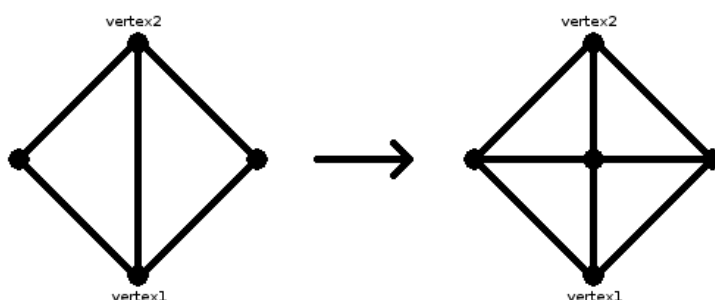


FIGURE 5.1 – Principe de la méthode cutEdge

Fusion de deux arêtes

Il est possible de fusionner deux arêtes en une seule grâce à la fonction :

```
bool mergeEdge(QVector3D vertex1, QVector3D vertex2, QVector3D vertex3);
```

S'il existe une arête entre "vertex1" et "vertex2", ainsi qu'une autre entre "vertex2" et "vertex3", alors la fonction fusionne ces deux arêtes. Le principe de ce processus est de ramener un éventail de son centre vers une de ses extrémités. Donc, toutes les arêtes de l'éventail de centre "vertex2" se redirigeront vers "vertex1". Il est conseillé d'utiliser cette fonction avec parcimonie, notamment en vérifiant les angles entre les arêtes, car aucune vérification de recoupement de faces n'est effectué.

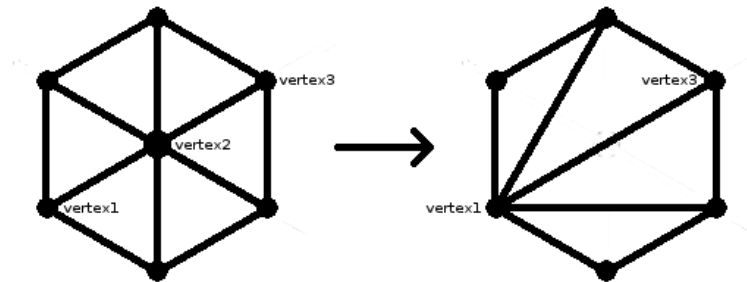


FIGURE 5.2 – Principe de la méthode mergeEdge

Récupération de points

Il est possible de récupérer une liste de points dans une certaine zone avec :

```
QVector<QVector3D> getVertices(QVector3D position, float areaSize);
```

Le but de cette fonction est de renvoyer tous les points présents dans la zone de centre "position" et de rayon "areaSize". Pour cela, un parcours récursif des voisins de la face contenant le centre, couplé avec des tests de distance point à point, renvoie tous les points des faces voisines tant que la distance au centre reste inférieure au rayon. Si le rayon est égal à zéro, la fonction renvoie uniquement les trois points de la face contenant le centre de la zone.

Remarque : la liste de points renvoyée contient aussi "position".

Récupération de voisinage

Il est possible de récupérer une liste de points voisins d'un certain point avec :

```
QVector<QVector3D> getNeighbours(QVector3D vertex, int degree);
```

Si le point passé en paramètres existe, alors la fonction renverra, grâce à un parcours récursifs basé sur les adjacences de faces, la liste des points voisins de celui-ci. Le degré de voisinage permet d'obtenir des voisins plus éloignés, ce paramètre définissant le nombre de récursions à effectuer lors du parcours.

Récupération de normale de surface

Il est possible de récupérer la normale à la surface de l'objet grâce à la méthode :

```
QVector3D getNormal(QVector3D position);
```

Cette méthode détecte la face contenant le point passé en paramètre, et renvoie la normale au plan contenant cette face. Si aucune face n'est détectée comme contenant ce point, le vecteur renvoyé sera la direction entre le centre de l'objet et le point "position", afin d'éviter les scintillements du pinceau ou autres petits décalages du curseur pouvant créer des incohérences.

Translation de points

Il est possible d'effectuer une translation sur un ou plusieurs points à l'aide des fonctions :

```
void moveVertex(QVector3D vertex, QVector3D move);
void moveVertex(int index, QVector3D move);
void moveVertices(QVector<QVector3D> vertices, QVector3D move);
```

Ces trois fonctions permettent au développeur d'effectuer des translations sur un ou plusieurs points, selon un vecteur passé en paramètres ("move").

Les accesseurs

La classe Mesh contient également certains accesseurs utiles :

```
QVector3D getCenter() const;
void setCenter(QVector3D center);

QVector3D getCoords(int index) const;
void setCoords(QVector3D vertex, QVector3D coord);
void setCoords(int index, QVector3D coord);

int getEdgeCount() const;
int getVertexCount() const;
int getFaceCount() const;
```

Avec ces accesseurs, nous pouvons récupérer ou déplacer des points du maillage directement (y compris le centre de l'objet), ainsi que connaître des informations utiles telles que le nombre total de points, demi-arêtes ou faces.

Les méthodes de la classe MeshRenderer

Dessin de l'objet

On effectue le rendu OpenGL avec la méthode suivante :

```
void paintGL();
```

Cette méthode transmet à la carte graphique (donc le GPU), les buffers nécessaires au rendu OpenGL de l'objet. Il existe trois buffers : les points, les normales et les indices. Nous avons choisi de passer par un buffer d'indices afin d'améliorer les performances (un entier pour chaque point de chaque triangle au lieu de répéter trois flottants pour chaque point et trois de plus pour chaque normale).

Synchronisation des buffers

Il est parfois nécessaire d'actualiser ou non les buffer objects :

```
void update();
```

Cette fonction permet d'actualiser les buffers. En effet, avec les modifications sur les maillages rendues possibles, il est souvent nécessaire de resynchroniser les buffers avec le maillage existant. Ce processus a été séparé du processus de rendu afin de permettre de changer les options de rendus sans recalculer la synchronisation qui n'est nécessaire que si le maillage est modifié.

Les méthodes de la classe **MeshProcessing**

Subdivision

Nous avons mis en place deux types de subdivision :

```
static void subdivide(Mesh *mesh);  
static bool subdivideAuto(Mesh *mesh, float maxEdgeLength);
```

Ces deux processus de subdivision permettent de raffiner le maillage dans son intégralité.

La première subdivision crée pour chaque face un triangle à l'aide des milieux de chaque arête de celle-ci. Un schéma est disponible en annexe (cf page 43). Celle-ci étant intimement liée à la structure interne des maillages, il est nécessaire de la redéfinir si l'on décide de changer cette structure.

