



HAL
open science

Modélisation et animation interactive de visages virtuels de dessins animés

Perrine Monjaux

► **To cite this version:**

Perrine Monjaux. Modélisation et animation interactive de visages virtuels de dessins animés. Informatique [cs]. Université René Descartes - Paris V, 2007. Français. NNT : . tel-00274869

HAL Id: tel-00274869

<https://theses.hal.science/tel-00274869>

Submitted on 21 Apr 2008

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

UNIVERSITE RENE DESCARTES - PARIS V
Centre Universitaire des Saints-Pères
UFR DE MATHEMATIQUES ET INFORMATIQUE

Thèse présentée en vue de l'obtention du grade de Docteur
de l'Université RENE DESCARTES - PARIS V

Discipline : Sciences de la Vie et de la Matière

Spécialité : Mathématiques et Informatique

Par

Perrine MONJAUX



Sujet de la thèse :

Modélisation et animation interactive de visages virtuels de dessins animés

Soutenue le 14 Décembre 2007,
Devant le jury composé de :

Monsieur le Professeur
Madame le Professeur
Monsieur le Professeur
Monsieur
Madame le Professeur
Monsieur le Professeur
Monsieur le Docteur

Danco DAVCEV
Christine GRAFFIGNE
Henri HUDRISIER
Olivier MARRE
Françoise PRÊTEUX
Georges STAMON
Titus ZAHARIA

Rapporteur
Examineur
Rapporteur
Examineur
Directeur de thèse
Examineur
Examineur

Remerciements

Mes remerciements vont tout d'abord à Madame le Professeur Françoise Prêteux, Responsable du Département ARTEMIS de l'Institut National des Télécommunications, qui a dirigé cette thèse. Je souhaite lui exprimer ma profonde reconnaissance pour la qualité de la formation dont elle m'a fait bénéficier, ainsi que pour ses conseils avisés.

Je remercie tout particulièrement Monsieur le Docteur Titus Zaharia pour son encadrement de grande qualité, et les connaissances qu'il a su me faire partager tout au long de ce travail de recherche.

À Monsieur Georges Stamon, Professeur à l'Université Paris V René Descartes, qui m'a fait l'honneur de présider ce jury, je tiens à témoigner mon respect et ma gratitude.

Que Messieurs Danco Davcev, Professeur à l'Université de Skopje et Henri Hudrisier, Professeur à l'Université Paris VIII, rapporteurs de ce mémoire, trouvent ici l'expression de toute ma gratitude pour leur lecture minutieuse et l'intérêt qu'ils ont porté à cette recherche.

Je suis également reconnaissante à Madame Christine Graffigne, Professeur à l'Université Paris V René Descartes, d'avoir accepté d'apporter, en tant qu'examineur, l'éclairage de ses compétences en imagerie mathématique.

Que Monsieur Olivier Marre, président de l'entreprise Quadaxis et promoteur du projet TOON, soit assuré de mes remerciements les plus chaleureux pour ces longues discussions fructueuses, que nous avons eues tout au long de cette thèse et qui m'ont fait découvrir le monde du dessin animé. Je tiens aussi à remercier l'ensemble des membres de Quadaxis ainsi que ceux de l'entreprise des Gueux de Terre à Terre.

Je remercie l'ensemble des membres d'ARTEMIS pour les discussions scientifiques et amicales que nous avons partagées et qui m'ont permis d'élargir mes horizons.

Enfin, je tiens ici à remercier ma famille, mon ami et tous mes proches dont le soutien a été précieux tout au long de cette thèse.

Table des matières

CHAPITRE 1 :	12
CONTEXTE ET OBJECTIFS	12
1.1 APPROCHE TRADITIONNELLE 2D	13
1.1.1 <i>La pré-production</i>	13
1.1.1.1 La spécification du scénario	14
1.1.1.2 La conception des personnages	14
1.1.1.3 La spécification du storyboard	16
1.1.2 <i>La production</i>	17
1.1.2.1 La spécification du décor	17
1.1.2.2 L'animation	17
1.1.2.3 Le traçage et la mise en couleur	18
1.1.3 <i>La post-production</i>	18
1.1.3.1 La prise de vue (tournage)	18
1.1.3.2 Le mixage	18
1.1.3.3 Le montage	19
1.2 APPROCHES ASSISTÉES PAR ORDINATEUR	19
1.2.1 <i>Techniques 2D</i>	19
1.2.1.1 La création de modèles	20
1.2.1.2 La mise en couleur	20
1.2.1.3 L'animation	21
1.2.1.4 La post-production	23
1.2.2 <i>Techniques d'animation 3D</i>	23
1.2.2.1 La pré-production	24
1.2.2.2 La production	24
1.2.2.2.1 Modélisation et squelettisation	24
1.2.2.2.2 Animation	25
1.2.2.2.3 Rendu	25
1.2.2.3 La post-production	26
1.3 TAXONOMIE DES DESSINS ANIMÉS	26
1.4 CONCLUSION	27
CHAPITRE 2 :	28
MODELISATION, DEFORMATION, ANIMATION	28
2.1 STRUCTURE ANATOMIQUE DE VISAGE	29
2.1.1 <i>Le squelette</i>	29
2.1.2 <i>Les muscles</i>	30
2.1.3 <i>Les proportions du visage</i>	31
2.2 CARACTERISTIQUES FACIALES	31
2.2.1 <i>La bouche</i>	32
2.2.2 <i>Les yeux et les sourcils</i>	32
2.2.3 <i>Cheveux, plis, rides et éléments colorés</i>	32
2.3 EXPRESSIONS FACIALES	33
2.3.1 <i>Emotions</i>	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
2.3.2 <i>Visèmes</i>	34
2.4 MODELISATION DE VISAGES ANIMÉS	34
2.4.1 <i>Paramétrisation directe</i>	35
2.4.1.1 Modèle de paramétrisation directe	35
2.4.1.2 Action abstraite des muscles	36
2.4.2 <i>Modélisation physique</i>	36
2.4.2.1 Systèmes masses-ressorts	37
2.4.2.2 Représentation vectorielle	38
2.5 SPECIFICATION DE VISAGE MPEG-4	40
2.5.1 <i>Descripteur de visage MPEG-4</i>	40
2.5.1.1 Paramètres de description du visage (FDPs)	40
2.5.1.2 Paramètres d'animation du visage (FAPs)	40
2.6 CONCLUSION	44

CHAPITRE 3 :	45
SYSTEMES D'ANIMATION FACIALE – ETAT DE L'ART	45
3.1 LOGICIELS GENERALISTES D'IMAGERIE DE SYNTHESE	46
3.2 LE SYSTEME FACEROBOT	49
3.3 TOONBOOM	55
3.4 LES SOLUTIONS DI-O-MATIC	57
i. <i>Le logiciel Facial Studio</i>	58
ii. <i>Le logiciel Voice-O-Matic</i>	60
iii. <i>Le module de morphing Morp-O-Matic</i>	60
3.5 AUTRES LOGICIELS OU MODULES D'ANIMATION FACIALE	61
3.6 LOGICIELS MPEG-4	62
3.7 PROTOTYPES DE RECHERCHE ET SYSTEMES EXPERIMENTAUX	63
3.8 DISCUSSION ET ANALYSE COMPAREE	66
CHAPITRE 4 :	69
CAHIER DE CHARGES DE LA PLATE-FORME FACETOON	69
4.1 DOMAINE D'APPLICATION	70
4.2 EXIGENCES GLOBALES SUR L'INGENIERIE DU SYSTEME	71
4.3 TYPES DE DONNEES	71
4.3.1 <i>Données en entrée</i>	71
4.3.1.1 Entrées 2D	71
4.3.1.2 Entrée 3D	73
4.3.2 <i>Données en sortie</i>	73
4.4 ESPACES DE TRAVAIL INTERACTIFS ET INTERFACES ASSOCIEES	73
4.4.1 <i>Fenêtre de gestion de la partie 3D</i>	74
4.4.2 <i>Fenêtre de gestion de la partie 2D</i>	74
4.4.3 <i>Fenêtre de gestion de l'animation</i>	75
4.5 APPROCHE DE CREATION DE POSES CLEFS	77
4.6 CREATION DE L'ANIMATION	79
4.6.1 <i>Importation des poses clefs</i>	79
4.6.2 <i>Construction des séquences d'animation</i>	79
4.6.3 <i>Calcul et visualisation de l'animation réalisée</i>	79
4.6.4 <i>Exportation de l'animation réalisée</i>	80
4.7 MOYENS LOGICIELS MIS EN ŒUVRE	80
4.8 EXTENSIONS	80
4.8.1 <i>Gestion hiérarchique des objets 2D</i>	80
4.8.2 <i>Mode de dessin intégré à l'application</i>	81
4.8.3 <i>Animation dépendante du point de vue</i>	81
4.8.4 <i>Gestion et synchronisation du signal audio</i>	81
4.8.5 <i>Analyse et suivi de visages dans des vidéos réelles</i>	81
CHAPITRE 5 :	82
LA PLATE-FORME FACETOON	82
5.1 TRIANGULATION AUTOMATIQUE DE DESSINS 2D	83
5.2 DEFORMATION PAR CARTES DE PROFONDEUR	85
5.3 DEFORMATION NON-RIGIDE DE MAILLAGES 2D	88
5.3.1 <i>Techniques de déformation : critères et techniques retenues</i>	88
5.3.2 <i>Déformations par RBF (Radial Basis Functions)</i>	89
5.3.3 <i>Déformation Laplacienne</i>	92
5.3.1.1 Définition mathématique et matrice laplacienne	93
5.3.1.2 Déformation de surfaces	94
5.3.4 <i>Déformation par courbes Wires</i>	96
5.3.5 <i>Comparaison expérimentale</i>	99
5.3.6 <i>Spécification des contraintes</i>	102
5.4 PLACAGE DU MAILLAGE ENFANT SUR LE MAILLAGE PARENT	103
5.4.1 <i>Calcul de la zone d'influence</i>	104
5.4.2 <i>Procédure de paramétrisation</i>	107
5.4.3 <i>Transfert de la carte de profondeur</i>	109
5.5 DEFORMATION PAR MANIPULATION DIRECTE 3D	111

5.6	INTERPOLATION DES POSES CLEFS.....	112
5.7	CONCLUSION.....	113
CHAPITRE 6 :		114
INTERFACE LOGICIELLE ET MISE EN ŒUVRE		114
6.1	ESPACE DE TRAVAIL 2D.....	115
6.1.1	<i>Fonctionnement général.....</i>	<i>115</i>
6.1.2	<i>Gestion/création des cartes de profondeur.....</i>	<i>117</i>
6.1.3	<i>Déformation non-rigide des modèles 2D.....</i>	<i>118</i>
6.1.4	<i>Gestion des états des modèles 2D.....</i>	<i>120</i>
6.2	ESPACE DE TRAVAIL 3D.....	123
6.2.1	<i>Fonctionnement général.....</i>	<i>123</i>
6.2.2	<i>Déformation directe de maillage 3D.....</i>	<i>124</i>
6.2.3	<i>Gestion des poses clefs.....</i>	<i>125</i>
6.3	INTERACTION ENTRE LES ESPACES 2D ET 3D.....	127
6.3.1	<i>Manipulation active.....</i>	<i>127</i>
6.3.2	<i>Manipulation passive.....</i>	<i>131</i>
6.4	FENETRE D'ANIMATION.....	131
6.5	CONCLUSION.....	133
CHAPITRE 7 :		134
CONCLUSION ET PERSPECTIVES.....		134

Table des figures

Figure 1.1 : Modèle de construction pour le personnage Elfie	15
Figure 1.2 : Turnaround	15
Figure 1.3 : Exemples d'expressions de visage	16
Figure 1.4 : Exemple de <i>mouth-chart</i>	16
Figure 2.1 : Ostéologie du crâne	29
Figure 2.2 : Parke 1972 : Un des premiers modèles d'animation faciale	35
Figure 2.3 : La représentation par couches de ressorts [TerzWat90].....	37
Figure 2.4 : Résultat d'expressions générées par la représentation vectorielle des muscles.....	39
Figure 2.5 : Les paramètres FDPs regroupant (a) la description de forme par maillage 3D et (b) l'information de texture (ici la peau et les yeux) pour générer le modèle de visage texturé (c).....	41
Figure 2.6 : Points caractéristiques des FDPs tels que définis dans la norme MPEG-4	42
Figure 2.7 : Caractéristiques faciales de référence pour la définition des Facial Animation Parameter Units(FAPU)	44
Figure 3.1 : Exemples d'éléments constitutifs du visage humain.....	47
Figure 3.2 : Modèle du visage de Loralou dans le logiciel 3DS Max.....	47
Figure 3.3 : Exemple d'utilisation de la technique de <i>rigging</i> appliquée à l'animation faciale dans le logiciel <i>Maya</i>	49
Figure 3.4: Contrôle de l'animation faciale dans le logiciel <i>FaceRobot</i>	52
Figure 3.5 : Mouvement du menton par manipulation d'un seul point dans le logiciel <i>FaceRobot</i>	53
Figure 3.6 : Zones pré calculées (modèle de référence) pour la manipulation par régions dans le logiciel <i>FaceRobot</i>	53
Figure 3.7 : Exemple d'un système de capture de mouvement associé à <i>FaceRobot</i> . A gauche : visage humain réel avec marqueurs superposés.	54
Figure 3.8 : Exemples d'expressions obtenues par le logiciel <i>FaceRobot</i>	54
Figure 3.9 : Les huit phonèmes standard d'animation utilisés par <i>ToonBoom</i> [ToonBoom].....	56
Figure 3.10 : Outil de synchronisation labiale du logiciel <i>ToonBoom</i>	57
Figure 3.11 : Exemples de dessins de bouche réalisés à partir du logiciel <i>ToonBoom</i>	57
Figure 3.12 : Modélisation d'un visage à partir d'une modification de sa structure morphologique sous <i>Facial Studio</i>	59
Figure 3.13 : <i>Voice-O-Matic</i> , module de synchronisation labiale pour <i>3DS Max</i>	60
Figure 3.14 : Capture d'écran du logiciel <i>FaceGen Modeller</i>	61
Figure 3.15 : Exemples d'expressions de visages obtenus par le logiciel <i>iFace</i>	63
Figure 3.16 : Teddy : outil de création de formes 3D à partir de contours 2D	66
Figure 4.1 : Les deux structures topologiques de dessins 2D admissibles dans <i>FaceTOON</i>	72
Figure 4.2 : Fenêtre de gestion de la partie 3D	74
Figure 4.3 : Fenêtre de gestion de la partie 2D	75
Figure 4.4 : Fenêtre de gestion de la partie animation	75
Figure 4.5 : Schéma du fonctionnement principal de <i>FaceTOON</i>	76
Figure 4.6 : Principe d'interaction entre fenêtres 2D et 3D.....	77
Figure 5.1 : Méthode de recherche des pixels de contour.....	84
Figure 5.2 : Processus de triangulation des dessins 2D. De gauche à droite : image initiale au format png, forme binaire, pixel intérieur "A", contour détecté et triangulation de Delaunay obtenue.	85
Figure 5.3 : Enrichissement d'objets 3D par cartes de profondeur (courtoisie Société Quadraxis).....	86
Figure 5.4 : Création d'un globe oculaire grâce à une carte de profondeur	87
Figure 5.5 : Exemple d'une matrice laplacienne associée à un (petit) maillage	95
Figure 5.6 : Déformation d'un point P à un point P_{def} . [Singh98]	98
Figure 5.7 : Effets de déformation obtenus par variation des paramètres r (a) et s (b). [Singh98]	98
Figure 5.8 : Modèle 3D utilisé pour l'évaluation : pose neutre incluant les points caractéristiques utilisés et expressions cibles	99
Figure 5.9 : Expression cible « bouche triste »	101
Figure 5.10 : Expression cible « sourcil droit »	101
Figure 5.11 : Expression cible « sourcil gauche »	102
Figure 5.12 : Déformation conditionnelle de la surface enfant.....	103
Figure 5.13 : Algorithme de placage de l'objet enfant 2D sur la surface parent 3D	104
Figure 5.14 : Calcul de la zone d'influence du maillage parent.	106

Figure 5.15 : Les différents types de projection possibles pour le placage de l'enfant sur le parent	107
Figure 5.16 : Paramétrisation directe (f) et inverse ($g = f^{-1}$) d'un maillage 3D de visage.....	108
Figure 5.17 : Un point p et ses coordonnées barycentriques ($\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$).....	109
Figure 5.18 : Illustration des vecteurs de mouvements engendrés	110
Figure 5.19 : Problèmes possibles lors d'une interpolation directe dans l'espace des poses clefs.....	112
Figure 6.1 : Fenêtre de gestion de dessins et de modèles 2D.....	115
Figure 6.2 : Chargement d'un dessin 2D.....	116
Figure 6.3 : Sélection d'un mode de rendu.....	116
Figure 6.4 : Fenêtre <i>pop-up</i> pour la spécification interactive de la profondeur associée à un sommet sélectionné.....	117
Figure 6.5 : Création d'une carte de profondeur par déformation RBF.....	118
Figure 6.6 : Activation des outils de déformation.....	118
Figure 6.7 : Les différents outils/modes de déformation.....	119
Figure 6.8 : Processus de déformation par points de contrôle.....	120
Figure 6.9 : Processus de déformation par courbes de contrôle.....	120
Figure 6.10 : Gestion de la validation d'une pose parent.....	121
Figure 6.11 : Gestion de la validation d'une pose <i>enfant</i>	122
Figure 6.12 : Fenêtre 3D zone d'outils et fenêtre de rendu.....	123
Figure 6.13 : Chargement et manipulation du maillage 3D parent.....	124
Figure 6.14 : Gestion de la déformation directe 3D.....	125
Figure 6.15 : Gestion et validation d'une pose clef.....	126
Figure 6.16 : Interaction active entre la fenêtre 3D et la fenêtre 2D : le modèle de bouche est inséré dans la fenêtre 3D, depuis l'espace 2D.....	128
Figure 6.17 : Ajustement en taille/position du modèle 2D et placage sur la surface 3D.....	129
Figure 6.18 : Modèle 3D intégrant l'ensemble des caractéristiques faciales.....	130
Figure 6.19 : Interaction passive entre la fenêtre 3D et la fenêtre 2D.....	131
Figure 6.20 : Fenêtre de gestion de l'animation.....	132
Figure 6.21 : Ajout des poses clés dans la zone de <i>time-line</i>	132
Figure 6.22 : Fenêtre de prévisualisation de l'animation.....	133

Introduction

La production de dessins animés 2D suit actuellement un schéma mis en place dans les années 1920, qui fait intervenir un très grand nombre de compétences humaines et de métiers différents. Par opposition à ce mode de travail traditionnel, la production de films de synthèse 3D, en exploitant les technologies et les outils les plus récents de modélisation et d'animation 3D, s'affranchit en bonne partie de cette composante artisanale et vient concurrencer l'industrie du dessin animé traditionnel en termes de temps et coûts de fabrication.

Les défis à relever par l'industrie du dessin animé 2D se posent donc en termes de:

1. Réutilisation des contenus selon le paradigme d'accès «*Create once, render many*»,
2. Facilité d'échange et de transmission des contenus ce qui nécessite de disposer d'un unique format de représentation,
3. Production efficace et économique des contenus requérant alors une animation automatisée par ordinateur.

Dans ce contexte compétitif, cette thèse, réalisée dans le cadre du projet industriel TOON financé par la société Quadraxis (www.quadraxis.com) et supporté par l'Agence Nationale de Valorisation de la Recherche (ANVAR), propose une méthodologie de reconstruction, déformation et animation de modèles 3D de visages pour les dessins animés 2D. Vecteurs de la parole et des expressions, les visages nécessitent en effet une attention particulière quant à leur modélisation et animation conforme aux souhaits des créateurs de dessins animés. Ayant identifié les verrous technologiques à lever, nos contributions ont porté sur :

- l'élaboration d'une méthode de conception de visages virtuels 3D à partir d'une part d'un modèle 3D de type *seamless*, adapté aux exigences d'animation sans rupture, et d'autre part d'un ensemble de dessins 2D représentant les caractéristiques faciales,
- la mise au point d'une procédure de création de poses clés, mettant en œuvre plusieurs méthodes de déformation non-rigide,
- la conception d'un module d'animation 3D compatible avec le standard MPEG-4.

Les développements réalisés ont été intégrés dans un premier prototype de la plateforme du projet, appelée *FaceTOON*. Ils montrent un gain en temps de 20% sur l'ensemble de la chaîne de production tout en assurant une complète interopérabilité des applications *via* le standard MPEG-4.

Le premier chapitre précise notamment le contexte industriel de cette thèse, avec une analyse de la chaîne traditionnelle de production de dessins animés, ainsi que des méthodes informatiques d'automatisation, aussi bien 2D que 3D, de cette chaîne. L'analyse de ces systèmes montre un besoin important de techniques adaptés, capables d'intégrer une méthodologie de modélisation 3D de façon transparente à l'utilisateur, pour permettre aux dessinateurs d'appliquer leurs pratiques habituelles de travail, auxquelles ils restent très attachés.

Le deuxième chapitre est dédié à la présentation des éléments de visage que l'on souhaite modéliser. En partant de la structure anatomique de visages humains, nous analysons les différentes caractéristiques morphologiques et faciales, ainsi que les types d'expression à prendre en compte dans les systèmes d'animation faciale.

Le chapitre 3 présente notamment un état de l'art approfondi des principaux systèmes d'animation faciale disponibles aujourd'hui sur le marché. Logiciels et plates-formes de modélisation 2D et 3D, généralistes ou dédiés, sont présentés en détail et comparés, avec principes, avantages et limitations. Cet état de l'art est présenté et discuté au regard des contraintes spécifiques qui régissent les règles de création des dessins animés 2D et la chaîne de fabrication traditionnelle. Il nous permet de retenir un ensemble de principes et contraintes de base, développés ensuite dans le prototype *FaceTOON* proposé.

Ces contraintes fonctionnelles et architecturales sont présentées dans le chapitre 4, qui spécifie le cahier des charges du système *FaceTOON*. Ces éléments sont ensuite développés en détails au chapitre 5 qui synthétise l'ensemble méthodologique proposé. Eléments de modélisation 2D et 3D, ainsi que leur co-habitation et exploitation conjointe dans le cadre de la plate-forme *FaceTOON*, sont ici présentés détaillés.

La mise en œuvre du système *FaceTOON* est notamment discutée et illustrée au Chapitre 6, qui présente le prototype logiciel réalisé, avec principales interfaces utilisateurs, espaces de travail dédiés et exemples de modélisation et d'animation de personnages de dessins animés.

Enfin, le dernier chapitre conclut ce mémoire et ouvre quelques perspectives de recherches futures.

Chapitre 1 :

Contexte et objectifs

Résumé :

Ce chapitre propose une présentation détaillée de la chaîne de fabrication des dessins animés, avec principales étapes et tâches afférentes. L'analyse des méthodes traditionnelles de travail des dessinateurs met en évidence un besoin important d'informatisation et d'automatisation de cette chaîne de fabrication archaïque, dont les origines remontent aux premières grandes productions de dessins animés réalisés par les studios Disney dans les années 1920-1930. Nous analysons donc par la suite les approches assistées par ordinateur aujourd'hui disponibles, dans des contextes aussi bien 2D que 3D, en mettant l'accent sur les techniques permettant d'automatiser ce processus de fabrication lourd et coûteux en temps et en ressources nécessaires. De cette étude, il ressort que pour automatiser le processus tout en s'affranchissant des problèmes inhérents d'occlusion, il convient d'adopter les approches de l'animation 3D en les adaptant de façon à respecter scrupuleusement les pratiques de travail traditionnelles des dessinateurs.

Mots clés : chaîne de fabrication des dessins animés, pré-production, production, post-production, animation 3D, logiciels de modélisation.

La réalisation d'un film d'animation requiert la mise en œuvre d'un large éventail de techniques différentes. Si certaines de ces techniques restent expérimentales (papiers découpés, ombres chinoises, sable, marionnettes, pâte à modeler, dessin sur pellicule), deux grandes approches s'imposent aujourd'hui sur le marché de films d'animation. Il s'agit de celle traditionnelle de dessins animés 2D et de l'animation 3D.

Chacune de ces approches fait appel à des technologies et compétences bien distinctes. Ainsi, grâce aux avancées technologiques accomplies depuis une décennie dans le domaine de l'infographie 3D, il est maintenant possible de réaliser un personnage virtuel entièrement en 3D, de le visualiser et de simuler son comportement via des modélisations impliquant des lois géométriques ou algorithmiques. Il est alors possible de créer des films d'animation entièrement en 3D.

Malgré cela, la communauté des créateurs de dessins animés reste encore très attachée à l'animation traditionnelle 2D. Dans ce cadre, la segmentation des tâches de fabrication en 2D suit un processus de fabrication archaïque, qui date des années 1920-1930, et fait appel à un grand nombre d'intervenants de corps de métiers différents. Cela implique des coûts et temps de production très élevés. Même si aujourd'hui, avec le phénomène de mondialisation, l'industrie du dessin animé 2D délocalise les tâches les plus coûteuses de sa production et utilise de plus en plus les outils informatisés, la survie de cette industrie se pose avec acuité.

Afin de dégager les besoins d'automatisation et d'informatisation nécessaires au processus de fabrication de dessin animés, nous décrivons dans les paragraphes suivants les deux types de chaîne de production, 2D et 3D, avec analyse des principales tâches impliquées et des contraintes de mise en œuvre associées.

1.1 Approche traditionnelle 2D

Mener à bien le projet de création d'un dessin animé, nécessite l'intervention d'un grand nombre de corps de métiers différents, dans le cadre d'un processus coopératif long et complexe.

L'ensemble constitue la chaîne de fabrication dont la formalisation très stricte suit un schéma mis en place dès l'avant-guerre et toujours en vigueur à l'heure actuelle. Cette chaîne de fabrication admet une décomposition en trois grandes étapes successives : la pré-production, la production et la post-production.

1.1.1 La pré-production

La pré-production est l'élément clef de la fabrication du dessin animé. Avant de commencer à travailler sur le film, chaque intervenant doit savoir à quoi ressemblent les personnages, leurs expressions, le style des décors, l'enchaînement des scènes. Cette étape consiste à écrire le scénario (*i.e.* l'histoire du film), à concevoir les personnages et à mettre en place le *storyboard*, qui représente une transposition du scénario en images.

1.1.1.1 La spécification du scénario

À la racine de tout projet, il y a une idée. Sa première formalisation, dans le processus de production d'un dessin animé est réalisée sous la forme d'un synopsis. Le synopsis est constitué d'une brève description de la nature de l'intrigue, de l'espace/temps de l'action, des épisodes et des personnages. Un séquencier qui présente l'histoire scène par scène, est alors parfois réalisé. De ces deux éléments naît le scénario.

Le scénario établit la base du film d'animation. Il définit de manière très précise l'intrigue et les dialogues, les lieux où elle se déroule, donne une description des personnages, et des indications pour l'emploi de la caméra. Il sert de référence à l'ensemble des étapes suivantes et est indispensable pour garantir la cohérence des différents éléments du film.

1.1.1.2 La conception des personnages

Une fois l'histoire parfaitement définie, le travail de recherche graphique peut commencer. Cette étape permet de définir le style et l'esprit graphique du futur dessin animé à partir de son scénario. Ces recherches graphiques le plus exhaustives possibles forment un ensemble qui servira de référence artistique aux animateurs afin de garantir une certaine cohérence. À ce niveau, le travail porte sur les aspects fondamentaux des personnages principaux, du décor et des objets prédominants.

On constitue ainsi ce qu'on appelle dans le jargon des dessinateurs un *workbook* qui inclut pour chaque personnage, une fiche du modèle (*model-sheet*), un ensemble de vues (*turnaround*) et des planches d'expression.

Le *model-sheet* (Figure 1.1) illustre, à travers plusieurs dessins, de manière précise et complète les caractéristiques des personnages. Ces dessins doivent définir l'allure, les attitudes et poses caractéristiques des différents personnages afin de pouvoir les reproduire par n'importe quel animateur le plus fidèlement. Dans les *model-sheet* de chaque individu, on retrouve le cheminement de sa construction à travers des dessins de complexité croissante, incluant :

- le squelette du personnage, régissant sa forme globale, ses proportions, ses principales lignes de construction, ses principaux volumes,
- la version intermédiaire avec des formes simplifiées, servant de support à partir duquel les détails seront progressivement ajoutés et servant dans le *storyboard*,
- une version finalisée et raffinée du personnage, avec l'ensemble des détails, ainsi que les couleurs et les textures.

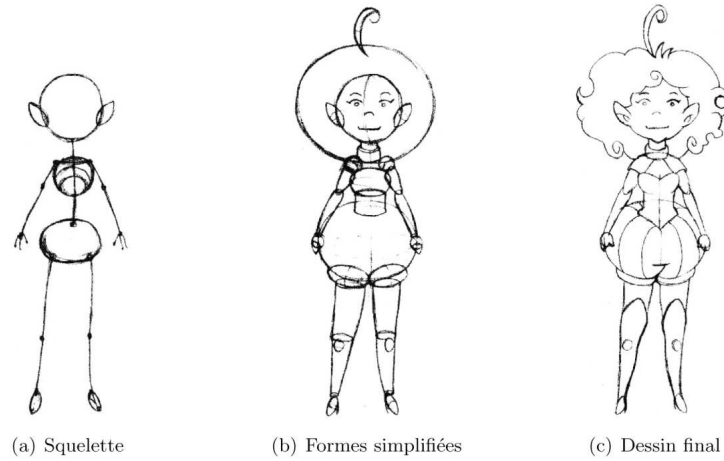


Figure 1.1 : Modèle de construction pour le personnage Elfie (courtoisie Société Quadraxis)

Le *turnaround* (Figure 1.2) est un ensemble de dessins représentant le personnage dans la même pose, selon plusieurs angles de vue. Généralement composé de maximum cinq vue (face, profil, dos, trois-quarts face et dos), il permet de dessiner le personnage de façon reproductible quel que soit l'angle de vue.

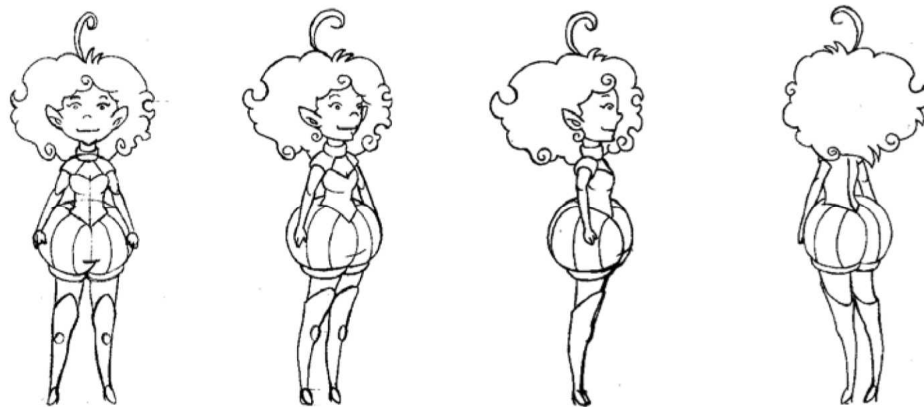


Figure 1.2 : Turnaround (courtoisie Société Quadraxis)

Enfin, pour compléter la description du personnage et lui insuffler de la « vie », le dessinateur fournit des planches représentant différentes expressions de visage (Figure 1.3). Souvent indicateurs du caractère et de la personnalité du personnage, ces dessins doivent permettre aux dessinateurs de reconstituer des émotions. Ils doivent être vraisemblables et crédibles pour s'adapter au mieux aux traits du personnage.

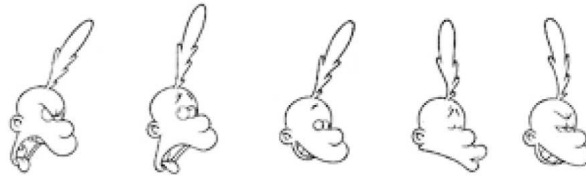


Figure 1.3 : Exemples d'expressions de visage ©Moonscoop¹

Dans certains cas, ils sont accompagnés de planches de dessin appelées *lip-sync* ou *mouth-chart* (Figure 1.4), qui représentent le mouvement des lèvres pour la parole. Ainsi, à chaque phonème (*i.e.* atome phonétique du signal parlé) est associé un *visème*, représentant une traduction graphique du phonème caractérisée par la forme de la bouche, par la position de la langue... Notons que dans les dessins animés simplifiés, la parole d'un personnage peut être réduite à huit dessins de bouches de référence au minimum (Figure 3.9).

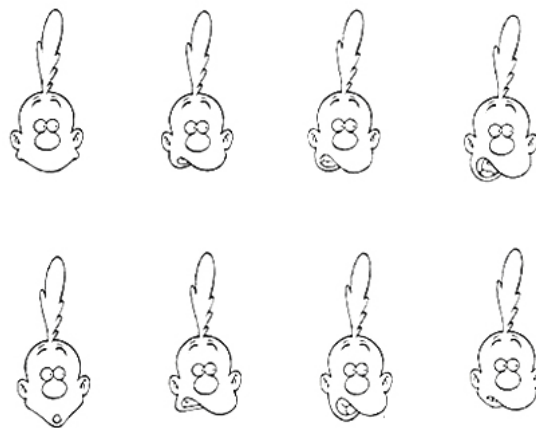


Figure 1.4 : Exemple de *mouth-chart* ©Moonscoop¹

Enfin, pour compléter cette description, les concepteurs de personnages peuvent la faire accompagner d'un schéma spécifiant à titre indicatif les tailles relatives des différents protagonistes, ainsi que les accessoires associés (exemples : véhicules, costumes, effets personnels...).

1.1.1.3 La spécification du storyboard

Une fois les personnages créés, l'histoire est traduite en images dans le *storyboard* parfois aussi nommé scénarimage. Constitué de vignettes illustrant le déroulement de l'action de chaque plan, il combine éléments du scénario et travaux de conception réalisés précédemment. Il regroupe scène par scène les informations concernant la

¹ <http://moonscoop.com>

composition de chaque plan, le lieu et l'ambiance, le rythme des éléments, les dialogues et actions des personnages et même les effets sonores. Il doit révéler l'expression, l'émotion ainsi que l'atmosphère du dessin animé. Il peut être crayonné de manière grossière ou davantage finalisé. Dans tous les cas, il représente la référence ultime pour tous les collaborateurs du film.

1.1.2 La production

Une fois les idées formalisées dans l'ensemble des documents créés au cours de la pré production (*scenario*, *model-sheet* et *storyboard* pour les plus importants), l'équipe de dessinateurs peut commencer la production. Elle implique la mise en place des éléments de décor et l'animation.

1.1.2.1 La spécification du décor

Le décor est constitué par l'ensemble des éléments qui ne subissent pas de traitement pendant l'étape d'animation. Les images représentant ces décors peuvent être hiérarchisées pour constituer une simulation de profondeur entre les éléments du décor et l'arrière-plan. Pour cela, elles doivent être réalisées sur plusieurs plans (couches) ou *layers*. Ils seront par la suite placés à des distances différentes de la caméra, les plus proches étant les *overlays*, venant ensuite les *underlays* et enfin le dessin de l'arrière-plan peint sur papier afin de garantir l'opacité.

1.1.2.2 L'animation

L'animation est une étape essentielle pour l'ensemble de la scène, représentant le moment où chaque personnage prend vie par le mouvement. Pour cela, elle s'appuie sur le même principe que celui utilisé en cinématographie : l'illusion de mouvement est créée en faisant succéder des images à des cadences de l'ordre 25-30 images/secondes. Ainsi, pour obtenir une animation à partir du *storyboard*, il est nécessaire de dessiner *manuellement* 25-30 dessins par seconde ! Même pour des courts-métrages de quelques dizaines de secondes, cela implique un immense travail effectué en général par de grandes équipes de dessinateurs et cela explique les temps de production importants.

Pour réaliser cette lourde tâche, on distingue habituellement les trois étapes suivantes :

1. En accord avec le directeur de l'animation, une équipe d'animateurs spécialistes du mouvement réalisent des croquis des principaux dessins (dessin de début, deux dessins intermédiaires et dessin de fin) des séquences clefs repérées dans le *storyboard*. Sur ces premières ébauches ne sont tracées que les lignes de construction des personnages tels que définies lors de l'établissement des *model-sheet*. Les animateurs fournissent également la position temporelle relative des poses clefs, en précisant le nombre de dessins intermédiaires à dessiner.

2. Les assistants animateurs sont ensuite chargés de reprendre les dessins grossiers des animateurs et de les exécuter de manière fidèle aux normes des *model-sheet*.

3. Enfin, les intervallistes exécutent les dessins manquants, aux cadences vidéos requises, en partant de ceux des assistants animateurs.

1.1.2.3 Le traçage et la mise en couleur

La mise au net des dessins de l'équipe d'animateurs élimine les tâches non désirées et autres traces afin de préparer le transfert des dessins sur une pellicule de *celluloid* (ou *cellulo*), feuille plastique transparente d'acétate de cellulose. Grâce à la transparence, on peut superposer plusieurs feuilles une à une, afin de créer des scènes complexes sans tout redessiner à chaque fois.

Cette étape de traçage s'accompagne de celle de mise en couleur ou gouachage. Elle s'effectue au pinceau à la gouache au dos des *cellulos* pour ne pas abîmer le trait. Les tons utilisés doivent être conformes à ceux spécifiés dans les *model-sheet*. Il peut y avoir plusieurs teintes pour une même couleur, dépendamment de l'éclairage ou de l'ambiance de la scène.

1.1.3 La post-production

La post-production regroupe les étapes de finalisation du dessin animé, regroupant la prise de vues, puis le mixage du son et enfin le montage.

1.1.3.1 La prise de vue (tournage)

La prise de vue (ou le tournage) consiste en l'enregistrement image par image de l'ensemble des dessins du film composés avec d'autres éléments (décors, *underlays*, *overlays*...). Elle est effectuée à l'aide d'une caméra montée sur un banc-titre, qui photographie la composition des dessins empilés. Pour passer à l'image suivante, on remplace les *cellulos* qui varient par rapport à la composition précédente et on reprend une photographie, et ainsi de suite jusqu'à ce que l'ensemble des séquences soit photographié. Pour donner un effet de profondeur, on peut utiliser un système de caméras multiplans créé par un ingénieur des studios Disney en 1933 qui permet de placer les différents *cellulos* à des distances différentes de la caméra.

Des améliorations sur ce type de système ont été plus récemment trouvées pour déplacer les différentes feuilles mécaniquement à des instants donnés.

1.1.3.2 Le mixage

Le mixage est l'avant-dernière étape de la réalisation d'un dessin animé. Il implique la combinaison des différentes bandes « son » enregistrées en cours de production ou à l'issue de cette phase, ainsi que leur synchronisation avec le signal image. Ces bandes « son » sont les voix (et éventuellement les doublages traduits), les enregistrements musicaux ainsi que les bruitages et effets.

1.1.3.3 Le montage

Une fois l'ensemble des sons mixés, il ne reste plus qu'à monter toutes les séquences du dessin animé et les sons correspondants ensemble. Le montage d'un dessin animé n'induit pas de choix artistique, puisque toute la structure temporelle a été précédemment définie dès l'étape du *story-board*.

1.2 Approches assistées par ordinateur

Depuis les années 1990, l'informatique a bouleversé les techniques traditionnelles pour la fabrication des films d'animation. Aujourd'hui, par souci de temps et d'argent, la majorité des productions inclut dans leur processus de fabrication au moins une étape réalisée à l'aide d'un ordinateur. Cette fabrication peut se réaliser encore en 2D ou bien faire appel aux nouvelles techniques d'infographie 3D.

1.2.1 Techniques 2D

Si les créateurs des personnages spécifient toujours sur papier les premières esquisses de leurs personnages, ils adoptent les outils informatiques dès que les modèles sont fixés. L'informatisation de la production est réalisée à plusieurs niveaux et permet d'automatiser des tâches répétitives, assurant ainsi un gain de productivité.

Historiquement, les premiers travaux et logiciels (*i.e.* *CAPS* de Disney/Pixar et *Animo* de Cambridge Animation System) ont été utilisés pendant l'étape de mise en couleur. En effet, cette tâche est répétitive et ne nécessite aucune compétence artistique. Dans *CAPS* (*Computer Animation Production System*), les animateurs devaient numériser chacun de leurs dessins afin de pouvoir utiliser le logiciel pour les colorier, vérifier la cohérence des dessins et composer les éléments de la scène. La simple introduction d'un outil numérique dans la chaîne de production traditionnelle a ouvert la voie à d'autres possibilités révolutionnant de ce fait les outils de production. Cette mini-révolution a eu une conséquence immédiate au niveau des temps de réalisation ainsi que des coûts finaux. La maison Disney a alors remplacé les *cellulos* papiers par des *cellulos* numériques. Les images numérisées peuvent être ainsi réutilisées et modifiées, ce qui est très utile pour les éléments de décor. De plus, cela a permis la suppression d'inconvénients techniques liés à l'utilisation des *cellulos*, comme la présence de poussière ou l'apparition d'ombres dues à leur superposition. Utilisé pour la première fois en 1989 dans la scène finale de « La petite sirène », puis entièrement dans « La belle et la bête » en 1992, le système *CAPS* s'est imposé rapidement comme l'outil de base, exploité intensivement depuis pour des films bien connus comme « Les triplettes de Belleville »², « Le roi Lion »³ ou encore « Le voyage de Chihiro »⁴.

² www.lestripettesdebelleville.com

³ www.disney.fr

⁴ www.ghibli.jp

1.2.1.1 La création de modèles

L'étape de création des modèles peut elle aussi être informatisée, l'utilisation de la numérisation de certains dessins pouvant conduire à un gain de temps. Mais il est aussi possible de créer les personnages ou les objets directement sur l'ordinateur à l'aide d'une tablette graphique et d'un stylet. Ces modèles peuvent être représentés par des pixels dans des images de type bitmap ou de manière continue dans des images vectorielles.

Ce dernier type de représentation est décrit par des composantes géométriques primitives telles que point, droite ou courbe spline et supporte des transformations continues comme des changements d'échelle et des rotations, qui ont du mal à trouver des équivalents dans le cas discret. L'imagerie 2D vectorielle est actuellement utilisée majoritairement dans les logiciels existants de fabrication de dessins animés dont *Flash* de Macromedia, *Toonz* [Toonz] de Digital Video, *Animo* [Animo] de Cambridge Animation System, *Pegs* [Pegs] de Mediapegs et enfin *Toon Boom* [ToonBoom] de Toon Boom Technologie (héritier de *TicTacToon* [Feke95]).

L'informatisation de ces étapes de la chaîne de fabrication permet des gains de productivité considérable. En effet, des estimations montrent qu'il est possible d'atteindre aujourd'hui 500 *cellulos* numériques contre quelque 200 *cellulos* papiers en animation traditionnelle.

Pour compléter cette création, mentionnons qu'il existe aussi des logiciels spécialisés dans l'édition de *storyboard* avec des possibilités de tests de l'animation et des logiciels d'assistance au *lipsync*.

1.2.1.2 La mise en couleur

La mise en couleur traditionnelle nécessite un travail très précis afin d'obtenir un résultat uniforme par l'application de couches fines et homogènes sur les *cellulos* et une bonne composition des couleurs durant tout le film. Ce travail méticuleux est actuellement remplacé par une coloration numérique permettant une meilleure gestion des couleurs par un processus d'étalonnage exact. Il est alors possible de définir une base de couleurs pour chaque personnage, chaque couleur étant reproductible à l'identique.

L'utilisation de ce type de technique permet des gains de temps considérables. En effet, des estimations font apparaître que là où la gouache traditionnelle permettait de mettre en couleur une trentaine de *cellulos* par jour, la gouache informatique peut prétendre de 150 à 300 *cellulos* par jour. Quelles que soient les variations éventuellement applicables, le différentiel reste indiscutable et rend le recours à la gouache traditionnelle pour des contextes où les critères artistiques sont très spécifiques.

Autre bénéfice induit par l'informatisation de la mise en couleur, l'apparition de nouvelles techniques de traitement d'image. Des interventions jusqu'alors impossibles sont ainsi devenues réalisables sur les images numérisées. Les exemples types de manipulation envisageables concernent la correction de certaines erreurs, l'ajout des

effets, la modification des certains cadrages et enfin l'intégration d'autres images issues d'autres sources.

1.2.1.3 L'animation

L'étape d'animation reste le processus le plus coûteux en temps et argent, qui nécessite le plus de travail dans l'ensemble de la chaîne de fabrication de dessins animés. Cela est dû au très grand nombre de dessins qu'il faut réaliser manuellement par une équipe nombreuse, constituée d'animateurs, d'assistants animateurs et d'intervallistes.

En effet si on considère une cadence standard de 24 images par seconde, cela implique la production de 1500 images par minutes de film, soit 39000 images pour un épisode d'une série animée de 26 minutes. La norme pour une série d'animation étant 26 épisodes de 26 minutes chacun, cela représente une quantité de travail estimée à environ 33000 jours/homme. Le développement d'outils informatiques spécifiques permettant d'automatiser cette étape reste un enjeu majeur au vu de l'impact économique considérable pour les producteurs de dessins animés, films d'animation ou séries animées. Dans cette attente, l'étape d'animation est délocalisée là où les coûts de main d'œuvre sont les plus faibles.

L'informatisation de l'animation, appelée aussi *in-betweening*, consiste à calculer, à partir de deux poses clés notées $P_{début}$ et P_{fin} , l'ensemble des poses intermédiaires nécessaires, suivant les indications données par les animateurs. Néanmoins comme Catmull [Cat78] le montre, cela ne peut se résumer qu'à une seule interpolation entre deux dessins extrêmes. En effet, quand un animateur réalise ce travail il se réfère à des connaissances intrinsèques au monde qui l'entoure, afin de parvenir à une projection efficace du monde 3D en 2D. La perte d'information due aux occlusions (par exemple une jambe qui cache la deuxième) rend la tâche d'automatisation difficile. Il serait donc nécessaire de disposer d'un programme informatique capable de « comprendre » le modèle et les intentions de l'animateur.

Pour atteindre cet objectif, une structure procédurale globale peut être retenue. Elle est composée des deux étapes suivantes :

1. La constitution des paramètres servant à la mise en correspondance entre les dessins-clefs à partir desquels l'interpolation est effectuée. Ces éléments peuvent se présenter sous la forme de primitives géométriques telles que points, courbes B-Splines ou NURBS [Piegl95], lignes ou surfaces polygonales, ou bien constituer une entité spécifique et plus complexe comme un squelette.
2. La génération des états intermédiaires par l'interpolation entre chaque couple de paramètres définis précédemment. Notons que cette étape est dépendante de la cadence imposée par l'animateur, ainsi que de l'échantillonnage des intervalles entre les deux poses clefs.

Pour la définition de ces paramètres, la littérature fait état de deux grandes approches: l'une fondée sur des entités géométriques et l'autre faisant appel à la notion de squelette d'animation.

Dès les années soixante-dix, Burtnyk et Wein [Burt71] introduisent l'utilisation de l'ordinateur dans la génération de poses intermédiaires lors d'une animation par poses clefs. Pour cela ils utilisent des points représentant de façon schématique un squelette dans une image. Notons que la spécification de ces squelettes simplifiés requiert néanmoins un important travail de la part de l'utilisateur. De plus, Des problèmes sont susceptibles d'apparaître lorsque dans certaines poses on ne retrouve plus les points du squelette à cause des occlusions. Le même problème apparaît dans les travaux de Shapira et Rappoport [Shap95], qui utilisent une représentation du squelette en étoile.

L'utilisation de courbes rend le travail plus accessible. Ainsi, dans TicTacToon [Feke95], les auteurs manipulent des courbes paramétriques, où la correspondance est rendue possible par une mise en correspondance manuelle. Un autre schéma, fondé sur la polygonisation des lignes a aussi été proposé dans [SederGreen92] et [Mel04]. Plus récemment encore, Kort *et al.* [Kort02] introduisent une méthode avec moins de contraintes, fondée sur l'assignation d'une fonction de coût entre chaque couple de courbes. La mise en correspondance des caractéristiques est ici déterminée par un processus de minimisation globale de la fonctionnelle énergétique associée.

