

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS.....	i
RESUME.....	ii
SOMMAIRE.....	iii
LISTE DES ABREVIATIONS.....	vi
LISTE DES FIGURES.....	vii
LISTE DES TABLEAUX.....	ix
INTRODUCTION.....	1
Chapitre I : GENERALITES SUR L'IMAGERIE 3D.....	2
1. Définitions.....	2
1.1. Qu'est-ce qu'une image ?	2
1.2. Image numérique.....	2
1.3. Imagerie 3D.....	3
1.4. Animation 3D.....	4
2. Pourquoi utiliser l'imagerie 3D ?	5
3. Méthodes d'obtention d'une image 3D.....	5
3.1. La synthèse d'image.....	5
3.1.1. Historique.....	5
3.1.2. Définition.....	7
3.1.3. Techniques de la synthèse d'image.....	7
a) Modélisation.....	7
i. Modélisation polygonale.....	7
ii. Modélisation par courbe.....	8
iii. Modélisation par subdivision de surface.....	9
iv. Subdivision géométrique.....	10
b) Rendu en temps réel.....	10
i. Couleur.....	10
ii. Texture.....	11
iii. Eclairage.....	13
iv. Caméra.....	13
3.2. La stéréovision.....	14
4. Les différents types d'image 3D.....	15
5. Conclusion.....	16

Chapitre II : THEORIE SUR LA PROPAGATION DU FEU.....	17
1. Définitions.....	17
1.1. Qu'est-ce que la pyrotechnie ?	17
1.2. Le feu.....	17
1.3. Qu'appelle-t-on incendie ?	17
2. La combustion.....	17
2.1. Définition.....	17
2.2. Le triangle du feu.....	17
2.3. Les différents types de combustion.....	18
3. Mécanisme du feu.....	19
3.1. Les types de feux.....	19
3.1.1. Les feux secs.....	19
3.1.2. Les feux gras.....	19
3.1.3. Les feux de gaz.....	19
3.1.4. Les feux de métaux.....	19
3.1.5. Les hors qualifications.....	20
3.2. Comportement au feu des matériaux.....	20
3.2.1. Résistance au feu.....	20
3.2.2. Réaction au feu.....	21
4. Propagation du feu.....	23
4.1. Front de feu.....	23
4.2. Modes de propagation du feu.....	24
4.2.1. Par transfert de chaleur.....	24
a) Par rayonnement.....	25
b) Par conduction.....	25
c) Par convection.....	26
4.2.2. Par déplacement de substances en combustion.....	26
a) Les solides.....	26
b) Les liquides.....	26
c) Les gaz.....	27
4.3. Equations de propagation du feu sur un matériau solide.....	27
5. Conclusion.....	33

Chapitre III : FiFoSi.....	34
1. Les outils de simulation.....	34
2. Modélisation des éléments constitutifs de la forêt.....	34
3. Réalisation de la particule feu.....	35
4. Comportement de la particule feu.....	37
5. Présentation de FiFoSi.....	37
5.1. Configuration matérielle et logicielle.....	37
5.2. Présentation de FiFoSi.....	38
5.2.1. Le bouton Préférences.....	39
5.2.2. Le bouton Crédit.....	42
5.2.3. Le bouton Quitter.....	43
6. Simulation de l'incendie de forêt.....	43
7. Conclusion.....	47
CONCLUSION.....	48
Annexe 1 : 3DS MAX ET UNITY.....	49
Annexe 2 : SCRIPT.....	54
Annexe 3 : MODELE DE ROTHERMEL.....	57
REFERENCES.....	60