La seconde méthode est paramétrable. En effet, le paramètre "maxEdgeLength" permet de ne couper que les arêtes dépassant cette taille. Un booléen atteste de la modification ou non du maillage. Le processus utilisé est celui de la méthode "cutEdge" de la classe **Mesh** (cf page 20).

Décimation

Nous avons mis en place deux types de décimation :

```
static void decimate(Mesh *mesh);  
static bool decimateAuto(Mesh *mesh, float minEdgeLength);
```

Ces deux processus de décimation permettent de simplifier le maillage dans son intégralité.

La première décimation fusionne chaque ensemble de quatre faces (cf schéma de subdivision page 43) en une seule, si et seulement si ces faces ont des angles dièdres inférieurs à une certaine valeur (ici 22.5 degrés mais paramétrable dans l'avenir). Les faces déjà visitées sont enregistrées pendant le processus afin de ne pas faire plusieurs passes en une seule fois.

La seconde méthode est paramétrable. En effet, le paramètre "minEdgeLength" permet de ne fusionner que les arêtes plus courtes que cette taille. Un booléen atteste de la modification ou non du maillage.

Le processus utilisé pour les deux méthodes est celui de la méthode "mergeEdge" de la classe **Mesh** (cf page 20).

Les méthodes de la classe **MeshTool**

Les outils de sculpture

Comme expliqué précédemment (cf page 9), nous avons plusieurs outils de sculpture présents. Pour chacun d'entre eux, il existera une unique méthode, dans la classe **MeshTool**, définissant son action :

```
void gtmove(Mesh *mesh, QVector3D move);  
void gtrotate(Mesh *mesh, QVector3D move);  
void gtscale(Mesh *mesh, QVector3D move);
```

```
void ltadd(Mesh *mesh, QPoint last_position, float brushSize, float strength, Qt::Key
```



```

void ltinflate(Mesh *mesh, QPoint last_position, float brushSize, float strength, Qt::KeyboardModifiers modifiers);
void ltmove(Mesh *mesh, QPoint last_position, QVector3D move, float brushSize, float strength, Qt::KeyboardModifiers modifiers);
void ltpinch(Mesh *mesh, QPoint last_position, float brushSize, float strength, Qt::KeyboardModifiers modifiers);
void ltsmooth(Mesh *mesh, QPoint last_position, float brushSize, float strength, Qt::KeyboardModifiers modifiers);

```

Pour chaque outil, les paramètres diffèrent légèrement. En effet, nous pouvons retrouver le maillage de l'objet sélectionné "mesh", un vecteur de déplacement "move" (dans le repère scène ou déplacement de souris), la position du curseur "last_position", la taille de la zone d'action "brushSize", la force de l'outil "strength" (force d'attraction de la matière : Plus la force est forte, plus la modification par l'outil va être significative), ou encore des KeyboardModifiers afin d'augmenter les possibilités de nos outils. Mais comment fonctionnent ces outils ?

Remarque : un Brush, cité ci-dessous, correspond à la zone circulaire de centre "last_position" (en réalité on utilise par la suite le point d'impact du curseur sur l'objet, donc des coordonnées dans le repère scène) et de rayon "brushSize". Ce brush permet de définir les sommets contenus dans cette zone où l'outil va être appliqué.

- **GTMove :** Translation par le vecteur "move" de chacun des points de l'objet.
- **GTRotate :** Rotation selon les composantes du vecteur "move" de chacun des points de l'objet, en prenant comme origine du repère de rotation le centre de celui-ci.
- **GTScale :** Homothétie de l'objet selon le déplacement en coordonnées du vecteur "move", en prenant comme origine le centre de l'objet.
- **LTAdd :** Translation de tous les points contenus dans le Brush selon la normale à la face touchée par le curseur, pondérée par le paramètre "strength". La touche Shift inverse la normale et permet donc de creuser.
- **LTSmooth :** Translation de chaque point contenu dans le Brush dans la direction des coordonnées moyennes de ses voisins immédiats, pondérée par "strength". La touche Shift augmente la force d'un facteur 20.
- **LTMove :** Translation de tous les points contenus dans le Brush selon le vecteur "move" (défini dans le repère scène).
- **LTInflate :** Translation de chaque point contenu dans le brush selon un vecteur défini par la normale de surface et la distance entre le point et le centre du Brush. Ce vecteur est une addition du vecteur normal et de la composante plane (sur le Brush) du vecteur allant du centre du Brush vers le point. Ce qui a pour effet de créer un gonflement de la matière, puisque les directions des translations forment une bulle. La touche Shift permet d'inverser la normale et donc de creuser.
- **LTPinch :** Translation de chaque point contenu dans le brush selon un vecteur défini par la normale de surface et la distance entre le point et le centre du Brush. Ce vecteur est une soustraction entre le vecteur normal et la composante plane (sur le Brush) du vecteur allant du centre du Brush vers le point. Ce qui a pour effet de créer un pincement de la matière, puisque les directions des translations forment l'inverse d'une bulle. La touche Shift permet d'inverser la normale et donc de creuser.

Remarque : Les outils LTSmooth, LTMove, LTInflate et LTPinch pondèrent leurs translations par un coefficient de distance entre le point translaté et le centre du Brush, de sorte que le déplacement décroisse avec la distance.

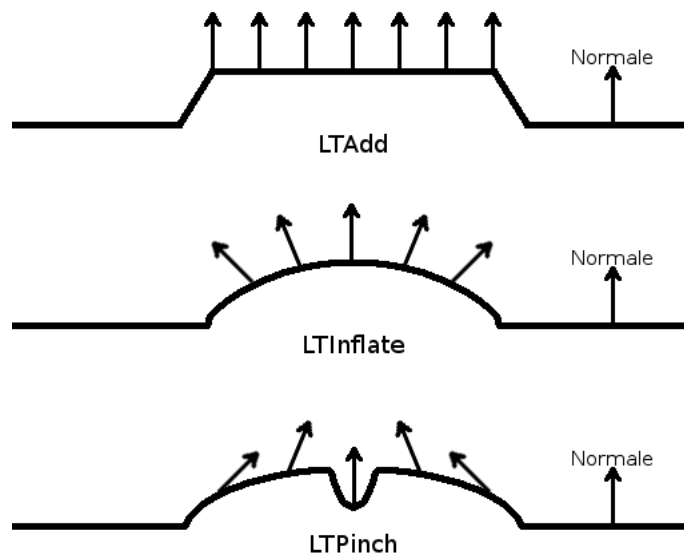


FIGURE 5.3 – Translations par les outils de sculpture

Les outils spéciaux

De nouveaux outils, nommés ici "spéciaux", ont été développés suite à la proposition de notre encadrant :

```
void subdivideAuto(Mesh *mesh, QPoint last_position, float brushSize);
void decimateAuto(Mesh *mesh, QPoint last_position, float brushSize);
```