Dans ce même cadre, une deuxième approche par lignes polygonales prend en compte non plus leurs sommets mais leurs arêtes et les mesures classiques de longueur et d'angle qui leur sont associées. La mise en correspondance de ces différents éléments est ensuite utilisée à des fins d'interpolation pour générer les séquences d'animation. L'interpolation peut être linéaire, conduisant dans le cas où les poses clefs sont éparses, à des animations relativement peu fluides (mouvements saccadés et mécaniques). Elle peut être d'ordre supérieur par courbes splines ou NURBS, comme décrit dans [Ree91]. Outre ces interpolations, un modèle physique peut être aussi appliqué [Seder93], en associant aux lignes polygonales des constantes d'élasticité ou de raideur.

La limitation majeure de l'ensemble de ces approches est liée au phénomène d'occlusion. En dépit de quelques propositions qui visent à gérer ces aspects [Kort02], cela reste peu satisfaisant pour le moment. La seule solution est alors une interaction utilisateur supplémentaire, pour déterminer et positionner manuellement les éléments nécessaires à la mise en correspondance. Bien entendu, ces obstacles peuvent être contournés quand il s'agit d'animation simples et courtes, comme pour certaines séries TV. Mais dans les autres cas, le problème persiste. Cela nécessite alors une spécification plus dense des poses clefs. En revanche, augmenter le nombre de ces poses réduit considérablement l'intérêt du système.

Une simulation de scènes et d'objets 3D peut être obtenue par des méthodes dites 2,5D. Le principe ici consiste à spécifier une scène par un ensemble de plans superposés, auxquels on associe une information plus ou moins qualitative de profondeur par rapport à un point de vue. Cela permet de définir des plans sur lesquels évoluent les personnages et sont placés les décors. Le problème de l'occlusion est dans ce cas géré en effectuant les procédures de mises en correspondance nécessaires à travers différents plans, comme proposé par exemple dans [Kort02]. Il est ainsi possible de spécifier des contours apparents et cachés. En outre, l'animation peut être considérée indépendamment dans chaque plan [Ree81] ou [Bourg94].

Toutefois, l'ensemble de ces solutions reste néanmoins assez limité, en raison de la perte inhérente d'information relative à la projection dans une scène 2D d'objets supposés d'évoluer dans l'espace 3D.

La vraie solution à ces problèmes est apportée par les modélisations pleinement 3D, seules à pouvoir s'affranchir des problèmes d'occlusion. Ainsi, dans [Fiore01], Di Fiore *et al.* proposent une méthode multi-couches, qui utilise des modèles 3D simples pour enrichir l'information provenant des dessins 2D. En combinant les différents niveaux de la représentation, la méthode proposée offre une solution efficace. En revanche, elle exige de la part des utilisateurs un savoir-faire et des connaissances avancées en modélisation 3D pour spécifier les paramètres impliqués, relatifs au squelette d'animation 3D utilisé. Cela dépasse les compétences d'un animateur 2D traditionnel.

Parallèlement au développement de ces techniques de *in-betweening*, il reste à gérer une problématique spécifique au dessin animé qui est celle de la représentation des personnages de façon dépendante de leur point de vue [Radem99, Chaudh04, Roh02]. Cela peut conduire à des confusions dans le calcul des poses intermédiaires, mais reste un effet de style incontournable dans la création de dessin animé traditionnel. Dans ce cadre, plusieurs approches ont été étudiées.

Rademacher [Radem99] utilise un modèle 3D de base du personnage ainsi qu'un ensemble de dessins 2D de ce même personnage, représentant le personnage selon des points de vue clefs. La méthode permet de calculer à partir de ces dessins 2D, la position de la caméra ainsi que les distorsions associées aux différentes poses. Un nouveau modèle 3D est alors généré, interpolant les déformations associées aux points de vue donnés.

Des approches similaires sont proposées dans [Chaudh04] et [Roh02].

1.2.1.4 La post-production

Certaines étapes de la post-production peuvent également être remplacées par des techniques numériques. C'est notamment le cas

- du montage des *cellulos* : une scène est composée en assemblant ensemble des personnages et des décors. Appelée aussi *compositing*, cette étape permet d'hybrider des éléments de natures différentes tels que modèles 3D, photographies 2D ou scènes filmées avec acteurs humains,
- du mixage du son, ainsi que des traitements associés,
- du tournage, qui peut être intégralement réalisé numériquement, en offrant ainsi une plus grande souplesse dans les cadrages et l'ajustement des différents paramètres.

1.2.2 Techniques d'animation 3D

En raison, d'une part de la baisse constante des coûts matériels et logiciels, et d'autre part, de l'augmentation continue de la puissance de calcul offerte par les ordinateurs modernes, les techniques émergentes d'animation 3D ont pu faire leur entrée sur le marché du dessin animé. La pluralité des outils hétérogènes mis à disposition et leur nouveauté n'ont pas encore permis de définir un schéma rigoureux et

unanimentement accepté d'organisation de la chaîne de production des films d'animation 3D, comme c'était le cas en 2D. On assiste ainsi à des fluctuations importantes, en terme de méthode de travail, d'une équipe à une autre et de production à production. Malgré cela, il est néanmoins possible d'identifier trois principaux axes, analogues à ceux de la production d'animations 2D : la pré-production, la production et la post-production.

1.2.2.1 La pré-production

Les premières étapes de la chaîne de fabrication 3D ont emprunté la plupart des concepts utilisés en 2D. C'est le cas des étapes de conception et de création comme de l'écriture du scénario, de recherche graphique et de mise en place du *storyboard*. A cette étape, le dessin des personnages est encore réalisé sur support papier, même s'il est désormais possible (et de plus en plus fréquent) d'utiliser des tablettes de dessins accompagnées de logiciels spécialisés. Spécifiant les éléments essentiels du film d'animation, la pré-production reste une étape fondamentale pour le projet dont la réussite dépend fortement.

1.2.2.2 La production

La production de films d'animation 3D représente la partie la plus importante du processus de fabrication. Elle regroupe les processus de modélisation et de squelettisation, d'animation et de rendu.

1.2.2.2.1 Modélisation et squelettisation

Si l'animation 3D a emprunté quelques concepts aux dessins animés 2D, elle fait toutefois état de différences significatives dans le mode de création des modèles.

Notons tout d'abord la distinction très stricte qui est faite entre création d'un modèle 3D, en tant qu'enveloppe surfacique, et création d'une maquette d'accompagnement, indiquant éclairage, ombres, textures, couleurs, mouvements, positions des caméras et paramètres de rendu. Cette distinction est essentielle pour permettre la réutilisation des modèles dans des contextes, ambiances et scènes différents. Cette approche est à l'opposée de celle traditionnelle 2D, où tous les éléments sont spécifiés en même temps.

Pour modéliser les personnages en 3D, plusieurs approches sont possibles. Le plus souvent, le créateur débute par des dessins 2D manuels correspondant au *model-sheet*. Il dessine le modèle sous plusieurs points de vue, numérise les dessins et s'en sert ensuite comme feuilles de calque dans des logiciels de modélisation 3D tels que Maya [Maya], 3DS Max [3DSMax], XSI [XSI]. La même approche peut s'appliquer en partant de dessins réalisés directement sur ordinateur ou à partir de photos réelles.

Dans certains cas, il est préférable de fabriquer directement en volume le modèle par des techniques de modelage, moulage ou sculpture pour ensuite le numériser à l'aide d'un scanner 3D. Enfin, les infographistes avec expérience ont l'habitude de créer les modèles directement en 3D et sans aucun support 2D, à l'aide des logiciels de modélisation 3D susmentionnés.

L'étape de modélisation ne concerne pas uniquement la création de l'enveloppe surfacique du modèle 3D, mais également sa préparation pour une animation ultérieure. Dans la plupart des cas, cela revient à spécifier un squelette d'animation, défini par un ensemble d'articulations reliées par des segments correspondant aux os. Déterminante pour la qualité, la fluidité et le réalisme des animations générées, la squelettisation constitue une étape fondamentale dans la production d'un film d'animation 3D.

Bien naturellement, en complément à ce travail sur les personnages, il est également nécessaire modéliser l'ensemble des éléments de décors, qui peuvent être à leur tour 2D, 3D, statiques ou animés.

Ce travail complexe de modélisation conduit à des bases de données impressionnantes, avec gestion des versions, des poses de références et des paramètres associés.

Afin de tester les résultats obtenus à chaque étape de modélisation, des techniques de pré-visualisation, intégrant des modes de rendu plus ou moins simplifié, sont utilisés. Cela est essentiel pour garantir de mener à bien ce processus de création, complexe et éminemment itératif.

1.2.2.2.2 Animation

L'animation est créée conformément aux spécifications du *storyboard*. Sa construction est réalisée à l'aide de plusieurs techniques possibles :

- animation par trames clefs (*keyframes*), de loin la plus utilisée,
- animation par capture de mouvement (*motion capture – MoCap*)
- animation procédurale.

L'animation par poses clefs (*keyframes*) consiste à spécifier une séquence de poses clefs, associée à des instants temporels et d'appliquer ensuite des mécanismes d'interpolation pour générer les poses intermédiaires nécessaires pour générer les séquences d'animation aux cadences vidéo habituelles. Notons que les poses clefs sont le plus souvent construites manuellement pour chaque modèle de personnage.

L'animation par capture de mouvement est une technique permettant de capter les mouvements d'un personnage (acteur) réel, à l'aide de capteurs plus ou moins sophistiqués (marqueurs : capture optique, mécanique ou magnétique...) [Mena02, Menac99], associés aux articulations ou plus généralement à des caractéristiques du personnage pertinentes au sens du mouvement. Les mouvements ainsi mesurés sont ensuite appliqués au modèle virtuel à l'aide de techniques d'animation et de déformation.

Enfin, l'animation procédurale est réalisée en élaborant des modèles comportementaux, à partir desquels seront contraints les mouvements du modèle virtuel.

1.2.2.2.3 Rendu

Les séquences d'animations sont enfin fournies à l'équipe de rendu, qui a pour tâche de les intégrer dans une scène complexe, en assurant l'ambiance globale, caractérisée

par un ensemble d'attributs photométriques. Cette tâche est composée de plusieurs phases :

- Calcul de l'éclairage (illumination) qui doit être cohérent tout au long de la séquence pour un décor donné, en fonction de la position de la caméra et des personnages,
- Projection dans le plan d'observation selon les points de vue spécifiés dans le *storyboard*,
- L'application des textures et de reliefs.

1.2.2.3 La post-production

Dans le contexte d'animation 3D, la post-production regroupe l'ensemble des manipulations nécessaires à la finalisation du film avant enregistrement définitif et diffusion.

Cette étape débute par le calcul de chaque plan spécifié dans le *storyboard*, une fois les étapes de modélisation, d'animation et de rendus finalisées. Ensuite, les plans peuvent être complétés avec les éléments de décors dessinés, ou avec des images réelles.

Le son est également ajouté à l'animation pour assurer de façon synchronisée les dialogues, la musique ou les effets de bruit. Des retouches finales peuvent être aussi effectuées pour ajuster les couleurs, les paramètres de rendu ou d'éclairage, la durée des plans ou encore la position de la caméra.

1.3 Taxonomie des dessins animés

Vue la grande variété de films d'animation existants, il est difficile d'en dresser une taxonomie pertinente, sans tomber dans le piège de la facilité. Dans ce travail, nous nous contentons d'identifier les quatre grandes familles de dessins animés habituellement reconnues dans le monde des créateurs. Par ordre décroissant de complexité et de finesse, il s'agit notamment des animations hyperréalistes, réalistes, de type *cartoon* et minimalistes.

L'animation hyperréaliste essaie d'imiter au maximum les acteurs du monde réel. Les mouvements de la peau sont naturels, avec prise en compte des niveaux de détails très fins, comme les rides ou les changements de couleur de la peau. En général, la modélisation physique de l'anatomie et des structures osseuses, musculaires et tissulaire des personnages est ici nécessaire pour assurer cette ressemblance aux personnages réels.

L'animation réaliste reprend les concepts précédents en les simplifiant. Elle vise également à garantir une ressemblance avec les personnages réels, mais admet des compromis entre complexité du modèle et niveau de détails.

Le dessin animé de type *cartoon* est le style d'animation le plus libre possible, mais sans doute aussi le plus difficile à modéliser puisque aucune limite n'entrave ici la liberté du créateur. Le style graphique et l'animation peuvent comporter des déformations très amples (étirements, grands yeux, quatre doigts, technique du *stretch and squash* [Las87]). Les caractéristiques des visages sont également exagérées,

portées à la caricature. Tout cela permet de créer des univers complètement fantastiques, où les personnages se retrouvent dans des situations illogiques et comiques. Qui ne s'est pas réjoui des créations des maîtres de l'animation de type cartoon comme Tex Avery, Chuck Jones, Hanna et Barbera...

Enfin, en ce qui concerne le style minimaliste, les personnages sont créés à l'aide de modèles ultra simplifiés et possèdent des caractéristiques faciales réduites au minimum. Par exemple, la bouche est souvent représentée par un simple trait. Les expressions peuvent être très exagérées ou imagées à l'aide de symboles souvent naïfs (exemple : une goutte pour exprimer l'ennui, une croix pour signifier que le personnage s'est fait mal...).

1.4 Conclusion

Dans ce premier chapitre, nous avons présenté les principales approches de création de dessins animés utilisées aujourd'hui à échelle industrielle.

Dans ce cadre, nous avons tout d'abord explicité la chaîne traditionnelle de création de dessins animés 2D, en soulignant étapes de production et tâches afférentes. L'analyse de cette chaîne révèle un schéma de production à la fois très formel et bien rodé, qui bonifie pleinement le potentiel créatif et artistique des dessinateurs (qui y sont d'ailleurs profondément attachés), mais qui nécessite une impressionnante quantité de travail manuel de dessinateurs spécialisés. Cela conduit à des coûts et des temps de production très élevés qui pénalisent fortement l'industrie du dessin animés.

Les outils informatiques aujourd'hui disponibles visent notamment à pallier cet inconvénient, en introduisant des mécanismes d'automatisation sur différentes étapes de la chaîne de production. Nous avons analysé donc les solutions existantes, dans des contextes aussi bien 2D que 3D.

L'analyse de ces différentes solutions révèle, pour le cas 2D, des limitations importantes dues à des phénomènes d'occlusion difficiles à gérer par ordinateur dans des contextes purement 2D. Au contraire, les techniques émergentes d'animation 3D permettent de s'affranchir de ce handicap, en privilégiant des modélisations 3D, le plus souvent à base de modèles sophistiqués. Ces techniques s'éloignent en revanche des pratiques traditionnelles de dessin et du domaine de compétences des créateurs de dessins animés, donnant naissance à des métiers et méthodologies de fabrication de films 3D complètement nouveaux.

L'objectif de cette thèse est notamment de créer un pont entre les deux mondes, 2D et 3D, dans le cadre spécifique de l'animation de visage. Le principe consiste à proposer des outils hybridant approches 2D et 3D. Cela permettra de tirer profit des avancées technologiques accomplies dans le domaine de l'animation 3D, tout en respectant les pratiques traditionnelles de travail des dessinateurs traditionnels.

Vecteurs d'émotion et de la parole, les visages constituent un élément essentiel pour les dessins animés. Le chapitre suivant est dédié notamment à l'analyse des différents modèles de visages de la littérature.

Chapitre 2 :

Modélisation, déformation, animation

Résumé :

Ce chapitre analyse les contraintes de modélisation de visage qui doivent être prises en compte par les systèmes d'animation. En premier lieu, nous présentons la structure anatomique et morphologique des visages humains, avec éléments de squelette, structures musculaires, tissus et proportions à respecter. Une attention particulière est dédiée aux différentes caractéristiques faciales (bouche, yeux, sourcils...), correspondant aux éléments de visage pertinents pour l'animation, ainsi qu'à leur modélisation. Les deux grandes familles d'expressions, émotions et visèmes sont ensuite présentées. La façon dont ces éléments et leurs interrelations complexes sont pris en compte dans des systèmes et formalismes de modélisation physique de visage est ensuite présentée. Enfin, un bref aperçu de la norme MPEG-4 d'animation faciale est proposé.

Mots Clés : *anatomie de visage, caractéristiques faciales, expressions, émotions, visèmes, modélisation physique, standard MPEG.*

Tête et visage sont des structures complexes qu'il n'est pas facile de modéliser pour l'animation. Modéliser un visage a pour but de transmettre une expression ou simuler de manière réaliste un dialogue. Pour communiquer efficacement ces variations, la seule référence disponible est celle des personnages humains réels. Pour créer des expressions et pour simuler la parole de façon crédible il est donc nécessaire de comprendre en premier lieu la structure anatomique complexe du visage humain, avec son squelette, ses muscles et ses tissus.

2.1 Structure anatomique de visage

La structure anatomique du visage, doit prendre en compte le squelette crânien, les muscles faciaux et enfin les tissus épidermiques du visage.

2.1.1 Le squelette

Le squelette crânien est formé d'un ensemble d'os aplatis et irréguliers joints ensemble de manière fixe à l'exception du maxillaire inférieur. Ce squelette est divisé en deux parties : le squelette du crâne (boîte crânienne), qui loge et protège le cerveau et du visage. Le squelette du visage est particulièrement intéressant dans notre contexte car il fournit le cadre sur lequel les muscles et la peau visibles seront fixés. Celui-ci est constitué de quatorze os (le vomer, les deux os maxillaires, les deux os palatins, les deux os zygomatiques, les deux os nasaux, les deux os lacrymaux, les deux cornets inférieurs et la mandibule) et des cavités (cavités orbitaires, fosses nasales, cavité orale).

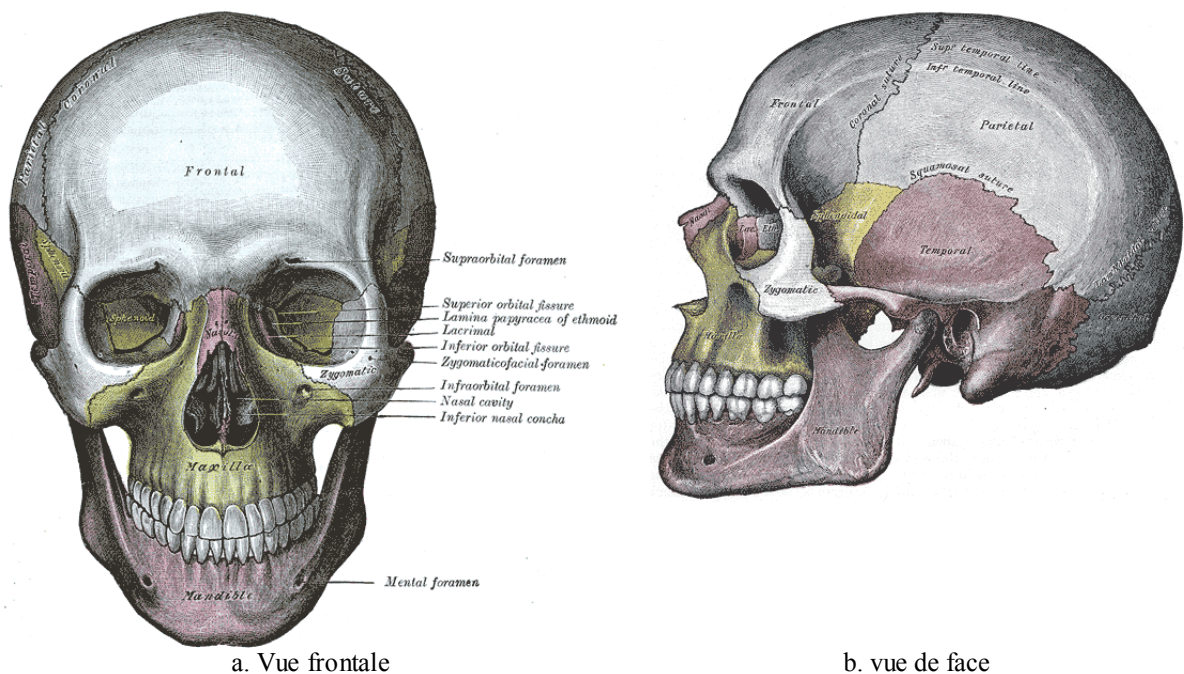


Figure 2.1 : Ostéologie du crâne

Dans ce contexte, il est intéressant de décrire l'ensemble des mouvements que peut effectuer la mandibule et qui affectent toute la partie inférieure du visage. Les mouvements ainsi générés sont de trois types :

- *Mouvements verticaux* : constitués de l'abaissement ou de l'élévation de la mandibule, ils conduisent à l'ouverture ou la fermeture buccales. Le point de départ de ce mouvement peut être défini par la position de repos physiologique (bouche fermée).
- *Mouvements antéropostérieurs* : formés par la propulsion ou la rétropropulsion de la mandibule, correspondant à une projection du menton en avant ou en arrière. De faible amplitude, ces mouvements sont impossibles si la bouche n'est pas ouverte un minimum.
- *Mouvements latéraux* (diductions) : ces mouvements portent le menton latéralement vers la droite ou la gauche. Une ouverture buccale minimale est nécessaire et l'amplitude est rapidement limitée par des tensions musculo-ligamenteuses.

2.1.2 Les muscles

Le visage est composé d'une collection complète de muscles qui poussent ou tirent la peau de façon différente. Ils interviennent directement dans la création d'expressions faciales ou de la parole mais aussi à la réalisation d'autres fonctions telle que la mastication. Ils sont superficiels et tous attachés à un réseau sous-cutané constitué de graisse et de peau à leur insertion. Quand les muscles sont en position de relaxation, les tissus gras remplissent les creux et lissent les transitions anguleuses, laissant la forme générale de la boîte crânienne prendre sa place. L'ensemble de ces muscles faciaux travaillent en collaboration et non indépendamment. Toutefois, il est possible de les grouper en quatre grandes masses musculaires selon des paramètres de localisation, d'orientation ou de forme. On y distingue les muscles de la joue, les muscles de la bouche, les muscles des yeux et enfin les muscles du crâne, chacun intervenant plus ou moins spécifiquement dans la création d'une expression faciale.

Notons que dans les muscles de la joue, un rôle important revient au muscle *masseter* qui permet de serrer les dents et de relever la joue. Le *masseter* participe à la formation des expressions comme la peur ou la lassitude.

Les muscles de la bouche sont les plus nombreux permettant de multiples variations. Les principaux muscles sont :

- *Levator labii superioris* : il commence au niveau de la base du nez et au milieu de la lèvre supérieure et permet de monter la lèvre supérieure au niveau des narines provoquant un air de dégoût ou de dédain.
- *Zygomaticus major* : appelé aussi muscle du sourire, il est autour de la commissure des lèvres et attaché avant les oreilles. Quand il est actionné, il tire la bouche vers le haut et l'extérieur créant ainsi un sourire ou un rire.
- *Triangularis* : il participe à générer l'expression de tristesse, en tirant la bouche vers le bas.
- *Depressor labii inferioris* : il connecte la lèvre inférieure à la mandibule, accompagnant certains mouvements de bouche nécessaires à la parole ou exprimant la surprise.

- *Mentalis* : situé au-dessous de la lèvre inférieure, il pousse cette lèvre vers le haut et l'extérieur pour manifester la peur ou la tristesse.
- *Orbicularis oris* : il entoure les deux lèvres, compressant et plissant les lèvres. Il montre le dédain et la répulsion.

Le groupe des muscles liés aux yeux fait intervenir les deux éléments principaux suivants :

- *Corrugator*, localisé directement entre les deux yeux, il comprime la peau entre les sourcils créant un froncement, visible particulièrement au moment d'une intense concentration ou lors d'un dégoût.
- *Orbicularis oculi*, encerclant les yeux, il permet de fermer les paupières ou de garder les yeux grands ouverts afin d'exprimer l'endormissement ou la fatigue.

Jouant un rôle plus ou moins important dans toutes les expressions, le *frontalis* fait partie de la dernière catégorie des muscles faciaux qui sont fixés sur le front. Permettant de rider la peau du front, il provoque aussi à lui seul, peur et haussement de sourcil.

Mentionnons enfin les muscles moteurs contrôlant l'articulation de la mâchoire, le mouvement de la langue, le mouvement du cou.

2.1.3 Les proportions du visage

L'étude des proportions appropriées pour la tête est essentielle si l'on souhaite simuler des expressions faciales et de la parole de façon réaliste et convaincante. Ces proportions sont liées à l'âge, au sexe ou encore à la stature de personnes.

Ainsi, les formes du crâne sont différentes suivant que le personnage représente un homme ou une femme, la masse crânienne et la mâchoire chez l'homme sont plus robustes et plus carrées alors que plus arrondies chez la femme. De plus les proportions peuvent aussi décrire la position, largeur, hauteur et profondeur des éléments du visage comme le menton, le front, les yeux ou bien les joues. Dans un contexte de créations de personnages, l'ensemble de ces proportions peut être plus ou moins accentué afin de souligner un trait de caractère du personnage ou bien le caricaturer dans le cas des cartoons.

Il est bon de souligner qu'il existe aussi des mouvements globaux de la tête intéressants pour la transmission des émotions. Ces déplacements étant actionnés par les articulations du cou.

Après cette introduction très succincte à l'anatomie du visage, intéressons-nous dans la suite aux principales caractéristiques faciales que l'on souhaite modéliser.

2.2 Caractéristiques faciales

Un modèle de visage est la réunion de plusieurs éléments et détails. Décrivons brièvement les principaux éléments de description du visage, ainsi que leurs rôles respectifs dans la génération des expressions ou de la parole.

2.2.1 La bouche

La bouche est une des caractéristiques faciales les plus expressives, notamment grâce aux nombreux muscles l'entourant qui permettent des mouvements variés. Constituée de deux lèvres, inférieure et supérieure indépendante l'une de l'autre, elle permet à la fois d'exprimer la parole et les émotions. Notons que la lèvre inférieure est solidaire des mouvements de la mâchoire.

D'autres éléments intérieurs de la bouche, comme les gencives, les dents et la langue peuvent également être visibles dans certaines postures faciales, pouvant aider à augmenter le degré de réalisme. Leur rôle dans l'animation ne reste que secondaire.

2.2.2 Les yeux et les sourcils

Le mouvement des yeux est vraiment très important pour transmettre des émotions et créer des expressions. Situés chacun dans une orbite du squelette, ils sont entourés de muscles permettant un positionnement précis de l'axe de vision et aidant à la détermination du rapport nécessaire entre les deux yeux pour la vision binoculaire.

Mentionnons qu'une des règles habituellement prise en compte pour la fabrication d'un personnage est d'assurer la convergence des directions de regard pointées par les deux yeux.

Du point de vue de la modélisation, les yeux sont représentés schématiquement par un globe, dont une partie est visible et l'autre non. Sur ce globe oculaire se trouvent l'iris et la pupille.

Pour certains dessins animés simplifiés, les yeux des personnages sont réduits à une boule plus ou moins sphérique. Pour ajouter plus de vie au visage, il est possible de jouer sur la dilatation de la pupille, la coloration de l'iris, ou bien sur les réflexions de la lumière. Notons enfin que les sourcils peuvent accompagner les mouvements des yeux pour accentuer ainsi l'expression.

2.2.3 Cheveux, plis, rides et éléments colorés

Afin d'ajouter plus de personnalité et de réalisme au personnage et à ses expressions, il est possible de prendre aussi en compte d'autres éléments. Parmi ceux-ci, mentionnons les cheveux et tous les autres éléments pileux : barbe, moustache, cils, qui peuvent subir de mouvements spécifiques, en fonction de l'expression et du personnage. Plis et rides sont utiles pour ajouter une information concernant l'âge du personnage, permettent toujours d'augmenter le degré de réalisme, de même que tout changement de teint (rougeur, pâleur, ton verdâtre...).

2.3 Expressions faciales

Le visage d'un personnage raconte à lui seul une histoire. Il est donc très important dans un processus de modélisation d'assurer la simulation des expressions faciales, qu'il s'agisse des émotions ou de la parole.

Chaque élément du visage joue un rôle plus ou moins important dans la réalisation de l'expression faciale finale. Les trois caractéristiques principales de visage qui influent sur la nature de l'expression faciale sont la bouche, les yeux et les sourcils. Les autres comme les plis, rides, les éléments colorés ou les cheveux ne jouent qu'un rôle secondaire, mais peuvent venir renforcer l'expression en fonction du type de film d'animation et de la volonté du créateur.

2.3.1 Émotions

Le visage constitue une interface pour communiquer une émotion spécifique. Pour faire coïncider expression faciale et émotion il est donc nécessaire de connaître et de catégoriser les principales familles d'émotions existantes. Bien que les émotions d'un humain puissent être très variées, on peut distinguer les sept catégories principales suivantes :

- La joie,
- La tristesse,
- La colère,
- La peur,
- Le dégoût,
- La surprise,
- La honte.

À cela s'ajoute des expressions secondaires, comme la confusion, l'inquiétude, le dédain, la sournoiserie, la rage, la sévérité, l'enthousiasme, la lassitude, la fatigue, le désintérêt, la peine, la terreur...

Notons que les émotions peuvent être aussi nuancées en fonction des personnages et de leur appartenance à des catégories ethnique, d'âge, socio-professionnelles, ...

Plusieurs systèmes proposent de descriptions des émotions du visage. Un des plus anciens est le langage imité (*Mimic language*) introduit par Hjortsjo [Hjor70]. Aujourd'hui celui probablement le plus utilisé est le système FACS.

Le système de codage des actions du visage (*Facial Action Coding System* ou FACS) est le résultat de recherches conduites dans les années 1970 par des psychologues Ekman *et al.* [Ekm78] pour codifier tous les mouvements, expressions et mimiques possibles du visage humain par un ensemble de mouvements faciaux de base. Ces mouvements primaires, nommés unités d'action (*Action Unit* ou AU), dérivent d'une l'analyse anatomique des changements d'aspect du visage dus à l'action musculaire. Ils peuvent être combinés afin de décrire n'importe quelle expression du visage. Au total, 46 unités d'action ont été identifiées et classifiées. Un mouvement peut

être ainsi décrit par une ou plusieurs unités d'action. Par ailleurs, toutes les unités d'action ne peuvent pas être combinées en même temps, certaines définissant des actions contraires.

L'impact des FACS dans l'animation faciale de synthèse dépasse largement le cadre qu'il s'était initialement proposé. En effet, partant du rôle principal de description, le système FACS est utilisé dans un grand nombre de systèmes d'animation faciale comme contrôleur ou générateur de mouvement nécessaire pour obtenir l'expression faciale souhaitée. La manipulation des paramètres FACS, fondée sur des actions sur les muscles, rend en revanche ce système peu intuitif et complexe à utiliser. De plus, les aspects temporels sont pris en compte d'une façon très minimaliste, ce qui alourdit la tâche des utilisateurs.

Les FACS ne décrivent que les expressions émotionnelles du visage, n'étant pas dédié à la description de la parole. Les mouvements qui permettent de former les différents phonèmes, unités de base de la parole, n'ont pas été pris en compte.

2.3.2 Visèmes

Les mouvements faciaux nécessaires à la simulation de la parole sont décomposés en formes de base appelées *visèmes*. Ces visèmes correspondent à l'aspect visuel des phonèmes, un phonème étant la plus petite entité que l'on puisse distinguer et segmenter dans le signal audio parlé.

Les visèmes reflètent la forme de la bouche, son ouverture, ainsi que la position de la langue, nécessaires pour produire le son correspondant au phonème considéré. Notons que certains visèmes peuvent présenter des similitudes importantes. Cette particularité s'explique par le fait que le son émis peut être produits par le concours de certains éléments anatomiques internes, qui sont donc invisibles sur le visage. Notons enfin que les phonèmes sont propres à une langue. À titre d'exemple, mentionnons qu'on en compte une quarantaine pour l'anglais américain et trente six en français.

2.4 Modélisation de visages animés

La modélisation de visages doit s'inscrire dans une démarche plus large, prenant en compte les objectifs d'animation faciale. Elle doit permettre la mise en œuvre de techniques d'animation, capables de générer des expressions clefs, correspondant à des émotions ou à la parole, à partir d'une expression neutre.

Les premières recherches sur l'animation faciale ont débuté dans les années 1970 avec les travaux de F. Parke [Parke72] (Figure 2.2). Dans son travail de pionnier, il a formalisé les différents aspects du domaine, en proposant des solutions originales. Depuis, de nombreux axes de recherche ont été développés [Parke82, Piep89, Koch98, PlattBad81, TerzWat90, Waters87, Magne88, Coq90, Kalra90].

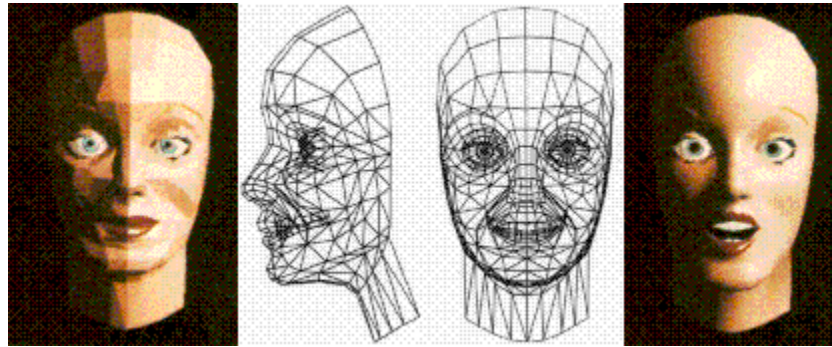


Figure 2.2 : Parke 1972 : Un des premiers modèles d'animation faciale

La variété de ces axes de recherche peut s'expliquer par le grand nombre d'applications impliquant des contraintes technologiques différentes : la chirurgie maxillo-faciale virtuelle dans le domaine médical [Glad04], les outils d'aide pour sourds et malentendants [Labiao], le cinéma, la télévision, les dessins animés, les jeux vidéos ou encore la réalité virtuelle avec la création d'avatars pour la communication à distance.

2.4.1 Paramétrisation directe

Les systèmes de paramétrisation sont fondés sur un ensemble de paramètres qui peuvent affecter non seulement la taille et la structure du modèle (paramètres morphologiques), mais permettent également de générer des expressions.

2.4.1.1 Modèle de paramétrisation directe

Le premier modèle de paramétrisation directe a été proposé par F. Parke [Parke82]. Le principe consiste à spécifier un modèle 3D maillé, ainsi qu'un ensemble de paramètres permettant de contrôler les différents mouvements du visage ainsi que sa morphologie. La difficulté principale réside principalement dans la capacité à bien contrôler l'ensemble des paramètres pour obtenir les résultats souhaités. Environ dix de ces variables permettent de spécifier la morphologie et vingt sont disponibles pour créer les expressions.

Il est possible de contrôler les proportions du visage ainsi que celles de ses différents composants, la forme des joues, du menton, la taille du nez, des yeux, du front et de la mâchoire mais aussi des actions plus dynamiques comme le degré d'ouverture des yeux, la direction du regard, le mouvement de la mâchoire, ainsi que tout ce qui a trait à la bouche : forme, largeur, épaisseurs des lèvres, positionnement des commissures des lèvres et ouverture de la bouche.

Vu le nombre réduit des paramètres utilisés, les résultats restent toutefois assez limités.

2.4.1.2 Action abstraite des muscles

En 1988, Magnenat-Thalman *et al.* [Magne88] ont présenté une nouvelle manière de créer une animation faciale de type humaine. Ce modèle est fondé sur le concept pseudo-musculaire géré par des paramètres de contrôle et appelé *Abstract Muscle Action* (AMA).

Des régions spécifiques du visage sont spécifiées et des actions simples ou plus complexes alliées à l'action d'un ou plusieurs groupes de muscles leur sont associées. Ces actions musculaires simples peuvent être assimilées à celles décrites par les FACS, mais sont en général simplifiées. Dans ce cadre, les FACS constituent plutôt une référence exhaustive, servant de guide.

Au total, les AMA sont composées d'une trentaine de paramètres, dont certains sont primaires et d'autres d'un plus haut niveau, regroupant plusieurs éléments de bas niveaux. Le nombre de paramètres étant fixé à l'avance tout extension est impossible, ce qui rend la génération d'expressions limitée.

2.4.2 Modélisation physique

Les visages étant animés par des muscles, il semble naturel, pour un modèle de visage, de chercher à lui associer un modèle physique de muscles. Étant détaché de la représentation du visage, un tel modèle de description musculaire permettrait d'assurer l'indépendance par rapport aux caractéristiques morphologiques. Le modèle peut être bien sûr étendu, pour prendre en compte le comportement de la peau, de la chair et des os.

Aucune approche d'animation faciale existante ne prend en compte une modélisation exhaustive de l'anatomie de visage. Dans le cadre d'applications chirurgicales [Glad04] (chirurgie maxillo-faciale), d'impressionnants résultats peuvent être obtenus. Toutefois il s'agit souvent d'expressions statiques, très difficiles à obtenir et gourmandes en temps et quantité de calcul. En effet, les muscles réels possèdent de nombreuses caractéristiques, et une simulation efficace doit prendre en compte leurs interactions avec les os (et plus particulièrement la mâchoire), avec les différents tissus constitutifs de la peau, et avec les autres muscles.

À titre d'exemple, notons qu'au total dix-sept muscles entrent en jeu pour obtenir un sourire ! À l'évidence, cela rend la tâche de modélisation très difficile.

Enfin, la nature visco-élastique des tissus constituant du visage entraîne l'addition de plusieurs phénomènes physiques visibles décrits notamment dans les travaux de Pieper [Piep89] ou dans les manuels d'histologie qui décrivent l'interaction de deux composants biochimiques : l'élastine et le collagène.

Malgré toutes ces difficultés, plusieurs modèles ont été développés afin de fournir une expression faciale à partir d'une représentation simplifiée des caractéristiques des muscles et/ou de la peau. Ces modèles permettent d'obtenir des expressions faciales prenant en compte le mouvement des muscles et des différents tissus du visage.

Ces modèles s'appliquent exclusivement aux visages humanoïdes.

Ces modélisations physiques complexes sont rencontrées le plus souvent dans le domaine spécifique des films d'animation réalistes et hyper-réalistes⁵⁶.

Parmi les approches de la littérature les plus utilisées, nous avons identifié deux grandes familles de modélisation physique, l'une par systèmes masses-ressorts et l'autre par représentation vectorielle, que nous explicitons ci-dessous.

2.4.2.1 Systèmes masses-ressorts

Un premier système masses-ressorts a été proposé par Platt et Badler [PlattBad81], qui sont aussi les précurseurs dans le domaine de la modélisation des muscles et de la structure de visages humains. Leur modèle est fondé sur une représentation élastique de 38 muscles [Platt81], interconnectés entre eux par un réseau de ressorts. L'effet d'un muscle est modélisé par la perturbation de ce système qui doit alors trouver une position d'équilibre.

Terzopoulos et Waters [TerzWat90] reprennent l'idée d'un système élastique en l'appliquant différemment, par couches successives (Figure 2.3). Leur objectif est de modéliser de façon précise les propriétés plastiques, visqueuses et élastiques de la peau à l'aide de trois couches connectées entre elles par des ressorts transversaux. Ces couches sont : l'épiderme, le derme et l'ossature. Ce concept est ensuite repris par Lee *et al.* [Lee95] dans une version plus évoluée, incluant à la fois la définition du maillage 3D, sa numérisation et son animation. Nous nous intéresseront ici uniquement à la partie animation.

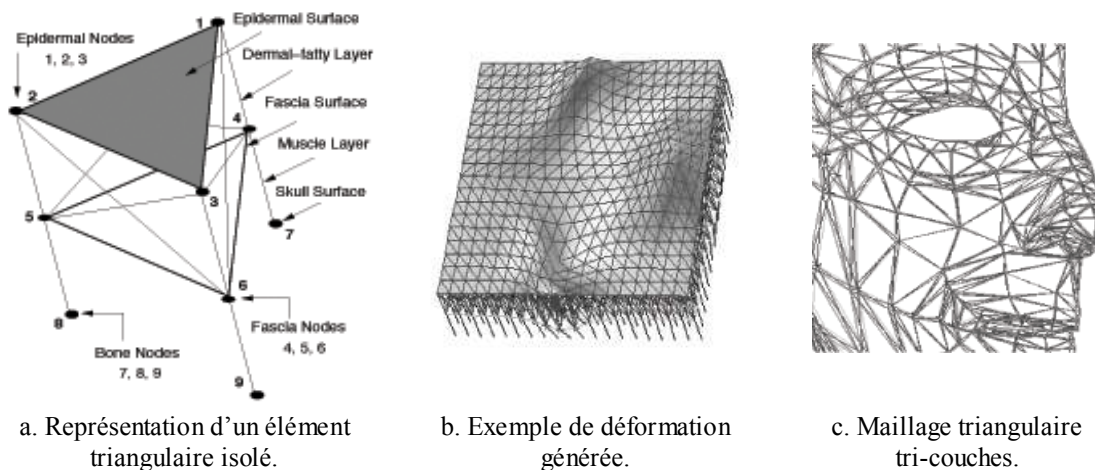


Figure 2.3 : La représentation par couches de ressorts [TerzWat90]

Une première couche, en arrière plan, représente l'ossature du visage. Non mobile, elle sert d'accroche à l'ensemble des autres couches. Le derme et l'épiderme sont ensuite spécifiés, aux niveaux superficiels. L'ossature et le derme sont séparés par une couche intermédiaire formée de muscles et le derme et l'épiderme par une couche

⁵ <http://www.finalfantasy.com>

⁶ <http://www.pixar.com/featurefilms/ts>

graisseuse. Par cet agencement, la structure anatomique du visage est scrupuleusement respectée.

Quant à la peau, elle est représentée à l'aide d'éléments triangulaires correspondant au maillage du modèle de visage. La surface de l'épiderme est formée par les points 1, 2, 3 (Figure 2.3) reliés par un système de ressorts (*dermal-fatty layer springs*) aux points 4,5,6 qui définissent la surface *fascia* (la couche supérieure des muscles). Cette couche est aussi connectée par une couche de ressorts, représentant une couche musculaire, au squelette par les points 7, 8, 9.

Les muscles sont fixés à certains points d'accroche sous la peau par de courts tendons. La contraction de ces muscles entraîne un mouvement de la peau et de l'ensemble des couches la constituant. Sur cette même lignée, Lee *et al.* [Lee95] ont modélisé 28 muscles primaires du visage. Les fibres musculaires sont de deux types : linéaires pour simuler les muscles plats (comme le frontalis et les muscles zygomatiques), ou linéaires par morceaux et attachées au fascia à chaque fin de segment pour reproduire les muscles sphincter (comme le *orbicularis oris* entourant la bouche).

Afin de reproduire les plissements de la peau relatifs à l'incompressibilité de la peau humaine, une force de contrainte volumique est appliquée. Cette force est calculée et appliquée au niveau des nœuds et prend en compte aussi bien le changement de volume que le déplacement des nœuds.

Notons que pour ne pas produire d'incohérence avec la structure osseuse du crâne humain, les tissus doivent glisser au-dessus de la surface osseuse durant les mouvements faciaux. Pour empêcher la pénétration des couches superficielles dans le domaine du crâne, une contrainte de non pénétration est appliquée. La technique consiste à annuler la composante de la force sur les nœuds du crâne.

Les résultats obtenus par cette technique de système à couches de ressorts successives sont souvent réalistes. Toutefois, la prise en compte des parties de visages non déformables mais aussi importantes, n'est pas possible. C'est le cas des yeux et des dents. De plus bien que la qualité visuelle du rendu soit excellente, le temps de calcul est prohibitif, même si des solutions simplifiées existent [Wu95].

Les techniques décrites ci-dessus, fondées sur les caractéristiques biomécaniques et anatomiques du visage humain illustrent la complexité de la modélisation faciale. Une autre approche, dite par représentation vectorielle, ignore complètement ou partiellement ces aspects physiques. Le principe consiste alors à simuler les caractéristiques biomécaniques des déplacements des tissus du visage par une fonction de déformation géométrique.

2.4.2.2 Représentation vectorielle

Dans le modèle développé par Waters [Waters87] et repris par la suite dans [Bui03], trois types de muscles primaires sont décrits : linéaires, sphincters et parallèles. Une analyse de la position des points d'attachement des muscles a été effectuée sur une base de visages a permis d'établir les déplacements extrêmes ainsi que l'amplitude des zones d'influence de chacun. Il en résulte que les muscles entourant la bouche sont à l'origine

des plus grands déplacements et que ceux-ci n'excèdent pas 25mm. L'impact de la déformation dépend du degré de contraction du ou des muscles mis en jeu et l'utilisation des FACS comme système paramétrique lui permet d'établir qu'une variation d'angle de 15 à 160 degrés produit une zone convexe.

Le principe est de modéliser les muscles des vecteurs de déplacement avec une zone d'influence associée. Pour chaque point de la peau, on obtient alors un vecteur de déplacement provenant de l'effet de contraction d'un vecteur musculaire. Un vecteur musculaire peut être décrit par sa direction et son amplitude, à la fois en 2D qu'en 3D, ainsi que par ses points d'attachement au squelette et à la peau.

La description des tissus adjacents constitue une deuxième problématique. Cela correspond à définir la manière dont un point arbitraire est affecté par la contraction d'un vecteur musculaire. L'amplitude maximale de déformation est assurée au niveau du point d'accroche avec la peau. Une amplitude nulle est associée point d'accroche à l'os. L'effet du déplacement est propagé de façon lisse à travers les tissus contigus. Il est ainsi possible de représenter l'action d'un muscle est utilisant une technique d'interpolation non-linéaire

L'action des différents muscles est limitée par une constante de ressort qui représente le déplacement maximal du muscle. Un des limitations majeures du modèle vient du fait que chaque muscle est modélisé d'une façon indépendante des autres.

Les techniques par représentation vectorielle sont relativement peu coûteuses en temps de calcul et conduisent en général à des résultats satisfaisants (Figure 2.4). Elles peuvent être combinée avec les FACS, pour obtenir une représentation plus descriptive.

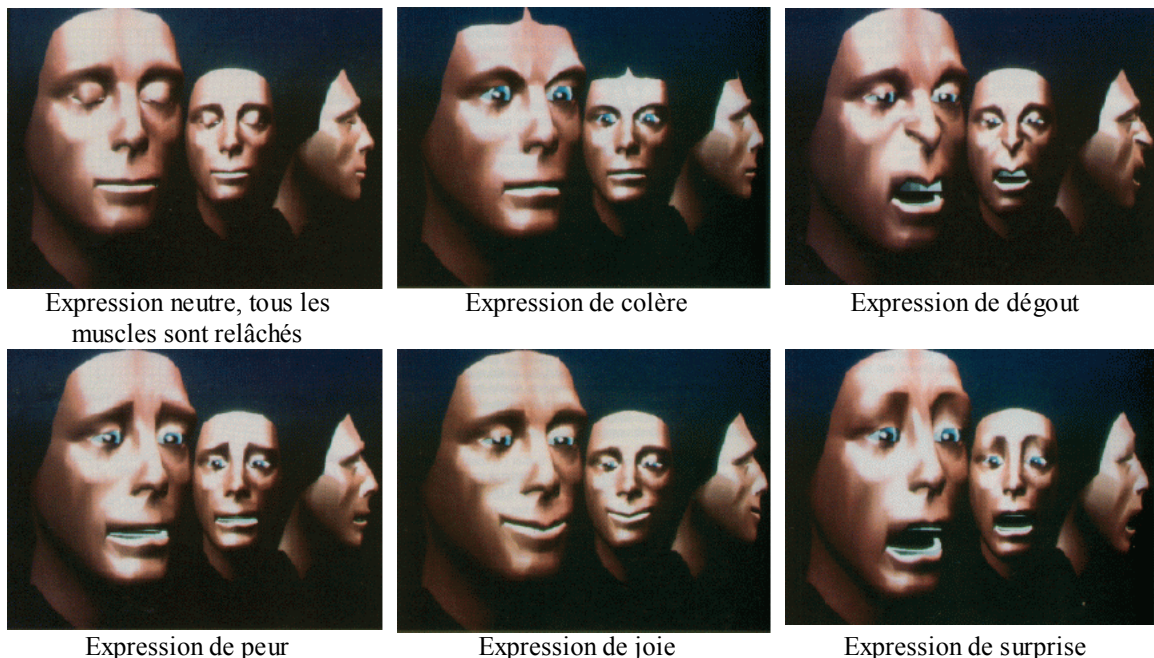


Figure 2.4 : Résultat d'expressions générées par la représentation vectorielle des muscles [Waters87]

Ces deux systèmes, par masses-ressort et par représentation vectorielle, sont souvent utilisés aujourd'hui pour générer des animations réalistes et hyper-réalistes. D'autres approches, comme celle par éléments finis [Koch96, Koch98], ou par déformation de formes libres [SedPar86, Coq90, Kalra90], fournissent également des solutions alternatives, plus ou moins élaborées.