LISTE DES ABREVIATIONS

2D : Deux dimensions

3D : Trois dimensions

4D : Quatre dimensions

C# : C sharp

C.A.O : Conception Assistée par Ordinateur

CD : Compact Disc

CF : Coupe-Feu

DVD : Digital Versatile Disc

EN : European Norm

FiFoSi : Fire Forest Simulator

HRR : Heat Release Rate

MLR : Mass Loss Rate

NF : Norme Française

NURBS : Non Uniform Rational Basis Splines

PF : Pare-Flammes

PVC : Polyvinyl Chloride

R.A.M : Ram Access Memory

RGB : Red Green Blue

SF : Stable au Feu

USB : Universal Serial Bus

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : Images numériques.....	3
Figure 1.2 : Illustration des 3 axes.....	3
Figure 1.3 : Exemple d'animation 3D.....	4
Figure 1.4 : La cité idéale attribuée à Piero Della Francesca.....	6
Figure 1.5 : La théière de l'Utah.....	6
Figure 1.6 : Technique de la modélisation polygonale	8
Figure 1.7 : Surface et points de contrôle NURBS.....	8
Figure 1.8 : Subdivision d'un cube.....	9
Figure 1.9 : Modélisation géométrique.....	10
Figure 1.10 : Couleurs de bases et couleurs dérivées.....	11
Figure 1.11 : Mapping planaire.....	11
Figure 1.12 : Mapping cylindrique.....	12
Figure 1.13 : Mapping sphérique.....	12
Figure 1.14 : Illustration de la stéréovision vision.....	14
Figure 2.1 : Triangle du feu.....	18
Figure 2.2 : Modèle de propagation des feux de forêts.....	24
Figure 2.3 : Schémas représentatif du rayonnement thermique.....	25
Figure 2.4 : Schémas représentatifs de la conduction.....	25
Figure 2.5 : Schémas représentatif de la convection.....	26
Figure 2.6 : Quantité de chaleur qui traverse une surface dS.....	28
Figure 2.7 : Schéma synthétique de la propagation d'une flamme sur une surface solide horizontale.....	30
Figure 2.8 : Schéma des mécanismes mis en jeu lors de la propagation d'une flamme sur une paroi verticale de combustible solide.....	32
Figure 3.1 : Modélisation d'un arbre avec 3DS Max.....	35
Figure 3.2 : Réalisation de la particule feu avec Unity 3D.....	36
Figure 3.3 : Valeurs des sous-composants pour la réalisation du feu de la Fig.4.2.....	36
Figure 3.4 : Fenêtre de configuration de FiFoSi.....	38
Figure 3.5 : Menu Principal de FiFoSi.....	39
Figure 3.6 : Fenêtre qui permet le choix de la densité de la forêt.....	40
Figure 3.7 : Illustration d'une faible densité de la forêt (vue d'oiseau).....	40
Figure 3.8 : Illustration de la densité moyenne de la forêt (vue d'oiseau).....	41

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I : Classification Française de la résistance au feu d'un matériau.....	21
Tableau II : Classification française de la réaction au feu d'un matériau.....	22
Tableau III : Signification des euroclasses.....	22
Tableau IV : Valeurs typiques du coefficient convectif.....	28
Tableau V : Valeurs de la conductivité thermique de quelques matériaux à 20°C.....	29

Rapport-Gratuit.com

INTRODUCTION

Depuis bien longtemps, l'image 3D occupait déjà une place dans la vie des hommes. 3D ou trois dimensions est le nouveau nom donné à ce qu'on appelait dessin ou sculpture apparu durant la renaissance. Grâce à l'évolution de la technologie et l'apparition des machines puissantes pour traiter les images, les informaticiens n'ont cessé de faire des recherches pour pouvoir reproduire ce qu'ils voyaient en images 3D.

En ce moment, plusieurs domaines dans la société utilisent 3D pour la création de simulateurs afin de rapprocher la vue réelle de la vue numérique. Parmi ces domaines se trouvent la médecine, l'astronomie, la cartographie, sans oublier le cinéma dans lequel la 3D domine.

Dans plusieurs pays, l'incendie de forêts reste l'une des catastrophes qui provoque toujours des énormes dégâts. Ses impacts environnementaux obligent les pays concernés à fournir d'intenses efforts tant au niveau préventif ou extinctif. Ainsi, élaborer des outils d'aides à la décision pour lutter contre ce fléau est un défi majeur. C'est dans cette optique qu'apparaisse l'idée de créer un logiciel de simulation pour voir la propagation du feu dans une forêt d'où l'intitulé de ce mémoire qui est : « **Modélisation de propagation du feu** ».

Ce mémoire sera donc divisé en trois parties. La première partie expliquera les généralités de l'imagerie 3D, ensuite dans la deuxième partie, je parlerai de la théorie sur la propagation du feu. La troisième et dernière partie, on parlera de FiFoSi. A la fin, ces travaux feront l'objet de quelques conclusions.

Chapitre I

GENERALITES SUR L'IMAGERIE 3D

1. DEFINITIONS

1.1. Qu'est-ce qu'une image ?

Une image est une représentation d'une personne ou d'un objet par la peinture, la sculpture, le dessin, la photographie, le film, etc. C'est aussi l'ensemble structuré d'informations qui, après affichage, a une signification pour l'œil humain [1].