Ces deux outils sont en fait une subdivision ou une décimation, mais uniquement locale. Nous pouvons les utiliser soit seul, soit conjointement à un des outils de sculpture. Ce sont en fait des processus paramétrés, d'où le "Auto" rappelant les méthodes de la classe **MeshProcessing** (cf page 24). En réalité, le processus est similaire, sauf qu'ici le paramètre de longueur d'arête est calculé grâce à une moyenne des longueurs d'arêtes contenues dans la zone d'action. Les fonctions utilisées sont également "cutEdge" et "mergeEdge" de la classe **Mesh** (cf page 20);

Les méthodes de la classe MeshManager

Dessin et synchronisation

On effectue le rendu OpenGL et la synchronisation des buffers à l'aide de ces fonctions :

```
void paintGL(int activeMesh);
```

```
void updateMesh(int index);  
void updateLastMesh();
```

Cette classe permet facilement de faire appel à tous les objets itérativement, et offre également quelques options. En effet, le paramètre "activeMesh" permet le rendu du maillage actif d'un couleur différente des autres par exemple. De même, nous pouvons choisir quel maillage nous avons besoin de mettre à jour.

Ajout et suppression

Puisque le MeshManager est un conteneur, il est possible d'ajouter ou de supprimer un ou plusieurs maillages :

```
void addMesh(Mesh *mesh);  
void removeMesh(Mesh *mesh);  
void clear();
```

Ces fonctions d'ajout et suppression permettent de ne pas gérer nous même les suppressions d'objet de la mémoire, puisque le manager s'en occupe. Ainsi, la programmation s'en retrouve moins compliquée.

5.2 Diagramme

Diagramme de l'interface

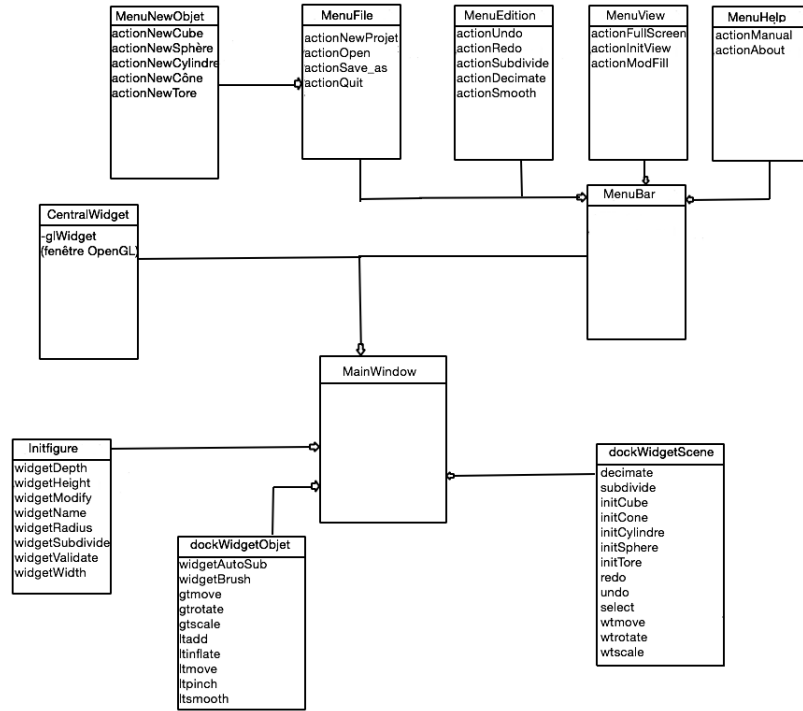


FIGURE 5.4 – Diagramme de l'interface graphique

Chapitre 6

Manuel

6.1 Utilisateur

L'interface se décompose en quatre parties. Un panel à droite permet d'agir sur les objets de la scène : une liste des objets présents permet de sélectionner l'objet sur lequel travailler, ainsi que de supprimer ou renommer celui-ci. Le panel droit contient également une boîte de dialogue permettant de paramétrer nos objets (notamment à leur création). Une barre d'outils, dans la partie supérieure de la fenêtre, permet d'agir sur la scène (déplacement de caméra, ajout d'objets...etc) ou l'objet courant (subdivision ou décimation). Un panel dans la partie gauche permet de sélectionner un outil de sculpture, ainsi que de paramétrer notre Brush. Enfin, une sous-fenêtre au centre permet le rendu OpenGL de la scène.

Voici un aperçu de notre interface, voulue ergonomique et dynamique (tous les panels sont mobiles) :

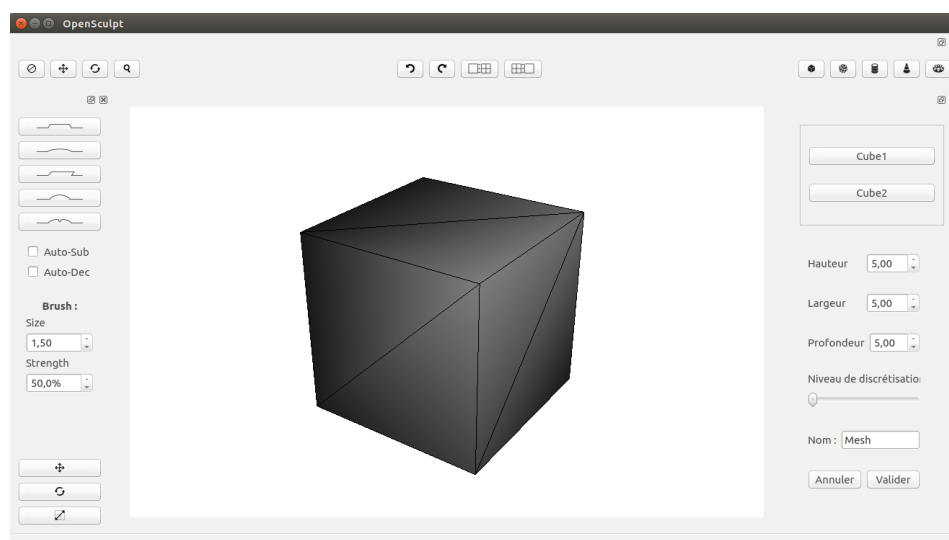


FIGURE 6.1 – Aperçu de l'interface graphique

Via cette interface, nous pouvons créer une scène comportant plusieurs objets. Tout d'abord, pour ajouter un objet à la scène, deux choix s'offrent à nous :

- Soit à partir du menu : "Fichier" puis "Nouvel objet".
- Soit en cliquant directement sur l'icône de l'objet voulu, présent dans la barre d'outils.