Quelle que soit la technique de modélisation utilisée, il est important de disposer de représentation interopérables, pour faciliter les échanges des contenus créés sur la chaîne de fabrication. Pionnier dans ce domaine, le standard MPEG-4 a été le premier à proposer une spécification de visage internationale, avec paramètres de définition et d'animation de visage.

2.5 Spécification de visage MPEG-4

Dans le contexte d'animation d'avatars, la norme MPEG-4 utilise une spécification de représentation et de codage pour l'animation d'humanoïdes virtuels dite *Face and Body Animation* (FBA) [ISO99, Preda02b, Preda04], fondée sur un concept de descripteur de visage.

2.5.1 Descripteur de visage MPEG-4

Conceptuellement, le descripteur de visage MPEG-4 réunit deux classes de paramètres : les paramètres de description du modèle de visage en termes de forme et de texture, *Face Definition Parameters* (FDPs), et les paramètres d'animation du modèle, *Face Animation Parameters* (FAPs), qui précisent le mouvement global et/ou les déformations locales du visage. Le descripteur donne ainsi la possibilité de reproduire un large éventail d'expressions faciales, d'émotions ou les mouvements de la parole.

2.5.1.1 Paramètres de description du visage (FDPs)

Pour assurer un rendu réel des expressions faciales lors de l'étape d'animation, le descripteur de visage définit un jeu de paramètres (FDPs) caractérisant d'une part, la forme du modèle de visage à l'aide d'un maillage 3D et, d'autre part, la texture associée (Figure 2.5). À cette description s'ajoute un ensemble de points caractéristiques qui seront directement affectés par les paramètres d'animation (FAPs), leur emplacement sur le visage (Figure 2.6) leur permettant de simuler une large variété d'expressions.

2.5.1.2 Paramètres d'animation du visage (FAPs)

Les paramètres d'animation du visage (FAPs) spécifient l'amplitude et la direction du déplacement des points caractéristiques de FDPs lors de l'animation. Ils sont issus d'une étude sur les actions faciales minimales et sont étroitement liés aux actions musculaires. Ils représentent un ensemble complet d'actions faciales de base et, par conséquent, permettent le rendu de la majorité des expressions naturelles.

Les FAPs se divisent en deux classes de paramètres de haut niveau : les visèmes et

les expressions. Un visème représente l'équivalent visuel d'un phonème, notamment l'ensemble des déformations du visage correspondant à la prononciation d'un phonème. Actuellement, la norme MPEG-4 inclut seulement les visèmes statiques qui sont clairement distingués, mais d'autres pourront être ajoutés dans une extension future du standard. Le Tableau 2.1 présente les phonèmes ayant des visèmes définis dans le standard.

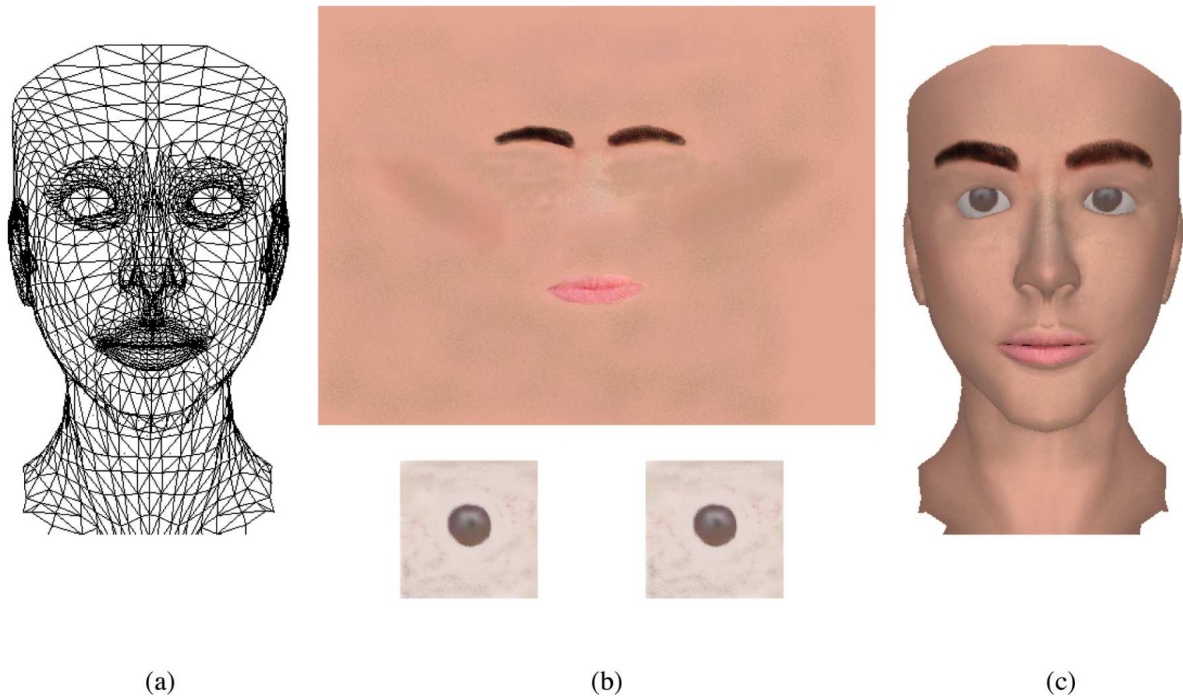


Figure 2.5 : Les paramètres FDPs regroupant (a) la description de forme par maillage 3D et (b) l'information de texture (ici la peau et les yeux) pour générer le modèle de visage texturé (c)

Numéro du visème	Phonème	Exemple
1	p, b, m	put, bed, mill
2	f, v	far, voice
3	T, D	think, that
4	t, d	tip, doll
5	k, g	call, gas
6	tS,dZ, S	chair, join, she
7	s, z	sir, zeal
8	n, l	not, lot
9	r	red
10	A :	car
11	e	bed
12	I	tip
13	O	top
14	U	book

Tableau 2.1 : Les visèmes définis dans la norme MPEG-4 [ISO99]

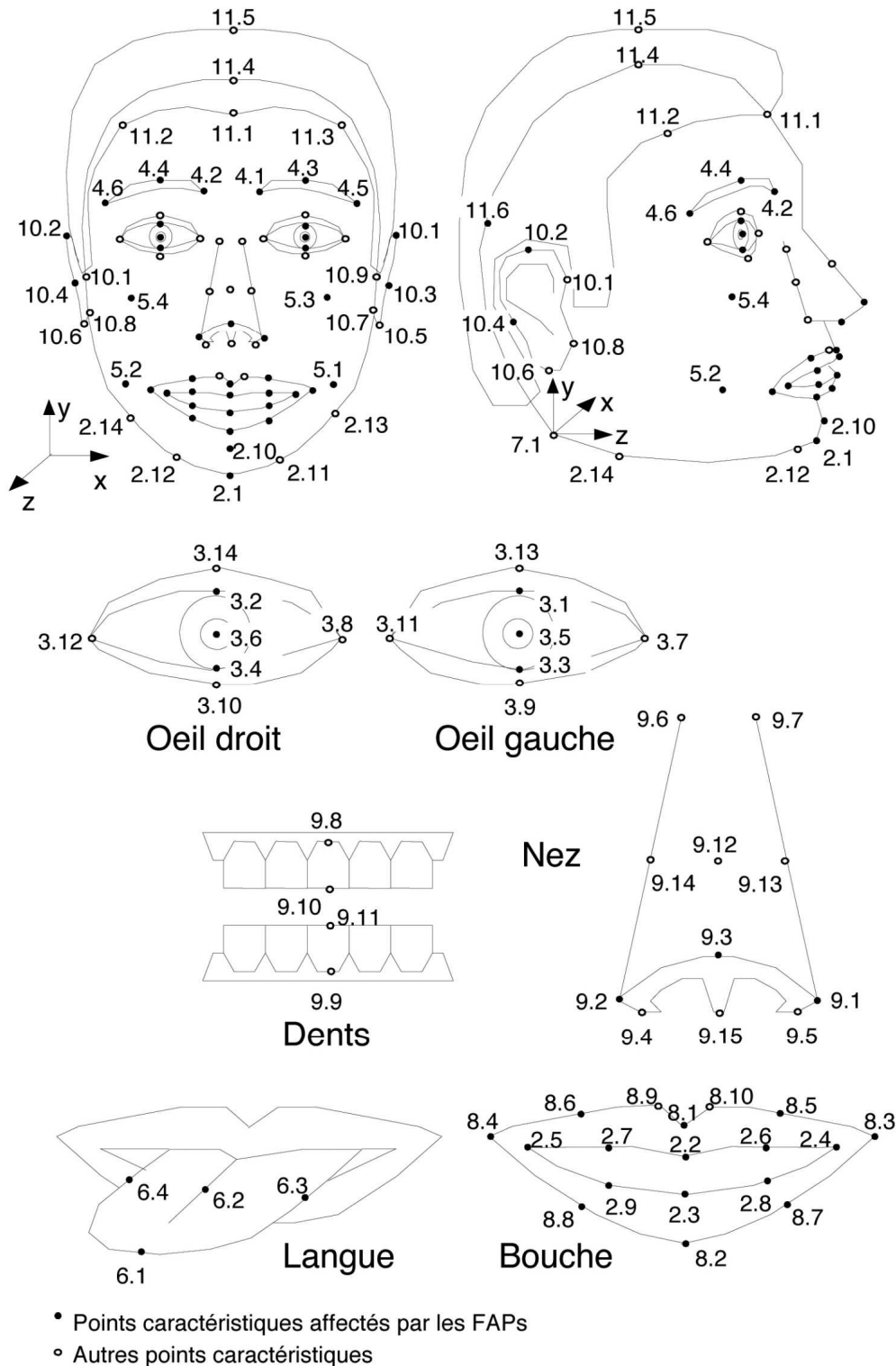


Figure 2.6 : Points caractéristiques des FDPs tels que définis dans la norme MPEG-4 [ISO99]

De manière similaire, les paramètres d'expression permettent la définition d'expressions faciales de haut niveau. Les valeurs que ces paramètres peuvent prendre sont spécifiées par description textuelle, comme le montre le Tableau 2.2 ci-dessous.

Expression	Description textuelle
joie	Les sourcils sont décontractés. La bouche est ouverte et les commissures des lèvres retirées en arrière, vers les oreilles.
Tristesse	Les coins intérieurs des sourcils sont courbés vers le haut. Les yeux sont légèrement fermés. La bouche est décontractée.
Colère	Les coins intérieurs des sourcils sont abaissés ensemble. Les yeux sont largement ouverts. Les lèvres sont serrées l'une contre l'autre ou ouvertes pour montrer les dents.
Peur	Les sourcils sont levés ensemble et leur partie intérieure est courbée vers le haut. Les yeux sont contractés et en état d'alerte.
Dégoût	Les sourcils et les paupières sont décontractés. La lèvre supérieure est levée et courbée, souvent de manière asymétrique.
Surprise	Les sourcils sont levés. Les paupières supérieures sont ouvertes, les paupières inférieures, décontractées. La bouche est ouverte.

Tableau 2.2 : Les expressions faciales définies dans la norme MPEG-4 et leur description textuelle [ISO99]

Pour faciliter l'animation du visage, les FAPs qui peuvent être utilisés ensemble pour représenter des expressions naturelles, sont rassemblés en groupes qui sont référencés à l'aide d'un paramètre d'expression.

Pour assurer l'interprétation uniforme des FAPs sur un modèle de visage compatible MPEG- 4 quelconque, en termes de rendu cohérent d'expressions ou de parole, les FAPs impliquant un mouvement de translation sont exprimés en unités de mesure spécifiques, dénommées FAPU (*Facial Animation Parameter Units*), permettant de s'affranchir d'une étape de calibrage préalable du modèle.

Les FAPU sont définies comme des fractions des distances entre certains points caractéristiques de l'ensemble FDP et sont choisis pour assurer une précision suffisante des mouvements d'animation. Ces unités sont illustrées dans le Tableau 2.3, avec les notations des Figures Figure 2.7.

FAPU	Caractéristique faciale de référence
IRISD=IRISD0/1024	IRISD0=3.1.y-3.3.y
ES=ES0/1024	ES0=3.5.x-3.6.x
ENS=ENS0/1024	ENS0=3.5.y-9.15.y
MNS=MNS0/1024	MNS0=9.15.y-2.2.y
MW=MW0/1024	MW0=8.3.x-8.4.x
AU=10-5rad(unité angulaire)	

Tableau 2.3 : *Facial Animation Parameter Units* (FAPU) définies en fonction des distances entre des points caractéristiques du visage (Figure 2.7) dont l'identification est donnée Figure 2.6. Ici, 3.1.y représente la coordonnée y du point 3.1

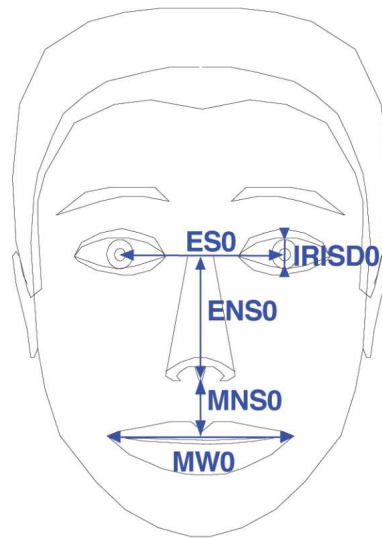


Figure 2.7 : Caractéristiques faciales de référence pour la définition des *Facial Animation Parameter Units* (FAPU) [ISO99]

Les FAPs sont exprimés sous forme de déplacements par rapport à une position de référence du visage, appelée visage neutre, définie comme suit :

- le système de coordonnées est droit, les axes étant parallèles aux axes du système fixe de référence ;
- le regard est dirigé dans la direction de l'axe z (Figure 4.3) ;
- tous les muscles du visage sont relâchés ;
- les paupières sont tangentes à l'iris ;
- le diamètre de la pupille est le tiers de IRISDO (Figure 4.4) ;
- les lèvres sont en contact, la ligne de séparation horizontale est à la même hauteur que les coins des lèvres ;
- la bouche est fermée et les dents supérieures touchent les dents inférieures ;
- la langue est aplatie, en position horizontale, avec le bout touchant la frontière entre les dents supérieures et inférieures (le point caractéristique 6.1 touche le 9.11, Figure 4.3).

2.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une description des principaux éléments de visage que l'on souhaite modéliser et représenter. Structure anatomique, caractéristiques faciales, expressions de type émotion ou visème ont été présentées et discutées. Les principales familles d'approches de modélisation physique dédiées à l'animation de visage ont été ensuite brièvement rappelées, avant d'analyser comment l'ensemble de ces caractéristiques sont pris en compte dans le contexte de la normalisation internationale ISO/MPEG-4.

Cette analyse montre que la problématique de modélisation et d'animation faciale est un problème complexe, nécessitant l'élaboration et la mise en œuvre de techniques souvent sophistiquées. Dans le chapitre suivant, nous analysons comment ces aspects sont traités par les systèmes existants.

Chapitre 3 :

Systèmes d'animation faciale – état de l'art

Résumé :

L'objectif de ce chapitre est de dresser un état de l'art des principaux systèmes et plates-formes d'animation faciale disponibles aujourd'hui. Dans ce contexte, nous analysons tout d'abord comment les fonctionnalités d'animation de visage, avec leurs contraintes spécifiques, sont prises en compte par les grands systèmes de modélisation et de synthèse 3D, tels Maya, 3DSMax, XSI, ou MotionBuilder. Après une présentation synthétique de chaque système, une étude comparée, mettant en évidence principes, avantages et limitations est proposée. De l'analyse de ces systèmes il ressort un certain nombre de limitations quant à leur complexité d'utilisation et efficacité. Cela explique le grand nombre de logiciels d'animation faciale dédiés, qui peuvent d'ailleurs s'interfacer ou non avec les plates-formes génériques.

Mots clefs : *système d'animation faciale, modélisation 3D, plate-forme logicielle, imagerie de synthèse.*

L'animation faciale est liée naturellement aux objectifs plus génériques de modélisation et d'animation 3D pris en compte par les grands systèmes et plates-formes logicielles d'imagerie de synthèse. Analysons donc en premier lieu comment les contraintes d'animation de visage, telles qu'énoncées au Chapitre 1, sont prises en compte par ces systèmes.

3.1 Logiciels généralistes d'imagerie de synthèse

Il serait difficile d'aborder le domaine de l'animation faciale, sans évoquer en premier lieu les grandes plates-formes professionnelles d'imagerie de synthèse à vocation généraliste. Dans ce contexte, le monde de la modélisation et de l'animation 3D fait apparaître des systèmes logiciels incontournables, comme :

- les outils de la société Autodesk *Maya* [Maya], *MotionBuilder* [Motion] et *3DSMax* [3DSMax],
- le logiciel *XSI* [XSI] de la société Softimage.

Ces systèmes, omniprésents dans tous les domaines touchant à l'image de synthèse, sont aujourd'hui exploités à grande échelle par les créateurs d'effets spéciaux en cinématographie (Eclair Studio⁷, Mikros Image⁸, Duran Duboi⁹...), par les sociétés d'animation et de production de films d'animation 3D (comme les maisons Disney¹⁰ et Pixar), ou encore par les créateurs de jeux vidéos (Ubisoft, Electronics Art...).

Ces logiciels ne traitent pas spécifiquement des aspects d'animation faciale, mais offrent un large éventail de méthodes et d'outils de modélisation, de création et d'animation de personnages 3D virtuels, ainsi que de composition de scènes 3D complètes, faisant évoluer des personnages dynamiques dans des décors variés.

En pratique, il se trouve que chacun des logiciels susmentionnés est utilisé dans des secteurs bien spécifiques.

Ainsi, les studios de production de films d'animation ou d'effets spéciaux utilisent-ils la plupart du temps *Maya*. C'est notamment le cas des studios Pixar¹¹ qui complètent cet usage avec celui des outils propriétaire développés en interne.

En ce qui concerne les jeux vidéos, le logiciel *XSI* semble être l'outil de prédilection pour les créations de très haute qualité, tandis que *3DS Max* semble être l'outil incontournable pour les jeux vidéos standard.

Un rôle à part et fédérateur dans ce paysage est occupé par le logiciel *Motion Builder* d'Autodesk, qui peut être utilisé conjointement avec les trois précédents, complétant ainsi la panoplie de fonctionnalités de chacun au niveau de l'animation uniquement.

⁷ www.eclairstudio.com

⁸ www.mikrosimage.fr

⁹ www.quintainindustries.com

¹⁰ www.disney.fr/

¹¹ www.pixar.com

Couvrant l'ensemble de la chaîne de production des animations 3D, ces logiciels, à l'exception de *Motion Builder*, permettent en outre de réaliser des animations faciales. Analysons donc comment ces systèmes répondent aux besoins spécifiques d'animation de visage.

Qu'il s'agisse de *Maya*, *XSI* ou encore *3DSMax*, la première étape concerne la création d'un modèle de visage conforme aux spécifications des créateurs, y compris sur les aspects d'animation. L'utilisateur doit construire un modèle de crâne/visage à l'aide d'interfaces interactives relativement complexes, qui permettent de spécifier manuellement les modèles de visage directement en 3D et qui font intervenir un grand nombre de paramètres. Les modèles géométriques sous-jacents se composent de surfaces NURBs ou de maillages 3D, avec des éléments de contrôle associés (points et courbes de contrôle, muscles et pseudo-muscles, cartes de profondeur,...). Notons que la topologie du modèle doit obéir à des contraintes et règles bien précises, pour répondre à un large spectre d'animations. En outre, des éléments constitutifs du visage (Figure 3.1) comme la bouche, les lèvres, la langue, les dents, les globes oculaires, les paupières doivent être modélisés par des composantes à part et intégrés de façon harmonieuse dans le modèle global.

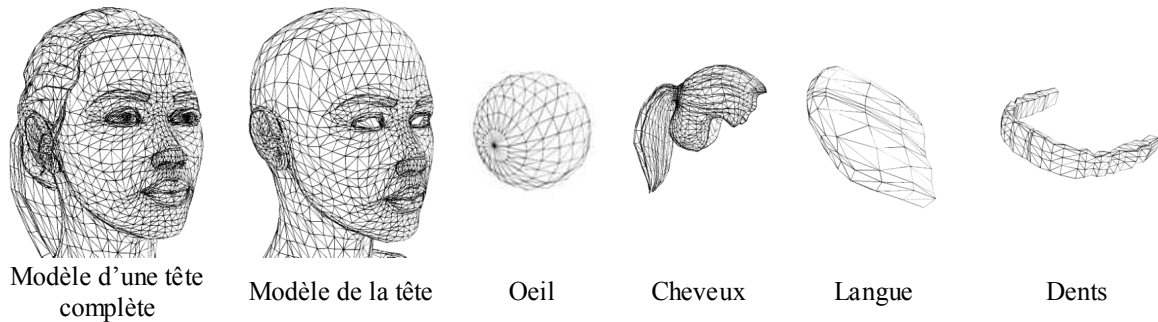


Figure 3.1 : Exemples d'éléments constitutifs du visage humain

À cela s'ajoute l'étape de spécification des attributs photométriques (images et textures) qui peuvent être classiquement associés aux modèles géométriques pour obtenir des personnages réalistes et conformes aux souhaits des créateurs.

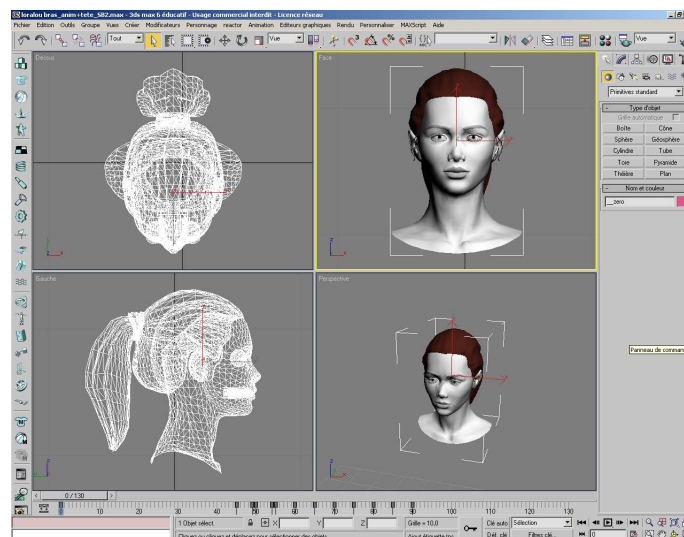


Figure 3.2 : Modèle du visage de Loralou dans le logiciel 3DS Max

Les manipulations nécessaires pour spécifier de façon complète un personnage requièrent des compétences spécifiques et souvent poussées en modélisation 3D et en infographie, nécessitant des formations dédiées pour les maîtriser. Dans ce contexte, la modélisation de personnages 3D animés devient aujourd'hui un métier à part entière et l'on assiste à un glissement progressif de la compétitivité créative à la compétitivité technologique.

Une fois le modèle créé et disponible, l'étape d'animation a pour objectif de générer un ensemble de poses clefs, correspondant à des expressions et/ou de visèmes (dans le cas du langage parlé) spécifiés en fonction de scénarios prédéfinis. Les séquences d'animation sont alors obtenues par des mécanismes d'interpolation entre les poses clefs.

Ne disposant pas d'outils dédiés d'animation faciale, les utilisateurs recourent à des méthodes généralistes par déformation de modèles 3D. Une première solution, d'une lourdeur considérable mais à résultat garanti, consiste à appliquer des manipulations de bas niveau directement sur le modèle 3D. Cela revient à déplacer, soit un par un, soit par groupe, les éléments constitutifs du modèle. Ces manipulations peuvent dans certains cas, comme celui des maillages polygonaux, être déclinées jusqu'au niveau des sommets individuels. Ce type de manipulation offre l'avantage d'une grande liberté de création, puisque aucun paramètre n'est prédéfini. Toutefois, les résultats dépendent fortement des connaissances, de l'expérience et de l'intuition du créateur. En outre, ce processus devient extrêmement lourd pour des modèles de visage de grand réalisme, en raison de la complexité des modèles sous-jacents, composés en général de milliers de sommets.

Notons que le processus doit être appliqué pour chaque pose souhaitée. Pour réaliser de longs métrages d'animation 3D, des milliers de poses 3D générées manuellement sont nécessaires. Cela conduit à des temps de production très importants qui expliquent les coûts afférents très élevés.

Pour alléger la quantité de travail nécessaire, quelques solutions sont proposées. La technique dite de « *Blend Shape* », offerte par les logiciels *Maya* et *XSI*, fait intervenir un ensemble de poses clefs prédéfinies du personnage, dites extrêmes et supposées disponibles (créées par l'utilisateur par la technique de base décrite ci-dessus). Notons que la topologie du modèle est inchangée pour l'ensemble des poses clés. Les poses clefs nécessaires sont construites à partir des poses extrêmes par interpolation dans l'espace de poses ainsi créé, à l'aide d'un ensemble de coefficients définissant la contribution de chaque pose extrême à la pose souhaitée. Cette méthode conduit à de bons résultats lorsque la base de poses extrêmes est suffisamment complète et que les poses souhaitées s'apparentent visuellement à celles de la base. Sa limitation principale est liée au caractère peu intuitif des paramètres de contrôle que sont les coefficients de pondération des poses prédéfinies. En général, cela limite fortement la gamme des poses générées.

Une dernière solution consiste à utiliser la méthode de *rigging*, servant plus généralement à l'animation de personnages virtuels et à l'adapter aux objectifs d'animation faciale. Dans ce cadre, l'utilisateur doit spécifier un *squelette d'animation*, structure qui regroupe les éléments de visage susceptibles de s'animer, en définissant les

différentes zones d'influence correspondantes, les coefficients d'appartenance, ainsi que des contraintes physiques de déformation et des élongations maximales permises. Des manipulateurs des os du squelette (Figure 3.3) sont ensuite définis à l'aide de formes simples qui permettent la déformation contrôlée du squelette et de la peau associée. Notons que, dans le cas d'une animation de visage, le squelette virtuel créé se retrouve complètement à l'intérieur du crâne et est ainsi difficilement accessible. En manipulant/déformant ces contrôleurs, la peau va suivre le champ de déformation et aboutira à des expressions/visèmes plus ou moins réalistes selon l'expérience et le savoir-faire de l'opérateur. Le contrôle des déformations reste toutefois trop élémentaire, peu intuitif et très long, ce qui représente la principale limitation de cette approche.

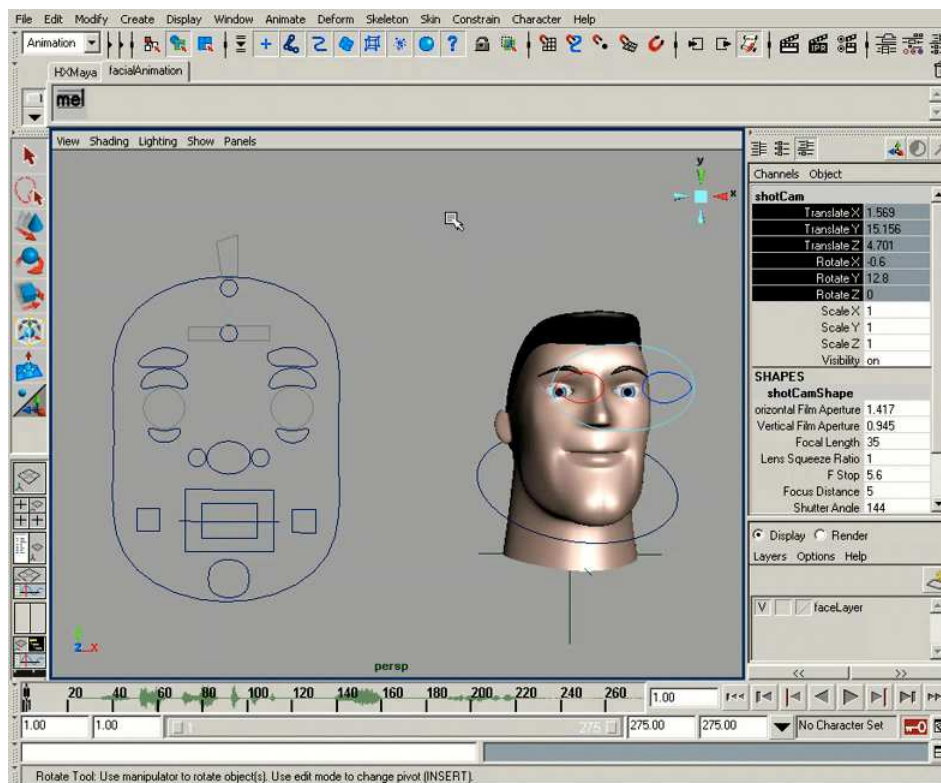


Figure 3.3 : Exemple d'utilisation de la technique de *rigging* appliquée à l'animation faciale dans le logiciel *Maya*

En conclusion, malgré la large gamme d'outils de modélisation et d'animation offerts, ces logiciels restent toutefois très limités en ce qui concerne l'animation faciale. Cela explique l'émergence relativement récente de logiciels dédiés. Analysons à présent les plus représentatifs de ces outils, en commençant par le système phare en animation faciale, appelé FaceRobot et proposé par la société Softimage.

3.2 Le système FaceRobot

Sorti au cours de l'année 2006, *FaceRobot* [FaceRobot] représente une véritable révolution au sein du domaine de l'animation faciale. Cet outil logiciel est développé

par la société Softimage¹² déjà présente sur le marché des logiciels 3D avec la solution de modélisation et d'animation *XSI* [XSI] et le plug-in *CAT* [CAT] pour le logiciel *3DS Max* d'Autodesk.

Dédié à l'animation faciale par poses clefs, *FaceRobot* se propose l'ambitieux objectif de devenir l'outil universel d'animation et de création de visages parlants. Pouvant interagir avec les différents outils professionnels présents sur le marché tant au niveau de la modélisation 3D avec *XSI*, *Maya*, *MotionBuilder* et *3DS Max* d'Autodesk, *Zbrush* de Pixologic et *BodyPaint 3D* de Maxon, qu'à celui du traitement d'image avec *Photoshop* d'Adobe.

L'objectif principal de *FaceRobot* est de fournir des outils d'animation faciale pour personnages hyperréalistes et réalistes (selon la classification établie au paragraphe 1.3). Les différentes animations possibles sont calibrées à travers un ou plusieurs modèles prédéfinis, décrivant de façon détaillée aussi bien les divers mouvements possibles que la structure des visages humains. Les résultats obtenus sont naturels et organiques, et peuvent atteindre des niveaux de détail très fins (pouvant inclure par exemples des plis ou des rides). Ils permettent de créer de personnages pouvant combiner parole et expression, d'une façon hautement réaliste.

Préalablement à toute animation, *FaceRobot* requiert l'importation d'un modèle 3D de visage arbitraire. Dans ce but, il utilise l'un des logiciels précédemment mentionnés (*XSI*, *Maya*, *3DS Max*,...), avec le quel il assure la compatibilité. Ce modèle doit représenter un visage humain dans une expression neutre. Intuitivement, cette expression correspond à un état de relâchement des muscles faciaux.

En même temps, le logiciel met à la disposition des utilisateurs un modèle de visage prédéfini dit de référence, qui inclut une modélisation complète de visage avec une peau reliée à un ensemble de muscles, des caractéristiques faciales, des articulations et un ensemble de points/courbes/régions caractéristiques, qui décrivent aussi bien la morphologie du visage que des éléments de contrôle de l'animation. Le modèle de référence générique sert ainsi de guide pour enrichir le modèle utilisateur à l'état vierge d'éléments d'animation faciale, par un processus de mise en correspondance. Plus précisément, il s'agit d'un processus de construction appelé « *picking* ». Le modèle de référence est visible sous la forme d'une vignette qui fait apparaître au fur et à mesure différents ensembles de points caractéristiques, correspondant aux caractéristiques faciales prédéfinies. L'utilisateur indique l'emplacement de ces points sur le maillage à animer. Il réalise ainsi une mise en correspondance entre le visage de référence et son modèle.

Notons que le maillage utilisateur doit obéir à un ensemble de règles de construction. Il doit typiquement être composé d'un crâne, de deux yeux, de deux lèvres et de deux rangées de dents, supérieure et inférieure.

Le logiciel permet de spécifier s'il s'agit d'un visage humain symétrique ou asymétrique. Des extensions, de complexité croissante, à ces deux types de modèle de visage sont également envisagées.

Le nombre de points à spécifier est d'une trentaine pour un visage asymétrique et de dix-huit pour un visage symétrique. Ces points décrivent l'emplacement des différents éléments du visage et servent de repères de contrôle. Ils sont similaires aux FDP (*Facial Animation Parameters*) du standard MPEG-4 (cf. paragraphe 2.5).

¹² www.softimage.com

Plus précisément, ces repères de contrôle sont les suivants :

- la pointe du nez,
- la base des narines,
- le coin interne des yeux,
- le centre du bord supérieur des yeux,
- le coin externe des yeux,
- le centre du bord inférieur des yeux,
- le coin externe des sourcils,
- la base des cheveux,
- le point inférieur d'accroche des oreilles,
- l'emplacement de l'articulation de la mâchoire et son correspondant au niveau du cou,
- le côté extérieur du menton,
- le milieu de la lèvre inférieure,
- le milieu de la lèvre supérieure,
- les commissures des lèvres,
- la base inférieure de la tête au dessous du menton,
- la base du cou au niveau de la pomme d'Adam,
- l'artère carotide,
- un point sur chaque côté du cou,
- un point sur la nuque,
- des points derrière les oreilles et sur la pointe supérieure des oreilles.

Un sous-ensemble de ces éléments de contrôle correspondant à la partie du visage est illustré Figure 3.4.

Une fois l'ensemble de ces paramètres spécifié par l'utilisateur, un premier ajustement entre les paramètres du modèle de référence et ceux du modèle utilisateur est effectué. Cette étape est relativement rapide (quelques dizaines de secondes sur un processeur P4 à 2GHz) et permet de générer un ensemble descriptif initial du personnage que l'on veut animer, composée :

- d'une estimation de la rotation de la mâchoire,
- d'une estimation des différentes zones affectées par les mouvements de la mâchoire,
- des paramètres de la peau,
- des régions musculaires,
- des degrés possibles de rotation du cou,
- d'un ensemble de courbes définissant les principaux éléments physiologiques du visage.

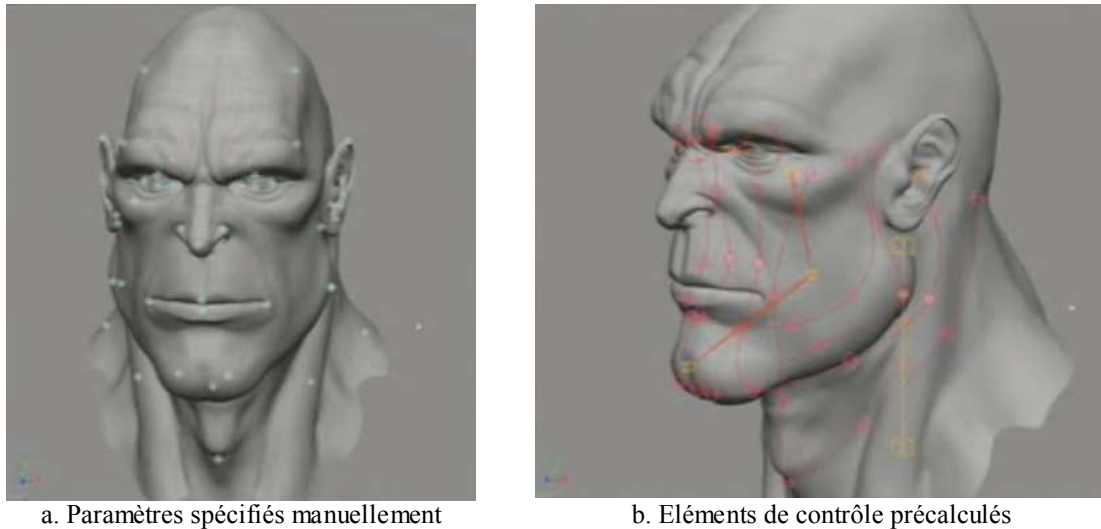


Figure 3.4 : Contrôle de l'animation faciale dans le logiciel *FaceRobot*

L'ensemble de ces caractéristiques peut être à ce stade repris, ajusté et raffiné par l'utilisateur.

Une fois satisfait par cette première mise en correspondance, l'utilisateur lance la procédure de calcul final qui produit comme résultat un modèle complet, prêt pour l'animation. Ce modèle enrichi comporte un ensemble d'éléments de contrôle, déterminés automatiquement à partir du modèle de référence qui guideront les futures déformations. Trois types d'éléments de contrôle sont considérés : points (0D), courbes (1D) et régions (2D). Cette étape, plus coûteuse en temps de calcul nécessite environ 5 à 10 minutes de calcul effectif.

Le système permet ensuite de générer des poses clefs et ce, soit manuellement (l'utilisateur devant manipuler les points de contrôle), soit à partir de visages réels, à l'aide des mécanismes de capture de mouvement intégrés dans le système.

En ce qui concerne la manipulation manuelle du modèle, les trois niveaux suivants sont disponibles : par points de contrôle, par points du maillage ou par zones. Dans le premier cas, les exemples types sont ceux correspondant au mouvement de la mâchoire ou à la fermeture des paupières. Il est possible de contrôler l'ouverture de la bouche ou l'avancée du menton du modèle simplement en manipulant un point situé au milieu du menton.



Figure 3.5 : Mouvement du menton par manipulation d'un seul point dans le logiciel *FaceRobot*

Pour une maîtrise plus précise, deux ou plus de ces points peuvent être sélectionnés, l'ensemble formé est manipulé dans l'espace de la même manière. L'ensemble de ces déformations utilise les courbes préalablement définies sur le modèle de référence et associées au modèle de l'utilisateur par le processus de mise en correspondance décrit ci-dessus. Cela s'applique également à des attributs de la peau et aux zones musculaires qui permettent de générer des plis ou des rides. Ces effets peuvent être accentués en utilisant un outil spécifique de dessin sur une ligne virtuelle joignant plusieurs arêtes.

Enfin, la manipulation par zones engendre des modifications essentiellement sur la position de la peau par rapport à un crâne virtuel et permet l'ajout de détails réalistes. Un ensemble de régions de contrôle, représentées sur le visage de référence, est illustré Figure 3.6.

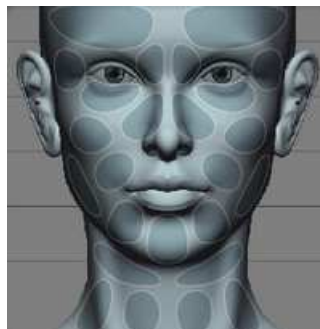


Figure 3.6 : Zones pré calculées (modèle de référence) pour la manipulation par régions dans le logiciel *FaceRobot*

Dans certains cas des contraintes de déformation sont spécifiées afin de conditionner correctement les animations. L'exemple type est celui des yeux qui doivent rester à l'intérieur de leurs orbites associées.

La solution alternative à cette interaction manuelle s'appuie sur un système intégré de capture de mouvement. Fondée sur des techniques avancées de vision par ordinateur, elle requiert l'utilisation d'un ensemble de marqueurs pour caméras infrarouges, placés

sur l'acteur réel et correspondant aux 30 points caractéristiques de visages spécifiés dans *FaceRobot*. La Figure 3.7 illustre un tel système de capture de mouvement.



Figure 3.7 : Exemple d'un système de capture de mouvement associé à *FaceRobot*. A gauche : visage humain réel avec marqueurs superposés

De façon générale, quelle que soit la technique de production utilisée, par manipulation manuelle ou par capture de mouvement, *FaceRobot* permet d'obtenir rapidement des résultats. Les animations obtenues sont agréables visuellement, lisses, sans artéfacts et d'un haut degré de réalisme (Figure 3.8).



Figure 3.8 : Exemples d'expressions obtenues par le logiciel *FaceRobot*

Pour le moment, la seule contrainte imposée par le système concerne le caractère humanoïde des personnages modélisés. En effet, le modèle facial utilisé est spécifiquement adapté à ceux-ci. Le respect très strict de l'étape de spécification des points caractéristiques représente d'ailleurs une de clefs du succès du système. Dès qu'un personnage virtuel présente de caractéristiques qui ne se prêtent pas à ces éléments de spécification/identification, le système montre ses limitations.

La grande force du système concerne l'utilisation astucieuse d'un ensemble de techniques avancées et en même temps adaptées aux objectifs d'animation faciale de

personnages humanoïdes, intégrées dans une interface qui reste simple d'utilisation, intuitive et ergonomique.

Un autre point fort du système concerne son interfaçage aisé la plupart des grands logiciels de modélisation 3D (Maya, XSI, 3DSMax...). Cela favorise l'intégration de *FaceRobot* aussi bien dans les chaînes de fabrication de films d'animation 3D que dans celles de production de jeux vidéos.

FaceRobot est par définition un logiciel hautement professionnel, dédié à un marché très spécialisé. En raison de son coût élevé (80keuros), il est principalement utilisé pour de grands projets, et par les grandes maisons de production.

Avec sa riche gamme de fonctionnalités avancées, *FaceRobot* représente en quelque sorte l'archétype du logiciel d'animation 3D. Contrairement aux méthodes d'animation traditionnelles 2D, l'interaction avec l'utilisateur est ici entièrement 3D. Des compétences en modélisation et infographie 3D sont nécessaires pour une utilisation optimale de la plate-forme.

A l'opposée de cette approche, le système *ToonBoom*, décrit dans le paragraphe suivant, reste entièrement 2D, en s'efforçant de respecter au maximum les méthodes purement 2D des créateurs de dessins animés traditionnels.

3.3 ToonBoom

Face à la montée actuelle des techniques d'animation 3D, plusieurs solutions logicielles 2D restent fidèles aux techniques de fabrication traditionnelle des films d'animation. Le logiciel *ToonBoom* [ToonBoom] de la société ToonBoom Studio s'inscrit dans cette démarche, en offrant un outil complet pour une animation dite « zéro papier ». Cela correspond à une informatisation complète des chaînes de pré-production et de production du dessin animé, intégrant des solutions adaptées à chaque étape du processus de fabrication, depuis la création du personnage et l'élaboration du *storyboard*, en passant par les étapes d'animation et de mise en couleur et jusqu'à l'exportation finale en séquences d'animation.

ToonBoom vise un large spectre d'applications possibles : production de films d'animation, création d'animations pour le web, télévision, ou encore jeux sur terminaux mobiles et téléphones portables.

Dans *ToonBoom*, l'ensemble des manipulations/interactions requises est entièrement réalisé en 2D.

Le principe de construction de personnage adopté par *ToonBoom* repose sur un modèle multi-couches, lié à un processus de création itératif. Chaque personnage est représenté par un ensemble de couches superposées. La couche de base correspond à une ébauche préliminaire grossière, sur laquelle plusieurs couches de raffinement sont ajoutées pour spécifier de façon de plus en plus précise les éléments constitutifs du personnages (corps, bras, jambes, tête, visage, bouche, yeux...). Cette approche par couches multiples offre l'avantage de la réutilisation : lors de l'étape d'animation, seules les couches correspondant aux sous-parties en mouvement sont redessinées. Notons que l'ensemble des dessins est représenté dans un format vectoriel, ce qui offre l'avantage de la continuité .

En ce qui concerne l'étape d'animation, *ToonBoom* repose sur la construction de

poses clés, avec un calcul automatisé mais modifiable de toutes les poses intermédiaires. Bien que des outils évitant de reproduire les éléments invariants à chaque trame existent, dans *ToonBoom* chaque pose clef doit toutefois être entièrement spécifiée.

Ces principes génériques s'appliquent naturellement au visage et à ses éléments constitutifs. En conséquence, aucun outil dédié spécifiquement à l'animation faciale n'est proposé par *ToonBoom*, celle-ci étant réalisée avec les méthodes génériques précédemment mentionnées. En revanche, un outil de synchronisation de lèvres est proposé.

Cette étape, nécessaire dans la retranscription du dialogue des personnages, est souvent une des tâches les plus fastidieuses d'un travail d'animation. Elle fait intervenir deux éléments distincts qui nécessitent d'être corrélés : d'une part, la bande sonore du dialogue et d'autre part, la forme de la bouche du personnage.

Le principe adopté par *ToonBoom* repose sur une analyse du signal vocal, qui vise à déterminer tout d'abord à partir de la bande sonore l'ensemble des phonèmes, puis à définir, pour chaque phonème, la forme visuelle correspondante de la bouche, appelé *visème*.

Pour cela, *ToonBoom* propose deux outils différents.

Le premier réalise une classification de chaque phonème en un ensemble de huit phonèmes standards ou prototypes, correspondant à une approximation simplifiée des phonèmes possibles (Figure 3.9). Le système renvoie à l'utilisateur pour chaque phonème une forme de bouche, représentée à l'aide d'un modèle de référence, comme ceux de la Figure 3.10. Il revient alors au dessinateur de reproduire le phonème généré par le système, qui sert de guide, sur son propre personnage.



Figure 3.9 : Les huit phonèmes standard d'animation utilisés par *ToonBoom* [ToonBoom]

La Figure 3.11 illustre un exemple d'utilisation de cet outil, avec le signal sonore en mode oscilloscope et les huit phonèmes standards présentés en bas à droite.

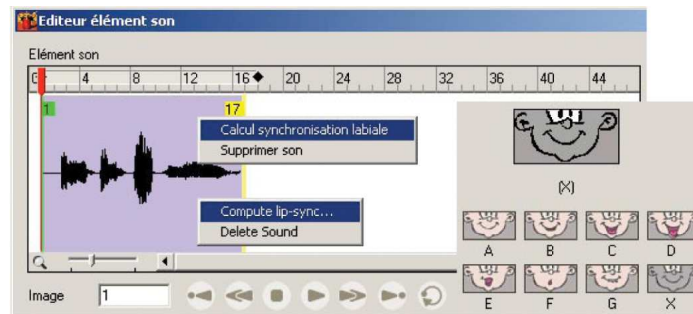


Figure 3.10 : Outil de synchronisation labiale du logiciel *ToonBoom*

Le deuxième outil est quasiment similaire, à un détail près : l'utilisateur attribue ici depuis le début ses propres dessins à chaque phonème. Cela permet de générer automatiquement la séquence d'animation depuis le moment même de l'analyse du dialogue. Cette solution est illustrée Figure 3.11.

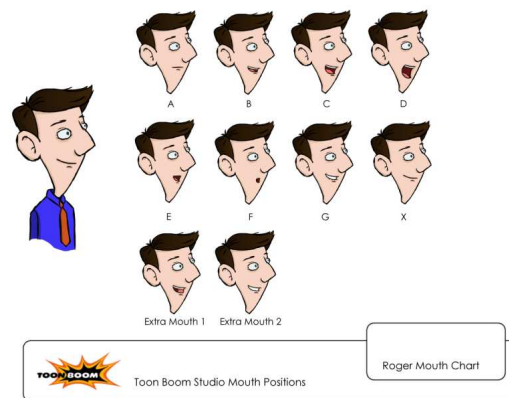


Figure 3.11 : Exemples de dessins de bouche réalisés à partir du logiciel *ToonBoom*

Les deux méthodes permettent de réduire le temps dédié à cette tâche de synchronisation labiale par rapport à une analyse manuelle de la bande son et la mise en correspondance des sons sur la base de phonèmes.

Le logiciel *ToonBoom* offre une solution très complète, entièrement 2D et respectant la structure traditionnelle de production des films d'animation 2D, tout en proposant aux créateurs la possibilité d'exploiter leurs compétences artistiques. Le gain de temps évident obtenu a un impact important sur les coûts de production afférents.

Toutefois, *ToonBoom* n'a pas vocation à fournir une aide spécifique à l'animation faciale. De plus, l'ensemble des méthodes de calculs utilisées reste entièrement 2D, avec les différentes contraintes et limitations que cela implique (cf. 1).

3.4 Les solutions Di-O-Matic

L'entreprise Di-O-Matic [DiOMatic] s'est spécialisée dans l'édition de modules d'animation en tant qu'applications autonomes ou intégrées à des logiciels de

modélisation et animation 3D comme *3DS Max*, *Maya* ou *XSI*. Elle propose plusieurs solutions interagissant avec l'animation faciale, dont les principales sont *Facial Studio*, *Voice-O-Matic* et *Morp-O-Matic*.

i. Le logiciel *Facial Studio*

Ainsi, *Facial Studio* permet de créer des visages 3D, de type réaliste ou cartoon, mais aussi de gérer leurs déformations, le placage de textures et de préparer le terrain pour l'animation faciale. Le logiciel intègre environ 500 paramètres de contrôle, plus ou moins interdépendants et regroupés en 18 sous-sections : forme, animation, déformation, dents, langue, front, menton, nez, oreilles, yeux, cou, mâchoire, sourcils, bouche, joues, personnalisation Plusieurs résolutions du maillage sont également disponibles, ce qui permet l'ajustement plus ou moins précis des valeurs des paramètres par rapport au niveau de détail souhaité.

En premier lieu, il est nécessaire de créer le personnage à animer. Bien naturellement, le système supporte l'importation de modèles 3D créés avec de logiciels dédiés de modélisation 3D comme *Maya* ou *3DSMax*. Comme dans le cas de *FaceRobot*, ici encore le modèle doit obéir à un ensemble de règles de construction. En particulier, il doit être composé d'une tête, avec deux yeux, deux lèvres, deux rangées de dents et une langue.

La deuxième approche, plus originale, consiste à utiliser un modèle de référence, intégré à *Facial Studio*, que l'utilisateur peut modifier et personnaliser, en faisant varier un ensemble de paramètres de contrôle de la morphologie du modèle. Ces paramètres globaux de forme, inclus dans la section nommée « Shape » (Figure 3.12), jouent sur des caractéristiques visuelles associés intuitivement aux concepts génériques tels que le sexe, l'origine ethnique, la corpulence, l'âge et enfin la nature de l'animation souhaitée (réalisme, cartoon, caricature). Indirectement, la variation de ces différents coefficients a une influence sur les valeurs de certains paramètres associés à d'autres sections. Par exemple, si la catégorie ethnique est asiatique, les paramètres de contrôle de la forme des yeux vont être automatiquement modifiés. L'ensemble de ces différents paramètres est à 100% personnalisable, donnant ainsi une grande liberté de création à l'utilisateur.



Figure 3.12 : Modélisation d'un visage à partir d'une modification de sa structure morphologique sous *Facial Studio*

Plus récemment, le logiciel a été enrichi d'un module appelé « Bonus », qui permet de modéliser et de personnaliser des visages non plus humains, mais des têtes d'animaux (singe, chat, chien...).

L'ajustement des paramètres globaux permet d'obtenir rapidement un premier modèle personnalisé servant de support pour les éléments physiologiques de visage. Les autres sections permettent notamment de raffiner davantage cette première ébauche. Il s'agit ici de déformer, d'ajuster et de contrôler les principales caractéristiques faciales tels le nez, les narines, la bouche, les yeux, les oreilles, les joues, le menton, le cou, les sourcils, les dents, la langue et les globes oculaires. Pour des soucis d'ergonomie, l'interaction avec l'utilisateur est réalisée à l'aide de différents curseurs, associés à des caractéristiques de forme spécifiques de chaque élément physiologique.

De plus, des ensembles de couleurs prédéfinies spécifiques à chacun des sous-éléments du visage sont déjà inclus, chaque teinte étant modifiable. *Facial Studio* contient aussi une base de données de textures de visages humains aux caractéristiques variables (âge, ethnie, sexe...). Certaines sont construites sur plusieurs couches, permettant d'isoler certains éléments en faisant varier le critère d'opacité.

Enfin, en ce qui concerne l'animation du modèle, elle est fondée sur une procédure de construction de poses clefs. Adoptant la même philosophie de construction, les poses clefs sont créées à l'aide d'une palette d'outils regroupés dans une section dédiée. *Face Studio* intègre un éventail complet d'expressions et de phonèmes pré-définis et représentés à l'aide d'une combinaison de paramètres contrôlant l'action d'un ensemble de pseudo-muscles. Ces derniers sont par ailleurs modifiables individuellement, de manière symétrique ou asymétrique.

Accessoirement, *Face Studio* inclut aussi la technologie du *photomatching*, qui permet de créer un visage à partir de simples photographies en quelques minutes.

Un deuxième module logiciel développé par Di-O-Matic, qui par ailleurs peut être couplé avec *Face Studio*, est *Voice-O-Matic*.

ii. Le logiciel *Voice-O-Matic*

Dédié à la synchronisation labiale, *Voice-O-Matic* permet la gestion à la fois de la bande sonore et des différents modèles 3D, en adoptant une approche en cinq étapes.

L'utilisateur doit posséder le maillage de son personnage ainsi que l'ensemble de ses différents états correspondant chacun à un phonème particulier.

Pour cela, *Voice-O-Matic* dispose, pour une quarantaine de phonèmes, d'une description des déformations 3D associées à la prononciation de chacun. L'utilisateur a la possibilité de les utiliser afin de créer, à partir du maillage de son personnage, les maillages cibles représentant les visèmes souhaités. Ces paramètres peuvent être applicables isolément ou bien associés par groupe.

Une fois les poses cibles créées, la synchronisation labiale peut enfin débuter avec l'importation d'un fichier sonore dans une langue donnée, qui est visualisé sous forme d'onde. La seconde étape, optionnelle, correspond à l'importation d'un texte de sous-titrage qui vise à améliorer la reconnaissance syllabique. L'utilisateur associe ensuite à chaque son un maillage cible préalablement créé. Enfin, les deux dernières étapes, complètement automatiques, permettent de déterminer les visèmes associés aux phonèmes.

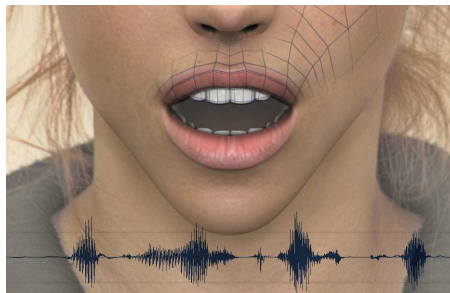


Figure 3.13 : *Voice-O-Matic*, module de synchronisation labiale pour *3DS Max*

iii. Le module de morphing *Morp-O-Matic*

Dépassant le cadre *stricto sensu* d'un outil d'animation faciale, *Morp-O-Matic* est un logiciel générique de morphing, opérant dans l'espace à la fois des formes 3D et des matériaux (textures). Ses performances lui permettent non seulement d'être trois à quatre fois plus rapide que l'outil correspondant du logiciel *3DS Max*, mais aussi d'accepter un nombre illimité de modèles cibles. Compatible avec le module *Voice-O-Matic*, une de ses particularités est l'utilisation d'une technique dépendant du point de vue.

Les différentes solutions proposées par Di-O-Matic sont à l'évidence moins performantes que celles du *FaceRobot*. Elles présentent en revanche l'avantage d'un coût beaucoup plus abordable (Tableau 3.3) et d'une utilisation relativement simple. Toutefois, malgré les outils prédéfinis intégrés, la quantité d'interaction avec l'utilisateur requise reste très importante et la créativité relativement restreinte.

Face à ces grands systèmes commerciaux qui dominent le domaine de l'animation faciale, d'autres systèmes proposent, à une échelle plus modeste, des solutions spécifiques, qui peuvent être utiles pour certaines applications bien particulières.

3.5 Autres logiciels ou modules d'animation faciale

Mentionnons tout d'abord, les solutions logicielles 2D couvrant des étapes précises de la chaîne de fabrication d'animations, qui visent à compléter les fonctionnalités de *ToonBoom*. C'est le cas d'*Anime Studio* de E-frontier 5 [Efrontier], de *Plastic Animation Paper* [Plastic], d'*Animo* de Cambridge Animation Systems [Animo], de *Mirage Pro +* de Bauhauss Software [Mirage] et de *Ktoon* de Toonka Films [Toonka].

Depuis longtemps impliqué dans le domaine de l'animation faciale, *Famous3D* [Fam3D] propose des solutions personnalisées à base de *kits* d'outils. Ces ensembles logiciels fournissent des modèles de base, des techniques de capture de mouvement, ainsi que des outils de synchronisation labiale.

Très récemment, *Iclone Studio* de *Reallusion* [Iclone] offre une possibilité de création rapide d'un visage à partir d'une base. Chacune des caractéristiques faciales est paramétrée, entraînant une personnalisation possible mais limitée. L'animation générée est fondée sur des déformations pseudo-musculaires.

Mentionnons encore *FaceGen Modeler* [FaceGe] (Figure 3.14), qui permet de créer rapidement de visages humanoïdes réalistes à partir de photographies ou d'un modèle de référence. Le visage choisi est modifiable à travers une série de contrôleurs permettant la gestion de caractères, avec une cinquantaine de paramètres liés à l'âge, le sexe, l'appartenance à un groupe ethnique ainsi que la forme des caractéristiques faciales. Ces paramètres s'accompagnent de 36 expressions, visèmes et modificateurs prédéfinis, qui offrent la possibilité de créer rapidement des animations personnalisées.

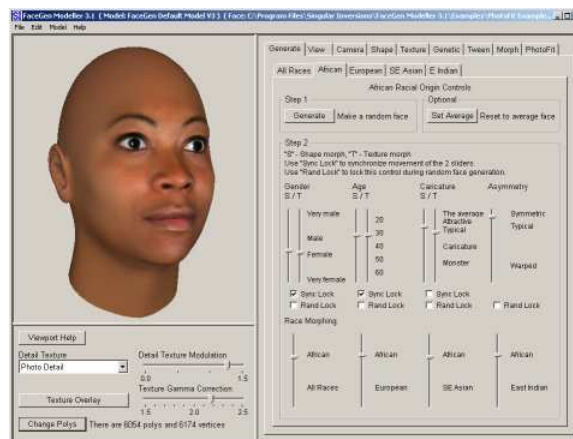


Figure 3.14 : Capture d'écran du logiciel *FaceGen Modeler*

Enfin, dans le domaine de la synchronisation labiale, plusieurs outils de performances et coûts variés sont proposés. Citons ici le logiciel *LipService*¹³ par Joe

¹³ <http://www.lbrush.com>

Alter pour *3DS Max*, *Mimic Pro*¹⁴ intégrable à *Poser* ou *LightWave*, *Annosoft*¹⁵ dédié aux jeux vidéos (utilisable de manière autonome ou sous forme de SDK), *B3D Studio*¹⁶ de Brilliant Digital, *Crazy Talk 4*¹⁷ de Reallusion, *Face FX*¹⁸ d'OC3 Entertainment, et *MagPie Pro*¹⁹ de Third Wish Software & Animation.

Mentionnons aussi l'existence de quelques produits gratuits comme *Jlipsync*²⁰, *Papagayo*²¹ de Lost Marble ou *BlenderLipSynchro* utilitaire du logiciel *Blender*²².

Ces différents logiciels utilisent pour modéliser les caractéristiques faciales des formats propriétaires et plus ou moins *ad-hoc*. Cela limite fortement les possibilités de réutilisation des contenus créés. Afin de s'affranchir de cet inconvénient, une autre catégorie de logiciel s'appuie sur la norme MPEG-4 pour générer des descriptions standards et interopérables.

3.6 Logiciels MPEG-4

Pionnière dans le domaine de la standardisation audio-visuelle, la norme MPEG-4 (*cf.* paragraphe 2.5) standardise un ensemble de paramètres de visage et d'animation faciale. Historiquement, cette norme visait des applications de visioconférence à très bas débits, mais peut être appliqué dans un contexte plus général et notamment à des objectifs de synthèse et de production de séquences d'animation faciale.

Dans ce cadre, mentionnons les logiciels :

- *iFace [iFace]* (*Interactive Face Animation - Comprehensive Environment*) de Interactive Media Technologies,
- *Face2Face [F2F]* de la société Face2Face Animation,
- *Visage | interactive* ou *Visage | SDK* de Visage Technologies [Visag].

Ces logiciels exploitent les FAPs (MPEG-4 *Facial Animation Parameters*), définis pour des visages humanoïdes ou assimilés, en animation réaliste. Pour créer des animations, ils s'appuient soit sur des techniques de capture de mouvement à partir de vidéos ou d'images de texture 2D, soit sur des interfaces utilisateur pour une manipulation directe des paramètres. Bien que très aisés d'utilisation, ils restent très limités en termes de possibilités de création.

¹⁴ <http://www.daz3d.com>

¹⁵ <http://www.annosoft.com>

¹⁶ <http://www.brilliantdigital.com>

¹⁷ <http://www.reallusion.com>

¹⁸ <http://www.oc3ent.com>

¹⁹ <http://www.thirdwishsoftware.com>

²⁰ <http://jlipsync.sourceforge.net>

²¹ <http://www.lostmable.com>

²² <http://www.blender.org>



Figure 3.15 : Exemples d'expressions de visages obtenus par le logiciel *iFace*

Pour compléter ce panorama de logiciels et d'outils d'animation faciale, analysons brièvement les systèmes expérimentaux et les prototypes de recherche existants.

3.7 Prototypes de recherche et systèmes expérimentaux

Il existe un grand nombre de réalisations de laboratoires pour animer des visages. L'objectif de ce paragraphe n'est pas de lister de manière exhaustive l'ensemble de ces systèmes, mais d'en dégager les principales caractéristiques.

Nom	Propriété intellectuelle	Description succincte	Caractéristiques de l'animation faciale utilisée			
			Type de contrôleurs	Type de données en sortie	Type de déformation utilisée	Usage
Synthesizing Realistic Facial Expressions from Photographs	[Pigh98]	Création d'un ensemble de poses clés d'expressions différentes à partir de photos	Photos	3D	Morphing	Réaliste
Expression Clonning	[Noh01]	Transfert d'expressions faciales d'un modèle 3D à un autre de topologie différente ou pas	Points caractéristiques + vecteurs de mouvement	3D	RBF	Réaliste
InterFace: a Real Time Facial Animation System	[Wey98]	Génération d'expressions à partir d'un ensemble de poses extrêmes prédéfinies du personnage	Coefficients d'implication des différentes poses extrêmes	3D	Morphing	Réaliste/cartoon
Face Poser: Interactive Modeling of 3D Facial Expressions Using Model Priors	[Lau07]	Création d'expressions faciales en combinant une information 2D et un modèle antérieur construit à partir d'une base de données pre-enregistrée d'expressions faciales	Points ou courbes 2D	3D	-	Réaliste
Reanimating Faces in Images and Video	[Blanz07]	Application sur un visage quelconque 2D (photos, vidéos) d'une expression 3D déduite d'un apprentissage préalable	Points caractéristiques	2D	-	Réaliste
Subtle Facial Animation Transfer from 2D Videos to 3D Faces with Laplacian Deformation	[Zhao07]	Transfert de l'animation faciale d'une vidéo à un modèle 3D par utilisation des vecteurs de déplacements de certains points caractéristiques comme correspondance et points de contraintes pour la déformation	Vidéo	3D	Déformation laplacienne	Réaliste
CharToon	[Ruttk99]	Système de création et animation de visages 2D	Dessin vectoriel ou réutilisation d'un animation existante	2D	Interpolation	Cartoon
Sketching Articulation and Pose for Facial Animation	[Chang06]	Créations d'expressions faciales contrôlées par des courbes sources et cibles qui interagissent avec un squelette	Courbes 2D+squelette+région d'intérêt	3D	Méthode interne	Réaliste

Tableau 3.1 : Récapitulatif des réalisations liées à l'animation faciale dans le monde de la recherche

Sketching Facial Expressions	[Nata07]	Création d'expressions faciales à partir de dessins 2D Utilisation d'une représentation sémantique du trait de crayon	Courbes 2D	3D	-	Réaliste/cartoon
A comic emotional expression method and its applications	[Tana99]	Créations d'expressions faciales très simplifiées	Points	3D	-	Cartoon/Manga
Hierarchical Retargetting of Fine Facial Motions	[Na04]	Transfert d'expressions faciales multirésolution	3D + points caractéristiques	3D	RBF	Réaliste
Vision-based Control of 3D Facial Animation	[Chai03]	Création d'expressions faciales grâce à des informations précalculées par capture de mouvement et guidées par analyse de vidéo	Motion capture+ vidéos	3D	-	Réaliste
A Generic Framework for Efficient 2D and 3D Facial Expression Analogy	[Song07]	Transfert d'expressions faciales de source quelconque (Image 2D ou modèle 3D) vers une cible quelconque aussi	Points caractéristiques	2D ou 3D	Méthode interne	Réaliste
Mpeg-4 Facial Animation	[Preda04, Preda02b]	Description du standard Mpeg-4 pour l'animation faciale	Points caractéristiques	3D	Méthode interne	Réaliste

Tableau 3.2 : Récapitulatif des réalisations liées à l'animation faciale dans le monde de la recherche (Suite du Tableau 3.1)

Outre ces outils dédiés à l'animation faciale, mais dans un contexte d'interface mixte, Takeo Igarashi [Igara99] a réalisé un rapprochement efficace entre des dessins 2D et une modélisation 3D. Dans son outil nommé *Teddy* ou dans celui plus récent *SmoothTeddy*, les dessins en entrée sont bien particuliers puisque des enfants peuvent les concevoir : il suffit de tracer le contour du volume pour que celui-ci soit interactivement déduit par le système selon un principe d'expansion du contour selon des axes. Il est alors possible de creuser, couper ou déformer ce volume, ainsi que de lui ajouter des extrusions à l'aide de gestes et des tracés simples.



Figure 3.16 : Teddy : outil de création de formes 3D à partir de contours 2D

Toutefois, même s'ils permettent de produire intuitivement des modèles simples et libres, ces travaux restent toujours limités car produisant des modèles élémentaires (patatoïdes) et/ou imprécis et ne sont pas adaptés au contexte de cette thèse.

3.8 Discussion et analyse comparée

Cette revue des systèmes logiciels d'animation faciale montre la domination ses plates-formes professionnelles dédiées à des animations réalistes et hyperréalistes de personnages à physiologie anthropomorphe.

Le Tableau 3.3 résume les principales plates-formes logicielles présentées et discutées et en souligne de façon synthétique principes, avantages, limitations et coûts afférents.

Nom	Type de logiciel - indépendant - librairie - plug-in	Dédié à l'animation faciale	3D/2D	Prix (€, HT)	Système utilisé pour l'animation Faciale
<i>FaceRobot</i>	Indépendant	Oui	3D	13000(version de base)	Pseudo-musculaire, manipulation intuitive
<i>ToonBoom</i>	Indépendant	Non	2D	270	Dessin vectoriel
<i>Face Studio</i>	Indépendant ou plug-in	Oui	3D	520 (plug-in)	Paramétrique
<i>Voice-O-Matic</i>	Plug-in	Oui	3D	260	
<i>Anime Studio</i>	Indépendant	Non	2D	70	Dessin Vectoriel
<i>Plastic Animation Paper</i>	Indépendant	Non	2D	600	Dessin Vectoriel
<i>Mirage Pro +</i>	Indépendant	Non	2D	-	Dessin Vectoriel
<i>Ktoon</i>	Indépendant	Non	2D	0	Dessin Vectoriel
<i>Famous3D</i>	Indépendant	Oui	3D	-	
<i>Iclone</i>	Indépendant	Non	3D	125	Paramétrique & Pseudo-musculaire
<i>FaceGen Modeller</i>	Indépendant	Oui	3D	200	Paramétrique
<i>iFace</i>	Indépendant	Oui	3D	0	Paramétrique
<i>Face2Face</i>	Indépendant	Oui	3D	-	Paramétrique
<i>3DS Max</i>	Indépendant	Non	3D	4500	Manuel
<i>Maya</i>	Indépendant	Non	3D	7300	Manuel/ BlendShape/ rigging
<i>Poser</i>	Indépendant	Non	3D	189	Manuel
<i>XSI</i>	Indépendant	Non	3D	3500	Manuel/ BlendShape/ Rigging
<i>xface</i>	Librairie	Oui	3D	0	Paramétrique

Tableau 3.3 : Principaux logiciels d'animation commerciaux : principes et performances comparés

Dans l'ensemble des systèmes, la déformation des modèles joue un rôle central pour générer des poses clefs correspondant à des expressions et à des visèmes. Elle met en œuvre des caractéristiques faciales variées, contrôlées par des paramètres associés à des ensembles de points, de courbes ou des régions. Certains systèmes intègrent la possibilité de plaquer des muscles ou des pseudo-muscles, issus de modélisations physiques plus ou moins avancées et conformes à la réalité.

Les déformations sont générées soit, par des manipulations interactives des éléments de contrôle, soit par des systèmes de capture de mouvement à partir de personnages réels, d'images de texture 2D ou encore, à l'aide de techniques de vision par ordinateur à partir de vidéos.

Dans ce cadre, notons que la manipulation directe est en général très coûteuse en temps de production, nécessitant une interaction utilisateur laborieuse. Certains systèmes paramétriques possèdent plus de 500 paramètres à contrôler, ce qui rend le processus de création extrêmement lourd.

Quant à l'acquisition de poses à partir de visages réels, que ce soit dans un contexte de capture de mouvement ou d'analyse automatique d'image, elle permet de réduire considérablement les temps et les coûts de fabrication. En revanche, elle montre rapidement ses limites dès qu'il s'agit de création en dehors de la sphère classique de l'animation réaliste. Cela est très contraignant, en particulier dans le cas des dessins animés, où la créativité des auteurs s'exprime pleinement au travers de poses exagérées et souvent irréalistes, impossibles à créer avec de tels outils.

Enfin, la plupart de ces logiciels nécessite des manipulations de modèle directement en 3D dans des environnements souvent complexes, ce qui conduit à une interaction longue et laborieuse. Les quelques systèmes 2D existants, dont *ToonBoom* est le principal représentant ne possèdent en revanche pas d'outils dédiés à l'animation faciale.

De cette analyse, il ressort qu'il n'existe pas aujourd'hui d'outils dédiés à l'animation faciale respectant à la fois les contraintes de création traditionnelle 2D de dessins animés, de simplicité d'utilisation et de faible coût.

La plate-forme TOON proposée dans cette thèse vise notamment à combler cette lacune, en alliant simplicité d'utilisation, respect des pratiques traditionnelles de création de dessins animés, interaction essentiellement 2D et ergonomie. Le cahier des charges de la plate-forme, élaboré en coopération avec la société Quadraxis et détaillé dans le chapitre suivant, résume l'ensemble des fonctionnalités proposées ainsi que leur intégration dans un système interactif de conception originale.

Chapitre 4 :

Cahier de charges de la plate-forme *FaceTOON*

Résumé :

Ce chapitre décrit les spécifications de la plate-forme de création d'animations faciales appelée FaceTOON. Dans ce cadre, les exigences à satisfaire afin d'élaborer un outil intuitif et naturel pour l'animation faciale de personnages de dessins animés 3D complexes à partir de simples dessins servent de base à la conception de FaceTOON.

Ce cahier des charges répond aux contraintes industrielles. Il a été élaboré en partenariat avec la société Quadraxis (www.quadraxis.com) et dans le cadre du contrat TOON financé par Quadraxis et soutenu par l'Agence Nationale pour la Valorisation de la Recherche (ANVAR)

Mots clefs : *spécifications, logiciel d'animation faciale, format d'échange, interfaces utilisateur.*

Les animations 3D sont aujourd'hui incontournables dans le monde du multimédia, des films d'animations et de l'audiovisuel. Toutefois, les systèmes actuellement présents sur le marché ne permettent pas de répondre à la créativité toujours renouvelée de l'animation traditionnelle. Allier dans un même outil, possibilités artistiques et potentialités techniques et technologiques reste un important défi.

4.1 *Domaine d'application*

Le domaine d'application principal visé par *FaceTOON* est celui de la création de dessins animés. Toutefois, la plate-forme proposée devra répondre à des objectifs d'application plus larges, relatifs aux domaines connexes, comme la synthèse d'image pour la télévision, la création d'effets spéciaux pour l'industrie cinématographique ou encore les jeux vidéos.

Les défis à relever par l'industrie du dessin animé 2D se posent aujourd'hui en termes de :

- production améliorée des contenus, qui se veut efficace et intuitive, permettant l'expression sans limites du créateur,
- transmission en interfaçage efficace avec d'autres systèmes 2D ou 3D, tant au niveau de la modélisation des personnages virtuels qu'à celui de l'animation finale, ce qui se traduit par la nécessité d'un format unique de représentation.

Dans ce contexte pré-compétitif, nos recherches se sont portées sur le cas particulier des visages. Vecteurs d'émotion et de la parole, ils représentent un intérêt primordial ainsi qu'un fort potentiel de développement. Le système *FaceTOON* devra tout d'abord répondre à des objectifs de création artistique :

- En offrant un ensemble d'outils intuitifs, interactifs et rapides,
- En exploitant le savoir-faire des créateurs traditionnels d'animations 2D et en respectant les habitudes et les pratiques de travail des dessinateurs,
- En permettant la création d'animations aussi bien réalistes que de type *cartoon*.

En ce qui concerne les aspects techniques sous-jacents, *FaceTOON* devra :

- Intégrer des techniques de modélisation aussi bien 2D que 3D,
- S'insérer naturellement dans un schéma organisationnel d'une chaîne de production 2D,
- Couvrir l'ensemble des étapes de chaîne de production de dessins animés, de la modélisation à l'animation.

Enfin, en ce qui concerne les choix technologiques, il s'agit de privilégier :

- les méthodes de déformation naturelles et intuitives, permettant de créer aisément des poses clefs, par manipulation de points et courbes de contrôle,
- les formats de représentation 2D/3D normalisés, pour favoriser les échanges entre les différents métiers impliqués dans le processus de création, en assurant une totale interopérabilité.

4.2 Exigences globales sur l'ingénierie du système

L'objectif du système *FaceTOON* est d'offrir un ensemble d'outils pour créer des animations 2D et 3D.

Il s'agit, en premier lieu, de construire des visages 3D personnalisés à partir :

- d'une part d'un modèle 3D brut, dépourvu de toute caractéristique faciale et servant de support aux créateurs,
- et d'autre part, d'un ensemble de dessins 2D représentant notamment les caractéristiques faciales (yeux, bouche, sourcils pour les principaux).

La force du système *FaceTOON* repose notamment sur l'hybridation originale de techniques 2D et 3D. L'utilisateur continue à concevoir et à dessiner en 2D, le système traduit ses créations en modèles 3D, et ce d'une façon tout à fait automatique et transparente.

Un deuxième volet du système concerne donc logiquement l'ensemble logiciel nécessaire à la création de poses 3D, correspondant à la fois à des expressions et à des visèmes. Ce module intégrera des outils et méthodes de déformation 3D à partir de dessins 2D.

Enfin, la dernière composante de la plate-forme couvre la gestion dynamique des animations 3D, avec spécification de poses clés, mécanismes d'interpolation, représentation standardisée MPEG-4 des séquences d'animation, ainsi que rendu de scène et visualisation.

Pour atteindre ces objectifs, plusieurs conditions techniques préalables doivent être spécifiées. En particulier, il est nécessaire de définir les types de données supportées, ainsi que leur format de représentation.

4.3 Types de données

Pour faciliter la manipulation, les types de données, aussi bien 2D que 3D, en entrée et en sortie, doivent respecter un certain nombre de contraintes, quant à leur type, contenu et format de représentation.

4.3.1 Données en entrée

Les données en entrée sont de deux types :

4.3.1.1 Entrées 2D

Les entrées 2D sont des dessins 2D, réalisés avec des logiciels de dessin quelconques (*e.g.*, Adobe Photoshop, CorelDraw ou Paint Shop Pro de Corel,...). Chacun de ces dessins représente une caractéristique faciale du personnage que l'on veut animer dans une position neutre vue de face, inspirée des *model-sheets* fournis par les concepteurs de personnages.

Bien naturellement, les caractéristiques faciales à considérer de façon prioritaire sont celles correspondant à la bouche avec ses deux lèvres, son espace central (ouverture de la bouche), les yeux, les sourcils, le nez.

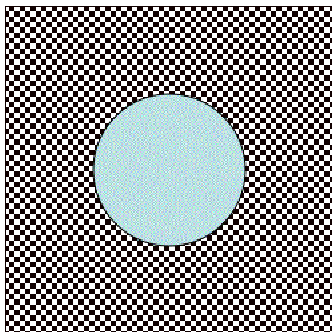
D'autres caractéristiques peuvent également être considérées pour modéliser de caractères non anthropomorphe, comme des animaux ou des personnages complètement imaginaires résultant de l'invention des créateurs.

Les dessins doivent être représentés au format *png* avec gestion d'une ou de plusieurs couches de transparence (*alpha layers*). *Png* (*Portable Network Graphics*)²³ est un format d'images numériques ouvert qui offre plusieurs possibilités de représentation, (en niveaux de gris, par couleurs indexés ou encore par couleur vraies) et qui est reconnu par la plupart des logiciels de traitement d'images aujourd'hui disponibles sur le marché.

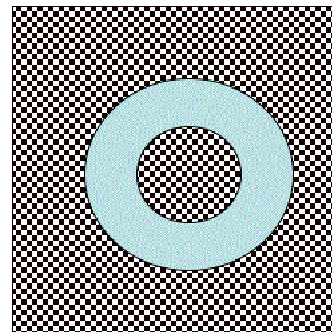
Les dessins sont chargés une seule et unique fois durant tout le processus de création de l'animation faciale. Une fois les dessins importés dans le logiciel, l'information de transparence fournit implicitement des cartes de segmentation, définissant les régions support des objets. Dans ce cadre, deux cas topologiques différents sont identifiés et traités :

1. la région support de l'objet est constituée d'une unique composante connexe sans trou, ce qui revient à spécifier de façon binaire une unique zone de transparence correspondant à l'extérieur de l'objet ;
2. l'objet est toujours composé d'une composante connexe avec un trou. Dans cette situation deux régions de transparence, l'une extérieure et l'autre intérieure à l'objet, doivent être spécifiées.

Ces deux cas sont illustrés schématiquement Figure 4.1.



a. Cas 1 : unique composante connexe sans trou.



b. Cas 2 : Unique composante avec un trou.

Figure 4.1 : Les deux structures topologiques de dessins 2D admissibles dans *FaceTOON*

Cela revient à supporter deux types de topologies, qui couvrent la plupart des caractéristiques faciales à modéliser. Le premier cas sert à spécifier les caractéristiques les plus simples, tandis que le deuxième est dédié aux caractéristiques comme la bouche (ou, éventuellement les yeux), où des modifications topologiques peuvent apparaître au cours de l'animation.

²³ <http://www.libpng.org/pub/png/>

Notons que dans tous les cas, une unique composante connexe par caractéristique faciale est supportée. Cela interdit la spécification conjointe de plusieurs éléments de visage (exemple : les deux yeux) dans un seul dessin.

4.3.1.2 Entrée 3D

L'entrée 3D est unique et réalisée une seule fois, au tout début du processus global. Elle est constituée d'un maillage triangulaire 3D représentant le visage simplifié du personnage que l'on veut animer. Ce modèle élémentaire représente en quelque sorte un support géométrique vierge, dépourvu de toute caractéristique faciale, sur lequel les différentes caractéristiques faciales seront ultérieurement spécifiées. Il sera appelé *modèle initial*.

Le modèle initial doit être constitué d'une unique composante connexe, pour garantir un maillage sans rupture, adapté aux objectifs d'animation 3D. D'un point de vue informatique, il est représenté en *VRML 2.0 (Virtual Reality Modeling Language)*, en raison de la simplicité et de la popularité de ce format, reconnu par la grande majorité des logiciels de graphique 3D. Notons toutefois que des entrées au format MPEG-4, qui correspond à une version binaire et compressé de VRML sont également supportées.

Ce maillage peut être créé avec des logiciels de modélisation généralistes, mais aussi avec des outils dédiés de reconstruction 3D, comme ceux déjà proposés dans le cadre du projet TOON [Triki05].

4.3.2 Données en sortie

Pour faciliter une large réutilisation des contenus, la séquence d'animation faciale obtenue devra être exportée sous les deux formats suivants.

Le premier est la norme MPEG-4, en utilisant le concept de « morph-target » explicité au Chapitre 2. Chaque pose cible du « morph-target » sera constituée de tous les maillages formant le visage. L'animation ainsi créée pourra être visible dans n'importe quel visualiseur MPEG-4 supportant ce type de technologie.

Le format d'animation VRML utilisé est celui qui, pour chaque objet composant la scène, fournit pour l'état initial les coordonnées cartésiennes de sa géométrie ainsi que sa structure topologique. Ensuite, sont spécifiées, pour chaque temps intermédiaire, les positions géométriques correspondantes. Le format VRML ajustera alors automatiquement ces données afin de visualiser l'animation. Cela n'est toutefois possible qu'avec un logiciel adapté.

La prise en compte de chacun de ces types de données doit être réalisée à l'aide d'interfaces utilisateurs dédiées et adaptées à chacun, comme décrit dans le paragraphe suivant.

4.4 Espaces de travail interactifs et interfaces associées

Nous présentons ici les principales fonctionnalités de création et d'animation 3D que la plate-forme *FaceTOON* doit supporter. Elles s'intègrent dans un processus de

création globale, qui inclut deux grandes parties correspondant à la construction de poses clés, ainsi qu'à leur manipulation, nécessaire pour obtenir l'animation souhaitée.

À cette fin, le système logiciel inclut les trois espaces de travail suivants, chacun muni d'une interface utilisateur interactive :

- fenêtre 3D, pour tout ce qui est manipulation de modèle 3D,
- fenêtre 2D, pour la gestion de dessins et de maillages 2D de caractéristiques faciales,
- fenêtre d'animation, pour spécifier des *time-line* et poses clefs associées.

4.4.1. Fenêtre de gestion de la partie 3D

La fenêtre de gestion de la partie 3D intégrera :

- les éléments d'import/export de modèles 3D aux formats VRML2.0 et MPEG-4 ;
- une zone de rendu : plusieurs modes de rendu (rendu en fil de fer et le rendu texturé) seront supportés ;
- l'ensemble des éléments nécessaires à l'interaction 3D de l'utilisateur avec le modèle de visage et en particulier les contrôleurs de la pose 3D pouvant gérer rotations, zoom et translations ;
- un ensemble d'outils interactifs de déformation 3D ;
- une base de données de poses clés, regroupées en visèmes et expressions, avec les éléments de gestion associés.

La fenêtre de gestion de la partie 3D, avec les éléments fonctionnels associés est illustrée Figure 4.2.

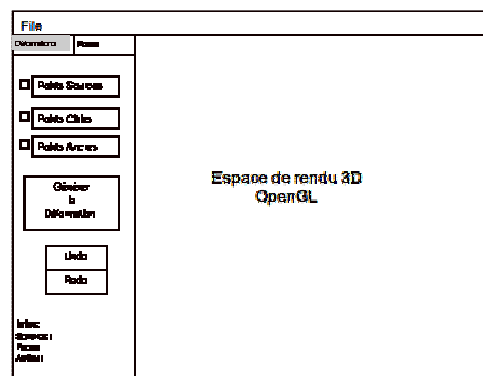


Figure 4.2 : Fenêtre de gestion de la partie 3D

4.4.2. Fenêtre de gestion de la partie 2D

La fenêtre de gestion de la partie 2D doit comporter :

- les outils classiques de gestion d'images 2D au format *png*, avec import, export et visualisation ;
- l'affichage et le rendu de maillages 2D avec rendu en fil de fer, texturé, mixte et par carte de profondeur ;
- l'outil de création interactive de carte de profondeur ;

- les mécanismes de déformation par points et courbes de contrôle ;
- une zone de stockage et de gestion d'états associés aux maillages 2D.

La fenêtre de gestion de la partie 2D est illustrée Figure 4.3.

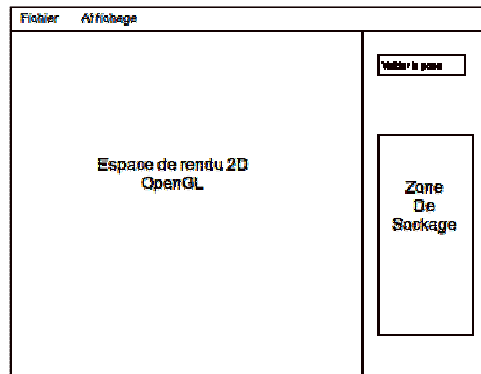


Figure 4.3 : Fenêtre de gestion de la partie 2D

4.4.3. Fenêtre de gestion de l'animation

La fenêtre de gestion de la partie animation (Figure 4.4) doit être composée :

- d'une échelle de temps (*time-line*) avec indication du temps en ms, la cadence vidéo, en tant que paramètre du système à spécifier par l'utilisateur (e.g., 25 trames par seconde) ;
- d'éléments d'insertion de poses clés qui doivent être repositionnables à volonté afin d'obtenir l'animation souhaitée ;
- une fenêtre de visualisation des animations obtenues ;
- d'outils d'exportation des animations aux formats souhaités (MPEG-4 ou VRML).

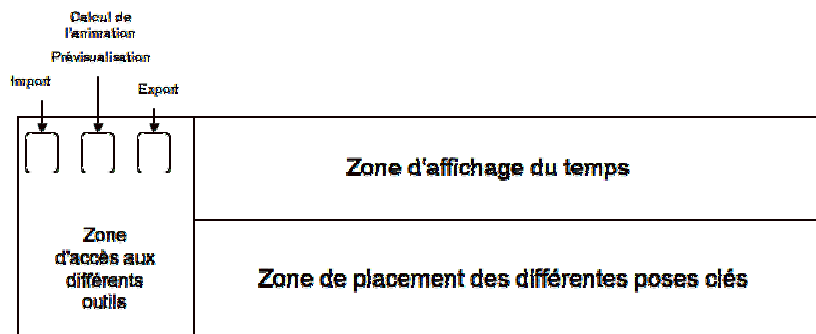


Figure 4.4 : Fenêtre de gestion de la partie animation

La Figure 4.5 synthétise le schéma de fonctionnement du système *FaceTOON*, avec les trois interfaces et le flot de données associé.

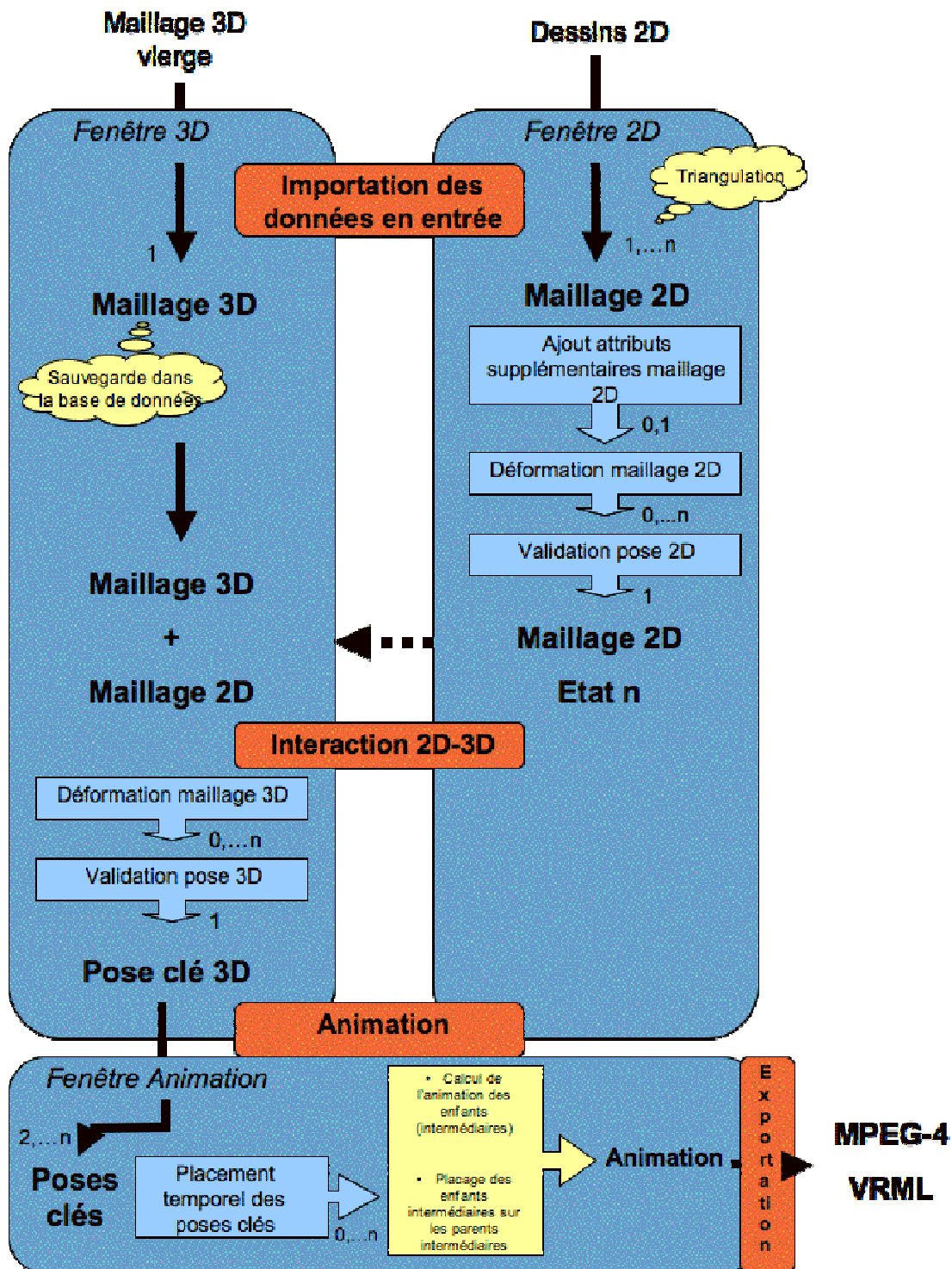


Figure 4.5 : Schéma du fonctionnement principal de FaceTOON

Bien évidemment, la plate-forme doit assurer, de manière naturelle et ergonomique, le lien et les interactions nécessaires entre les trois espaces de travail. Dans ce cadre, il est essentiel d'assurer un passage simple et intuitif entre les données 2D et le modèle 3D. Pour atteindre cet objectif, la forme 2D et ses caractéristiques photométriques (couleur, textures...) et géométriques (carte de profondeur, champs de déformation) sont placées sur le modèle 3D par « *drag & drop* » après une mise à l'échelle pour correspondre à la cible (Figure 4.6).

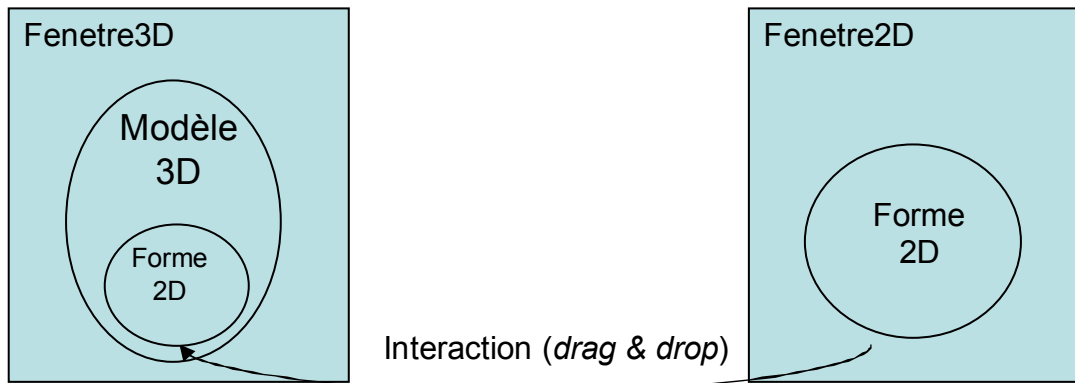


Figure 4.6 : Principe d'interaction entre fenêtres 2D et 3D

Cette étape est au cœur même du processus de création de poses clefs proposé, décrit dans le paragraphe suivant.

4.5 Approche de création de poses clefs

Dès que l'on dispose des données nécessaires en entrée, c'est-à-dire du maillage 3D dépourvu de toute caractéristique faciale, ainsi que de l'ensemble de dessins 2D représentant les attributs physiologiques dans une expression neutre, le processus de création d'animations avec *FaceTOON* peut démarrer.

La première étape consiste à importer le maillage 3D dans la fenêtre 3D qui lui est dédiée. Ensuite, la même action est répétée, cette fois dans la fenêtre 2D pour chacun des dessins 2D.

Chacune des deux parties 2D et 3D dispose d'un système de stockage pour les différents éléments. Ainsi, dans la partie 3D, le modèle initial est disponible à tout moment du processus de modélisation. Les modèles enrichis avec l'ensemble de leurs attributs faciaux et formant une pose clef spécifique sont disponibles dans deux bases de données au choix : l'une correspondant à l'ensemble des visèmes et l'autre regroupant l'ensemble des expressions.

La partie 2D est légèrement plus complexe. Elle doit disposer d'une gestion spécifique de l'ensemble des poses que l'on peut associer à chaque caractéristique faciale. L'approche adoptée suit un schéma d'organisation hiérarchique. Le principe consiste à sauvegarder, pour chaque attribut, un état initial (correspondant le plus souvent au dessin initial, sans déformation) ainsi qu'un ensemble d'états dérivés.

Notons, qu'une fois un dessin sauvegardé dans la base de données, il est impossible de le modifier sous le même identifiant. À tout moment, le système doit permettre l'affichage d'un dessin enregistré dans la base, par un simple clic sur son identifiant.

Pour permettre la création d'états dérivés à partir du dessin initial, une approche de modélisation par maillage 2D a été retenue. Lors du chargement du dessin 2D initial, un processus de triangulation, par exemple par une procédure de triangulation de Delaunay sous contrainte est appliqué pour convertir automatiquement le dessin en un maillage 2D, enrichi d'attributs de texture. Ce maillage sera appelé *maillage enfant*. Outre les attributs photométriques (couleur, texture) qui lui sont naturellement associés à partir du dessin fourni par l'utilisateur, des attributs géométriques de type carte de profondeur peuvent également lui être spécifiés et attachés. Cela implique la prise en compte dans la fenêtre 2D de méthodes de spécification et de création interactives de ces cartes de profondeur.

L'intérêt de disposer d'un maillage *enfant* 2D réside dans la facilité de manipulation d'une telle structure géométrique. L'utilisateur peut créer, à partir de celui-ci, différentes poses, correspondant à des expressions/visèmes, en appliquant des algorithmes de déformation de maillage. Les déformations que *FaceTOON* devra prendre en compte reposent sur la manipulation interactive de points et de courbes caractéristiques. Les maillages déformés seront stockés dans la base de données 2D en tant que différents états.

Une fois le modèle 3D chargé dans la fenêtre 3D et les différents états de chaque attribut créés et stockés, une phase de « collage » virtuel des maillages *enfants* sur le visage 3D *parent* peut débuter. Cette opération représente le cœur même de la stratégie adoptée par la plate-forme *FaceTOON*. Elle doit être complètement automatique et doit être interprétée au sens d'une paramétrisation. Notons qu'aucune modification topologique, ni du maillage *enfant* 2D ni du maillage *parent* 3D, n'est permise. Cela est essentiel pour garantir par la suite le processus d'animation, fondé sur une interpolation de maillages 3D de topologie fixe et géométrie variable.

Lorsqu'un champ de déformation est associé à la surface enfant, celle-ci modifie la géométrie du maillage parent, via cette paramétrisation. Ce champ de déformation peut être déterminé à l'aide de méthodes de déformations semi-automatiques. L'idée est de créer rapidement ce champ de déformation, avec une interaction utilisateur minimale par un ensemble réduit de points (réduit, idéalement, à un seul point) de contrôle, auxquels on associe une information de profondeur ajustable à l'aide d'un curseur. C'est notamment très utile pour créer rapidement des bosses et des creux, associés aux caractéristiques de visage comme les globes oculaires, les lèvres, l'intérieur de la bouche...

Cette procédure de collage virtuel des surfaces enfant et parent via une paramétrisation offre l'avantage d'une grande souplesse d'utilisation. Les surfaces enfant peuvent être à tout moment du processus de modélisation ajustés, voire remplacés complètement, en fonction des besoins de l'utilisateur. Cet ajustement incrémental est conforme aux pratiques des dessinateurs qui ont l'habitude de travailler par approximations successives.