Une fois l'objet créé (au centre de la scène), la boîte de dialogue permettant de le paramétrer apparaît dans le panel droit :

- Dimensions géométriques (largeur, hauteur, profondeur ou rayon)
- Niveau de discrétisation (cf partie **Développement** page 20)
- Nom de l'objet

L'objet se régénère en temps réel à chaque modification de paramètre (excepté le nom). Une fois l'objet validé, celui-ci apparaît dans la liste située dans le panel droit. Nous remarquons que la figure sélectionnée est de couleur orange et que son nom dans la liste est surligné. Il sera donc possible de passer d'un objet à un autre en cliquant sur le nom de l'objet souhaité. De plus il sera aussi possible d'accéder à certains attributs d'un objet en effectuant un double clic ou un clic droit sur son nom. Nous aurons alors la possibilité de modifier son nom ou de le supprimer.

Maintenant que nous avons créé un objet, nous allons pouvoir interagir sur celui-ci ainsi que sur la scène à laquelle il appartient (par utilisation de la souris : déplacement du curseur en maintenant le clic gauche enfoncé). Pour cela, nous pouvons utiliser la barre d'outils de la partie supérieure de la fenêtre. Celle-ci est composée de plusieurs boutons auxquels sont associés des raccourcis clavier (représentés ici entre parenthèses et guillemets).

Tout d'abord, les boutons à gauche permettront d'agir sur la scène. En effet nous aurons (de gauche à droite) :

- Désélectionner les boutons sélectionnés ("Esc").
- Déplacer la scène ("Alt+M") : déplace la scène dans la direction de la souris.
- Tourner la scène ("Alt+R") : tourne la scène dans la direction de la souris. Le clic droit permet par défaut cette fonctionnalité sans la sélectionner.
- Zoomer ou dézoomer dans la scène ("Alt+S") : avance la caméra dans la scène selon la hauteur du déplacement de la souris (vers le haut pour avancer, vers le bas pour reculer). La molette permet par défaut cette fonctionnalité sans la sélectionner.

Puis, les boutons au centre permettront d'annuler ("Ctrl+Z") ou refaire ("Ctrl+Y") une action et de subdiviser ("Ctrl+S") ou décimer ("Ctrl+D") l'objet actif dans son intégralité. Enfin, nous aurons les boutons permettant de créer un objet prédéfini (de gauche à droite) :

- Cube ("Ctrl+1")
- Sphère ("Ctrl+2")
- Cylindre ("Ctrl+3")
- Cône ("Ctrl+4")

- Tore ("Ctrl+5")

Nous pouvons manipuler les objets créés ainsi que leur appliquer des transformations. Pour cela, le panel de gauche nous permettra de choisir un outil de sculpture ou de manipulation globale de l'objet, ceux-ci ne modifiant que l'objet actif (en orange).

Tout d'abord, nous avons les boutons situés en bas du panel, correspondant aux manipulations globales :

- Déplacer l'objet dans la scène ("Shift+M") : déplace l'objet dans la direction de la souris.
- Tourner l'objet ("Shift+R") : tourne l'objet dans la direction de la souris.
- Mettre à l'échelle l'objet ("Shift+S") : met à l'échelle l'objet selon la hauteur du déplacement de la souris (vers le haut pour agrandir, vers le bas pour réduire).

Puis, nous avons les boutons en haut du panel, correspondant aux outils de sculpture :

- Ajouter de la matière à l'objet ("A").
- Lisser la surface de l'objet ("S").
- Déplacer les polygones de l'objet ("M").
- Faire gonfler la surface de l'objet ("I").
- Pincer la surface de l'objet ("P").

Tous ces outils ont un rayon d'action appelé Brush, représenté par un cercle vert à l'écran. Il n'agissent donc uniquement sous le curseur, dans une zone circulaire paramétrable (cf ci-dessous).

Enfin, au centre, plusieurs paramètres réglables agissent sur notre objet :

- Subdivision locale automatique : subdivise l'objet uniquement dans la zone d'action. Peut être cumulable avec un outil.
- Décimation locale automatique : décime l'objet uniquement dans la zone d'action. Peut être cumulable avec un outil.
- Modifier le brush (taille de la zone d'action et force d'attraction de l'outil).

Il est aussi possible d'agir grâce aux menus. Par exemple, le menu "Edition" permet de subdiviser, décimer ou lisser notre objet.

De plus, nous pouvons changer les options de rendu via l'onglet "Affichage". En effet, il est possible de réinitialiser la vue de la sous-fenêtre OpenGL ou d'activer ou désactiver le "mode fils de fer" (les raccourcis "F" et "W" permettent de passer du mode fils de fer au mode plein).



FIGURE 6.2 – Utilisation des raccourcis "W" et "F"

Enfin, il est possible à tout moment de créer un nouveau projet ou enregistrer celui en cours grâce au menu "Fichier".

6.2 Développeur

Toute personne avec des bases de programmation pourra étendre les fonctionnalités de celle-ci grâce à notre API. Les seuls prérequis seront d'installer QtCreator et d'avoir les bibliothèques Glut pour OpenGL.

Ajout d'un maillage modèle

Il est possible d'ajouter un maillage modèle afin d'enrichir les objets de base proposés à l'utilisateur.

Pour cela, il est nécessaire d'ajouter plusieurs choses :

- Une fonction de génération du maillage dans la classe **Mesh**
- Un bouton ou une entrée de menu pour créer le modèle dans l'interface
- Des widgets (s'ils n'existent pas encore) pour les paramètres de génération
- Une fonction de mise à jour du maillage en temps réel

Fonction de génération

Il est nécessaire d'ajouter cette fonction dans la classe **Mesh**. Nous conseillons, pour la clarté, de placer sa déclaration dans "Mesh.h", sous les méthodes existantes de type :

```
void makeCube(float width, float height, float depth, int discretization);
```

Toujours pour la facilité d'appréhension du code, nous conseillons de créer un nouveau fichier "makePolygon.cpp" contenant la définition de la fonction :

```
#include "Mesh.h"
```

```
void Mesh::makeCube(float width, float height, float depth, int discretization) {  
    this->clear();  
  
    ...  
  
    this->TEST();  
}
```

Il faut donc absolument inclure "Mesh.h", et surtout ne pas oublier d'utiliser la fonction clear(), qui permet de régénérer le maillage à chaque changement de paramètre. Une fonction TEST() est également disponible pour vérifier l'intégrité du maillage (à utiliser à la fin de la fonction makePolygon). Dans le corps de cette méthode, il est conseillé d'utiliser la méthode addFace (cf page 20) pour chaque facette du maillage. Vous pourrez bien sûr prendre exemple des fonctions déjà implémentées.

Bouton, menu et widgets

Pour que l'utilisateur s'y retrouve facilement (mais ce n'est pas obligatoire si l'on ne souhaite qu'un raccourci clavier par exemple), il est conseillé d'ajouter un bouton (via QtDesigner) dans le fichier "mainWindow.ui", formulaire de QtDesigner. Il suffit de recopier les valeurs des boutons déjà présents, en ne

changeant que le nom et l'icône de celui-ci. Ces boutons se situent à droite de la barre d'outils, dans la partie supérieure de la fenêtre. De même pour l'entrée de menu ("Fichier" - "Nouvel Objet"). Il faut ensuite ajouter les fonctions adéquates dans les fichiers "mainWindow.h" et "mainWindow.cpp", en prenant pour exemple celles déjà présentes du type :

```
void on_initCube_clicked(); // Bouton
void on_actionNewCube_triggered(); // Menu
```

La fonction *on_init()* doit être appelée au début de la première, afin de réinitialiser les paramètres de création et divers autres détails. S'il est nécessaire d'ajouter des widgets, il faudra prendre exemple sur ceux déjà présents (les *doubleSpinBox* de la boîte de dialogue du panel droit). Dans ce cas, il sera également nécessaire d'ajouter des appels aux fonctions *setVisible()* et *connect()* / *disconnect()*, dans les méthodes de la classe "mainWindow" suivantes :

```
void on_init();
void on_initVotrePolygone_clicked();
void hideDialog();
```

Pour le raccourci clavier, il suffit d'ajouter une entrée dans le switch de la méthode *keyPressEvent(QKeyEvent *event)*.

Fonction de mise à jour

Il est nécessaire d'ajouter cette fonction dans la classe **MainWindow**. Nous conseillons de placer sa déclaration dans "MainWindow.h", sous les méthodes existantes de type :

```
void updateCube();
```

Il suffit ensuite de placer sa définition dans "MainWindow.cpp", selon l'exemple des méthodes déjà implémentées. Cette fonction est obligatoire pour la génération (et régénération) du maillage.

Ajout d'un outil

Il est possible d'ajouter un outil afin d'enrichir les actions de sculpture proposées à l'utilisateur.

Pour cela, il est nécessaire d'ajouter plusieurs choses :

- Un type d'outil dans l'énumération **TOOL**
- Une fonction d'action de l'outil dans la classe **MeshTool**
- Un bouton pour utiliser l'outil dans l'interface
- Une entrée dans la méthode "mouseMoveEvent" de la classe **GLWidget**

Type d'outil et fonction d'action

Il est nécessaire d'ajouter le type de votre outil dans l'énumération "TOOL", déclarée dans le fichier "MeshTool.h". Pour la clarté, il est conseillé de respecter la convention de nom expliquée en commentaire au dessus de l'énumération. Vous devez ensuite créer une méthode d'action. Nous vous conseillons de vous

imprégner de la partie **Développement** (cf page 24) pour choisir les paramètres adéquats. Il suffit de la déclarer dans le fichier "MeshTool.h", sous les méthodes existantes de type :

```
void gtmove(Mesh *mesh, QVector3D move);
```

La déclaration se place dans le fichier "MeshTool.cpp". Il est encore une fois conseillé de bien comprendre la partie **Développement** (cf page 24) afin de créer l'effet désiré. De même, les fonctions déjà présentes pourront servir d'exemple. Les fonctions du fichier "functions.h" sont également très utiles.

Bouton

Pour que l'utilisateur s'y retrouve facilement (mais ce n'est pas obligatoire si l'on ne souhaite qu'un raccourci clavier par exemple), il est conseillé d'ajouter un bouton (via QtDesigner) dans le fichier "mainWindow.ui", formulaire de QtDesigner. Il suffit de recopier les valeurs des boutons déjà présents, en ne changeant que le nom et l'icône de celui-ci. Ces boutons se situent en haut du panel gauche. Il faut ensuite ajouter les fonctions adéquates dans les fichiers "mainWindow.h" et "mainWindow.cpp", en prenant pour exemple celles déjà présentes du type :

```
void on_ltadd_clicked();
```

Les fonctions *disableTool()* et *enableTool()* doivent être appelées, afin de ne sélectionner que l'outil voulu. Il sera également nécessaire d'ajouter un appel à la fonction *setChecked()*, dans la méthode de la classe "mainWindow" suivante :

```
void disableTool();
```

Pour le raccourci clavier, il suffit d'ajouter une entrée dans le switch de la méthode *keyPressEvent(QKeyEvent *event)*.

Une réaction à l'évènement souris

La fonction "mouseMoveEvent" de la classe **GLWidget** s'occupe de gérer les outils à l'aide d'un switch. Vous devrez donc ajouter une entrée dans cette fonction afin de pouvoir utiliser votre outil. Seul le fichier "GLWidget.cpp" est utile ici :

```
void GLWidget::mouseMoveEvent(QMouseEvent *event) {  
    ...  
    switch(activeTool) {  
        case GTSCALE:  
            m_tool.gtscale(m_manager.getMesh(activeMesh), QVector3D(0, dy, 0));  
            break;  
        ...  
    }  
    ...  
}
```

Nous vous conseillons de vous imprégner de la partie **Développement** (cf page 24 et ??) pour choisir les paramètres adéquats.

Pour aller plus loin...

Si un développeur souhaite modifier plus profondément l'application, il faudra pour cela se référer à la partie **Développement** (cf page 19), notamment les explications détaillant l'**API** (cf page 19).

Chapitre 7

Post-Mortem

Cette section liste toutes les étapes de la conception que nous n'avons pas réalisées (selon notre ordre de priorités), ainsi que toutes les améliorations auxquelles nous avons pensé lors de la phase de développement.

7.1 Fonctionnalités non implémentées

Nous avons, lors de la conception de ce projet, prévu nombre de fonctionnalités. Malheureusement, ce projet ayant une durée de développement limitée à quatre semaines, nous n'avons pas pu toutes les mettre en place.