Un mécanisme supplémentaire de déformation, associé cette fois à la surface parent et dédié aux mouvements de la mâchoire inférieure est introduit, pour augmenter le degré de réalisme des expressions et de visèmes obtenus. Le principe consiste à spécifier tout d'abord, à l'aide d'un outil de dessin 3D de type *brush*, une région d'influence associée au mouvement du maxillaire. Un unique point de contrôle localisé

au niveau du menton est ensuite spécifié. Son déplacement interactif guidera alors la déformation de toute la région d'influence.

Notons que ce type de déformation, bien que dédié principalement au mouvement de la mâchoire, peut également être utilisé pour d'autres déformations du maillage 3D.

Une fois l'ensemble des poses clés créées et stockées dans la base de données 3D, l'étape d'animation peut démarrer.

4.6 Création de l'animation

Le processus de génération des séquences d'animation comporte les quatre étapes décrites ci-dessous.

4.6.1 Importation des poses clefs

Chaque pose clef est récupérée à partir d'une liste créée à partir de la base de données 3D. Dans chaque pose, les modèles doivent avoir le même nombre d'objets enfants. Les poses clés peuvent être importées dans un ordre arbitraire.

4.6.2 Construction des séquences d'animation

Dès qu'une pose clé est importée, elle est affichée dans l'interface d'animation. Celle-ci dispose d'une échelle de temps (*time-line*), permettant de placer les poses clefs à différents instants temporels. Cela conduit à un ensemble d'intervalles de longueur variable. La cadence vidéo étant fixée en tant que paramètre global du système, cela conduit à de nombre de trames variables d'un intervalle à l'autre.

L'interface d'animation doit permettre une manipulation aisée des poses clefs qui doivent être glissées sur l'échelle de temps par *drag & drop*.

4.6.3 Calcul et visualisation de l'animation réalisée

Une fois l'ensemble de poses clefs placées sur l'échelle de temps, le processus de calcul des poses intermédiaires est complètement automatique. Il repose sur une procédure d'interpolation qui génère une séquence d'animation fluide à la cadence vidéo requise.

À noter que l'interpolation est réalisée dans l'espace des maillages 2D enfant. Pour chaque pose intermédiaire générée, le processus de collage sur la surface enfant sur le maillage parent doit être effectué.

Les résultats de l'interpolation sont visualisés dans une fenêtre de rendu d'animation dédiée, déclenchée automatiquement une fois le calcul terminé. Cela permet à l'utilisateur de visualiser en temps d'interaction le résultat de sa création et d'effectuer, s'il le juge nécessaire, les ajustements nécessaires.

4.6.4 Exportation de l'animation réalisée

Une fois validée par l'utilisateur, l'animation 3D obtenue peut être exportée aux formats VRML et MPEG-4.

4.7 Moyens logiciels mis en œuvre

Le logiciel *FaceTOON* devra être développé en C++, dans un environnement de développement Visual C+ sous le système d'exploitation Windows XP. Pour anticiper son extension à d'autres environnements, le système inclut des outils de développement portables. C'est le cas de la librairie Qt²⁴, bibliothèque logicielle offrant essentiellement des composants d'interface graphique, sur laquelle *FaceTOON* est fondé.

L'intégralité des éléments de gestion des maillages a été gérée grâce à la librairie OpenGL²⁵ (*Open Graphics Library*), qui définit une API multi plates-formes pour la conception d'applications visuelles 3D et 2D.

Notons que les deux grandes composantes Qt et OpenGL du système sont tout à fait compatibles et peuvent être exploitées conjointement.

Enfin, pour certains calculs impliquant des matrices creuses, comme la factorisation de Cholesky employée dans 5.3.3, nous avons utilisé la librairie TAUCS [Toledo03] proposée par S. Toledo.

Pour répondre aux besoins d'interaction utilisateur du système, les différents modules logiciels (importation/exportation, création de poses clés, animation et interpolation ...) intégrés dans la plate-forme doivent fournir des réponses à des taux interactifs afin que l'utilisateur puisse manipuler aisément.

4.8 Extensions

Outre les exigences et les fonctionnalités précédemment énoncées, qui constituent le noyau dur du système, certaines extensions sont susceptibles d'enrichir à court et moyen terme le prototype *FaceTOON*.

4.8.1 Gestion hiérarchique des objets 2D

Le principe de modélisation par surfaces parent/enfant peut être étendu à d'autres niveaux, ce qui permettrait de renforcer le côté intuitif des manipulations. Dans ce cadre, l'exemple typique est celui de l'œil comme surface parent avec la paupière comme surface enfant qui glisse sur le globe oculaire. Chacune des surfaces enfant est liée à celle de son parent dont elle ne peut pas dévier. De plus, les déformations apportées au niveau du parent sont répercutées sur l'enfant dérivé.

²⁴ <http://trolltech.com/>

²⁵ <http://www.opengl.org/>

4.8.2 Mode de dessin intégré à l'application

L'importation des dessins créés avec des logiciels extérieurs est actuellement une solution acceptable, de nombreux logiciels de dessin 2D à faible coût étant aujourd'hui disponibles. Néanmoins, l'idée d'offrir la possibilité de dessiner directement dans la fenêtre 3D les attributs 2D afin de pouvoir ajuster directement le dessin aux traits du personnage pourrait constituer une extension intéressante.

4.8.3 Animation dépendante du point de vue

Comme nous l'avons souligné au 1, les dessinateurs ne créent pas leurs personnages de manière identique suivant le point de vue. Actuellement, le système *FaceTOON* offre la possibilité de plaquer chacune des différentes caractéristiques faciales suivant une direction de vue frontale. Pour un visage humanoïde réaliste, cela représente une solution acceptable étant donné que l'ensemble des principales caractéristiques est visible dans une vue frontale. En revanche, pour un visage de type cartoon et suivant des pratiques traditionnelles des dessinateurs, il se peut qu'il y ait des caractéristiques dispersées dans des angles de vue variés. Il serait donc intéressant de prendre en compte et de gérer la possibilité de créer des caractéristiques faciales de façon adaptative par rapport à l'angle de vue.

4.8.4 Gestion et synchronisation du signal audio

Une autre extension directement envisageable concerne l'intégration du signal sonore, dans le cas de la parole. Cela permettrait d'enrichir le système avec une fonctionnalité de synchronisation son/parole.

4.8.5 Analyse et suivi de visages dans des vidéos réelles

Enfin, une dernière extension est liée à l'analyse semi-automatique de vidéos réelles. L'idée serait d'utiliser des mécanismes de suivi d'objets par méthodes de vision par ordinateur [Malci01] pour déterminer les champs de déformation 2D et synthétiser ensuite les animations 3D correspondantes. Cela représenterait une alternative intéressante à la déformation interactive et permettrait de générer des séquences d'animation à partir de vidéos réelles.

Chapitre 5 :

La plate-forme FaceTOON

Résumé :

Les principaux choix techniques adoptés de la plate-forme FaceTOON sont décrits en détails. Ils concernent la procédure de triangulation de dessin 2D, la construction de poses clefs par méthode de déformation, la paramétrisation de surface, le placage virtuel de maillages enfant et parent et enfin, l'interpolation des poses clefs avec construction des séquences d'animation.

A chaque étape, nous insistons sur les aspects pratiques d'interactivité et d'ergonomie qui ont guidé nos choix, soulignons les difficultés de mise en œuvre relatives au caractère hautement spécifique du dessin animé et proposons des solutions techniques adaptées.

Mots clefs : *Plate-forme d'animation faciale, techniques de déformation 3D, paramétrisation de surface, interpolation de séquences animées, standard MPEG-4.*

Comme spécifié dans le cahier des charges, la plate-forme FaceTOON doit fournir l'ensemble des outils nécessaires à la création aussi bien de modèle faciaux complets et prêts pour l'animation, que de poses clefs et de séquences d'animation aux cadences vidéo habituelles.

La plate-forme FaceTOON propose à chaque étape du processus de création un ensemble d'outils adaptés, intégré dans un ensemble logiciel de conception originale.

La plate-forme inclut les modules logiciels suivants :

- triangulation automatique de dessins 2D,
- création de poses clefs à l'aide de techniques de déformation non-rigide des maillages 2D,
- placage des maillages enfant et parent,
- déformation par manipulation directe dans l'espace 3D,
- interpolation des poses clefs et création des séquences d'animation.

Détaillons à présent chacun de ces modules, avec les méthodes adoptées et intégrées.

5.1 Triangulation automatique de dessins 2D

Le premier traitement appliqué aux dessins 2D consiste en une conversion du dessin d'origine en un maillage 2D, où la texture initiale est représentée en tant qu'attribut photométrique. Ce processus est complètement automatique et s'appuie sur les contraintes sur les données images spécifiées dans le cahier de charges (*cf.* 4.3.1.1).

La région support de l'objet est tout d'abord déterminée à partir de la couche de transparence (*alpha layer*) fournie et intégrée dans les images png. Rappelons que cette région support doit être constituée d'une seule et unique composante connexe. Elle est triangulée en appliquant un algorithme de Delaunay sous contrainte [Triangle], illustré Figure 5.2. Ici, les pixels objets sont représentés en blanc, les pixels non-objet en noir et les pixels de contour en gris. Ces derniers sont définis comme des pixels objets ayant dans un voisinage V8-connexe au moins un pixel non-objet.

Un pixel de départ arbitraire (noté "A", Figure 5.1), situé à l'intérieur de la région objet est tout d'abord sélectionné. Ensuite, le pixel de contour le plus proche situé sur une direction verticale en haut du pixel initial est déterminé (noté "B", Figure 5.1).

A partir du pixel B, l'ensemble des pixels de contour est déterminé et stocké dans une liste ordonnée, en appliquant une construction de type code de Freeman [FolVan97] avec deux parcours successifs :

Premier parcours : Pour le pixel courant, les voisins situés dans un voisinage V4-connexe et notés T (*top*), R (*right*), B (*bottom*) et L (*left*) (Figure 5.1) sont successivement parcourus. Le premier d'entre eux qui correspond à un pixel de contour est ajouté à la liste des pixels de contour, puis devient pixel courant. Le processus est répété pour chaque pixel ainsi détecté. Il s'arrête au moment où le pixel courant redevient le pixel initial, « B ». Bien évidemment, ce premier parcours ne prend pas en compte l'ensemble des pixels de contours, étant défini uniquement pour des connexités V4. C'est le cas des pixels k_1 , k_2 , k_3 et k_4 de la Figure 5.1. Pour compléter cette première liste, il est nécessaire de considérer un second parcours, correspondant à des connexités dans l'ensemble V8 - V4.

Deuxième parcours : Pour chaque pixel courant de la liste précédemment déterminée, les voisins notés TR, BR, BL et TL (Figure 5.1) sont successivement parcourus. Dès qu'un nouveau pixel de contour est trouvé (comme le pixel « k_1 » pour le pixel courant k dans Figure 5.1), le premier parcours est appliqué à cette nouvelle cible, à partir du pixel trouvé. Cela permet de déterminer un nouveau segment de contour (formé, dans notre exemple, des pixels k_1 , k_2 , k_3 , et k_4) qui est inséré dans la liste ordonnée après la position k .

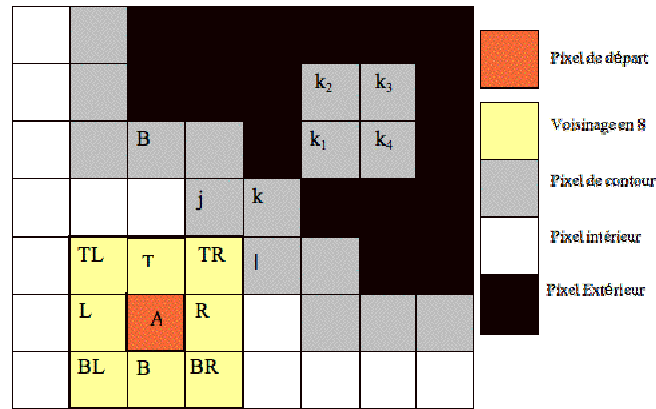


Figure 5.1 : Méthode de recherche des pixels de contour

À la suite de ce processus de parcours, on obtient donc une représentation sans perte du contour de l'objet, sous forme d'une liste ordonnée des pixels de contour. Ces points de contours ainsi déterminés sont alors utilisés comme contraintes pour l'algorithme de triangulation de Delaunay décrit dans [Chew87].

La triangulation de Delaunay T d'un ensemble S de points est l'unique triangulation telle qu'aucun triangle (ABC) de T ne contient un autre point de S à l'intérieur de son cercle circonscrit. Dans une triangulation de Delaunay sous contrainte, les arêtes formant les frontières sont préservées et ne sont pas divisées en plus petite unité en évitant l'insertion de points additionnels. Leur présence est assurée même après les modifications locales où certaines arêtes sont enlevées ou repositionnées. La triangulation résultante est dite contrainte par la frontière.

Le maillage triangulaire 2D résultant représente une approximation plus ou moins fidèle de la forme 2D binaire. Il dépend d'un certain nombre de paramètres utilisateurs, comme :

- le nombre de sommets de contour retenus, qui correspond à un sous échantillonnage uniforme de la séquence ordonnée de pixels de contour,
- le nombre minimal de sommets intérieurs à la forme considérée,
- l'aire relative maximale des triangles, qui permet de contrôler la résolution de la triangulation,
- la valeur minimale des angles des triangles, qui contrôle la régularité des maillages obtenus (fixée à 20 degrés, dans nos expérimentations).

La Figure 5.2 illustre le processus de triangulation, pour une forme simple de disque, depuis l'image initiale png, en passant par la forme binaire et jusqu'à la triangulation obtenue.

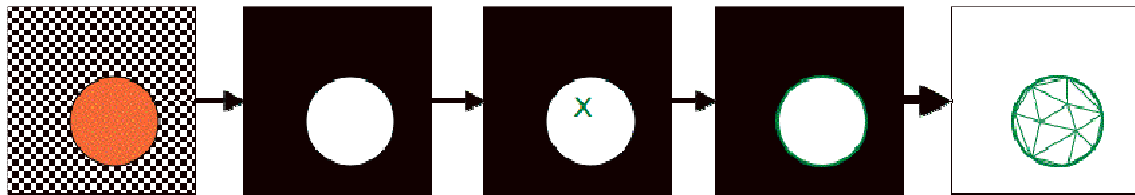


Figure 5.2 : Processus de triangulation des dessins 2D. De gauche à droite : image initiale au format png, forme binaire, pixel intérieur "A", contour détecté et triangulation de Delaunay obtenue

Ce processus de triangulation s'effectue en temps réel pour des contours de quelques centaines de pixels.

À chaque sommet du maillage 2D, on associe une texture correspondante à l'image initiale. A chaque sommet du maillage correspond une coordonnée (u,v) sur l'image.

Outre ces attributs photométriques, le maillage 2D peut être enrichi d'une information géométrique supplémentaire. C'est le cas des cartes de profondeur associées au maillage comme décrit dans le paragraphe suivant.

5.2 Déformation par cartes de profondeur

La spécification des cartes de profondeur constitue la manière la plus simple d'associer à une structure plane 2D (qu'elle soit image ou maillage), une information géométrique 3D relative à la notion de profondeur.

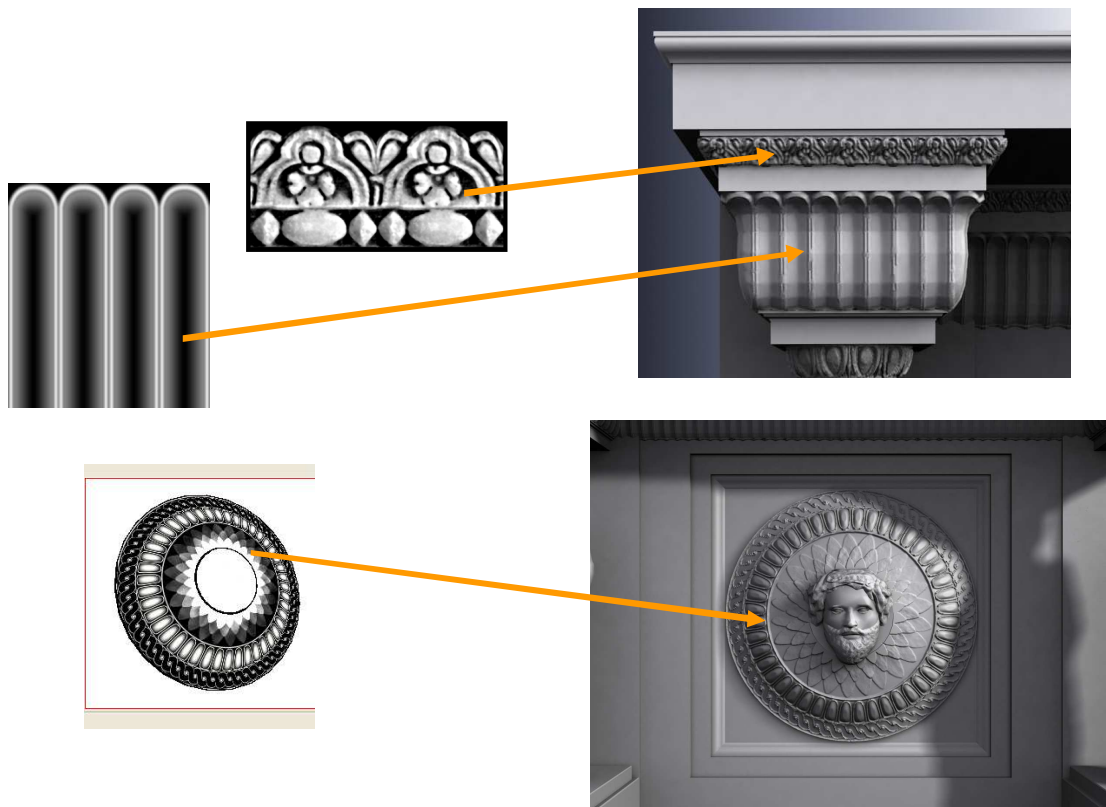
Le principe est de créer une image en niveaux de gris, où chaque niveau de gris est proportionnel à la profondeur associée au pixel correspondant. En considérant un repère cartésien (x, y, z) , le niveau de gris $u(x, y)$ associé au pixel (x, y) est ainsi proportionnel à une variation de profondeur, notée $z(x, y)$. L'image 3D offre ainsi le support paramétrique sur lequel une surface 3D est construite. Cette surface peut être représentée en tant qu'objet indépendant dans l'espace 3D ou bien se projeter sur d'autres objets et en faire varier la profondeur.

Ce mécanisme relativement simple se montre néanmoins très efficace pour créer rapidement des objets 3D à partir d'images 2D. La Figure 5.3 présente un exemple, où la carte de profondeur est superposée à une structure 3D déjà existante, pour créer un bas relief.



a. Objet 3D initial

b. Objet 3D enrichi par cartes de profondeur



c. Cartes de profondeur utilisées

Figure 5.3 : Enrichissement d'objets 3D par cartes de profondeur (courtoisie Société Quadraxis)

Observons que ce mécanisme, utilisé dans les systèmes informatiques aujourd'hui, remonte à quelques siècles. En effet, c'est la base du trompe l'œil, qui permettait de rendre une illusion 3D à partir d'un jeu d'ombres associé à des images 2D. À l'époque, comme aujourd'hui, l'utilisation d'une technique pareille était motivé par le coût de fabrication : il était beaucoup moins coûteux de créer de dessins/images que de vrais bas-reliefs sculptés.

Notons enfin que la plupart des standards (VRML, MPEG-4) et formats (Maya, 3DSMax) de représentation 3D supportent ce type de représentation ainsi que les outils de rendu associés.

Dans le cadre de *FaceTOON*, la carte de profondeur est toujours associée au maillage 2D. Elle correspond dans tous les cas à une variation de profondeur qui sera appliquée au maillage 3D parent lors de la projection de la surface enfant sur celui-ci.

Une convention relative aux valeurs de gris de ces cartes de profondeur a été adoptée. Le niveau 127 correspond à une variation de profondeur nulle. Les niveaux de gris 0 et 127, correspondent à des variations de profondeur négatives afin de créer des creux, alors que les niveaux entre 128 et 256 permettent de créer de bosses, par des variations de profondeur positives.

Cette technique se rapproche de celle largement connue dans la littérature sous le nom de *displacement mapping* [FolVan97], utilisée à grande échelle dans les jeux vidéo, ou de ses différentes variantes comme le *bump mapping* [FolVan97] (où l'information de texture géométrique est prise en compte uniquement au niveau du rendu) ou comme le *normal mapping* [FolVan97] (où une texture RGB simule les trois composantes x , y et z nécessaires pour spécifier des vecteurs normaux à la surface).

Contrairement à toutes ces approches, notre méthode n'associe pas cette information de texture géométrique directement à un objet/maillage 3D, mais de façon indirecte, à l'aide du maillage enfant 2D. Le transfert de cette information entre maillage 2D et surface 3D sera réalisé via une paramétrisation, comme nous le verrons au paragraphe 5.4.2.

Afin de minimiser l'interaction utilisateur nécessaire pour spécifier les cartes de profondeur, une méthode semi-automatique de création de celle-ci a été mise en place. Elle permet de sélectionner un ensemble réduit de points de contrôle, de leur associer une profondeur, puis de générer le champ de profondeur pour l'ensemble des sommets du maillage 2D, à l'aide de méthode de déformation par *RBF* (*Radial Basis Function*), qui sera décrite au paragraphe suivant.

Cela permet de créer en quelques clics des caractéristiques faciales simples, comme des globes oculaires, le creux de la bouche...

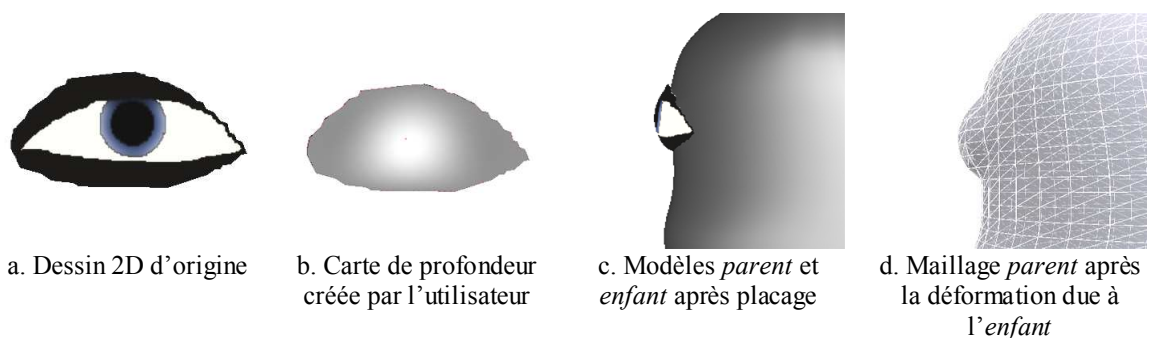


Figure 5.4 : Création d'un globe oculaire grâce à une carte de profondeur

Bien évidemment, pour modéliser des caractéristiques plus complexes, nécessitant un niveau de détail très fin, il est toujours possible de créer ces cartes de profondeur avec des logiciels extérieurs de traitement d'images.

La technique de variation est en soi une technique de déformation de maillage : le maillage 2D plan initial est enrichi d'une dimension supplémentaire, de profondeur et déformé en conséquence, après immersion dans l'espace 3D. Cela est utile pour créer des reliefs 3D associés au support plan que représente le maillage 2D. Toutefois, pour personnaliser et modifier la forme même de ce maillage, il est nécessaire de considérer de techniques de déformation de maillage 2D.

5.3 Déformation non-rigide de maillages 2D

Les techniques de déformation sont au cœur même de l'approche de construction de poses clés adoptée dans *FaceTOON*.

La déformation doit être rapide à mettre en place, facile à contrôler et fonctionner en temps réel pour que l'utilisateur puisse visualiser les résultats directement et éventuellement effectuer des ajustements.

Dans ce but, *FaceTOON* possède plusieurs outils à disposition de l'utilisateur et dont nous allons décrire le mécanisme dans les paragraphes suivants.

5.3.1. Techniques de déformation : critères et techniques retenues

L'analyse de l'état de l'art, présentée au chapitre 3, révèle un large éventail de techniques et méthodes de déformation. Dans ce cadre, les animations réalistes et hyper-réalistes nécessitent le plus souvent la mise en œuvre de techniques de modélisation sophistiquées, fondées sur la spécification de muscles, de simulations physiques ou encore des méthodes par éléments finis. Ces modèles laborieux ne se justifient pas dans le contexte de notre application, qui vise l'animation de personnages de dessins animés, plus ou moins réalistes et en général peu concernés par des phénomènes physiques. De plus, ces techniques se montrent souvent lourdes et complexes en temps de calcul, ce qui les rend peu adaptées aux objectifs de *FaceTOON*. Rappelons que, conformément au cahier des charges de la plate-forme *FaceTOON* (chapitre 4), les techniques privilégiées dans la conception du système doivent répondre à des contraintes de :

- rapidité, avec temps de calcul interactifs,
- nombre réduit de paramètres prédéfinis,
- contrôle efficace et intuitif, avec une interaction utilisateur minimale.

Une réponse adaptée à ces attentes est offerte par les techniques à base de contrôleurs, qui proposent des outils puissants de génération de poses clés pour un coût de calcul relativement faible. En outre, de tels modèles nécessitent un nombre réduit de paramètres, aisément définis et contrôlés par l'utilisateur. C'est donc cette approche par contrôleurs qui a été retenue et déclinée à travers différentes techniques.

Pour fixer les idées, introduisons tout d'abord quelques définitions mathématiques.

Un *contrôleur* est défini comme un ensemble de caractéristiques n-D (*i.e.* variétés n-D de l'espace \mathbb{R}^3 ou \mathbb{R}^2), avec une fonction d'influence associée, définie sur l'espace considéré (\mathbb{R}^3 ou \mathbb{R}^2). Pour un point arbitraire, cette fonction définit le degré dans lequel le point considéré est affecté par la caractéristique de contrôle. Ces fonctions d'influence peuvent être définies *via* critères de distance.

Le plus souvent, ces fonctions d'influence sont spécifiés par des fonctions à support compact [Preda02]. Quant aux contrôleurs, ils peuvent être soit de type 0-D (*i.e.*, ensembles de points caractéristiques), soit 1D (*i.e.*, ensembles de courbes de contrôle). Le principe général consiste à appliquer de façon interactive des déformations aux contrôleurs, en spécifiant une *pose source* (*i.e.*, position initiale du contrôleur) et une *pose cible* (*i.e.*, position finale du contrôleur, correspondant à la déformation souhaitée).

En fonction des valeurs des fonctions d'influence associées, le déplacement des caractéristiques de contrôle est alors propagé de façon lisse, soit à tout \mathbb{R}^3 , pour construire ainsi un champ global de déformation, soit à un domaine de \mathbb{R}^3 , appelé *région d'influence*.

Nous avons sélectionné trois méthodes pour intégration dans la plate-forme *FaceTOON* :

- *l'approche classique par RBF (Radial Basis Functions)*, traditionnellement utilisée pour des applications d'interpolation de données éparses,
- *la méthode de déformation par coordonnées laplaciennes*, pour une préservation optimale de l'information de forme locale,
- *la technique dite de Wires*, introduite par Alias Wavefront [Maya] et exploitée pour les fameuses productions de Pixar [Milli92].

Détaillons à présent ces différentes méthodes, en commençant par la méthode RBF.

5.3.2. Déformations par RBF (*Radial Basis Functions*)

Les méthodes par RBF (*Radial Basis Function*), initialement introduites dans [Miche86], et devenues rapidement très populaires [Fidale00, Koje02, Arad94, Noh01, Botsch05], mettent en œuvre une approche par contrôleurs 0-D, qui consiste à définir un champ de déformation lisse, à partir d'un ensemble de points de contrainte, dont les déplacements sont supposés connus. Ce principe est largement exploité dans le cadre des techniques d'interpolation de données éparses (*sparse data interpolation*). Le champ de déformation généré par RBF est exprimé comme une fonction implicite définie par combinaison linéaire de fonctions radiales.

Le formalisme mathématique détaillé dans la suite s'applique au cas de l'espace \mathbb{R}^3 . Son application au cas \mathbb{R}^2 est directe.

Une *fonction radiale*, notée $g_c : \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}$, est une fonction qui possède une symétrie radiale autour d'un point fixe $c \in \mathbb{R}^3$, considéré comme centre. Cette propriété peut être exprimée comme décrit par l'équation (5.1).

$$\forall x \in \mathbb{R}^3, \quad g_c(x) = \phi(\|x - c\|), \quad (5.1)$$

où $\|\cdot\|$ désigne la norme L_2 , et $\phi: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ la *fonction génératrice* de la base des fonctions radiales.

Un ensemble de fonctions de base radiales $\{g_i\}_{i=1}^M$ est associé à un ensemble de points de contraintes $\{p_i\}_{i=1}^M$ de \mathbb{R}^3 comme suit :

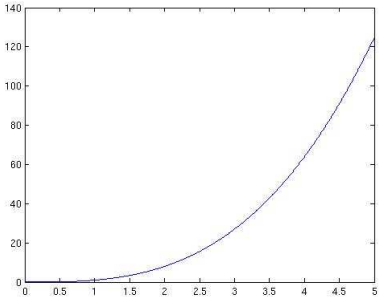
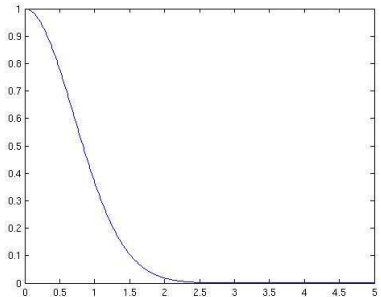
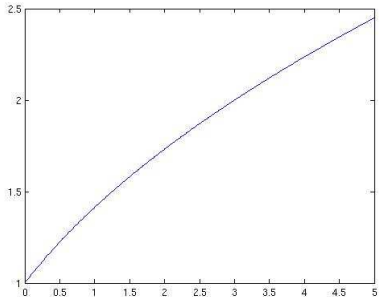
$$\forall i \in \{1, 2, \dots, M\}; \quad g_i(p) = g(p - p_i) = \phi(\|p - p_i\|), \quad (5.2)$$

A partir de l'ensemble des fonctions de base radiales $\{g_i\}_{i=1}^M$, un champ de déplacement f est défini comme une combinaison linéaire des g_i (5.3).

$$\forall p \in \mathbb{R}^3, \quad f(p) = \sum_{i=1}^M \lambda_i g_i(p) = \sum_{i=1}^M \lambda_i \phi(\|p - p_i\|), \quad (5.3)$$

où λ_i sont des vecteurs de \mathbb{R}^3 .

Plusieurs choix de fonction génératrice ϕ sont possibles. Le **Tableau 5.1** résume les fonctions les plus utilisées, avec définition mathématique et illustration graphique.

Fonction cubique	$\phi(r) = r^3$	
Fonction gaussienne	$\phi(r) = \exp^{-r/\sigma^2}, \sigma > 0$	
Fonction multiquadratique	$\phi(r) = \sqrt{s^2 + r^2}$	

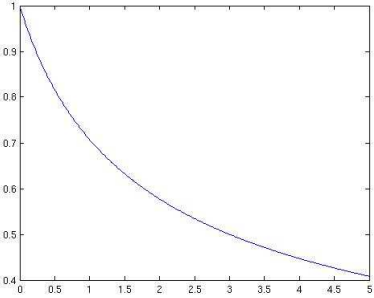
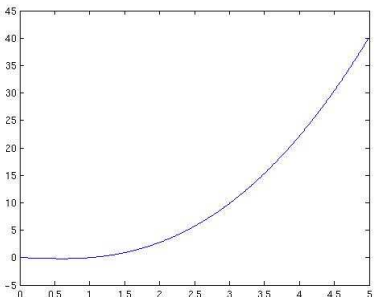
<p>Fonction multiquadrique inverse</p>	$\phi(r) = \frac{1}{\sqrt{s^2 + r^2}}$	
<p>Fonction de type membrane élastique (thin plate splines)</p>	$\phi(r) = r^2 \log(r)$	

Tableau 5.1 : Fonctions génératrices pour les RBF

Dans le cas de notre animation faciale, les points de contraintes $\{p_i\}_{i=1}^M$ correspondent aux contrôleurs. Les déplacements $d_i = (d_i^x, d_i^y, d_i^z)^t$ associés à chacun de ces contrôleurs sont supposés connus. L'objectif est de déterminer un champ de déformation lisse dans l'espace \mathbb{R}^3 , interpolant aux points $\{p_i\}_{i=1}^M$ les déplacements $\{d_i\}_{i=1}^M$, comme décrit dans l'équation suivante :

$$\forall j \in \{1, 2, \dots, M\}, \quad d_j = \sum_{i=1}^M \lambda_i g_i(p_j) = \sum_{i=1}^M \lambda_i \phi(\|p_j - p_i\|), \quad (5.4)$$

Pour déterminer les coefficients $\{\lambda_i\}_{i=1}^M$ satisfaisant le système d'équations ((5.4), nous utilisons la décomposition en valeurs singulières (SVD – *Singular Value Decomposition*), qui assure l'existence d'une solution même dans le cas où le système ((5.6) est mal conditionné.

Plus précisément, il s'agit de résoudre trois systèmes d'équation linéaires, un pour chacune des composantes x, y et z :

$$\forall \omega \in \{x, y, z\}, \quad A\lambda^\omega = d^\omega, \quad (5.5)$$

où :

$$A = \begin{pmatrix} \phi(0) & \phi(\|p_2 - p_1\|) & \dots & \phi(\|p_n - p_1\|) \\ \phi(\|p_1 - p_2\|) & \phi(0) & \dots & \phi(\|p_n - p_2\|) \\ & & \dots & \\ \phi(\|p_1 - p_n\|) & \phi(\|p_2 - p_n\|) & \dots & \phi(0) \end{pmatrix}, \quad (5.6)$$

et :

$$\forall \omega \in \{x, y, z\}, \quad \lambda^\omega = (\lambda_1^\omega, \dots, \lambda_M^\omega)^t, \quad d^\omega = (d_1^\omega, \dots, d_M^\omega)^t. \quad (5.7)$$

Pour notre implantation, nous avons choisi une fonction génératrice gaussienne, qui offre l'avantage de la stabilité. Dans ce cas, la matrice A est une matrice bande symétrique, avec les éléments significatifs répartis autour de la diagonale principale, qui est en général inversible. Le seul paramètre utilisé est celui de dispersion (σ), qui contrôle la largeur de la fonction gaussienne. Intuitivement, le paramètre σ contrôle l'étendue spatiale de l'influence des points de contrainte : une grande valeur de σ correspond à une large fenêtre spatiale, tandis qu'une valeur petite restreint la région d'influence à un domaine concentré autour des points de contrainte considérés.

La méthode de déformation par RBF offre l'avantage de la simplicité : en spécifiant un ensemble réduit de points de contrôle, un champ de déformation lisse sur l'ensemble de l'espace est rapidement construit. Cela est particulièrement utile pour spécifier des déformations globales à partir de quelques points. Toutefois, les RBF ne prennent pas en compte des contraintes de préservation des formes locales. Afin de s'affranchir de cet inconvénient, une deuxième méthode de déformation, dite laplacienne et détaillée au paragraphe suivant, a été adoptée.

5.3.3. Déformation Laplacienne

Dans [Alexa02, Alexa03], Alexa a montré pour la première fois l'utilité de disposer d'une représentation différentielle de la géométrie pour des applications de *morphing* et de déformation non rigide. Cette première idée a été ensuite reprise et développée dans de nombreux travaux, aussi bien pour le cas 3D [Sork04, Neal05, Zhou05, Au05, Sork06], que 2D [Igara05].

Le principe consiste à représenter chaque sommet d'un maillage 2D/3D par des coordonnées locales, dites différentielles ou laplaciennes, exprimant la position du sommet considéré en fonction de ses voisins. Contrairement à la représentation traditionnelle par coordonnées cartésiennes, les coordonnées différentielles sont porteuses d'une information de forme locale. Définir des champs de déformation tout en conservant au maximum ces coordonnées différentielles permet alors de préserver localement cette information de forme.

La représentation différentielle est calculée à partir d'une description cartésienne de la surface et peut donc être appliquée à partir de maillages polygonaux triangulaires comme ceux que l'on utilise. La transition qui permet de passer de coordonnées cartésiennes à des coordonnées laplaciennes est réalisée par un opérateur linéaire sur un support local : le maillage laplacien. Dans le but de retrouver une représentation cartésienne à partir de la représentation différentielle, nous résolvons un système linéaire creux par la méthode des moindres carrés. Les modifications apportées sur le modèle 3D en représentation différentielle par des contrôleurs de type 0-D, sont ensuite visibles dans la représentation cartésienne en reconstruisant la surface de manière « naturelle » grâce à la résolution du système linéaire.

5.3.1.1 Définition mathématique et matrice laplacienne

Considérons un maillage triangulaire $M(V,E,T)$, constitué d'un ensemble de sommets V , d'un ensemble d'arrêtes E et d'un ensemble de facettes triangulaires T . Chaque sommet $v_{i \in \{1, \dots, N\}}$ de V est initialement représenté par ses coordonnées cartésiennes $v_i = (x_i, y_i, z_i)$. N représente ici le nombre total des sommets du maillage.

Les coordonnées différentielles d'un point v_i , notées δ_i , sont définies comme la différence entre ses coordonnées cartésiennes et le centre de masse de ses voisins de premier ordre, comme décrit par l'équation suivante :

$$\delta_i = (\delta_i^{(x)}, \delta_i^{(y)}, \delta_i^{(z)}) = v_i - \frac{1}{d_i} \sum_{j \in N(i)} v_j . \quad (5.8)$$

où $N(i) = \{j | (i,j) \in E\}$ est l'ensemble des sommets v_j reliés par une arête (i,j) au sommet v_i et $d_i = |N(i)|$ est le nombre total de voisins du sommet v_i .

Cela revient à définir une version discrétisée de l'opérateur laplacien.

D'autres variantes du laplacien discret sont également proposées dans la littérature [Float96].

En particulier, dans [Meyer03], les auteurs introduisent une version pondérée de l'opérateur laplacien, prenant en compte l'information angulaire des triangles voisins et définie par :

$$\delta_i^c = \frac{1}{|\Omega_i|} \sum_{j \in N(i)} \frac{1}{2} (\cot \alpha_{ij} + \cot \beta_{ij}) (v_i - v_j) . \quad (5.9)$$

où $|\Omega_i|$ est la taille de la cellule de Voronoï [Voro08, Aurenh91] de i et α_{ij}, β_{ij} les deux angles opposés à l'arête (i,j) . Cette information revient à prendre en compte une estimation de la courbure moyenne de la surface maillée au point considéré.

Ces transformations peuvent être mises sous forme matricielle comme suit. Soit A la matrice d'adjacence du maillage, regroupant toute l'information de connexité et définie par :

$$A_{i,j} = \begin{cases} 1 & \text{si } (i,j) \in E \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} . \quad (5.10)$$

Soit D une matrice diagonale, avec les éléments de la diagonale principale $D_{ii} = d_i$, où d_i représente la valence du sommet v_i (*i.e.*, le nombre de sommets voisins à v_i)

La matrice laplacienne L est construite à partir de D et de A comme suit :

$$L = I - D^{-1}A . \quad (5.11)$$

Une deuxième version de matrice laplacienne, qui sera exploitée par la suite, est exprimé par :

$$L_s = DL = D - A . \quad (5.12)$$

En explicitant les éléments de la matrice L_s , on obtient ainsi :

$$(L_s)_{ij} = \begin{cases} d_i & \text{si } i = j \\ -1 & \text{si } (i, j) \in E \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}. \quad (5.13)$$

La matrice laplacienne fournit la relation entre coordonnées cartésiennes et différentielles. Il est ainsi possible de calculer les coordonnées différentielles à partir des coordonnées cartésienne, comme décrit dans l'équation suivante :

$$L x = \delta. \quad (5.14)$$

Inversement, déterminer les coordonnées cartésiennes à partir des coordonnées différentielles, n'est pas possible, la matrice L étant par définition singulière.

Toutefois, la relation ((5.14) peut être exploitée à des fins de déformation de surface, ce qui fait l'objet du paragraphe suivant.

5.3.1.2 Déformation de surfaces

Le principe consiste à déterminer une déformation de surface de façon à conserver au maximum les coordonnées différentielles des sommets du maillage. Cela garantit une préservation maximale de la forme de la surface considérée.

Un ensemble de sommets, appelés points de contrôle, est spécifié, pour lesquels les coordonnées (cartésiennes) cibles sont supposées connues. On définit ainsi un ensemble de contraintes géométriques, décrites par :

$$\forall j \in C, \quad v_j = c_j, \quad (5.15)$$

$$\text{avec } C = \{i_1, i_2, \dots, i_m\} \subset \{1, 2, \dots, N\} \text{ et } m < N$$

Pour simplifier le formalisme mathématique associé, et sans restreindre la généralité du problème, nous ne considérons que les sommets de contraintes correspondant aux m premiers sommets du maillage $\{i_1, i_2, \dots, i_m\} = \{1, 2, \dots, m\}$. Cela peut être réalisé en effectuant une renumérotation convenable des sommets du maillage.

Réaliser une déformation laplacienne revient alors à déterminer les coordonnées cartésiennes x satisfaisant le système d'équations linéaires suivant :

$$\begin{pmatrix} L \\ \omega I_{m \times m} | 0 \end{pmatrix} x = \begin{pmatrix} \delta^{(x)} \\ \omega c_{1..m} \end{pmatrix} \quad (5.16)$$

où ω représente une matrice de poids d'influence associés aux différentes contraintes $c_{j=1..m}$. Dans notre application, le poids ω est identique pour toutes les contraintes et donc égal à la matrice identité $I_{m \times m}$.

Soit

$$\tilde{L} = \left(\begin{array}{c|c} L & \\ \omega I_{m \times m} & 0_{m \times m} \end{array} \right). \quad (5.17)$$

Un exemple illustrant la construction de cette matrice est donné,

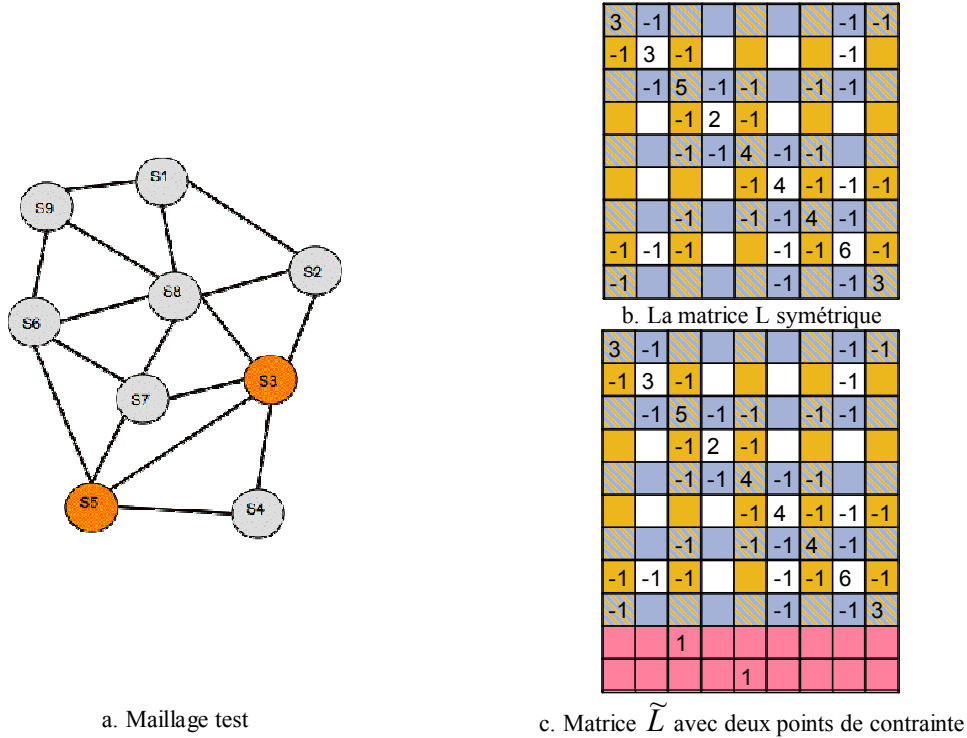


Figure 5.5 : Exemple d'une matrice laplacienne associée à un (petit) maillage

L'ensemble des contraintes rend le système d'équations (5.18) surdéterminé. En général, il admet plusieurs solutions. Néanmoins, la matrice \tilde{L} étant de plein rang, il existe une unique solution au sens des moindres carrés :

$$\hat{x} = \arg \min_x \left(\|Lx - \delta^{(x)}\|^2 + \sum_{j \in C} \omega^2 |x_j - c_j|^2 \right). \quad (5.19)$$

Le vecteur \hat{x} peut alors être exprimé comme solution de l'équation suivante :

$$(\tilde{L}^T \tilde{L}) \hat{x} = \tilde{L}^T b, \quad (5.20)$$

où $b = (\delta, \omega c_1, \dots, \omega c_m)^T$ et $(.)^T$ désigne l'opérateur de transposition.

En pratique, ce système peut être résolu pour chaque composante x , y et z en appliquant la factorisation de Cholesky [Toledo03], en observant que la matrice L est creuse et que la matrice $M = (\tilde{L}^T \tilde{L})$ est symétrique et définie positive.

Notons que la matrice laplacienne est par définition singulière. Néanmoins, l'ajout des points de contraintes régularise ce problème intrinsèquement mal posé et rend la factorisation stable.

5.3.4. Déformation par courbes *Wires*

Introduite par Singh *et. al.* [Singh98], et récemment intégrée comme outil de déformation dans le logiciel de modélisation/animation 3D Maya, l'approche des *wires* est devenu un outil populaire pour déformer des maillages. Le principe consiste à associer à un modèle 3D un ensemble de courbes paramétriques, appelées *wires*, qui représentent des contrôleurs de type 1-D. L'utilisateur déforme de manière interactive la courbe à partir d'une position de référence (ou courbe source) vers une courbe cible, par combinaison de translations, rotations et homothéties. La déformation par *wires* est ensuite extrapolée de manière à définir un champ de déplacement lisse, qui sera utilisé par la suite pour déformer le modèle 3D. Notons que la technique par courbes *wires* a été employée par Pyun *et. al.* [Pyun04] pour l'extraction des caractéristiques faciales. Mentionnons également l'extension plus récente de cette méthode proposée récemment dans [Kho05], qui offre un outil permettant de déformer des régions entières à partir de deux courbes.

Pour une formalisation mathématique rigoureuse, introduisons tout d'abord quelques définitions.

Une déformation par *wires* est définie par un ensemble $\langle R, D, s, r, f \rangle$, où R est une courbe de référence et D une courbe déformée (ou cible). Le facteur s représente un paramètre d'échelle, r définit un rayon d'influence radiale autour de la courbe de référence R et $f : \mathbb{R}^+ \rightarrow [0,1]$ est une fonction implicite de modulation, décroissante et C^1 – continue, satisfaisant les conditions suivantes :

- (i) $f(0) = 1$,
 - (ii) $f(x) = 1$ pour $x \geq 1$
 - (iii) $f'(0) = 1, f'(1) = 1$.
- (5.21)

Un exemple de fonction modulatrice satisfaisant l'ensemble des propriétés énoncées est donné par :

$$\forall x \in [0,1], f(x) = (x^2 - 1)^2. \tag{5.22}$$

Soient $R(u) \subset \mathbb{R}^3$ la courbe source (ou référence), paramétrée par l'abscisse curviligne $u \in [0,1]$ et P un point arbitraire de \mathbb{R}^3 . Notons par u_p la valeur paramétrique du point de la courbe minimisant la distance de P à la courbe. La fonction suivante est alors construite :

$$F(P, R) = f\left(\frac{\|P - R(u_p)\|}{r}\right). \quad (5.23)$$

La fonction F associe au point P un coefficient d'influence de la courbe R . A partir des propriétés de la fonction f , on déduit aisément :

- $F(P, R) = 0$, pour $\|P - R(u)\| = \pm r$,
- $F(P, R) = 1$, pour $\|P - R(u)\| = 0$
- $F(P, R)$ décroît de 1 à 0, pour r variant de 0 à r .

Intuitivement, la fonction modulatrice f combinée au rayon d'influence r définit un volume d'influence autour de la courbe de référence R . Seuls les points situés à l'intérieur de ce volume ont un coefficient d'influence associé non- nul et seront par conséquent déformés.