Voici une liste non exhaustive de certaines fonctionnalités que nous voulions :

- Possibilité de créer et placer plusieurs lumières, ou déplacer l'existante, afin de créer une illumination personnalisée de notre scène.
- Possibilité de créer ou utiliser différents matériaux ou shader pour nos objets.
- Possibilité de peindre nos objets avec différentes couleurs (un color-picker aurait pu être présent), ainsi que leur appliquer une texture de notre choix.
- Implémenter un "mode miroir" pour la sculpture. Ce mode permettrait à l'utilisateur de sculpter l'objet symétriquement, en n'agissant que sur un côté de celui-ci. Nous aurions voulu pouvoir implémenter une symétrie en abscisse, en ordonnées ou en profondeur, ainsi qu'une symétrie centrale permettant facilement de modeler des cercles parfaits.
- Implémenter des outils d'union, différence et intersection d'objets entre eux.
- Permettre de passer d'une représentation surfacique à une représentation volumique et inversement.
- Permettre l'affichage d'une grille (deux ou trois dimensions), ainsi que les repères scène et objet.
- Les fonctions "undo()" et "redo()".
- La gestion des sauvegardes.

7.2 Améliorations réalisables

Comme pour tout projet, la conception n'offre pas toujours une liste exhaustive des fonctionnalités futures, étant donné que nous pouvons toujours améliorer notre programme selon les possibilités offertes par le développement de celui-ci. Ainsi, nous avons quelques suggestions d'améliorations pour notre logiciel, dans le cadre d'une éventuelle future reprise de son développement :

- Optimisation : beaucoup de nos algorithmes pourraient être améliorés, notamment les comparaisons de points de par la surcouche de l'API qui se déroulent en $O(n)$ et pourraient l'être en $O(1)$ avec par exemple des fonctions de hachage. D'autres, plus coûteux, nécessiteraient une recherche approfondie pour améliorer les performances.
- Contenu : notre logiciel ne propose que cinq outils et cinq maillages prédéfinis, un aspect qui pourrait facilement être enrichi avec plus de temps.
- Maillage : il serait utile de mettre en place bon nombre de fonctions de vérification de maillage, notamment les recouvrements de triangles.
- Autre : les fonctions de subdivision et décimation mériteraient sûrement d'être améliorées, notamment la décimation globale qui ne fait pas exactement l'inverse de la subdivision. De plus, les rotations ne s'effectuent actuellement que par rapport au déplacement souris, et ne prennent donc pas en compte l'angle de vue actuel.

Annexe A

Dans cette partie seront placés les éléments trop volumineux pour être inclus directement dans le texte, tels que les images ou graphiques.

A.1 Diagramme de Gantt

Les diagrammes sont fournis page 40.

A.2 Comparatif de performances

Le graphique est situé page 41.

A.3 Diagramme de Classes

Le diagramme est fournis page 42.

A.4 Schémas explicatifs

Les différents schémas explicatifs se trouvent page 43 à 44.

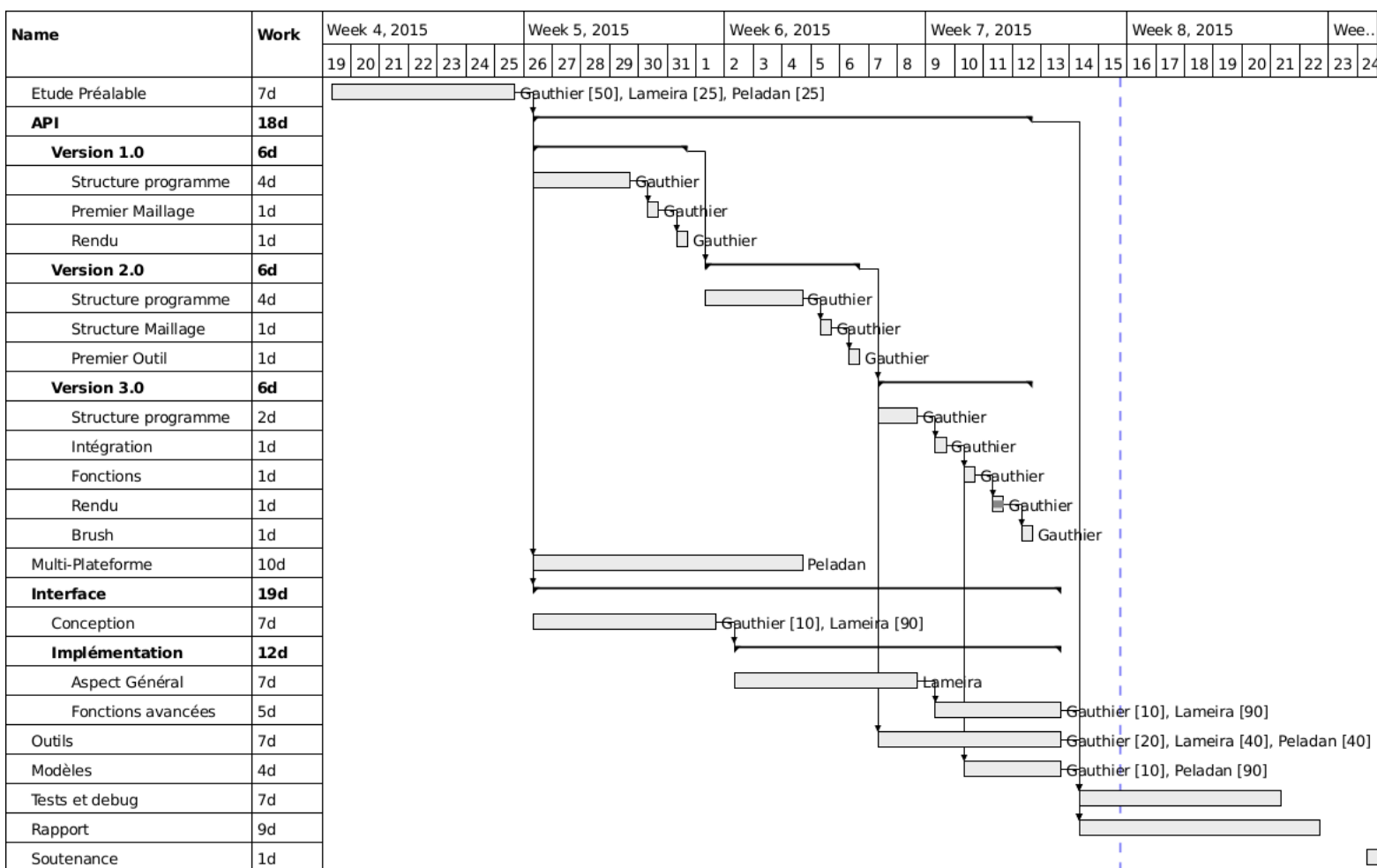
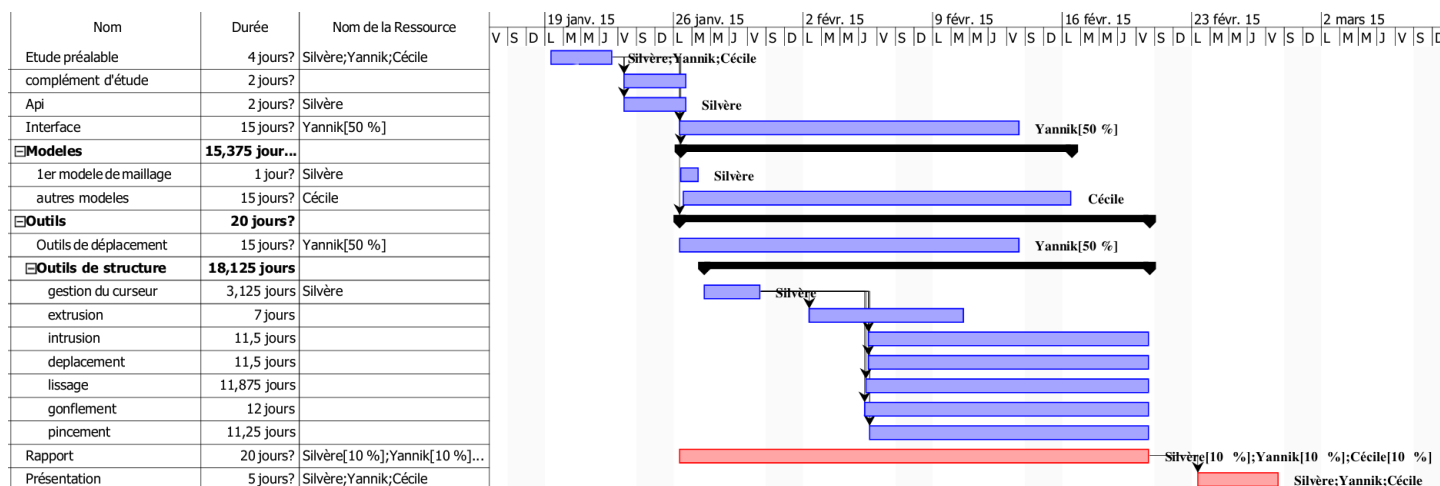


FIGURE A.1 – Diagrammes de Gantt prédictif (en haut) et final (en bas)

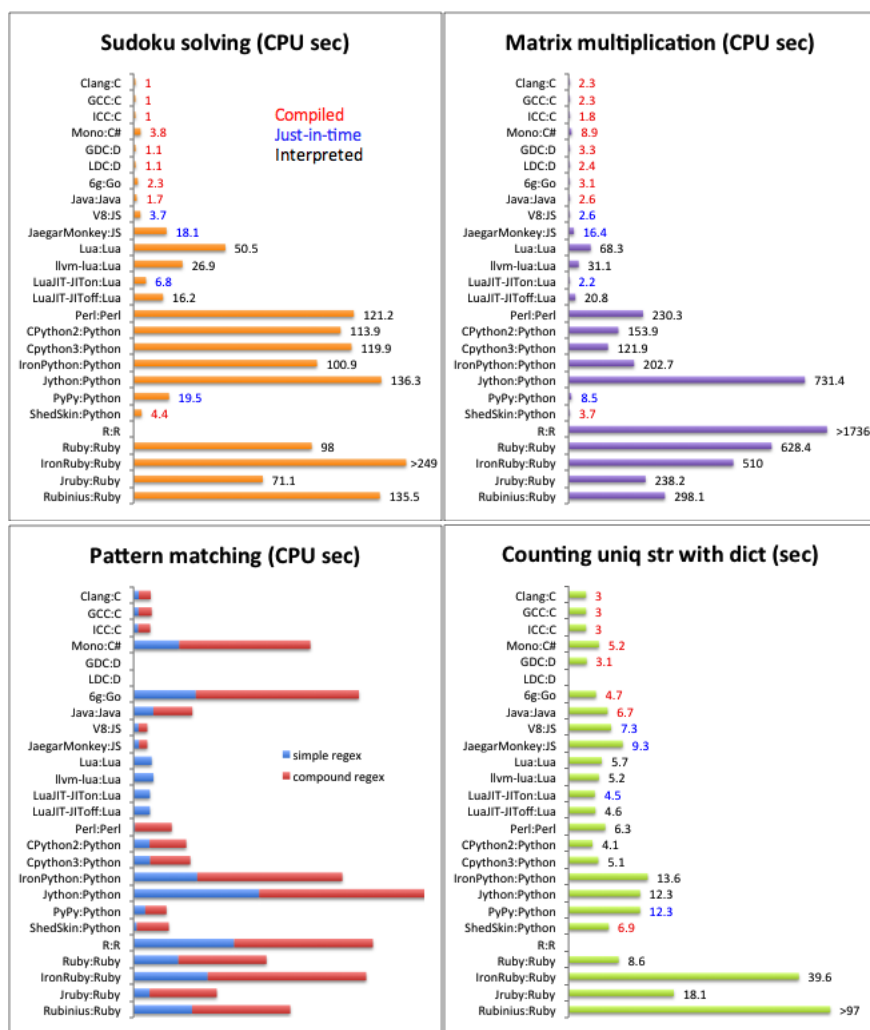


FIGURE A.2 – Comparaisons de performances de divers langages dans des cas donnés

Source : <http://attractivechaos.wordpress.com/2011/06/22/my-programming-language-benchmark-analyses/>