Le processus de déformation par courbes *wires* est illustré Figure 5.6. Soit $P \in \mathbb{R}^3$ un point arbitraire de l'objet à déformer. Sa position P_{def} après déformation est obtenue comme suit. Soit P_r le point le plus proche sur la courbe de référence R et P_d son homologue sur la courbe cible D .

Si $F(P, R)$ est égale à zéro, le point P est localisé à l'extérieur du volume d'influence de la courbe de référence et sa position ne sera pas affectée par le processus de déformation.

Au contraire, pour des valeurs de $F(P, R)$ strictement positives, une succession de transformations géométriques lui est appliquée pour déterminer sa position après déformation (P_{def}). Plus précisément, l'algorithme, illustré Figure 5.6, est constitué des étapes suivantes :

- 1) Mise à l'échelle du point P par rapport à P_r pour déterminer un point intermédiaire, noté P_s et exprimé par :

$$P_s = P + (P - P_r)(1 + (s - 1)F(P, R)) ; \quad (5.24)$$

- 2) Rotation de P_s d'angle θ autour de l'axe de direction $D'(P_d) \times R'(P_r)$ passant par $R(P_r)$, pour obtenir P_{rot} ;
- 3) Ajout d'une translation $(D(P_d) \times R(P_r))F(P, R)$ à P_{rot} pour obtenir la position finale P_{def} :

$$P_{def} = P_r + (D(P_d) \times R(P_r))F(P, R).$$

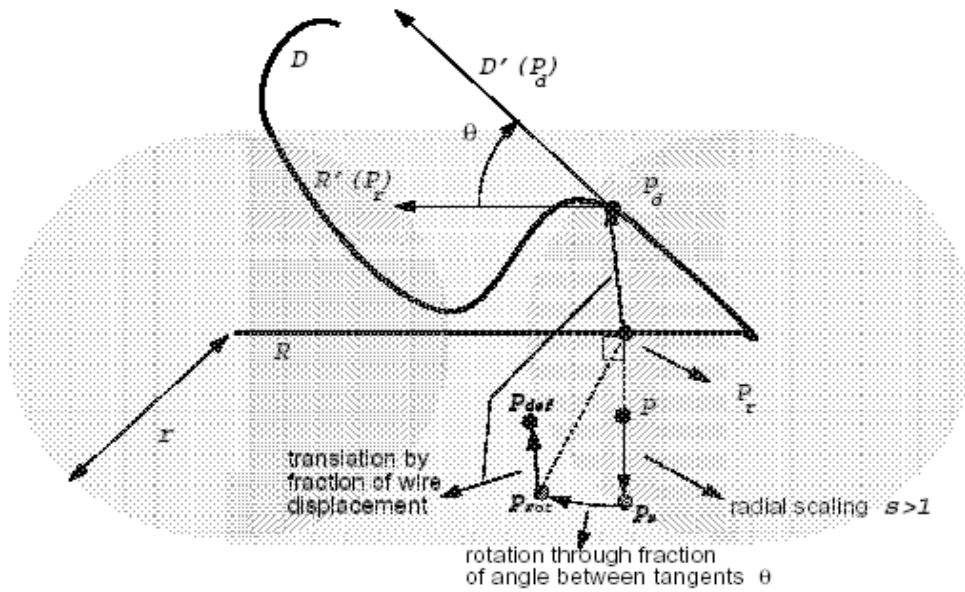


Figure 5.6 :Déformation d'un point P à un point P_{def} [Singh98]

La variation des paramètres r et s , ainsi que le choix de différentes fonctions modulatrices f , permet d'obtenir divers effets de déformation, comme illustré Figure 5.7.

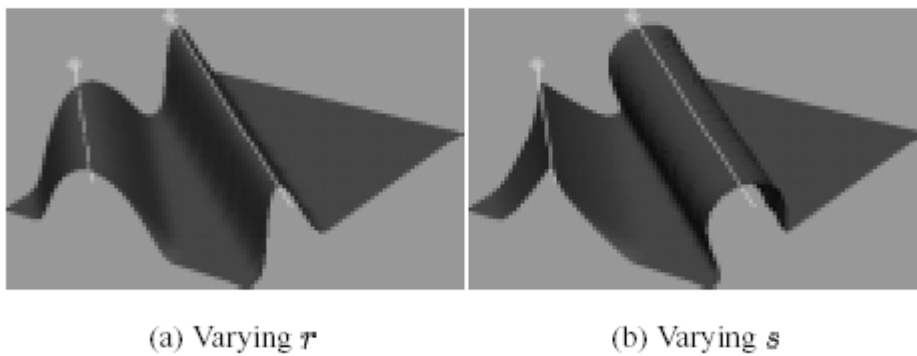


Figure 5.7 : Effets de déformation obtenus par variation des paramètres r (a) et s (b). [Singh98]

Les trois méthodes de déformation, par RBF, par coordonnées laplaciennes ou encore par courbes wires offrent des outils puissants et intuitifs de déformation aussi bien 2D que 3D

5.3.5. Comparaison expérimentale

Afin d'évaluer et de comparer objectivement les performances des différentes approches, nous avons considéré un ensemble de modèles 3D maillés correspondant à plusieurs expressions d'un visage virtuel (Figure 5.8). Ces modèles ont été créés dans le cadre du projet national LABIAO [Labiao], qui vise à fournir des outils d'aide à la communication pour les déficients auditifs. Tous les modèles représentent une expression particulière, partagent la même topologie et sont constitués de 7584 sommets et 14775 triangles. Etant donné que les modèles d'expression sont disponibles, la précision et l'efficacité des méthodes de déformation retenues peut être objectivement évaluée, en calculant la distance entre le maillage représentant l'expression cible et ceux obtenus par déformations. Pour chaque expression, le critère de distance considéré est l'erreur de Hausdorff moyenne entre les deux surfaces, déformée et cible, calculée avec l'outil *Mesh* [Mesh].

Rappelons tout d'abord la définition mathématique du critère de distance considéré. Soient S_1 et S_2 deux surfaces. L'erreur de Hausdorff moyenne, notée d_m , entre S_1 et S_2 , est définie par :

$$d_m(S_1, S_2) = \max \{ d(S_1, S_2), d(S_2, S_1) \}, \quad (5.25)$$

où :

$$d(S_1, S_2) = \frac{1}{|S_1|} \iint_{p \in S_1} d(p, S_2) dS_1, \quad d(S_2, S_1) = \frac{1}{|S_2|} \iint_{p \in S_2} d(p, S_1) dS_2; \quad (5.26)$$

et $d(p, S)$ représente la distance minimale entre un point p et la surface S :

$$d(p, S) = \min_{p' \in S} \|p - p'\|_2, \quad (5.27)$$

avec $\| \cdot \|$ désignant la norme L_2 .



a. Pose neutre avec points de contrôle

b. "Bouche triste"

c. "sourcil droit"

d. "sourcil gauche"

Figure 5.8 : Modèle 3D utilisé pour l'évaluation : pose neutre incluant les points caractéristiques utilisés et expressions cibles

Concernant les éléments de contrôle de la déformation, nous avons adopté un modèle très simple constitué de 5 points de contrôle pour la bouche et de 5 autres pour chaque sourcil. Les positions cibles sont déterminées manuellement, une seule fois pour l'ensemble des trois méthodes retenues. Dans le cas des méthodes par RBF et par coordonnées laplaciennes, les points caractéristiques sont utilisés directement comme

points de contrainte, tandis que pour l'approche par courbes *wires*, une courbe NURBS est construite en appliquant l'algorithme d'approximation NURBS décrit dans [Piegl95].

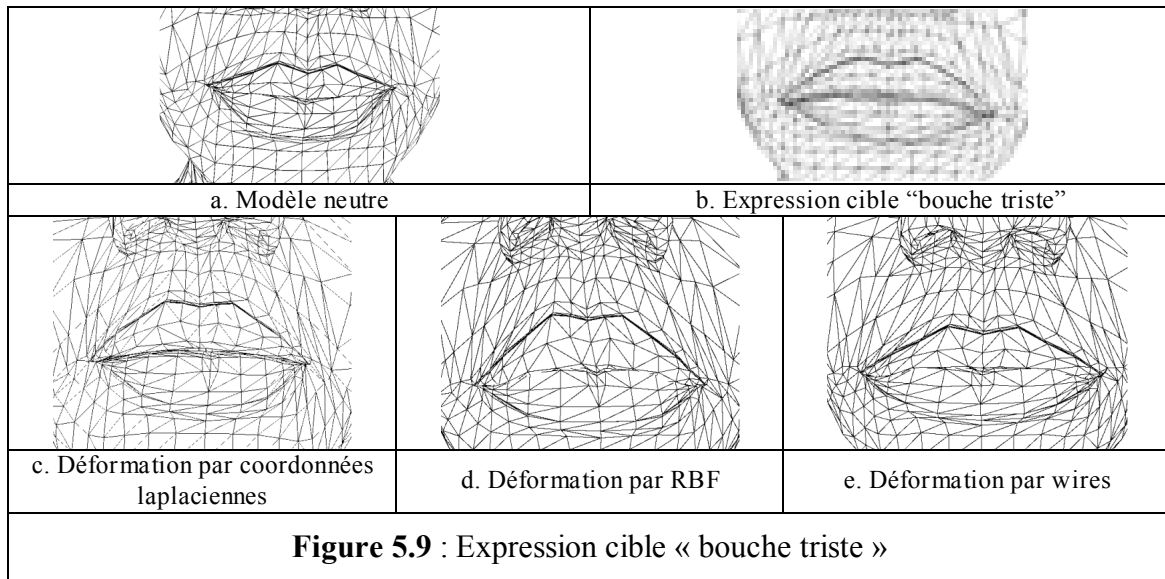
Le Tableau 5.2 résume les erreurs moyennes entre modèles cibles et déformés. Les erreurs sont normalisées par rapport à la diagonale de la boîte englobante de l'objet source.

	Wires	RBF	Coordonnées laplaciennes
"Bouche triste"	4.74	3.74	1.98
"Sourcil droit"	6.22	3.58	4.14
"Sourcil gauche"	3.75	3.86	4.57

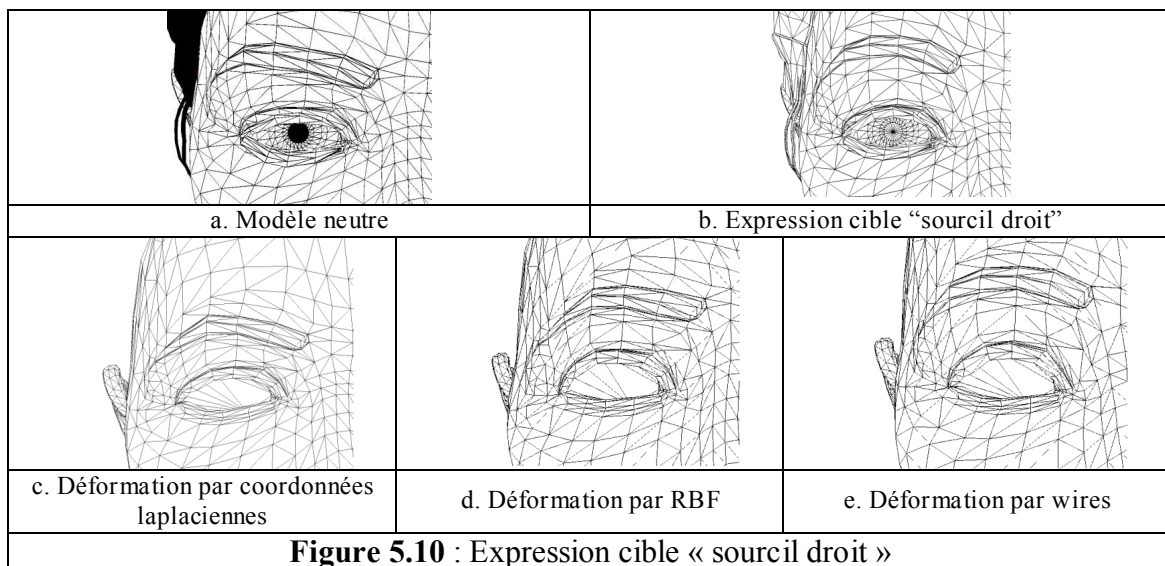
Tableau 5.2 : Erreurs moyennes entre modèles cibles et déformés pour les trois méthodes de déformation retenues ($\times 10^{-3}$)

Les résultats obtenus montrent que les trois méthodes ont des performances similaires, les erreurs moyennes se répartissant dans la même gamme de valeurs. Néanmoins, la méthode par RBF se distingue par un comportement stable dans chacune des déformations entreprises ainsi que sa facilité d'utilisation. Celle par wires, démontre des difficultés d'utilisation dans notre contexte, en effet les paramètres variables (cf. 5.3.4) qui devront être choisis dépendent très fortement de l'emplacement sur le visage de la déformation. Enfin les coordonnées laplaciennes permettent d'obtenir un résultat visuel cohérent, par une interaction faible. De plus, il est intéressant de noter que ce genre de manipulation n'est pas optimal pour cette dernière méthode de déformation, qui par définition (cf. 5.3.3) plus le nombre de points de contraintes est grand plus elle donne de meilleurs résultats.

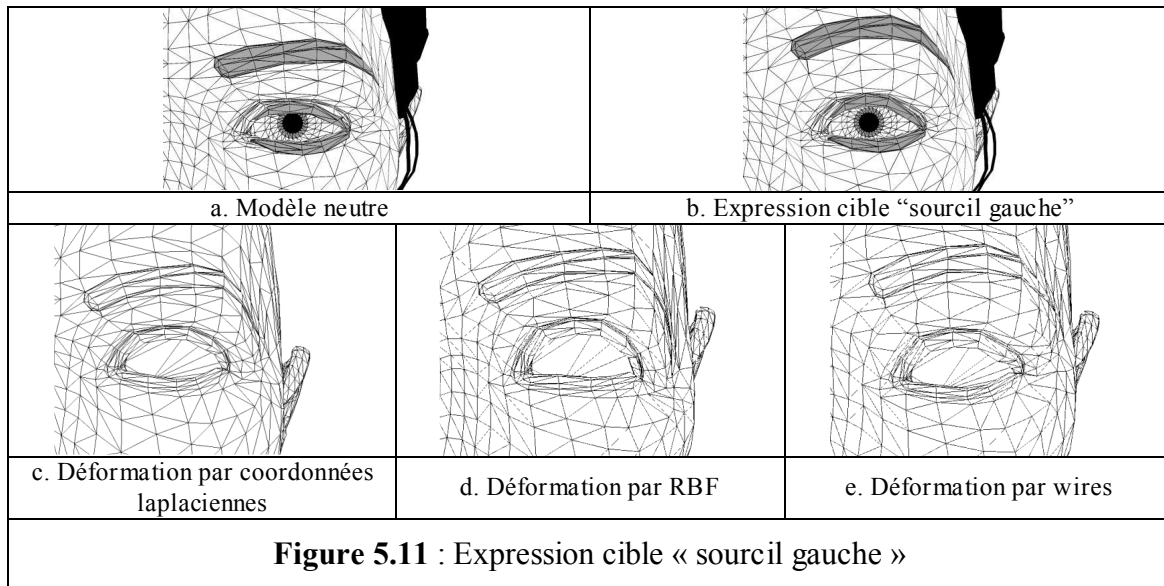
Les figures Figure 5.9 Figure 5.10 Figure 5.11 montrent les modèles déformés correspondants, la figure Figure 5.9 concerne l'expression de « bouche triste »,



la Figure 5.10 celle pour le « sourcil droit »,



et enfin la Figure 5.11 pour le « sourcil gauche »



5.3.6. Spécification des contraintes

Quelle que soit la méthode de déformation utilisée, il revient à l'utilisateur de spécifier interactivement l'ensemble des contraintes.

Afin de garantir une interaction aisée et ergonomique, plusieurs outils ont été intégrés. L'utilisateur peut spécifier des contrôleurs soit 0D, soit 1D.

Dans tous les cas, le protocole de spécification des contraintes implique les trois étapes suivantes :

- spécification des sources, *i.e.* position initiale (de référence) des contrôleurs,
- spécifications des cibles, *i.e.* leur position finale,
- spécification des ancrs, *i.e.* des points ou des courbes dont la position doit rester inchangée.

Dans le cas des contrôleurs 0D, la mise en correspondance des sources et des cibles est réalisée directement par le protocole d'acquisition adopté. Notons qu'il est indispensable de spécifier le même nombre de points sources et cibles et dans le même ordre.

Dans le cas des contrôleurs 1D, une procédure d'échantillonnage uniforme des courbes source et cible est préalablement appliquée, pour garantir le même nombre de points. Ensuite, la mise en correspondance des deux courbes est automatiquement réalisée.

Dans ce même contexte, notons que les méthodes de déformation par RBF et par coordonnées laplaciennes, nécessitent la spécification des sommets du maillage en tant que points sources. Ces sommets sont déterminés par un critère de distance par rapport à la courbe source. Leur position cible est calculée par le processus de mise en correspondance des deux courbes.

5.4 Placage du maillage enfant sur le maillage parent

Le placage (ou « collage virtuel ») du maillage 2D *enfant* sur le maillage 3D *parent* représente l'étape essentielle de l'approche proposée et intégrée dans la plate-forme *FaceTOON*. Elle permet de relier le monde 2D, où le dessinateur crée les caractéristiques faciales, au support 3D de visage. Dans cette étape, pour permettre la construction des séquences d'animation par procédures d'interpolation, aucune modification topologique n'est permise, ni au niveau du maillage 2D *enfant*, ni à celui de la surface *parent*.

Le placage débute par l'insertion du maillage 2D dans la fenêtre 3D, réalisé de façon interactive, par un simple *drag & drop*. L'utilisateur sélectionne ensuite le maillage enfant et ajuste sa taille et sa position pour le positionner à l'endroit souhaité. Cette opération s'inspire des pratiques traditionnelles des dessinateurs par couches de celluloids (*cf.* 1). Une fois l'emplacement spécifié validé, le placage permet de relier les caractéristiques géométriques des deux maillages. La surface 2D enfant est aussi tout d'abord déformée de façon à épouser la forme du support 3D parent. Cela est réalisé par projection des sommets de la surface enfant sur le maillage parent. La profondeur *z* de la surface parent au point de projection est associé au sommet enfant considéré. Cette procédure de déformation de la surface enfant conditionnellement à la géométrie du maillage parent est illustrée Figure 5.12.

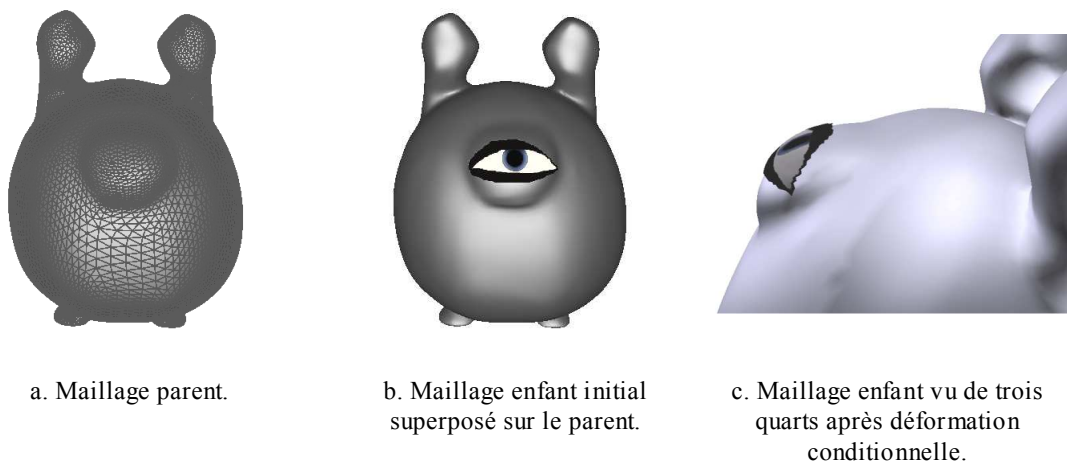


Figure 5.12 : Déformation conditionnelle de la surface enfant par rapport au maillage parent

Ensuite, tous les attributs, à la fois géométriques (*e.g.*, cartes de déformation) et photométriques (*e.g.* couleur, texture...) associés au maillage enfant sont transmis à la surface parent.

La procédure de placage proposée et intégrée dans la plate-forme *FaceTOON* est illustrée Figure 5.13.

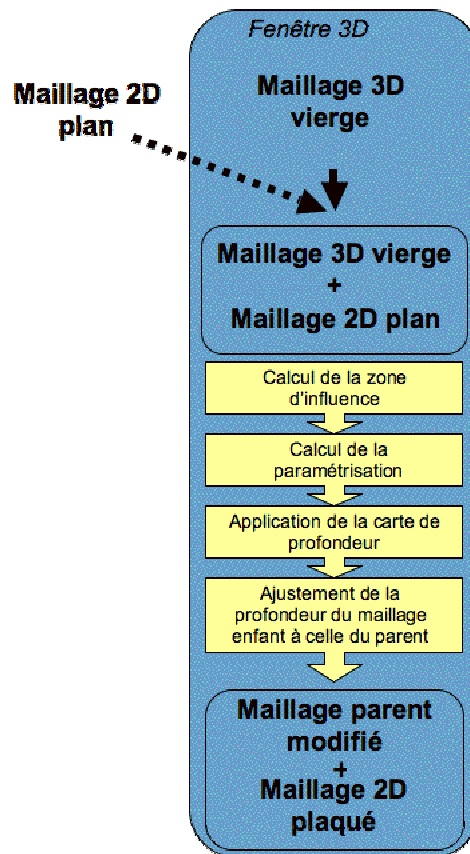


Figure 5.13 : Algorithme de placage de l'objet enfant 2D sur la surface parent 3D

Elle comporte les deux étapes suivantes :

- détermination de la zone d'influence,
- calcul de la paramétrisation.

Détaillons à présent chacune de ces étapes, en commençant par la procédure de calcul de la zone d'influence.

5.4.1. Calcul de la zone d'influence

La *région (ou zone) d'influence* est définie comme le sous-ensemble des sommets du maillage *parent* affectés par le maillage enfant. Cette zone d'influence est déterminée par simple projection des sommets visibles du maillage parent sur la région de projection du maillage enfant. Ce processus de double projection est effectué par rapport à la direction frontale de vue.

Pour déterminer de manière rapide cette zone d'influence deux approches distinctes ont été développées et testées, la première exploitant les fonctions internes OpenGL, la seconde fondée sur un processus géométrique.

Dans le premier cas, le maillage *enfant* est rendu automatiquement dans une image binaire, qui sert de masque de projection. Ce masque est obtenu par OpenGL. Pour chaque sommet visible du maillage parent, on vérifie son appartenance au masque ainsi déterminé. Notons que le masque de visibilité des sommets parents est également

calculé à l'aide de OpenGL, qui intègre un algorithme de Z-Buffer. Cela permet de sélectionner uniquement l'ensemble visible des sommets parents se projetant sur le masque de l'enfant et de construire ainsi la zone d'influence. La limitation de cette première méthode vient du processus de discrétisation mis en œuvre par OpenGL pour déterminer le masque de l'enfant. Cela correspond à déterminer une image pixélisée à partir de coordonnées de sommets réels. Cette perte de précision due à la discrétisation peut conduire à des discontinuités et artefacts visuels au moment où l'on applique les procédures de déformation et d'interpolation pour obtenir les animations. En effet, d'une pose à une autre, certains sommets se projetant sur le bord du masque peuvent être pris ou non en considération dans la zone d'influence.

Afin de pallier cet inconvénient, une seconde approche, plus précise a été élaborée. Il s'agit cette fois d'abandonner complètement les fonctionnalités OpenGL et de construire géométriquement la zone d'influence, en considérant les valeurs réelles des coordonnées des sommets.

Pour chaque triangle de l'objet parent, nous calculons tout d'abord le vecteur normal associé. Le triangle est considéré comme étant susceptible d'être visible si et seulement si le produit scalaire entre le vecteur normal et la direction de vue est positif. Cela élimine d'entrée de jeu et à un coût de calcul faible un grand nombre de triangles candidats. A partir de cet ensemble initial, des tests de visibilité de type lancé de rayon sont appliqués. Plus précisément, un segment de droite reliant chaque sommet parent au centre de la caméra 3D est construit. On détermine ensuite les intersections de ce segment de droite avec l'ensemble des triangles parents précédemment déterminés. Si le rayon intersecte l'intérieur d'au moins un triangle, alors il est considéré comme invisible. Dans le cas contraire, le sommet est considéré comme visible. Cette procédure de lancé de rayon est répétée, pour l'ensemble des sommets visibles, en calculant cette fois l'intersection avec les triangles 2D du maillage enfant. Si le rayon correspondant à un sommet parent visible intersecte l'intérieur d'un triangle enfant, alors il est considéré comme faisant partie de la région d'influence.

Pour accélérer cette procédure (de complexité quadratique en nombre de triangles), une optimisation supplémentaire a été adoptée. Elle consiste à considérer la boîte englobante de la surface enfant et à effectuer un test de visibilité par rapport à celle-ci, afin de réduire au maximum le nombre de sommets parents candidats à la région d'influence.

L'algorithme proposé est illustré Figure 5.14.

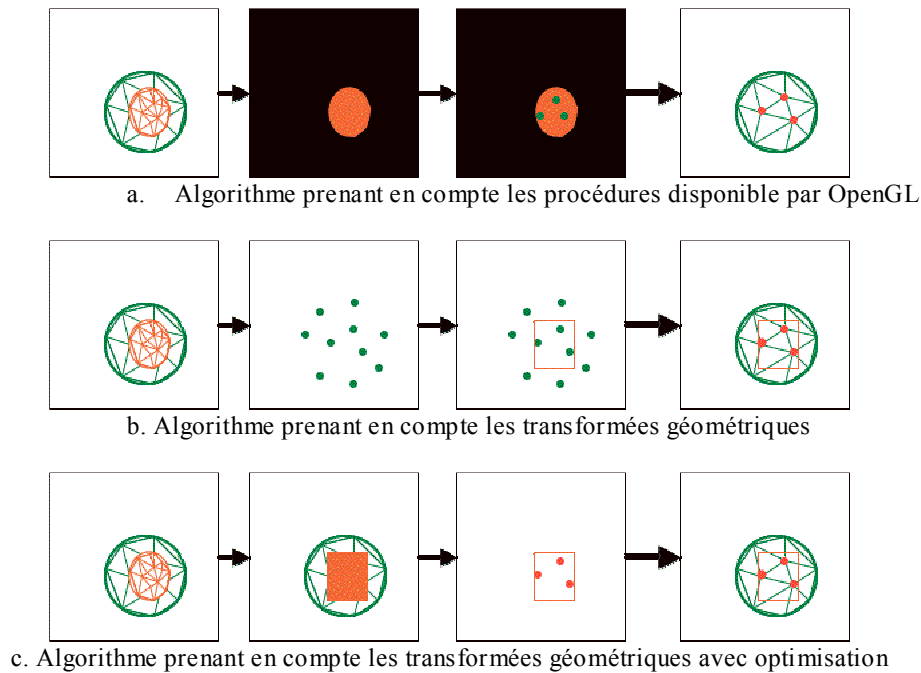


Figure 5.14 : Calcul de la zone d'influence du maillage parent

Les temps de calcul correspondant sont bien plus grands que ceux obtenus en appliquant les fonction optimisées de OpenGL. Ils restent néanmoins acceptables, de l'ordre de 100 ms pour des maillages enfant et parent de quelques milliers de sommets.

De plus, l'abandon de la discrétisation conduit à une région d'influence beaucoup plus précise, ce qui est crucial pour garantir une paramétrisation correcte.

L'axe de projection nécessaire au calcul de cette zone d'influence est l'axe selon la direction frontale de vue. Deux solutions pouvaient être envisagées :

1. L'axe choisi correspond à la direction frontale de vue : l'emplacement précis de projection est visible et intuitif.
2. L'axe choisi se construit par la droite formée du centre de gravité de la forme 2D à un sommet sur le maillage. Le sommet choisi est celui dont la distance euclidienne entre ce point et chaque sommet du maillage est la plus faible. Il est alors possible de « glisser » le maillage enfant sur la surface du maillage parent sans discontinuités sur les bords.

Dans le deuxième cas, la projection peut donner des résultats non souhaités, puisque l'utilisateur ne distingue pas la surface de support dans cette représentation. L'axe formé par la direction de la vue évite ces erreurs.

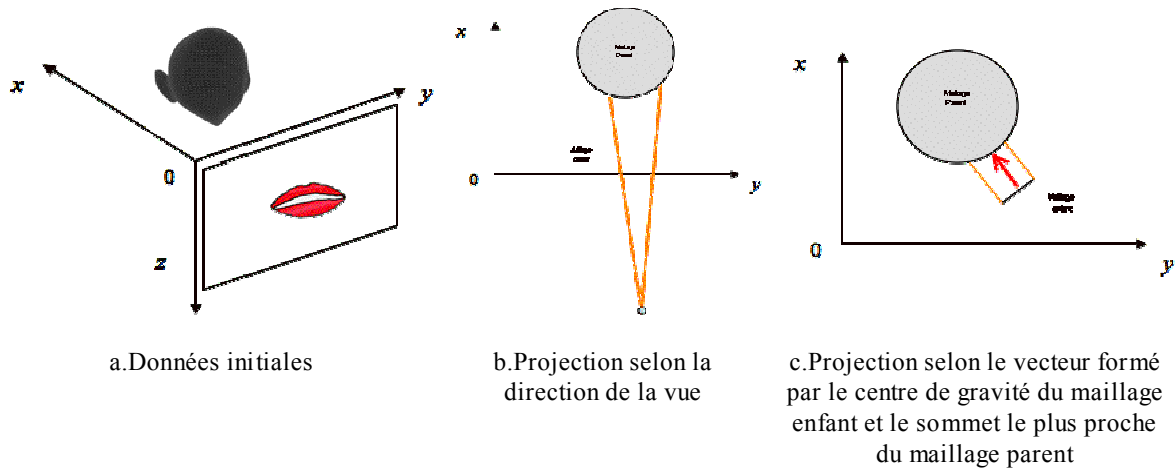


Figure 5.15 : Les différents types de projection possibles pour le placage de l'enfant sur le parent

5.4.2. Procédure de paramétrisation

Définir une paramétrisation revient à mettre en correspondance la surface 3D du maillage parent avec celle 2D du maillage enfant.

Pour formaliser les concepts, considérons l'ensemble des surfaces 3D de type variété (*manifold*) et homéomorphes à un disque (*i.e* tout point de la surface admet un voisinage homéomorphe à un disque fermé ou à un demi-disque). Etant donnée une surface 3D notée S , une paramétrisation de S est par définition une fonction bijective $f(u ; v)$ exprimée sur un sous-ensemble Ω de \mathbb{R}^2 à valeurs dans S (équation (5.28)).

$$\begin{aligned}
 f : \Omega \subset \mathbb{R}^2 &\rightarrow \mathbb{R}^3 \\
 (u, v) \in \Omega &\mapsto f(u, v) = [x(u, v), y(u, v), z(u, v)]^T
 \end{aligned}
 \tag{5.28}$$

L'ensemble Ω de \mathbb{R}^2 est appelé *domaine paramétrique*. La fonction inverse $g = f^{-1}$ est appelée paramétrisation inverse de la surface S . La Figure 5.16 illustre les concepts de paramétrisation directe et inverse pour un visage humanoïde. Notons que s'agissant d'une fonction bijective, définir une paramétrisation directe ou inverse est complètement équivalent. Cette observation est exploitée en pratique pour le cas des surfaces discrètes maillées, où il est plus aisé de spécifier la paramétrisation inverse.

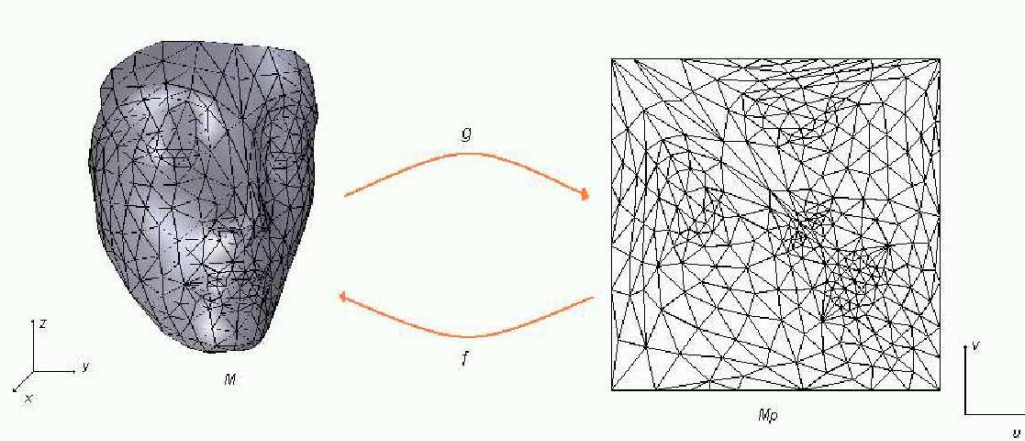


Figure 5.16 : Paramétrisation directe (f) et inverse ($g=f^{-1}$) d'un maillage 3D de visage

Dans notre cas, la surface 3D est approchée par un maillage triangulaire, noté $M = (V; T)$, où $V = \{v_1, v_2, \dots, v_N\}$ est l'ensemble des sommets et T l'ensemble des triangles du maillage. Un moyen simple de spécifier une paramétrisation inverse g serait de déterminer ses valeurs aux sommets V du maillage, en définissant ainsi une fonction discrète h telle que :

$$h : V \rightarrow V, \quad (5.29)$$

$$v_i \xrightarrow{h} (u_i, v_i)$$

La fonction g est ensuite définie par interpolation linéaire de h sur l'ensemble des triangles T . Ainsi, construire une paramétrisation inverse d'une surface triangulée revient à déterminer l'ensemble des valeurs des couples $(u_i; v_i)$ pour $i = 1, \dots, n$.

Plusieurs méthodes de paramétrisation de surface ont été proposées dans la vaste littérature consacrée à ce sujet [Tut63,Eck95,Float96,Float97,Desbr02].

Dans le cadre de nos développements, nous avons adopté et adapté la méthode MAPS (*Multiresolution Adaptive Parameteization of Surfaces*) [Lee98]. Dans sa formulation d'origine, celle-ci est construite sur un maillage de base déterminé à partir du maillage initial par une analyse multirésolution. Elle présente l'avantage significatif d'être applicable à des topologies arbitraires. Dans notre cas, le maillage de base est remplacé par le maillage enfant qui sert de domaine support pour construire la paramétrisation.

A chaque sommet de la zone d'influence du maillage parent précédemment déterminée, on associe les deux éléments suivants :

- l'index du triangle enfant sur lequel il se projette,
- les coordonnées barycentriques [Taub95] décrivant la position de sa projection à l'intérieur de ce triangle.

Rappelons que les coordonnées barycentriques $(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$ [Taub95] d'un point arbitraire p situé à l'intérieur d'un triangle (p_1, p_2, p_3) (Figure 5.17) sont les coefficients

positifs normalisés à l'unité qui déterminent de façon unique le point considéré. Elles sont définies par :

$$\lambda_1 = \frac{\text{aire}(p, p_2, p_3)}{\text{aire}(p_1, p_2, p_3)}, \quad \lambda_2 = \frac{\text{aire}(p_1, p, p_3)}{\text{aire}(p_1, p_2, p_3)}, \quad \lambda_3 = \frac{\text{aire}(p_1, p_2, p)}{\text{aire}(p_1, p_2, p_3)}. \quad (5.30)$$

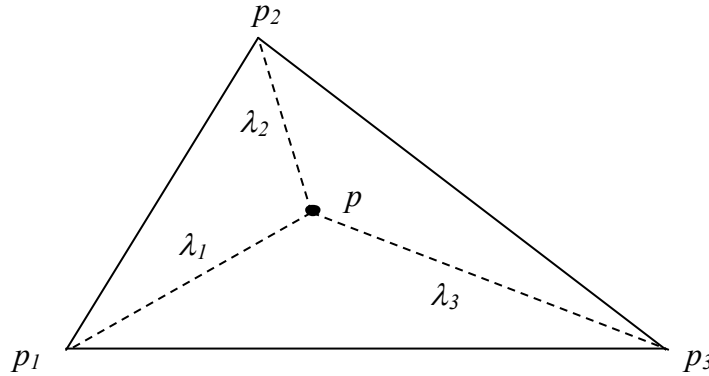


Figure 5.17 : Un point p et ses coordonnées barycentriques $(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$ dans le triangle (p_1, p_2, p_3)

Notons enfin que, pour accélérer le processus de calcul, la paramétrisation est effectuée conjointement avec la construction de la zone d'influence.

Une fois la paramétrisation parent/enfant déterminée, les attributs photométriques et géométriques du maillage enfant s'appliquent naturellement à la surface parent, en la modifiant au niveau de la zone d'influence déterminée. C'est le cas, en particulier, de la carte de profondeur associée au maillage enfant, qui est transférée au maillage parent.

5.4.3. Transfert de la carte de profondeur

Avec les notations de la Figure 5.17, pour un sommet arbitraire v de zone d'influence, soit $p = p(v)$ sa projection sur le maillage enfant, (p_1, p_2, p_3) le triangle enfant associé et $(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$ les coordonnées barycentriques correspondantes. A chaque triangle enfant on dispose d'une spécification de profondeur. Soit $z(p_i)$ la valeur de profondeur associée au point p_i et spécifiée dans la carte de profondeur associée, comprise entre 0 et 255.

La valeur de variation de profondeur associée au point v est définie par interpolation linéaire barycentrique, à partir des valeurs $z(p_i)$:

$$z(v) = \sum_{i=1}^3 \lambda_i z(p_i). \quad (5.31)$$

Une normalisation est ensuite appliquée à cette première valeur, pour obtenir la variation de profondeur finale, exprimée par :

$$z(v) = \frac{z(v) - 128}{255} \times \frac{1}{D} \times \alpha, \quad (5.32)$$

où D désigne la diagonale de la boîte englobante du parent et α est un facteur de pondération spécifié par l'utilisateur. Cette normalisation assure qu'un niveau de gris de 128 dans la carte de profondeur est considéré comme neutre.

Cette variation de profondeur s'applique enfin au point v , selon la direction de sa normale comme décrit dans l'équation suivante :

$$v_{final} = v + z(v) \times n(v) \quad (5.33)$$

où $n(v)$ désigne le vecteur normal unitaire au sommet v .

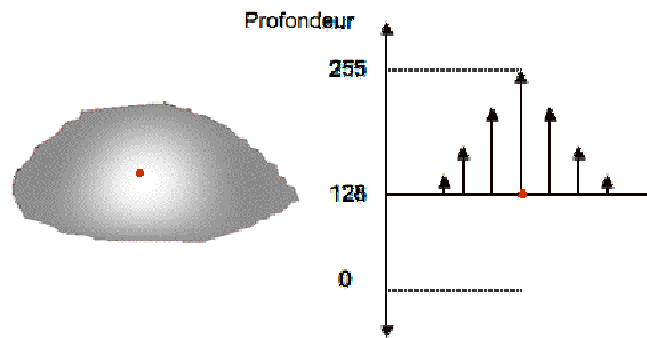


Figure 5.18 : Illustration des vecteurs de mouvements engendrés par la carte de profondeur

Notons que l'approche de placage des surfaces enfant et parent par paramétrisation adoptée rend possible la gestion dynamique des éventuelles modifications et des ajustements. Ainsi, à tout moment du processus de modélisation, l'utilisateur a la possibilité de revenir en arrière et de raffiner son modèle, soit en ajustant la taille et la position, soit en modifiant la forme. Pour cela, un *buffer* est gardé en mémoire tout au long du processus de modélisation, avec la zone d'influence, la paramétrisation associée et les variations de profondeur appliquées.

5.5 Déformation par manipulation directe 3D

Une dernière méthode de déformation, cette fois complètement 3D, a été intégrée dans la plate-forme *FaceTOON* afin de simuler les mouvements de la mâchoire inférieure.

Le mouvement réel de la mâchoire correspond à un mouvement rigide de rotation autour d'un axe. Modéliser de façon réaliste ce mouvement, en apparence très simple, ainsi que prendre en compte les différents degrés de liberté associés, nécessite néanmoins une modélisation lourde et complexe. C'est le cas des modèles par squelette d'animation proposés dans [Burt71, Shap95, Lew00]. Pour éviter cela, et pour répondre aux objectifs d'animation faciale de dessins animés, le plus souvent peu réalistes, nous avons adopté une approche différente, inspirée de [Botsch04].

Dans [Botsch04], les auteurs étendent les méthodes de déformation par formes libres [SedPar86,Coq90], en introduisant :

- un manipulateur à neuf degrés de liberté, incluant translations, rotations, et changements d'échelle,
- une fonctionnelle énergétique à support anisotrope, fondée sur une paramétrisation de surface.

La méthode proposée présente de nombreuses similarités avec celle par coordonnées différentielles présentée au paragraphe 5.3.3. Pour intégration dans la plate-forme, nous avons retenu le principe d'interaction par manipulateurs proposé dans [Botsch04], en le combinant avec la méthode de déformation par coordonnées laplaciennes.

De la même manière que dans le cas 2D, un ensemble de points de contraintes doit être spécifié, cette fois directement dans la fenêtre 3D. Pour permettre une sélection rapide et aisée, nous avons mis en place un outil d'interaction de type *brush* qui permet de spécifier des masques directement dans la zone de rendu 3D. Deux types des masques, représentés avec des couleurs différentes et correspondant à deux régions 3D de contrôle, peuvent être spécifiés. Il s'agit :

- du masque de la région de manipulation, incluant un ensemble de sommets déformés par mouvements rigides,
- et du masque de la zone mobile, intégrant l'ensemble des sommets affectés par la déformation,

Une troisième région frontalière entre les sommets mobiles et le reste des sommets du maillage est également déterminée, cette fois automatiquement par un processus de propagation. Sa frontière connexe aux sommets fixes sera utilisée comme ensemble de points ancrés, dont la position restera inchangée.

Pour diminuer la complexité de calcul, la méthode de déformation par coordonnées laplaciennes sera appliquée uniquement au sous-maillage défini par l'ensemble des sommets mobiles.

5.6 Interpolation des poses clefs

Pour générer les séquences d'animation aux cadences vidéo habituelles (25 à 30 trames par seconde), il est nécessaire d'appliquer un mécanisme d'interpolation des poses clefs. C'est lors de cette étape que l'approche proposée de création de poses clefs par placage de maillages enfants 2D sur une même surface parent 3D parent révèle toute son utilité.

Notons tout d'abord qu'effectuer l'interpolation directement dans l'espace des poses clefs obtenues ne peut pas être une solution acceptable. Même si couramment adoptée par la plupart des logiciels d'animation supportant des mécanismes d'interpolation ou de *morphing*, cette méthode n'est pas applicable dans le cas de dessins animés. La raison de ce phénomène est liée au caractère souvent exagéré de ces animations, où entre deux poses clefs successives les éléments de visage peuvent être relativement distants. Appliquer directement une interpolation entre de telles poses conduirait à l'apparition de bosses/creux non-désirés dans les trames intermédiaires.

Ce phénomène apparaît lorsque les caractéristiques associées au maillage enfant modifient la géométrie du maillage parent, l'exemple type étant celui des cartes de profondeur.

La Figure 5.19 illustre ce problème pour un exemple simple d'un maillage enfant disque plaqué sur une surface parent sphérique.

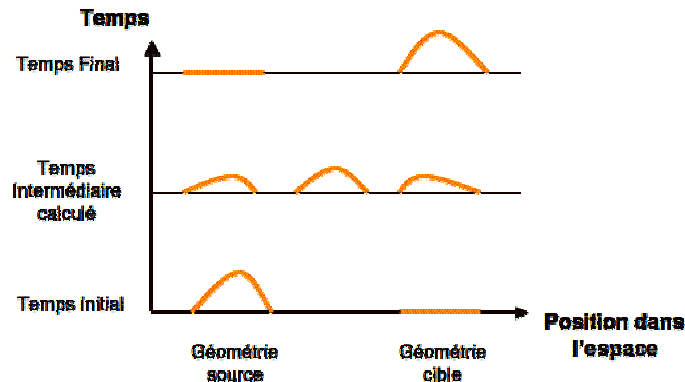


Figure 5.19 : Problèmes possibles lors d'une interpolation directe dans l'espace des poses clefs

La solution consisterait alors à augmenter le nombre de poses clefs nécessaires, mais comme celles-ci sont construites de manière interactive, cela compromettrait gravement l'efficacité du système.

L'approche par placage des maillages enfants permet notamment de s'affranchir de cet inconvénient, en effectuant l'interpolation dans l'espace des maillages enfant, indépendamment pour chaque caractéristique faciale. A chaque instant, le processus automatique de placage enfant/parent est alors appliqué pour déterminer la trame intermédiaire correspondante.

Notons que cette fois les trames interpolées correspondent à des poses correctes sans bosses ni creux.

On obtient ainsi une suite temporelle de poses 3D, prêtes à être visualisées/rendues, puis exportées aux formats VRML2.0 et MPEG-4.

5.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons explicité l'ensemble des méthodes intégrées et mises en œuvre dans la plate-forme *FaceTOON*. À chaque étape du processus de création de dessin animé spécifié dans le cahier des charges (*cf.* chapitre 4), nous avons proposé des méthodes adaptées, capables de répondre aux objectifs aussi bien créatifs que techniques fixés.

L'ensemble logiciel réalisé offre une conception originale qui couvre toute la chaîne de fabrication de dessins animés, depuis la création du modèle complet de visage, à partir d'un maillage parent vierge et d'un ensemble de dessins 2D, jusqu'à la génération des séquences 3D animées.

La construction de séquences d'animation, pour quelques exemples de personnages animés, est présentée en détails dans le chapitre suivant.

Chapitre 6 :

Interface logicielle et mise en œuvre

Résumé :

Ce chapitre présente les différents espaces de travail et interfaces utilisateur intégrés dans la plate-forme FaceTOON. Un exemple d'utilisation, pour un visage de personnage virtuel de dessin animé est illustré pour chaque des étapes du processus de création, depuis l'enrichissement d'un modèle de tête par des caractéristiques faciales, jusqu'à la création et la visualisation des séquences d'animation, en passant par la génération des poses clefs.

Mots clefs : *Interfaces logiciels, fenêtres utilisateur, interactivité, ergonomie, gestion des poses clefs, rendu et animation 3D.*

L'interface logicielle réalisée offre des outils d'interaction adaptés à chaque type de donnée manipulée. Elle inclut :

- un espace de travail 2D, dédié à la gestion de l'ensemble de dessins/maillages 2D, à leur manipulation interactive et à leur stockage dans une base de données dédiée,
- un espace de travail 3D, permettant la gestion des modèles 3D et des poses clés générées,
- une fenêtre d'animation, permettant la création de séquences d'animation ainsi que leur prévisualisation et stockage.

6.1 Espace de travail 2D

L'espace de travail 2D offre deux fenêtres d'interaction, une première de rendu qui permet la visualisation des dessins et des modèles 2D et une seconde qui permet la gestion (visualisation et stockage) de leur états/poses.

Pour chaque partie du visage, un fonctionnement type implique l'enchaînement des opérations suivantes :

- 1) chargement d'un dessin représentant une caractéristique faciale (bouche, œil droit, œil gauche, sourcil...) et stocké au format .png,
- 2) création (optionnelle) de sa carte de profondeur,
- 3) validation de son état neutre avant déformation,
- 4) déformations du modèle avec validation de chaque nouvel état créé.

Explicitons à présent ces différentes étapes.

6.1.1 Fonctionnement général

L'interface de gestion de dessins et de modèles 2D, avec fenêtres de rendu 2D et de gestion des poses clés est illustrée Figure 6.1.

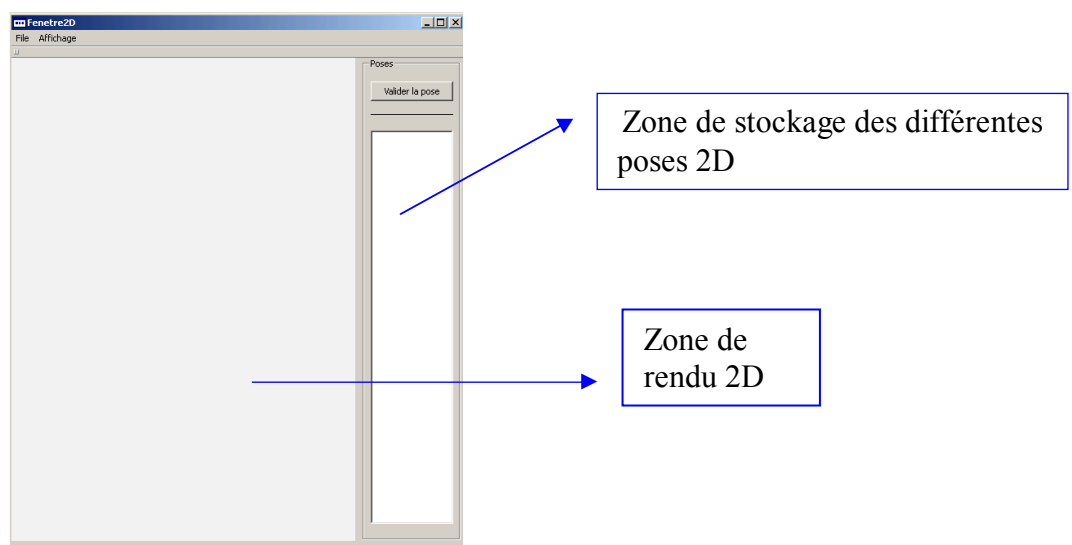
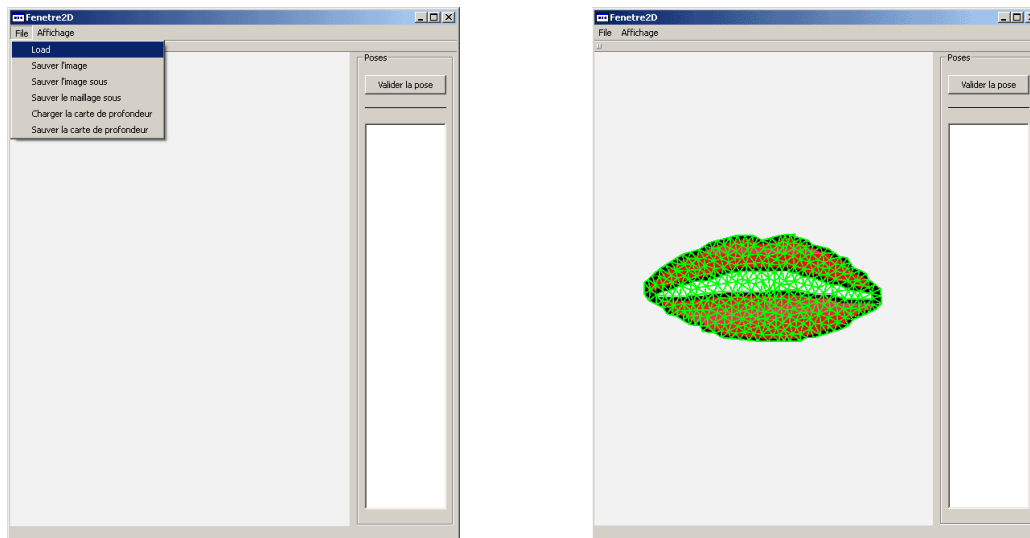


Figure 6.1 : Fenêtre de gestion de dessins et de modèles 2D

Le chargement d'un dessin 2D, ainsi que la visualisation de sa version triangulée, sont illustrés Figure 6.2, pour un exemple de bouche.



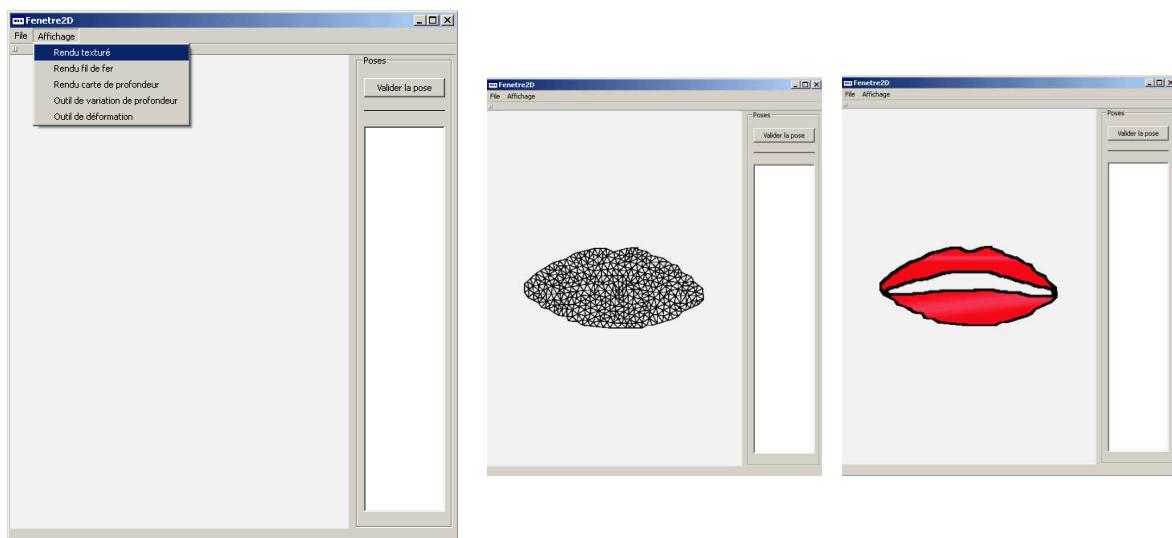
a. Choix menu chargement

b. Dessin chargé et triangulé

Figure 6.2 : Chargement d'un dessin 2D

Rappelons que l'image 2D chargée doit être représentée au format png avec une couche de transparence pour spécifier le support de l'objet.

A la suite de la procédure de triangulation de Delaunay sous contrainte intégrée (cf. Paragraphe 5.1) [Chew87], le système présentera le maillage plan 2D généré. Plusieurs modes de rendu sont alors possibles, soit en fil de fer (*wireframe*), soit avec texture, soit mixte. Ces différents types de rendu peuvent être sélectionnés via le menu « Affichage » de la barre d'outils (Figure 6.3).



a. Choix du mode de rendu à partir du menu affichage.

b. rendu en fil de fer.

c. rendu texturé.

Figure 6.3 : Sélection d'un mode de rendu

Un mode supplémentaire de rendu, dédié aux cartes de profondeur que l'on peut éventuellement associer aux maillages 2D a été également intégré.

6.1.2 Gestion/création des cartes de profondeur

Les cartes de profondeur peuvent être créées soit à l'aide d'un logiciel quelconque de dessin extérieur, soit en interne, à l'aide des méthodes de déformation par RBF intégrées dans la plate-forme.

Notons qu'en ce qui concerne la création externe, il est nécessaire d'assurer que les coordonnées de l'image sont identiques à celles de la carte de profondeur.

Comme précisé au chapitre précédent, la carte de profondeur est par définition une image en niveaux de gris représentant une variation de profondeur. Un niveau de gris égal à 128 est considéré comme « neutre », et ne modifie pas la surface parent. Au dessous de ce niveau, la surface parent sera creusée et au dessus elle sera extrudée. La carte de profondeur doit être sauvegardée au même format png que le dessin.

Pour créer une variation de profondeur en interne, un outil de variation de profondeur (Figure 6.4) a été intégré. A partir du mode de rendu en fil de fer, il permet de sélectionner un par un un ensemble de sommets et de leur associer une profondeur, à l'aide d'une fenêtre pop-up munie d'un curseur (Figure 6.4), qui s'active successivement pour chaque sommet sélectionné.

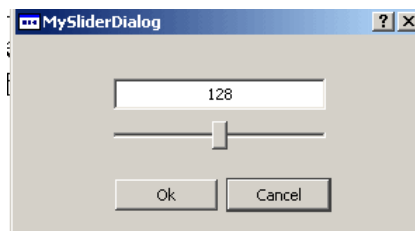


Figure 6.4 : Fenêtre *pop-up* pour la spécification interactive de la profondeur associée à un sommet sélectionné

Une fois que tous les sommets choisis ont été définis, la carte de profondeur est créée automatiquement. Pour la visualiser, il est nécessaire d'activer dans le menu affichage/rendu le mode « carte de profondeur ».

Ce processus de création des cartes de profondeur est illustré Figure 6.5.

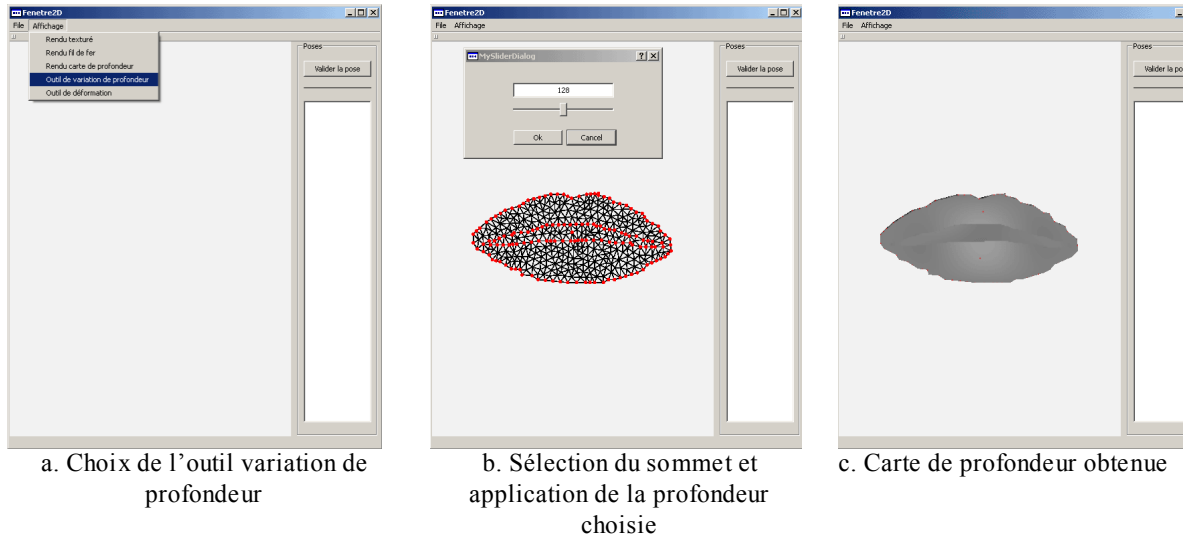


Figure 6.5 : Création d'une carte de profondeur par déformation RBF

Dans l'exemple de la Figure 6.5, trois sommets ont été sélectionnés, un situé à l'intérieur de la bouche, pour lequel une variation de profondeur négative a été spécifiée, et deux autres sur chacune des lèvres inférieure et supérieure, de variation de profondeur positive.

Notons que la valeur exacte de la valeur de profondeur n'est pas essentielle dans ce processus qualitatif : une spécification approximative est suffisante, seul le signe de la variation de profondeur étant important.

6.1.3 Déformation non-rigide des modèles 2D

Les outils de déformation sont disponibles depuis le menu « Affichage », en sélectionnant le volet « outil de déformation » (Figure 6.6).

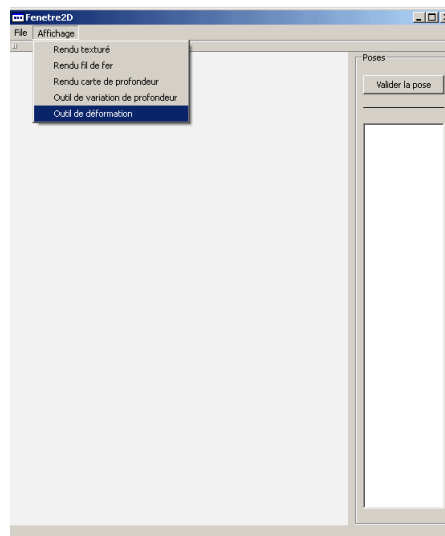


Figure 6.6 : Activation des outils de déformation

Une fenêtre *pop-up* est ainsi activée, qui propose à l'utilisateur la sélection des différents outils de déformation intégrés dans la plate-forme, ainsi que le type de contrôleurs, 0D et 1D. Ces différents modes sont explicités Figure 6.7.

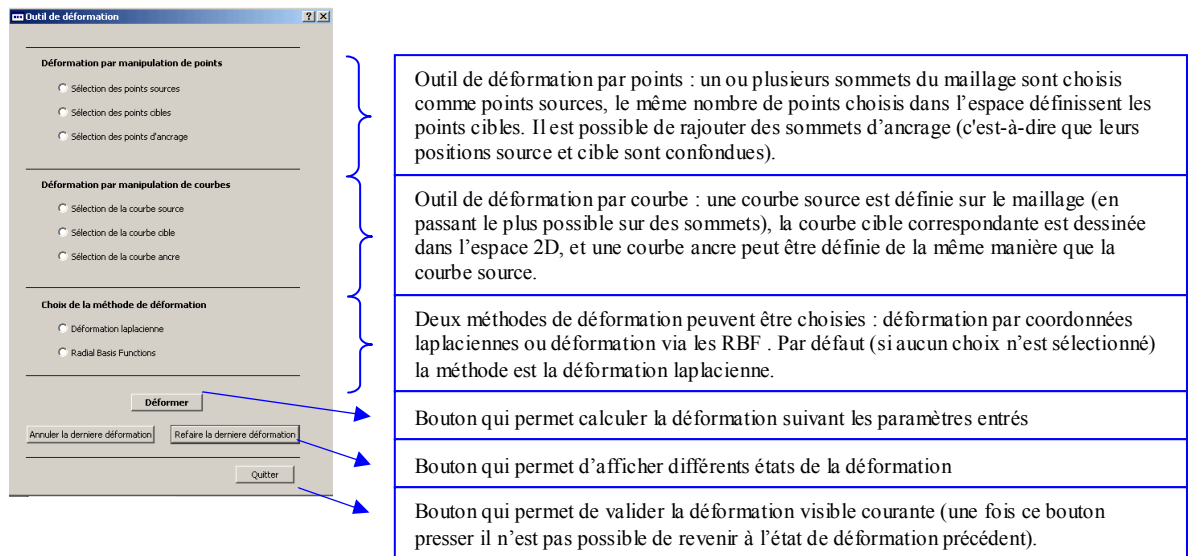
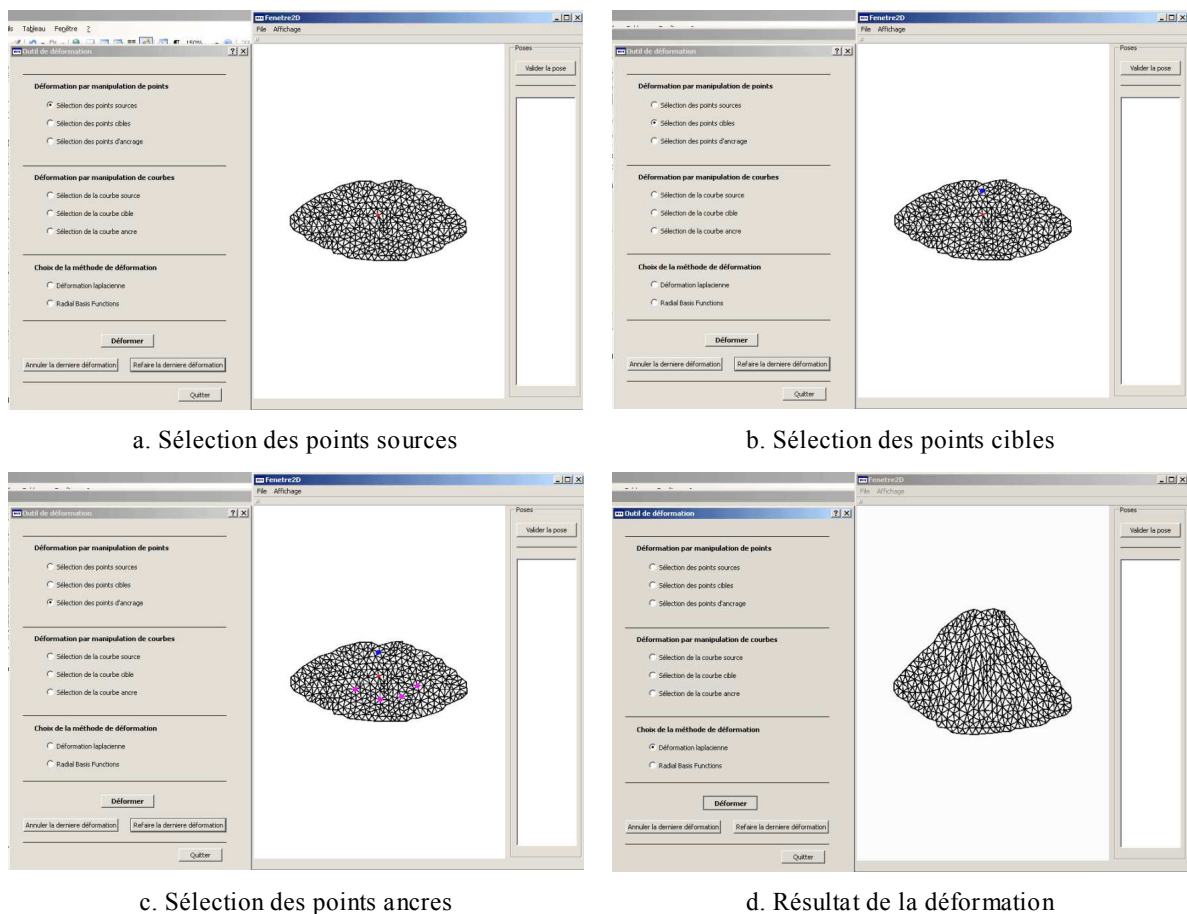


Figure 6.7 : Les différents outils/modes de déformation

La Figure 6.8 présente un exemple de déformation du modèle de bouche considéré, par méthode RBF et avec spécification des points de contrôle.



a. Sélection des points sources

b. Sélection des points cibles

c. Sélection des points ancrés

d. Résultat de la déformation

Figure 6.8 : Processus de déformation par points de contrôle.

Pour le même exemple de bouche, la Figure 6.9 illustre la procédure de déformation par courbes de contrôle. Le même mécanisme, avec spécification des courbes sources, ancre et cibles est ici mis en œuvre.

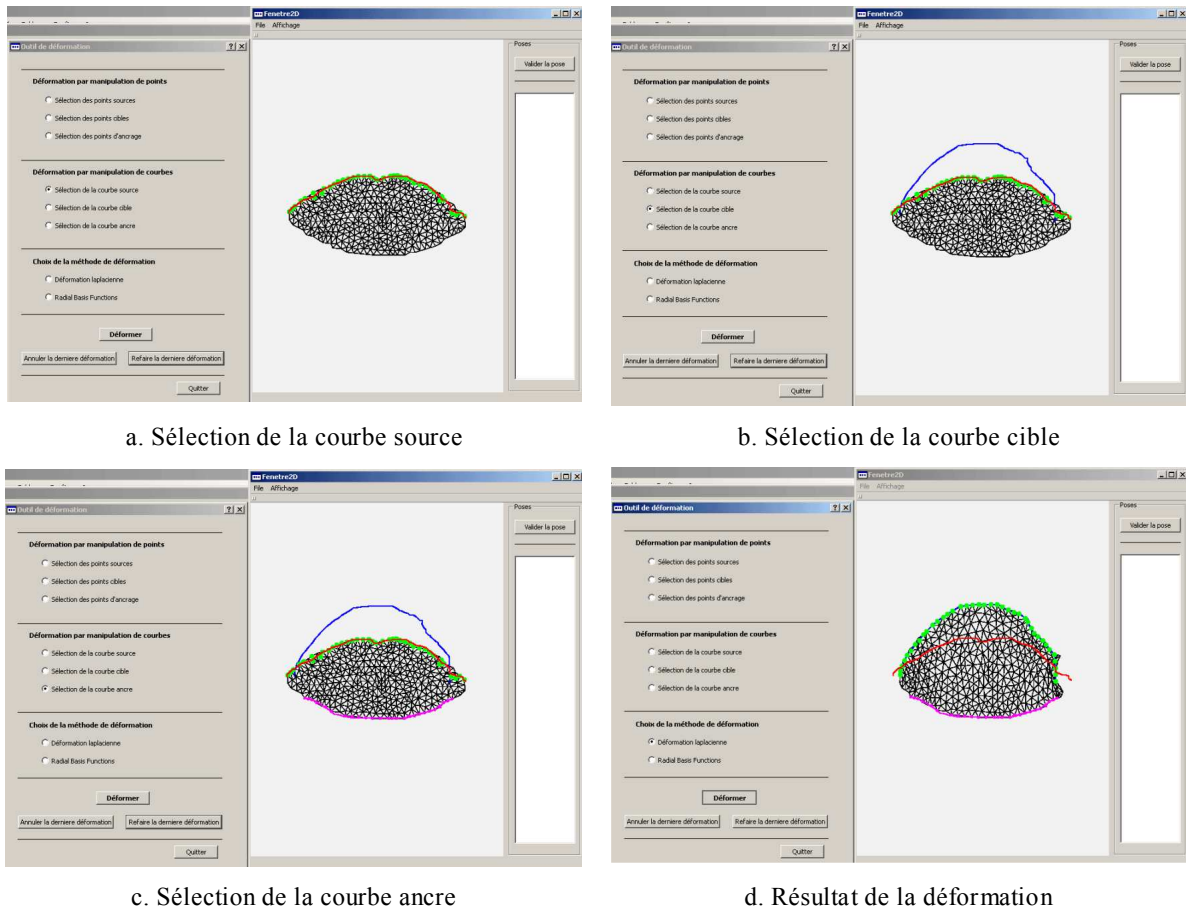


Figure 6.9 : Processus de déformation par courbes de contrôle

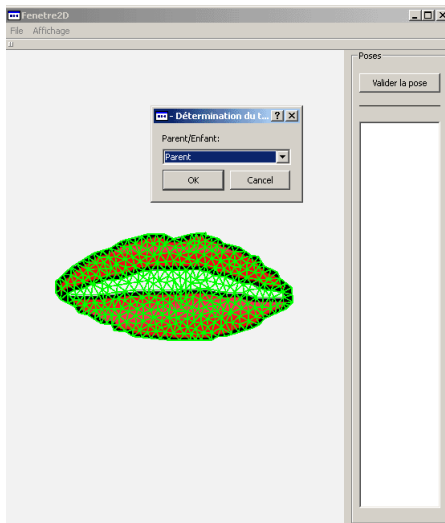
6.1.4 Gestion des états des modèles 2D

Après déformation, chaque modèle créé peut être validé, en tant que nouvelle pose.

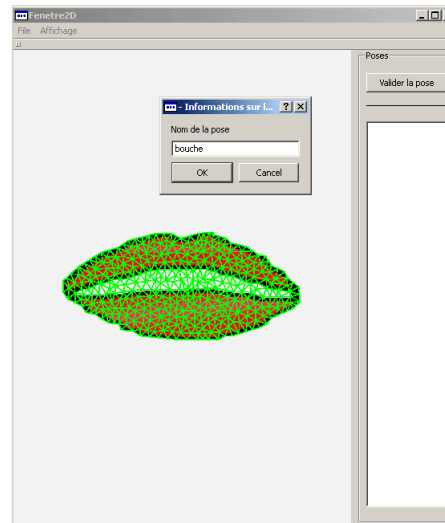
Pour chaque modèle 2D, une distinction est introduite entre état original (correspondant en général au dessin initial, sans déformation, mais auquel on peut associer une variation de profondeur) et des états dérivés, obtenus après le processus de déformation. Dans l'interface, ces éléments apparaissent respectivement sous les noms de poses *parent* et *enfant*. Quand le bouton « valider la pose » est actionné, une fenêtre de type *pop-up* est activée pour demander à l'utilisateur de préciser le type, parent ou enfant de la pose.

Quel que soit le type, un identificateur unique (un nom) est associé à chaque pose. Ce nom sera ensuite visible dans la zone de stockage.

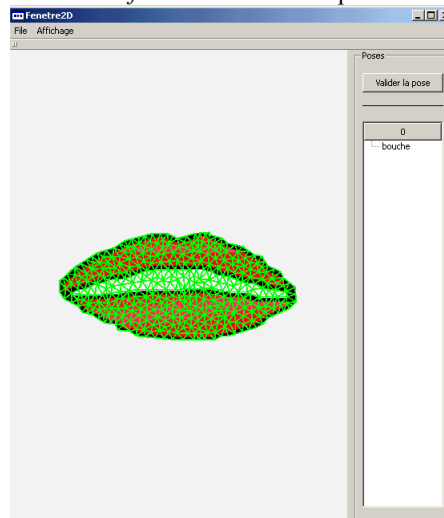
Ce processus est illustré Figure 6.10, pour une pose parent et Figure 6.11, pour une pose de type enfant.



a. Choix du type de pose *parent* ou *enfant*

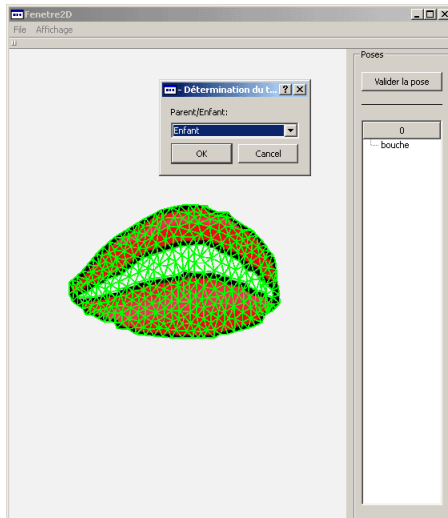


b. Spécification du nom de la pose *parent*

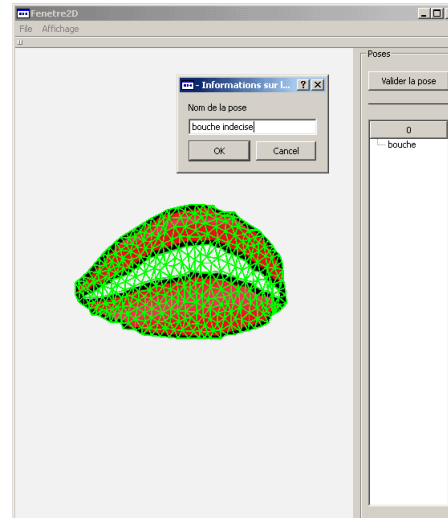


c. Affichage du nom de la nouvelle pose parent validée dans la zone de stockage 2D

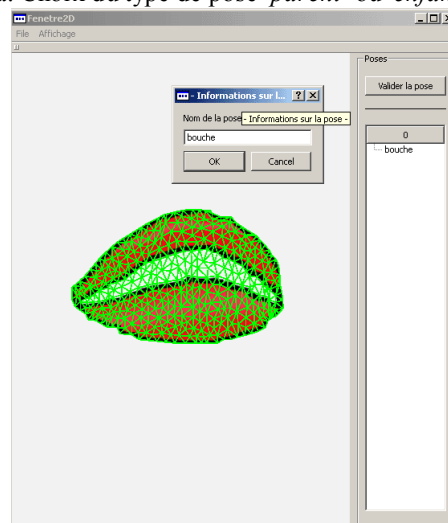
Figure 6.10 : Gestion de la validation d'une pose parent



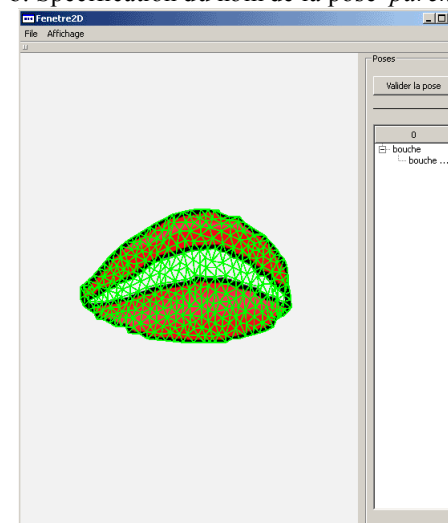
a. Choix du type de pose *parent* ou *enfant*



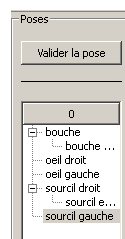
b. Spécification du nom de la pose *parent*



c. Nom de la pose *parent* dérivée



d. Affichage du nom de la nouvelle pose *enfant* validée dans la zone de stockage 2D



e. Aperçu de la zone de stockage 2D avec un ensemble de poses validées

Figure 6.11 : Gestion de la validation d'une pose *enfant*

Notons que si la pose est de type *enfant*, il est nécessaire également d'indiquer quel est le nom de son *parent*.

Si l'on souhaite reprendre une pose pour l'ajuster, il suffit de la sélectionner dans la zone de stockage. Elle sera alors affichée dans la zone de visualisation, et rendue disponible pour modifications et validation ultérieures.

Le système permet ainsi de créer graduellement, à partir d'une pose initiale, une banque de poses 2D structurée de façon hiérarchique par poses enfant/parent et accessible à tout moment du processus de modélisation.

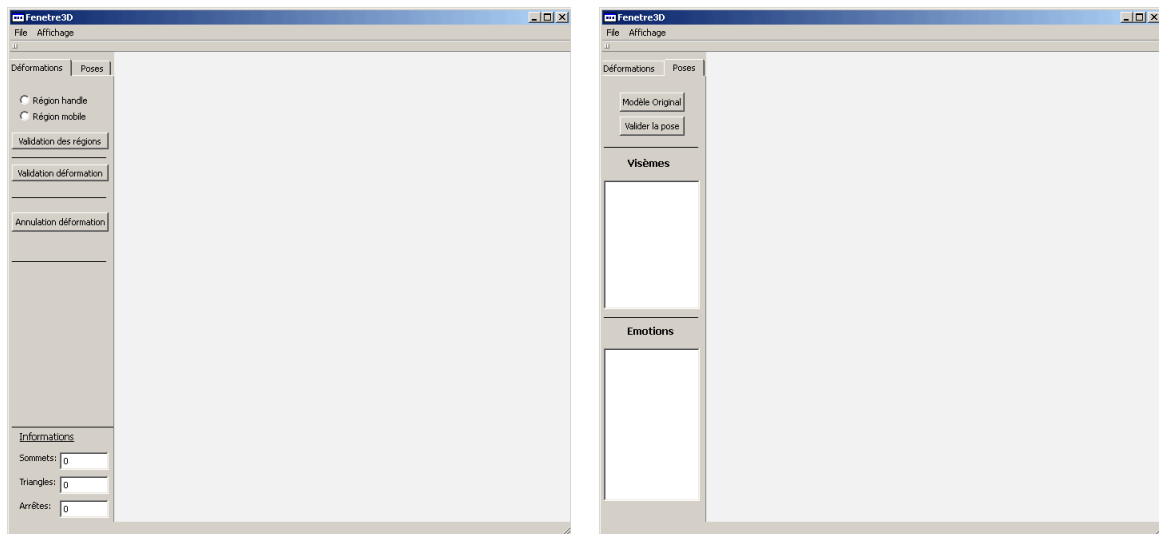
6.2 Espace de travail 3D

L'espace de travail 3D intègre l'ensemble des outils de visualisation, rendu, manipulation et création de modèles 3D. Il permet de charger le modèle 3D parent, de l'enrichir avec des caractéristiques faciales et enfin de créer les poses clefs nécessaires à l'animation.

6.2.1 Fonctionnement général

Cet espace (Figure 6.12) est composé :

- d'une fenêtre de rendu de maillages 3D, avec des outils de navigation et de manipulation 3D associés,
- d'une barre d'outils avec deux onglets : « Déformation » et « Poses ». Le premier fournit l'interface nécessaire afin de déformer le maillage 3D. Le second permet de gérer le stockage des différentes expressions créées.



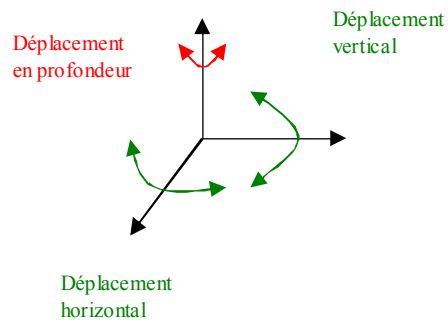
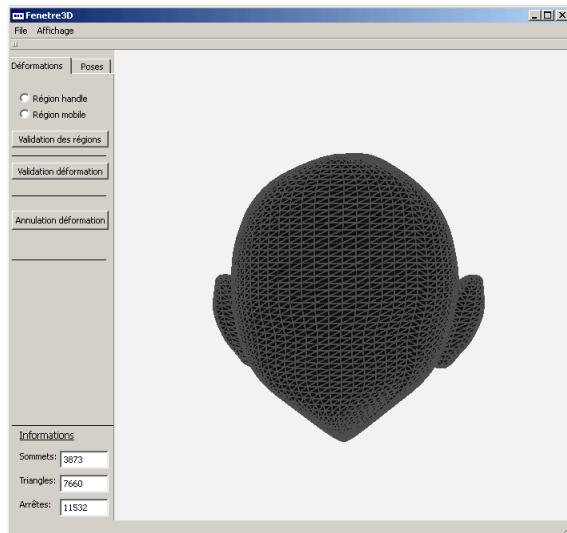
a. Affichage de l'onglet « Déformations »

b. Affichage de l'onglet « Poses »

Figure 6.12 : Fenêtre 3D zone d'outils et fenêtre de rendu

Le maillage 3D parent à l'état vierge, dépourvu de toute caractéristique faciale, est tout d'abord chargé dans l'espace de travail (menu « File/Load »). Il est alors affiché dans la fenêtre 3D de rendu, comme illustré Figure 6.13.a pour un modèle de tête.

Pour le positionner, des manipulations simples (translations et rotations autour des trois axes x , y et z , ainsi que zoom avant/arrière) sont disponibles (Figure 6.13.b).



- a. Maillage 3D chargé et visible dans la zone de rendu de la fenêtre 3D b. Schéma pour la manipulation des maillages en translation/rotation

Figure 6.13 : Chargement et manipulation du maillage 3D parent

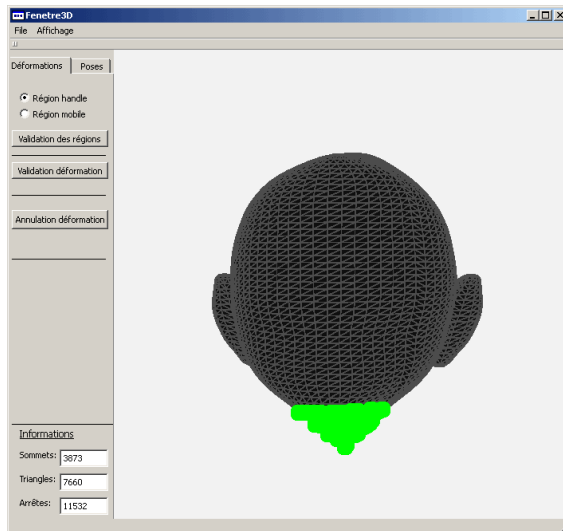
6.2.2 Déformation directe de maillage 3D

La méthode de déformation 3D directe décrite au paragraphe 5.5 est illustrée Figure 6.14, dans le cas d'une déformation appliquée au niveau du menton. Cet outil est disponible dans l'onglet « Déformation » de la fenêtre 3D, qui doit être activé.

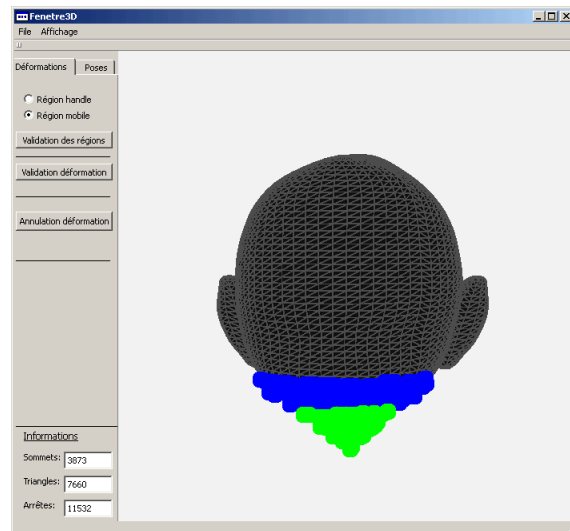
L'utilisateur spécifie tout d'abord la région de manipulation (*handler*) (Figure 6.14.a), c'est-à-dire l'ensemble des sommets qui vont guider la déformation. Cette sélection est réalisée à l'aide d'un outil de dessin de type *brush* et est illustrée par le masque vert (Figure 6.14.a). Une fois cette étape réalisée, l'utilisateur définit de façon analogue la région mobile, correspondant à l'ensemble des sommets du maillage susceptible d'être déformés. La région mobile est représentée par un masque de couleur bleue (Figure 6.14.b).

Ces deux masques permettent d'identifier les sommets intervenant dans le processus de déformation. Le calcul de ces ensembles de sommets est réalisé à l'aide d'un processus de propagation et est déclenché en actionnant le bouton « validation des régions », disponible dans la zone d'outils de la fenêtre 3D. Le maillage 3D est alors prêt pour la déformation. Pour cela, il suffit de sélectionner la région *handler* et de la déplacer (par drag & drop) dans l'emplacement souhaité (Figure 6.14.d).

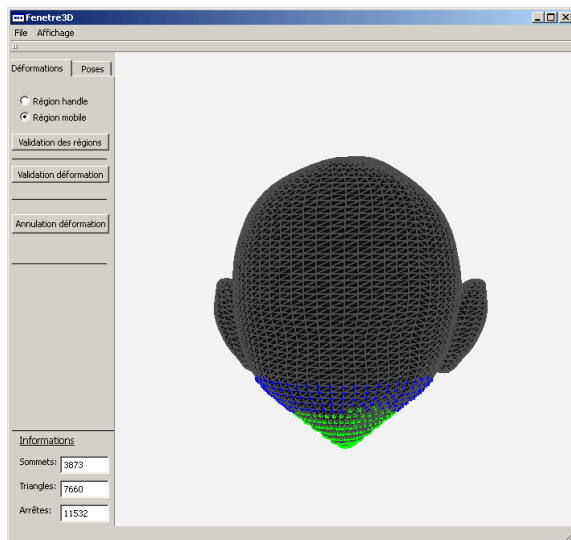
Le vecteur de déplacement ainsi créé correspond au déplacement associé à l'ensemble des sommets de la région de manipulation, qui subissent un mouvement rigide. Quant aux sommets de la région mobile, leur déplacement est calculé en utilisant l'algorithme de déformation par coordonnées laplaciennes.



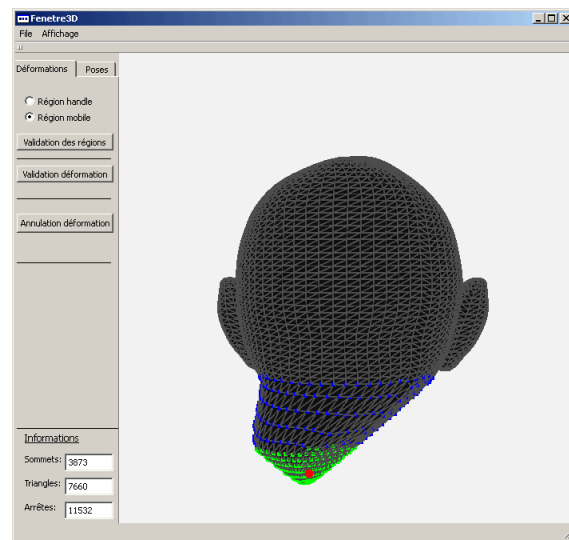
a. Sélection de la zone de manipulation



b. Sélection de la zone mobile



c. Validation des zones sélectionnés et affichage des sommets concernés



d. Déformation

Figure 6.14 : Gestion de la déformation directe 3D

6.2.3 Gestion des poses clefs

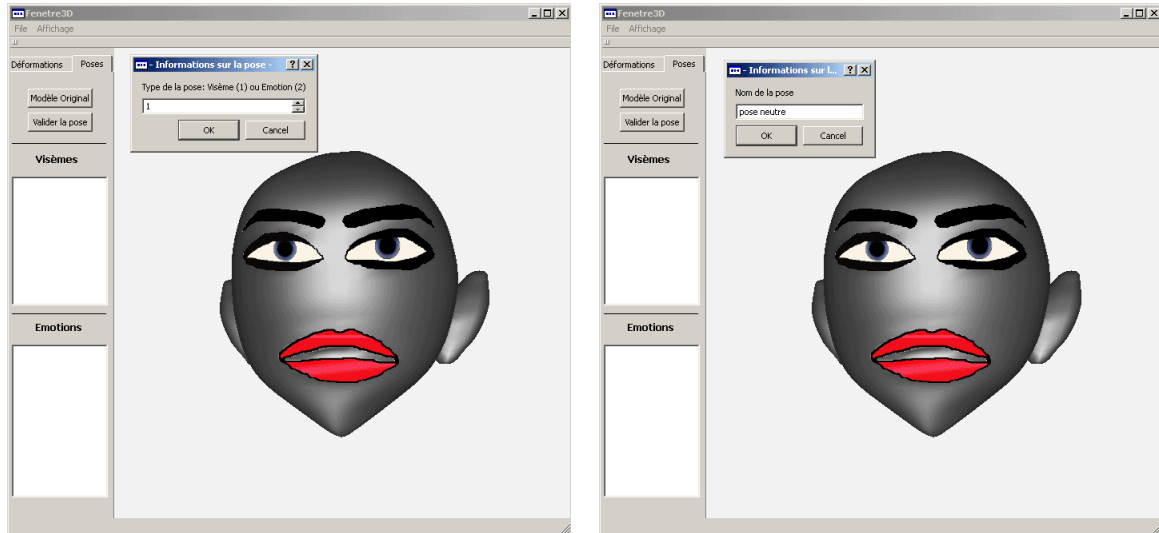
Une fois que le maillage 3D enrichi de toutes ses caractéristiques faciales est déformé conformément à l'expression ou au visème que l'on souhaite simuler, il constitue une pose. Pour la conserver, il est nécessaire de la valider dans la base de données des poses, ainsi que de lui attribuer un nom pour identification ultérieure dans la base de poses clefs.

La base des poses permet de gérer deux types de poses, correspondant respectivement à un ensemble d'expressions (émotions) ou à des visèmes.

Notons qu'il est possible de charger une copie d'une ancienne pose créée en cliquant sur son nom dans cette même zone. Cette copie pourra être modifiée à tout moment soit

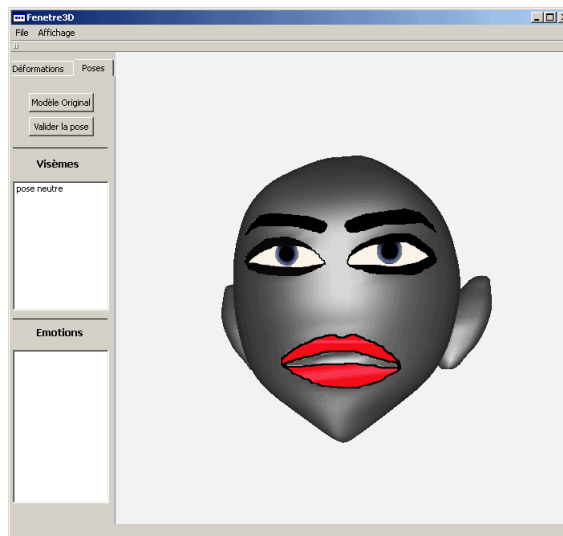
en remplaçant complètement les caractéristiques faciales, soit en appliquant une nouvelle déformation au maillage 3D.

Le processus de gestion des poses clefs est illustré Figure 6.15.



a. Choix du type de la pose : visème ou émotion

b. Choix du nom de la pose



c. Affichage du nom de la nouvelle pose clef validée dans la zone de stockage 3D

Figure 6.15 : Gestion et validation d'une pose clef

Notons enfin que pour créer une nouvelle pose, il est possible de partir soit du modèle 3D initial, soit d'une autre pose 3D déjà créée et validée.

6.3 Interaction entre les espaces 2D et 3D

Chaque partie 3D et 2D possède une manipulation dédiée et spécifique. Toutefois, pour assurer le fonctionnement global du système, des interactions entre les deux espaces de travail, 2D et 3D, sont nécessaires. Ces interactions sont de deux types :

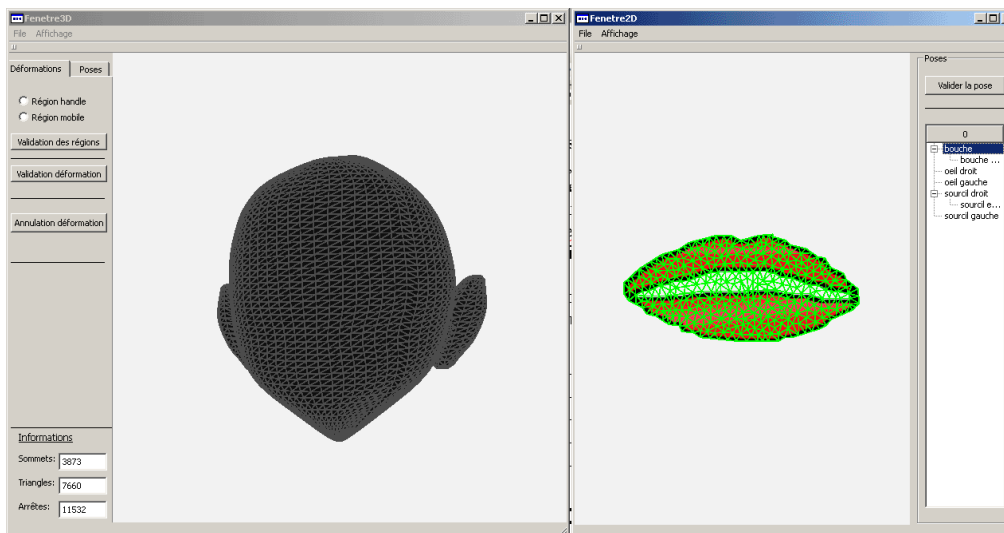
- active (l'utilisateur fait le lien entre les deux espaces),
- passive (le lien est réalisé automatiquement).

En particulier, ces interactions permettent d'associer au modèle 3D les caractéristiques faciales créées dans l'espace 2D.

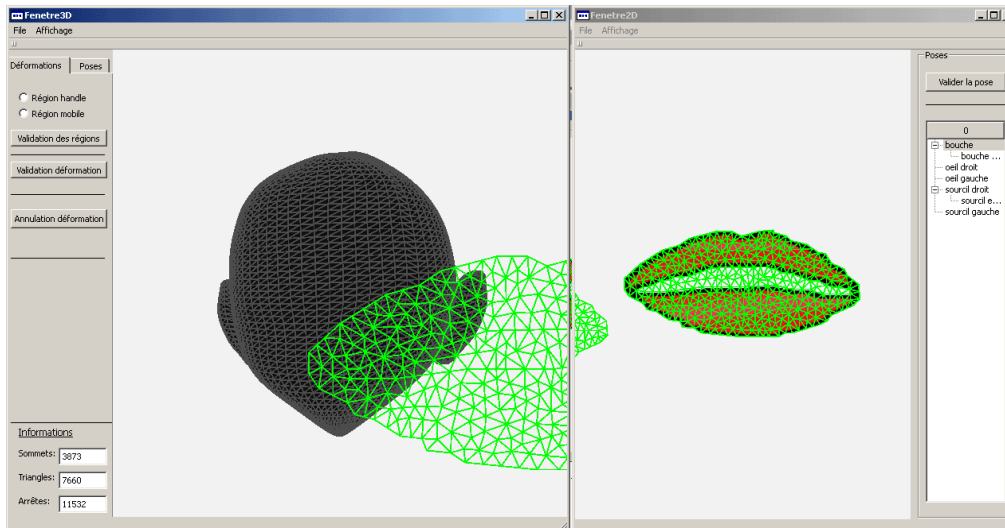
6.3.1 Manipulation active

À cette étape, on suppose disposer du modèle 3D chargé dans la fenêtre 3D et des modèles 2D validés dans la fenêtre 2D. Pour ajouter les caractéristiques faciales au modèle 3D, on sélectionne dans la zone de stockage des modèles 2D, le modèle approprié. Une copie de celui-ci est alors affichée dans la zone de rendu 2D. Ce processus est illustré Figure 6.16, pour l'exemple de bouche. L'objectif est d'ajouter le modèle 2D de bouche au maillage parent 3D et de créer ainsi une pose clef.