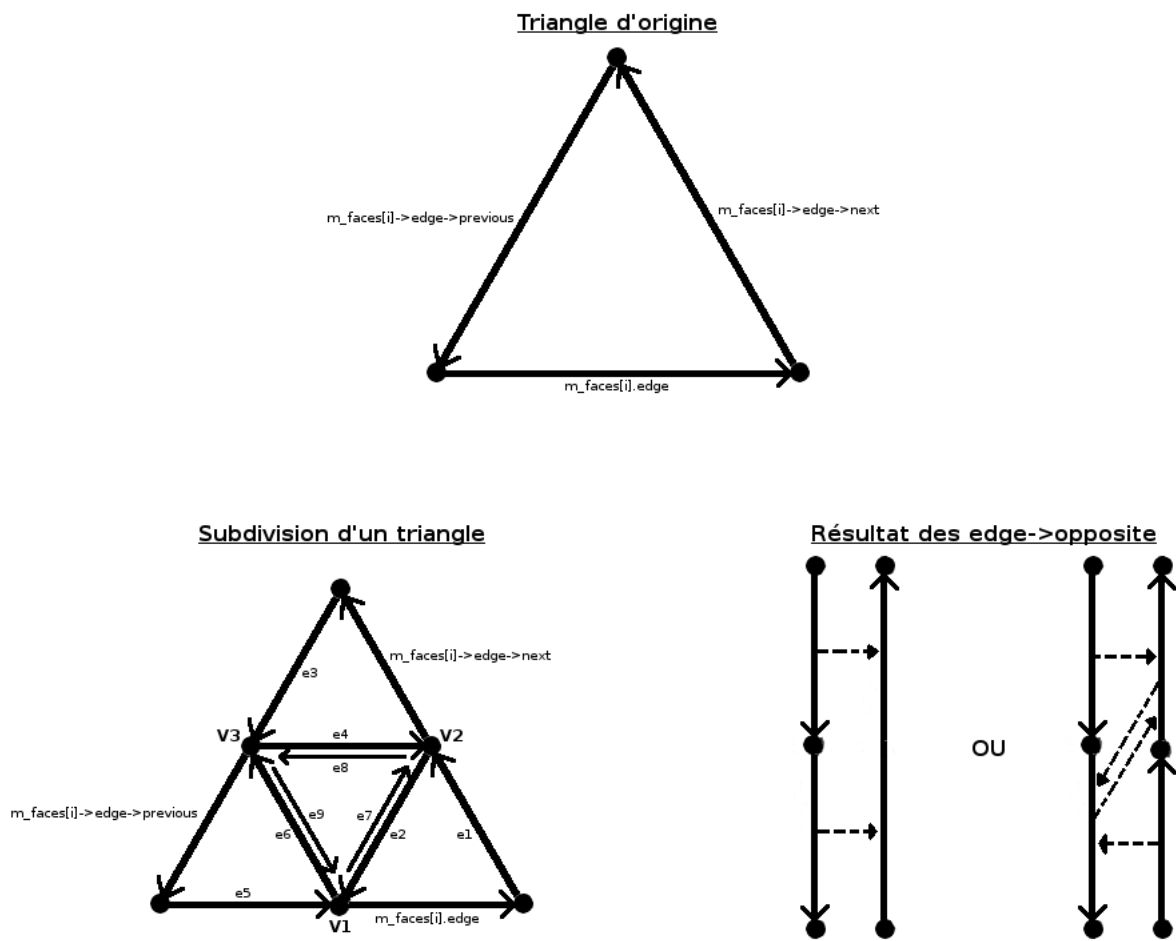


FIGURE A.4 – Schéma de subdivision globale

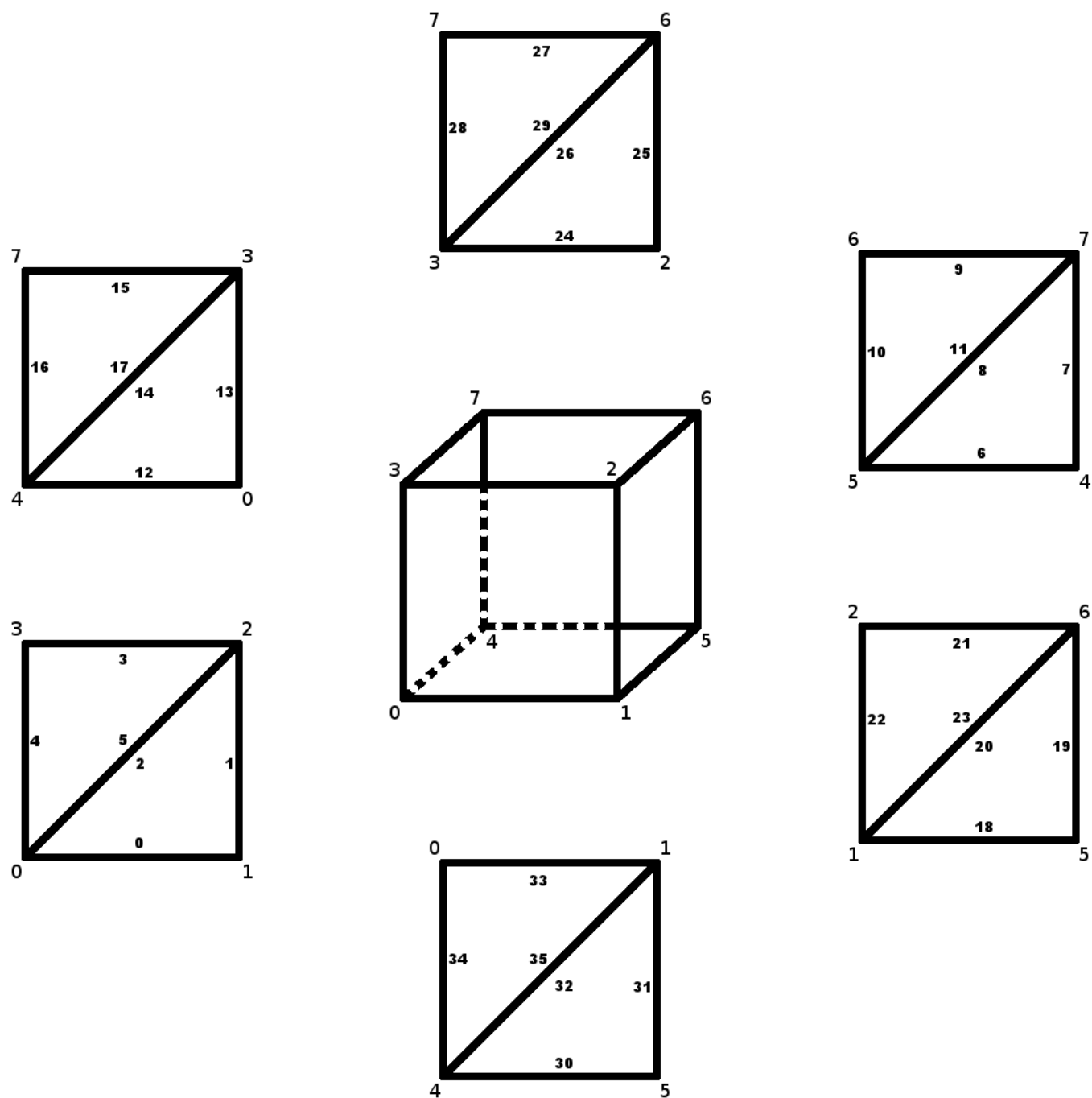


FIGURE A.5 – Conception d'un cube avec la représentation par demi-arêtes