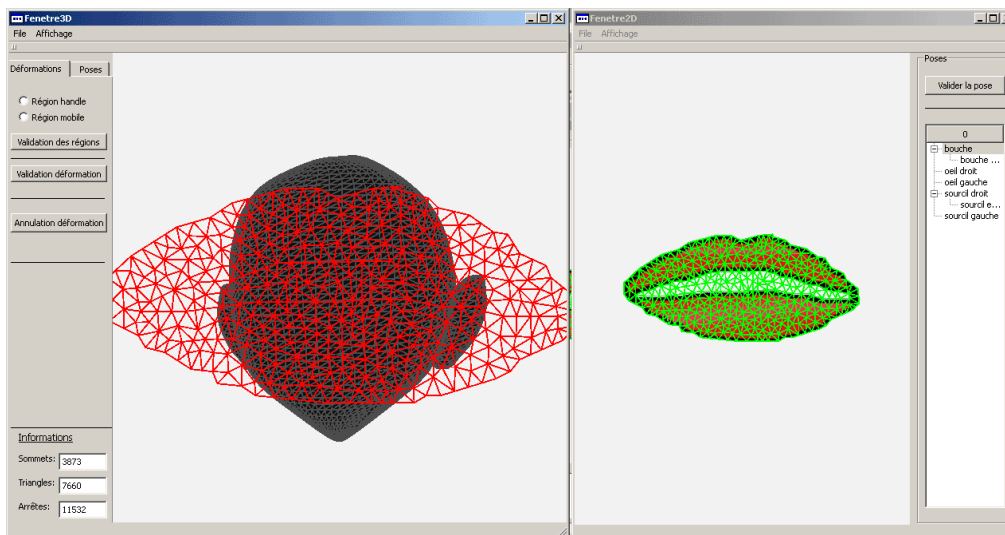
Cette copie est ensuite déplacée par *drag & drop* dans la fenêtre 3D. En relâchant la souris dans cette zone, le modèle inséré apparaît coloré en rouge (Figure 6.16.c).



a. Données initiales



b. Importation du modèle 2D dans la fenêtre 3D par *drag & drop*



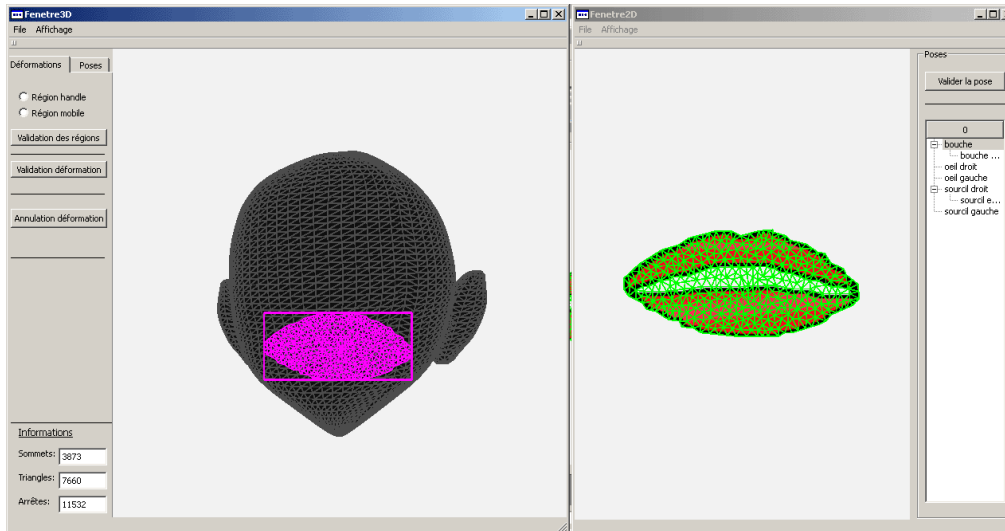
c. Modèle 2D inclus dans la fenêtre 3D (avant l'étape de validation)

Figure 6.16 : Interaction active entre la fenêtre 3D et la fenêtre 2D : le modèle de bouche est inséré dans la fenêtre 3D, depuis l'espace 2D

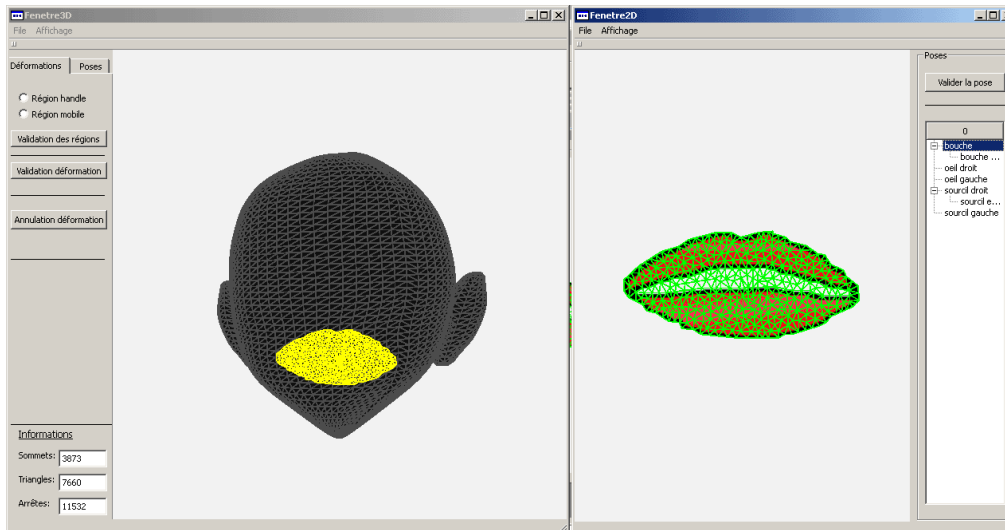
À ce moment, le modèle 2D de bouche n'est pas encore validé et intégré dans la pose 3D. Pour l'insérer, il est nécessaire de lui ajuster tout d'abord aussi bien la taille que la position sur la surface parent (Figure 6.17.a). A ce moment, on peut valider le modèle en lançant la procédure de placage de la surface 2D sur le maillage 3D.

Si le modèle 2D a une taille et une position compatibles avec celle du modèle 3D parent, le processus de placage sur la surface 3D suivant la direction de la vue sera effectué. Ensuite, le modèle 2D modifiera cette surface selon sa carte de profondeur associée (si disponible) et sera affiché avec une couleur différente (jaune dans la Figure 6.17.b) et en mode *wireframe*.

Sinon un message d'erreur sera affiché et l'utilisateur devra reprendre la manipulation en prenant soin de positionner correctement le modèle enfant, de façon à ce que le placage puisse être effectué avec succès.



a. Variation de la taille et placement du modèle 2D avant placage sur la surface 3D

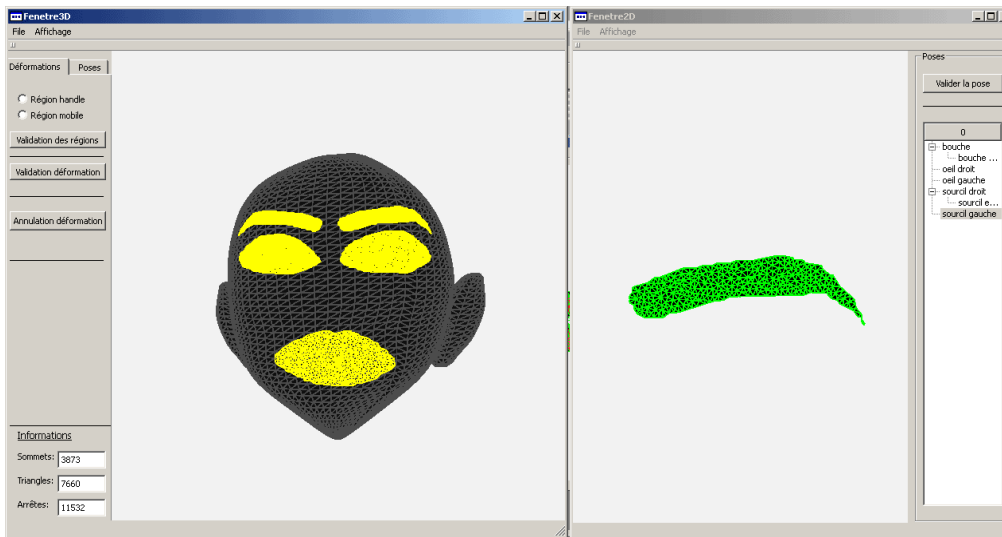


b. Modèle 2D plaqué sur la surface 3D

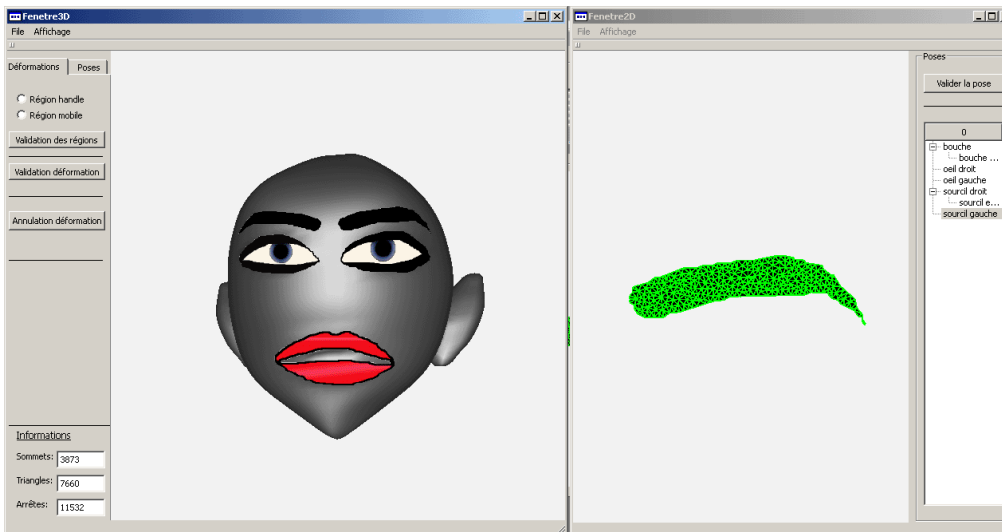
Figure 6.17 : Ajustement en taille/position du modèle 2D et placage sur la surface 3D

Ce processus est répété pour chacune des caractéristiques faciales.

La Figure 6.18 présente l'exemple du modèle de tête considéré, après intégration de l'ensemble des caractéristiques faciales (bouche, yeux, sourcils).



a. Résultat du placage de toutes les caractéristiques faciales 2D sur la surface 3D en rendu *wireframe*



b. Résultat du placage de toutes les caractéristiques faciales 2D sur la surface 3D en rendu texturé

Figure 6.18 : Modèle 3D intégrant l'ensemble des caractéristiques faciales

Un deuxième type de manipulation, dite passive est présenté dans le paragraphe suivant.

6.3.2 Manipulation passive

Il s'agit cette fois d'un mode de manipulation différent, qui permet d'effectuer des déformations sur le modèle 2D, et de les transférer directement sur le modèle 3D, sans l'intervention de l'utilisateur. Ce mode d'interaction, dit passif, offre l'avantage de permettre à l'utilisateur de créer des poses clés à partir de poses déjà existantes, ou de raffiner ces dernières, sans refaire les étapes les plus fastidieuses d'ajustement en position et en taille. Cela est conforme aux pratiques traditionnelles des dessinateurs, habitués à travailler de manière itérative, par approximations successives et conduit en même temps à un gain de temps considérable.

Ce mode de manipulation est illustré Figure 6.19.

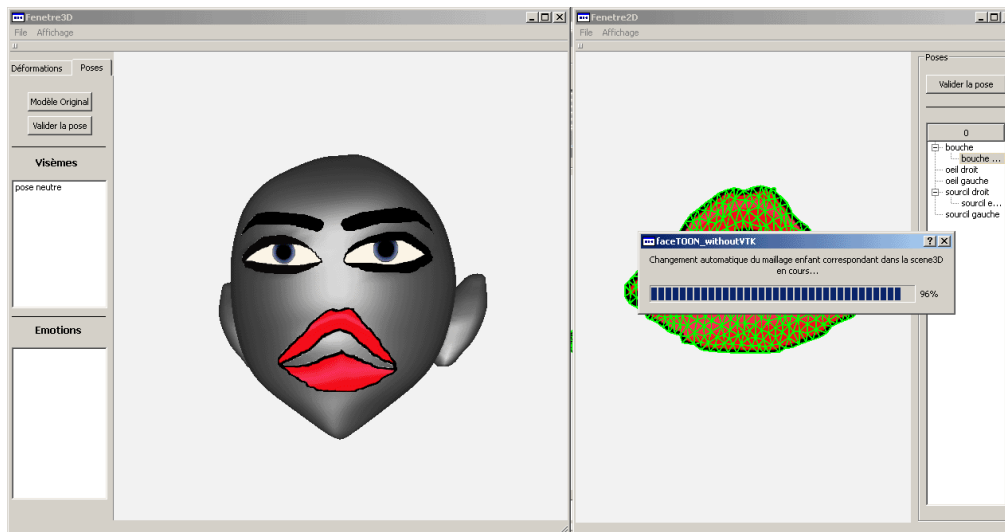


Figure 6.19 : Interaction passive entre la fenêtre 3D et la fenêtre 2D

Bien naturellement, une fois l'ensemble des modifications souhaitées accompli, l'utilisateur a la possibilité de valider le résultat sous forme d'une nouvelle pose 3D.

Une fois les poses clés créées, il ne reste qu'à les animer.

6.4 Fenêtre d'animation

L'animation est construite à partir des poses clés précédemment créées par l'utilisateur. La fenêtre d'animation est constituée d'une échelle temporelle (*time-line*) et d'une zone fonctionnelle (Figure 6.20).

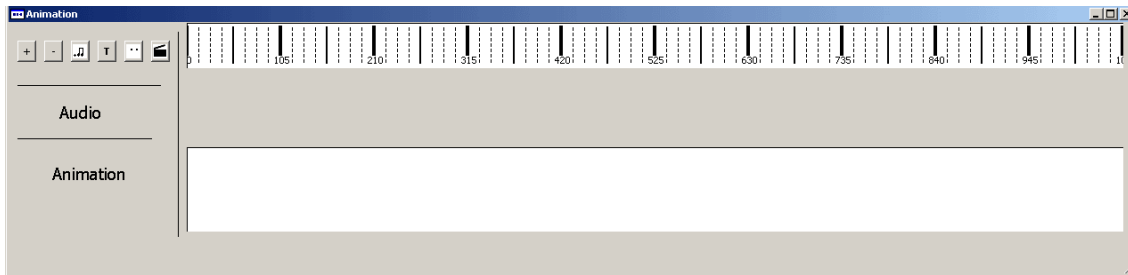


Figure 6.20 : Fenêtre de gestion de l'animation

La zone de *time-line* accueille les différentes poses clés dans l'ordre voulu pour l'animation correspondant à un temps exprimé en ms et affiché au-dessus de l'échelle de temps.

La zone fonctionnelle (en haut à droite) regroupe l'ensemble des boutons nécessaires pour insérer les poses clefs et déclencher les différentes actions disponibles (importation de poses clés, exportation de la séquence d'animation...).

Pour ajouter une pose clef dans la zone de *time-line* (en supposant un ensemble de poses déjà disponibles), l'utilisateur sélectionne dans la liste des différentes poses existantes celle souhaitée. Elle sera insérée dans la zone de *time-line* dans une position quelconque, après la dernière pose déjà insérée. L'utilisateur a ensuite la possibilité de la positionner à l'instant temporel approprié, par simple *drag & drop*. Ce processus est illustré (Figure 6.21), où les poses clefs insérées sont illustrées en bleu.

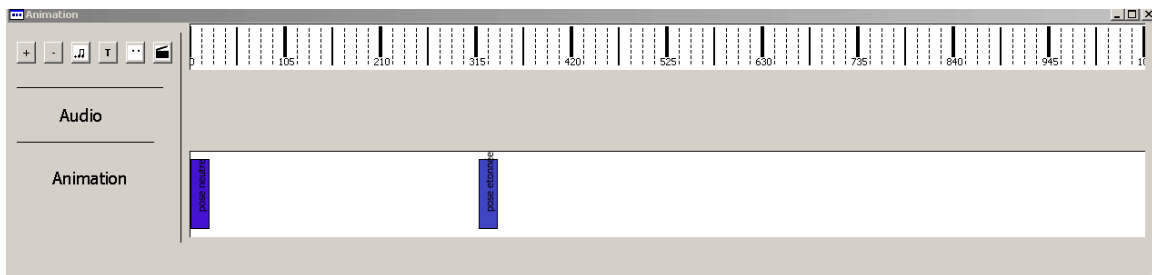


Figure 6.21: Ajout des poses clés dans la zone de *time-line*

Une fonction de prévisualisation de l'animation ainsi construite a été également intégrée. L'animation est créée, puis visualisée dans une fenêtre supplémentaire qui s'affiche automatiquement (Figure 6.22). Notons que la séquence d'animation est visualisée à l'aide d'un *player* MPEG-4 [Preda04b], entièrement en 3D. Pendant l'animation, l'utilisateur peut donc manipuler le modèle, pour ajuster son point de vue et obtenir une visualisation optimale. Notons que cette fonctionnalité de prévisualisation est essentielle pour les créateurs de contenus, qui souhaitent avoir un aperçu instantané de leur création.

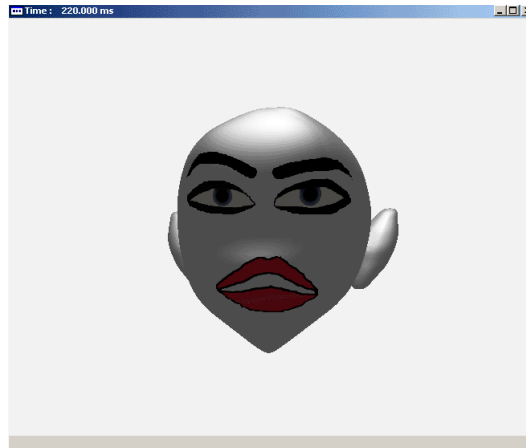


Figure 6.22 : Fenêtre de prévisualisation de l'animation

Enfin, pour des raisons évidentes d'échange et d'interopérabilité, les séquences d'animation ainsi réalisées peuvent être exportées sous deux formats : MPEG-4 et VRML.

6.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté :

- d'une part, les différents espaces de travail proposés par la plate-forme TOON, ainsi que les interfaces utilisateur associées,
- d'autre part le processus de construction de séquences d'animation, illustré à travers un exemple de tête de personnage virtuel.

L'illustration des différentes étapes de construction impliquées dans la chaîne de fabrication montre l'aisance avec laquelle le système permet de créer interactivement des animations, tout en respectant les pratiques traditionnelles de travail des créateurs de dessins animés.

Chapitre 7 :

Conclusion et perspectives

L'industrie du dessin animé est confrontée, depuis quelques années, à de nouveaux enjeux et défis en termes de modes de production et d'automatisation de la chaîne de production. Un choix cornélien se pose aujourd'hui entre continuer à fabriquer des dessins animés de façon traditionnelle, avec un minimum de moyens informatiques et donc des coûts de production de plus en plus prohibitifs, ou passer à des techniques d'animation 3D informatisées, mais avec des pratiques de travail nouvelles qui s'éloignent considérablement du cœur de métier des dessinateurs professionnels.

S'inscrivant dans le contexte précompétitif du projet industriel TOON, financé par la société Quadraxis avec le soutien de l'Agence Nationale de la Valorisation de la Recherche (ANVAR), ce travail s'attaque notamment aux défis d'automatisation de la chaîne de production de dessins animés traditionnels. L'application phare que nous avons considérée est celle d'animation de visages de personnages génériques de dessins animés, humanoïdes ou non. Vecteur d'émotion et de parole, qu'il soit hilare ou émouvant, drôle ou effrayant, caricatural ou hyperréaliste, le visage est le porteur primordial des intentions et du message du créateur et représente un attribut clef pour le succès du dessin animé auprès du public. Pour toutes ces raisons, il nécessite une attention particulière quant aux moyens techniques de modélisation mis en œuvre.

Le principe adopté, qui nous a servi de fil conducteur tout au long de ce travail de recherche, consiste à emprunter les méthodes et les techniques spécifiques de l'animation 3D et de les adapter aux objectifs de création de dessins animés 2D, tout en restant fidèles aux pratiques traditionnelles de travail des dessinateurs. Cela nous a permis de jeter un pont entre ces deux mondes parallèles, dont l'objectif est pourtant le même : délecter le public avec des histoires en images, peuplées de créatures fantastiques. Notons que cette passerelle est en quelque sorte à double sens. D'une part, il s'agit d'élaborer les outils d'automatisation du dessin animé traditionnel, nécessaires pour le rentabiliser et d'autre part, d'exploiter le savoir faire des dessinateurs 2D pour améliorer les films d'animation 3D, qui souffrent encore d'une capacité plus limitée d'émotion et d'affectivité.

Dans le chapitre 1, nous avons présenté en détail la chaîne de production de dessins animés traditionnels, avec principes, étapes et principales tâches mises en œuvre. Une attention particulière a été dédiée à l'analyse des moyens informatiques aujourd'hui utilisés pour accélérer les temps de fabrication. En parallèle, nous avons analysé le mode opératoire adopté pour la création des films d'animation 3D. L'analyse de ces deux chaînes de fabrication, avec la mise en évidence des avantages et inconvénients respectifs, montre qu'au mode traditionnel de création, très formalisé mais encore « papier-crayon », s'oppose aujourd'hui celui de l'animation 3D, avec des moyens informatiques sophistiqués, dont l'utilisation dépasse complètement les compétences

des dessinateurs traditionnels. La question qui se pose alors est de savoir comment concilier ces deux mondes en apparence si différents.

Dans le chapitre 2, nous avons abordé la problématique spécifique de l'animation de visage. Afin d'analyser les besoins de modélisation, il est indispensable de maîtriser l'ensemble des contraintes morpho-fonctionnelles qui doivent être prises en compte pour une modélisation réaliste de visage humain. Pour répondre à cet objectif, nous avons présenté et analysé la structure anatomique du visage humain, avec structure osseuse, muscles et tissus associés. Quelques éléments de modélisation physique (systèmes masses-ressorts et par représentation vectorielle) et procédurale (à l'aide de paramètres FACS), les plus souvent utilisés pour les animations hyper-réalistes et réalistes ont été ensuite présentés, ainsi qu'un bref aperçu du standard MPEG-4, partie FBA, le premier à proposer une spécification de représentation normalisée internationale.

Pour analyser comment ces diverses contraintes anatomiques et fonctionnelles sont prises en compte, le chapitre 3 est dédié à un état de l'art approfondi des systèmes d'animation faciale existants. L'analyse du riche ensemble de plates-formes logicielles aussi bien commerciales qu'expérimentales montre que peu d'entre elles sont adaptées aux besoins du dessin animé traditionnel et en particulier à la création de films de type *cartoon*, où les visages peuvent prendre des traits exagérés, défiant tout modèle physique.

Dans le chapitre 4, nous esquissons les premiers éléments de réponse proposés dans cette thèse, sous la forme du cahier des charges de la plate-forme logicielle *FaceTOON* développée. Ce chapitre précise notamment les contraintes fonctionnelles et architecturales que le système doit respecter pour assurer une utilisation ergonomique et conforme aux pratiques traditionnelles de travail des dessinateurs. Cela nous a conduit à une spécification innovante, au niveau aussi bien conceptuel que logiciel, qui prend en compte d'une part un modèle 3D initial, dépourvu de toute caractéristique faciale, et d'autre part un ensemble de dessins 2D, représentant les attributs faciaux que l'on souhaite modéliser, pour produire en sortie un modèle 3D de visage complet, ainsi que des séquences d'animation.

L'ensemble méthodologique proposé, développé et mis en œuvre est présenté au chapitre 5. Nous détaillons en premier lieu la procédure hiérarchique proposée d'enrichissement 2D/3D du modèle initial avec des caractéristiques de visage. Manipulation interactive, triangulation des dessins, placage virtuel de maillages enfants 2D sur le maillage parent 3D à l'aide de techniques de paramétrisation, méthodes de déformation adoptées (par RBF, par courbes Wires, par coordonnées laplaciennes ou encore par manipulation directe dans l'espace 3D), gestion des bases d'expressions et de visèmes, ainsi qu'animation par interpolation des poses clefs sont ici décrits en détails. Un aspect important pris en compte à toute étape concerne les fonctions de pré-visualisation et d'ajustement/raffinement itératif des résultats, essentielles pour les créateurs de contenus.

Enfin, le chapitre 6 présente un exemple d'utilisation grandeur réelle du système, pour un visage de dessin animé, à partir de la construction du modèle, et jusqu'à la création des séquences d'animation.

L'ensemble logiciel réalisé présente un potentiel économique significatif, les premiers tests réalisés au sein de la société Quadraxis montrant un gain en temps de production de l'ordre de 20% sur l'ensemble de la chaîne de fabrication de visages animés.

Les perspectives de ce travail sont nombreuses, aussi bien sur le plan méthodologique qu'au niveau de l'ergonomie du système. En premier lieu et à court terme, mentionnons la validation complète du système dans le cadre d'un court métrage d'animation, dont la réalisation est envisagée avec les studios partenaires de la société Quadraxis. Sur le plan méthodologique, les perspectives de développement concernent principalement l'élaboration de nouvelles techniques de déformation non-rigide de maillage 2D et 3D, capable de répondre de façon optimisée aux besoins de création de poses clés du système. Dans ce cadre, mentionnons également les aspects de création de visèmes à partir de vidéos 2D, par méthodes de vision par ordinateur, ainsi que ceux de synchronisation de la parole, potentiels porteurs d'une forte valeur ajoutée.

Bibliographie

- [3DSMax] www.autodesk.fr/3dsmax
- [Alexa02] Alexa, M. 2002. Recent advances in mesh morphing. In *Computer Graphics Forum*, 21(2), pp. 173-196.
- [Alexa03] Alexa M. 2003. Differential coordinates for local mesh morphing and deformation. In *The Visual Computer*, 19(2), pp.105-114.
- [Animo] www.cambridgeanimation.com
- [Arad94] Arad, N. Dyn, N. Reisfeld, D. 1994. Image warping by radial basis functions: applications to facial expressions. In *CVGIP: Graphical Models and Image Processing*, 56(2), pp. 161 - 172, March 1994.
- [Au05] Au, O. K.-C., Tai, C.-L., Liu, L., and Fu, H. 2005. Mesh editing with curvature flow laplacian operator. Technical report, Computer Science Technical Report, HKUST-CS05-10.
- [Aurenh91] Aurenhammer, F. 1991. Voronoi Diagrams - A Survey of a Fundamental Geometric Data Structure. In *ACM Computing Surveys*, 23(3), pp. 345-405.
- [Blair] Blair, P. 1994. *Cartoon Animation*. Walter Foster Publishing Inc., ISBN 1-56010-084-2.
- [Blanz03] Blanz, V. Basso, C. Poggio, T. and Vetter, T. 2003. Reanimating faces in images and video. In *P. Brunet and D. Fellner, editors, Computer Graphics Forum*, 22(3), EUROGRAPHICS 2003, pp. 641-650, Granada, Spain.
- [Botsch04] Botsch, M. and Kobbelt, L. 2004. An intuitive framework for real-time freeform modeling. In *ACM SIGGRAPH 2004 Papers* (Los Angeles, California, August 08 - 12, 2004). J. Marks, Ed. SIGGRAPH '04. ACM, New York, NY, pp 630-634.
- [Botsch05] Botsch, M., and Kobbelt, L. 2005. Real-time shape editing using radial basis functions. In *Computer Graphics Forum*, 24(3), pp. 611-621.
- [Bourg04] Bourguignon, D. Cani, M.P. Chaine, R. and Drettakis G. 2004. Relief : A modeling by drawing tool. In *First Eurographics Workshop on Sketch-Based Interfaces and Modeling (SBM'04)*, pp. 151-160, Grenoble, France, September 2004.
- [Bui03] Bui, D. Heylen, D. Poel, M. and Nijholt A. 2003. Exporting Vector Muscles for Facial Animation, *Lecture Notes in Computer Science*, Springer Berlin, 2733, ISBN 978-3-540-40557-3, pp. 251-260.
- [Burt71] Burtnyk, N., Wein, M. 1971. Computer-generated key-frame animation. In *Journal of the Society Motion Picture and Television Engineers*, 8(3), pp. 149-153
- [CAT] www.softimage.com/products/cat/
- [Cat78] Catmull, E. 1978. The problems of computer-assisted animation. In *Proceedings of the 5th Annual Conference on Computer Graphics and interactive Techniques* (August 23 - 25, 1978). SIGGRAPH '78. ACM Press, New York, NY, pp. 348-353.
- [Chai03] Chai, J., Xiao, J., and Hodgins, J. 2003. Vision-based control of 3D facial animation. In *Proceedings of the 2003 ACM*

- Siggraph/Eurographics Symposium on Computer Animation* (San Diego, California, July 26 - 27, 2003). Symposium on Computer Animation. Eurographics Association, Aire-la-Ville, Switzerland, pp. 193-206.
- [Chang06] Chang, E. and Jenkins, O. C. 2006. Sketching articulation and pose for facial animation. In *Proceedings of the 2006 ACM Siggraph/Eurographics Symposium on Computer Animation* (Vienna, Austria, September 02 - 04, 2006). Symposium on Computer Animation. Eurographics Association, Aire-la-Ville, Switzerland, pp. 271-280.
- [Chaudh04] Chaudhuri, P. Kalra, P. and Banerjee, S. 2004. A System for View-Dependent Animation, In *Computer Graphics Forum, Proceedings of Eurographic*, August 2004, 23(3), p. 411-420, Grenoble, France.
- [Chew87] Chew, L. P. 1987. Constrained Delaunay triangulations. In *Proceedings of the Third Annual Symposium on Computational Geometry* (Waterloo, Ontario, Canada, June 08 - 10, 1987). D.Soule, Ed. SCG '87. ACM, New York, NY, pp. 215-222.
- [Coq90] Coquillart, S.1990. Extended free-form deformation : a sculpturing tool for 3d geometric modeling. In *SIGGRAPH '90 : Proceedings of the 17th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pp. 187-196, Dallas, TX, USA, ACM Press.
- [Desbr02] Desbrun, M. Meyer, M. and Alliez, P. 2002. Intrinsic Parameterizations of Surface Meshes, In *Computer Graphics Forum*, 21, pp. 209-218.
- [DiOMatic] www.di-o-matic.com
- [Eck95] Eck, M., DeRose, T., Duchamp, T., Hoppe, H., Lounsbery, M., and Stuetzle, W. 1995. Multiresolution analysis of arbitrary meshes. In *Proceedings of the 22nd Annual Conference on Computer Graphics and interactive Techniques S. G. Mair and R. Cook*, Eds. SIGGRAPH '95. ACM, New York, NY, pp. 173-182.
- [Efrontier] www.e-frontier.com
- [Ekm78] Ekman, P. and Friesen, W.V. 1978. Manual for the Facial Action Coding System. Consulting Psychologists Press, Inc., Palo Alto, CA.
- [F2F] www.f2f-inc.com
- [FaceGe] www.facegen.com
- [FaceRobot] www.softimage.com/products/face_robot/
- [Fam3D] www.famous3d.com
- [Feke95] Fekete, J., Bizouarn, É., Cournarie, É., Galas, T., and Taillefer, F. 1995. Tic Tac Toon: a paperless system for professional 2D animation. In *Proceedings of the 22nd Annual Conference on Computer Graphics and interactive Techniques S. G. Mair and R. Cook*, Eds. SIGGRAPH '95. ACM, New York, NY, pp. 79-90.
- [Fidale00] Fidaleo, D. Noh, J. Neumann, U. 2000. Animated deformations with radial basis functions. In *VRST*, pp. 166-174.
- [Fiore01] Di Fiore, F. Schaeken, P. Elens, K. and Van Reeth F. 2001. Automatic inbetweening in computer assisted animation by exploiting 2.5d modelling techniques. In *Computer Animation CA'01*, pp. 192-200, Seoul, Korea.
- [Float96] Floater, M. S. 2003. Mean value coordinates. In *Computer Aided Geometric Design*. 20(1), pp. 19-27, March 2003.

- [Float97] Floater, M. S. 1997. Parameterization and smooth approximation of surface triangulations. In *Computer Aided Geometric Design*, 14(3), pp. 231-250.
- [FolVan97] Foley, J.D. van Dam, A. Feiner, S.K. and Hughes, J.F. 1997. *Computer Graphics : Principles and Practice*. Addison Wesley.
- [Glad04] Gladilin, E. Zachow, S. Deuffhard, P. Hege, H.-C. 2004. Anatomy- and Physics-Based Facial Animation for Craniofacial Surgery Simulations. In *Medical & Biological Engineering & Computing*, 42(2), pp.167-170.
- [Gray] Henry Gray. *Anatomy of the Human Body*. 1918
- [Hjor70] Hjortsjo, C.-H. 1970. *Man's Face and Mimic Language*. Lund, Sweden.
- [Iclone] www.reallusion.com/iclone
- [iFace] ivizlab.sfu.ca/research/iface/
- [Igara05] Igarashi, T. Moscovich, T. and Hughes, J.F. 2005. As-rigid-as-possible shape manipulation. In *ACM Transactions on Graphics (Proceedings of ACM SIGGRAPH)*, 24(3), pp. 1134-1141.
- [Igara99] Igarashi, T. Matsuoka, S. Tanaka, H. 1999. Teddy: A Sketching Interface for 3D Freeform Design. In *ACM SIGGRAPH'99*, Los Angels, pp.409-416.
- [ISO99] ISO/IEC JTC1/SC29/WG11 : Standard 14496 2, a.k.a MPEG 4 Part 2 : Visual, ISO, 1999.
- [Kalra92] Kalra, P. Mangili, A. Thalmann, N. M. Thalmann, D. 1992. Simulation of Facial Muscle Actions Based on Rational Free Form Deformations. In *Eurographics 1992*, 11(3), pp. 59-69.
- [Kho05] Kho, Y. and Garland, M. 2005. Sketching mesh deformations. In *Proceedings of the 2005 Symposium on interactive 3D Graphics and Games* (Washington, District of Columbia, April 03 - 06, 2005). I3D '05. ACM, New York, NY, pp. 147-154.
- [Koch96] Koch, R. Gross, M. Carls, F von Büren, D. Fankhauser, G. Parish, Y.I. 1996. Simulating Facial Surgery Using Finite Element Models. In *Computer Graphics*, 30, pp. 421-428.
- [Koch98] Koch, R. Gross, M. Bosshard, A. 1998. Emotion Editing using Finite Elements. In *Computer Graphics Forum*, 17(3), pp. 295-302.
- [Koj02] Kojekine, N. Savchenko, V. Senin, M. agiwara, I. H. 2002. A prototype System for Character Animation Based on Real-time Deformations, In *The Journal of Three Dimensional Images*, 16(4), pp. 91-95.
- [Kort02] Kort, A. 2002. Computer aided inbetweening. In *NPAR2002: Symposium on Non-Photorealistic Animation and Rendering*, pp. 125-132.
- [Labiao] www.labiao.org
- [Las87] Lasseter, J. 1987. Principles of Traditional Animation Applied to 3D Computer Animation. In *Proceedings of SIGGRAPH, Computer Graphics*, 21(4), pp. 35-44.
- [Lau07] Lau, M., Chai, J., Xu, Y., and Shum, H. 2007. Face poser: interactive modeling of 3D facial expressions using model priors. In *Proceedings of the 2007 ACM Siggraph/Eurographics Symposium on Computer Animation* (San Diego, California, August 02 - 04, 2007). Symposium on Computer Animation. Eurographics Association, Aire-la-Ville,

- Switzerland, pp. 161-170.
- [Lee95] Lee, Y., Terzopoulos, D., and Walters, K. 1995. Realistic modeling for facial animation. In *Proceedings of the 22nd Annual Conference on Computer Graphics and interactive Techniques S. G. Mair and R. Cook*, Eds. SIGGRAPH '95. ACM, New York, NY, pp. 55-62.
- [Lee98] Lee, A. W. F. Sweldens, W. Schröder, P. Cowsar, L. and Dobkin, D. 1998. MAPS : Multiresolution Adaptive Parameterization of Surfaces. In *ACM Siggraph 98*, pp. 95-104.
- [Lew00] Lewis, J. P., Corder, M., and Fong, N. 2000. Pose space deformation: a unified approach to shape interpolation and skeleton-driven deformation. In *Proceedings of the 27th Annual Conference on Computer Graphics and interactive Techniques International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., New York, NY, pp. 165-172
- [Magne88] Magnenat-Thalmann, N. Primeau, E. Thalmann, D. 1988. Abstract muscle action procedures for human face animation. In *The Visual Computer*, 3(5), pp. 290-297.
- [Malci01] Malciu, M. Approches orientées modèle pour la capture des mouvements du visage en vision par ordinateur, Ph.D. Dissertation Université Paris V - René Descartes, France, December 2001.
- [Maya] www.autodesk.fr/maya
- [Mel04] K. Melikhov, F. Tian, H.S. Seath, and Q. Chen. 2004. Frame skeleton based auto inbetweening in computer aided cel animation. In *International Conference on Cyberworlds*, pp. 216-223, Tokyo, Japan.
- [Mena02] Ménardais, S., Multon, F., & Arnaldi, B. 2002. A global framework for motion capture. Research report INRIA, No. 4360.
- [Menac99] Menache, A. 1999. Understanding Motion Capture for Computer Animation and Video Games, Morgan Kaufmann Publishers (21 octobre 1999), ISBN 0124906303, 238 pages.
- [Mesh] <http://mesh.berlios.de>
- [Meyer03] Meyer, M. Desbrun, M. Schröder, P. and Barr, A.H. 2003. Discrete differential-geometry operators for triangulated 2-manifolds. In Hans-Christian Hege and Konrad Polthier, editors, *Visualization and Mathematics III*, pp. 35-57. Springer-Verlag, Heidelberg.
- [Miche87] Micchelli, C.A., Interpolation of scattered data: Distance matrices and conditionally positive definite functions. *Constructive Approximation*. v2. pp. 11-12.
- [Milli02] Milliron, T., Jensen, R. J., Barzel, R., and Finkelstein, A. 2002. A framework for geometric warps and deformations. In *ACM Transaction on Graphics*. 21(1), Jan. 2002, pp. 20-51.
- [Mirage] www.bauhaussoftware.com
- [Motion] www.autodesk.fr/motionbuilder
- [Na04] Na, K. and Jung, M. 2004. Hierarchical retargetting of fine facial motions, In *Proceedings of Eurographics*, 23, pp. 687-695.
- [Nata07] Nataneli, G. and Faloutsos, P. 2007. Sketching facial expressions. In *ACM SIGGRAPH 2007 Sketches* (San Diego, California, August 05 - 09, 2007). SIGGRAPH '07. ACM, New York, NY, 60.
- [Neal05] Nealen, A. Sorkine, O. Alexa, M. and Cohen-Or, D. 2005. A sketch-based interface for detail-preserving mesh editing. In *ACM*

- Transactions on Graphics* (Proceedings of ACM SIGGRAPH), 24(3), pp. 1142-1147.
- [Noh01] Noh, J. Neumann, U. 2001. Expression cloning", In *Computer graphics (Proceedings SIGGRAPH'01)*, 35, pp. 277-288.
- [NR] Vetterling, William T. and Flannery, Brian P., *Numerical Recipes in C++: The Art of Scientific Computing*, ISBN 0521750334, Cambridge University Press, February 2002.
- [Parke72] Parke, F.I. 1972. Computer generated animation of faces, In *Proceedings ACM annual conference*.
- [Parke82] Parke, F.I. 1982. Parameterized Models for Facial Animation, In *IEEE Computer Graphics and Applications*, 2(9), pp. 61-68.
- [Pegs] www.mediapegs.com
- [Piegl95] Piegl, L. Tiller, W. 1995. *The NURBS book*. Springer-Verlag, London, UK, ISBN 3-540-55069-0.
- [Pieper89] Pieper, S.D. 1989. More than skin deep : Physical Modeling of facial tissue, Master Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Dept. of Architecture.
- [Pighin98] Pighin, F., Hecker, J., Lischinski, D., Szeliski, R., and Salesin, D. H. 1998. Synthesizing realistic facial expressions from photographs. In *Proceedings of the 25th Annual Conference on Computer Graphics and interactive Techniques SIGGRAPH '98*. ACM, New York, NY, pp. 75-84.
- [Plastic] www.plasticanimationpaper.dk
- [Platt81] Platt, S.M. 1985. A structural model of the human face, Phd thesis, University of Pennsylvania.
- [PlattBad81] Platt, S.M. Badler, N. 1981. Animating facial expressions, In *Computer Graphics*, 15(3) :245-152.
- [Preda02] Preda, M. 2002. Système d'animation d'objets virtuels : De la modélisation à la normalisation MPEG-4. Ph.D. Dissertation Université Paris V - René Descartes, France, December 2002.
- [Preda02b] Preda, M. Prêteux, F. 2002. MPEG-4 Human Virtual Body Animation In M. Bourges-Sévenier (Ed.), *MPEG-4 Jump-Start*, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, January 2002.
- [Preda04] Preda, M. Salomie, A. Prêteux, F. Lafruit, G. 2004. Virtual character definition and animation within the MPEG-4 standard. In M. Strintzis, N. Sarris (Ed.), *3D modeling and animation: Synthesis and analysis techniques for the human body*, IRM Press, Hershey, PA, July 2004, pp. 27-69.
- [Preda04b] Preda, M. Tran, S.M. Prêteux, F. 2004. MPEG-4 Player 3D(at)Work: demonstration of a weather forecast application. In *Standardization Report ISO/IEC JTC1/SC29/WG11, MPEG04/11207*, Palma de Mallorca, Spain, October 2004.
- [Pyun04] Pyun, H. Shin, H.J. Shin, S. Y. 2004. On extracting the wire curves from multiple face models for facial animation. In *Computers and Graphics*, 28(5), pp. 757-765.
- [Radem99] Rademacher, P. 1999. View-Dependent Geometry. In *Proceedings of the 26th annual conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, p.439-446, July 1999.
- [Ree81] Reeves, W. 1981. Inbetweening for computer animation utilizing moving point constraints. In *Computer Graphics*, 15(3), pp. 263-269.

- [Roh02] Kate, R. J. Kalra, P. Banerjee, S. 2002. Towards an Automated Approach for View-Dependent Geometry, In *International Journal of Image and Graphics*, 2(3), pp. 413-423, July 2002.
- [Ruttk99] Ruttkay, Zs. ten Hagen, P. Noot, H. 1999. CharToon: a system to animate 2D cartoon faces, In *Short Papers and Demos Proceedings of Eurographics'99*.
- [Seder93] T. W. Sederberg, P. Gao, G. Wang, and H. Mu. 1993. Shape blending : An intrinsic approach to the vertex path problem. In *Computer Graphics Conference Series*, pp. 15-18.
- [SederGreen92] Sederberg, T.W., Greenwood, E. 1992. A physically based approach to 2D shape blending. In *Computer Graphics*, 26 , pp. 25-34.
- [SedPar86] Sederberg, T.W. and Parry, S.R. 1986. Free-form deformation of solid geometric models. In *SIGGRAPH '86 : Proceedings of the 13th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, 20, pp. 151-160, New York, USA, ACM Press.
- [Shap95] Shapira, M., Rappoport, A. 1995. Shape blending using a star-skeleton representation. In *IEEE Computer Graphics and Applications* 15, pp. 44-51
- [Shef04] Sheffer, A. and Kraevoy, V. 2004. Pyramid Coordinates for Morphing and Deformation. In *Proceedings of the 3D Data Processing, Visualization, and Transmission, 2nd international Symposium on (3dpvt'04) - Volume 00 (September 06 - 09, 2004)*. 3DPVT. IEEE Computer Society, Washington, DC, pp. 68-75.
- [Singh98] Singh, K., and Fiume, E. 1998. Wires: A Geometric Deformation Technique. In *Computer Graphics (SIGGRAPH '98 Proceedings)*, pp. 405-414.
- [Song07] Song, M. Dong, Z. Theobalt, C. Wang, H. Liu, Z. Seidel, H.-P. 2007. A Generic Framework for Efficient 2D and 3D Facial Expression Analogy, to appear *IEEE Transactions on Multimedia*.
- [Sork04] Sorkine, O. Lipman, Y. Cohen-Or, D. Alexa, M. Rössl, C. and Seidel, H.-P. 2004. Laplacian surface editing. In *Proceedings of the Eurographics/ACM SIGGRAPH Symposium on Geometry processing*, pp. 179-188, ACM Press.
- [Sork06] Sorkine, O. 2006. Differential representations for mesh processing. In *Computer Graphics Forum*, 25(4),. Presented at Eurographics 2005 as "State-of-the-art report: Laplacian mesh processing".
- [Tana99] Tanahashi, S. Aoki, Y. Sang-Woon, K. 1999. A comic emotional expression method and its applications, TENCON 99, In *Proceedings of the IEEE*, 1, pp 329-332.
- [Taub95] Taubin, G. 1995. A signal processing approach to fair surface design. In *Proceedings of the 22nd Annual Conference on Computer Graphics and interactive Techniques* S. G. Mair and R. Cook, Eds. SIGGRAPH '95. ACM, New York, NY, pp. 351-358.
- [TerzWat90] Terzopoulos, D. and Waters, K. 1990. Physically-based facial modelling, analysis and animation, In *The journal of Visualization and Computer Animation*, 1(2), pp. 73-80.
- [Toledo03] Toledo, S. 2003. TAUCS: A Library of Sparse Linear Solvers, version 2.2. Tel-Aviv University, Available online at <http://www.tau.ac.il/~stoledo/taucs/>, September 2003.
- [ToonBoom] www.toonboom.com

- [Toonka] ktoon.toonka.com
- [Toonz] www.toonz.com
- [Triangle] www.cs.cmu.edu/~quake/triangle.html
- [Triki05] Triki, O. 2005. Reconstruction, registration and animation of 3D virtual characters from 2D drawings, PhD Thesis, Université Paris V-René Descartes
- [Tut63] Tutte, W. 1963. How to draw a graph. Proc. London Math. Soc., 13.
- [Visag] visagetechnologies.com
- [Voro08] Voronoi, G.F. 1908. Nouvelles applications des paramètres continus à la théorie de formes quadratiques. J. Reine Angew. Math. 134. Pp. 198-287.
- [Waters87] Waters, K. 1987. A muscle model for animating three-dimensional facial expression, In *Maureen C. Stone, Computer Graphics (Siggraph Proceedings)*, 21, pp. 17-24.
- [Wey98] Wey, J. and Zuffo, J. 1998. Interface: A Real Time Facial Animation System. In *Proceedings of the international Symposium on Computer Graphics, Image Processing, and Vision*, 00 (January 20 - 23, 1998). SIBGRAPHI. IEEE Computer Society, Washington, DC, 200.
- [Wu95] Wu, Y. Magnenat Thalmann, N. Thalmann, D. 1995. A PlasticVisco-Elastic Model for Wrinkles in Facial Animation and Skin Aging. In *Journal of Visualization and Computer Animation*, John Wiley, 6(4), pp.195-205.
- [XSI] www.softimage.com/products/xsi/
- [Yu04] Yu, Y., Zhou, K., Xu, D., Shi, X., Bao, H., Guo, B., and Shum, H. 2004. Mesh editing with poisson-based gradient field manipulation. In *ACM SIGGRAPH 2004 Papers* (Los Angeles, California, August 08 - 12, 2004). J. Marks, Ed. SIGGRAPH '04. ACM, New York, NY, pp. 644-651.
- [Zhao07] Zhao, H. and Tai, C.-L. 2007. Subtle facial animation transfer from 2D Videos to 3D faces with Laplacian deformation. In *International Conference on Computer Animation and Social Agents*. June 11-13, 2007, Hasselt, Belgium.
- [Zhou05] Zhou, K., Huang, J., Snyder, J., Liu, X., Bao, H., Guo, B., and Shum, H. 2005. Large mesh deformation using the volumetric graph Laplacian. In *ACM Transaction on Graphics*. 24(3), July 2005, pp. 496-503.