1.2. Image numérique

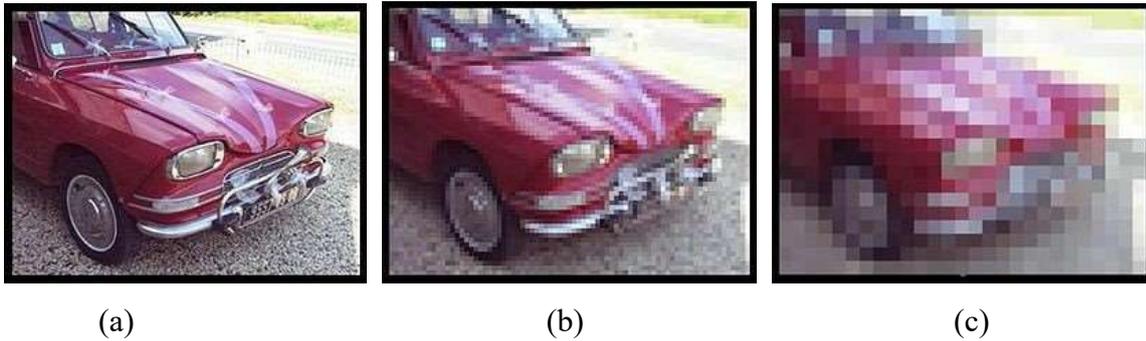
Une image numérique désigne toute image acquise, créée, traitée et stocké sous forme binaire :

- acquise par des convertisseurs analogique numérique situés dans des dispositifs comme les scanners, les appareils photos ou les caméscopes numériques, les cartes d'acquisition vidéo ;
- créée directement par des programmes informatiques, grâce à une souris, des tablettes graphiques ou par de la modélisation 3D ;
- traitée grâce à des outils informatiques, de façon à transformer, à en modifier la taille, les couleurs, d'y ajouter ou d'en supprimer des éléments, d'y appliquer des filtres variés ;
- stockée sur un support informatique : CD, DVD, clé USB ou disque dur [2].

L'unité de base qui permet de mesurer la définition d'une image numérique est le pixel. Le mot pixel provient de la locution anglaise « picture element ». Il est le composant élémentaire d'une image.

La résolution d'une image est définie par un nombre de pixels par unité de longueur de la structuré à minimiser. Plus le nombre de pixels par unité de longueur est élevé, plus la résolution est élevée et meilleure est la restitution.

La figure 1.1 illustre des images numériques avec des résolutions différentes.



(a) Bonne résolution (b) Résolution moyenne
(c) Mauvaise résolution

1.3. Imagerie 3D

3D étant l'abréviation de tridimensionnel, une image en 3D est une image représentée dans un plan en trois dimensions dont les axes sont :

x pour la largeur

y pour la hauteur

z pour la profondeur

La figure 1.2 illustre les trois axes d'un repère 3D

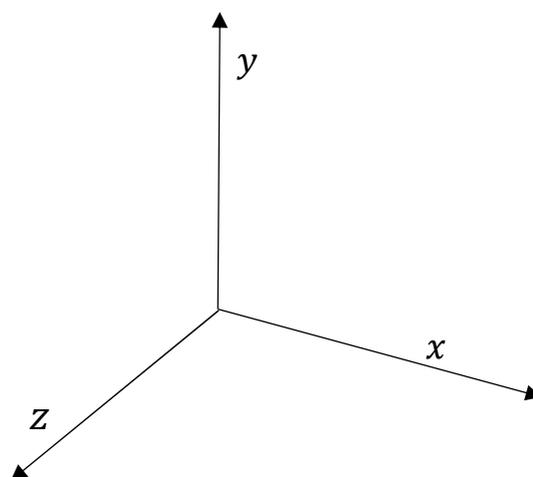


Figure 1.2 : Illustration des 3 axes

L'imagerie 3D est l'ensemble des technologies permettant l'acquisition, la modélisation, la visualisation et l'exploitation des données décrivant la géométrie des objets. Les données de l'imagerie 3D peuvent décrire :

- la surface des objets ou structure externe
- leur volume ou structure interne

1.4. Animation 3D

L'animation est une technique de manifestation en volume dans un monde virtuel. La mise en œuvre d'une animation 3D nécessite une bonne maîtrise de multiples procédés. L'illusion se façonne autour de la création d'un univers et de personnages à la fois surprenants et d'une réalité presque palpable.

Limiter l'univers de la 3D à une vision simpliste serait une erreur car les ordinateurs et les logiciels sont devenus très puissants. Ce fait a permis au formidable génie humain d'accéder à un rêve: donner la vie à une matière technologique plutôt abstraite au départ, et à mettre en place des histoires sans limitation pour l'imagination.

A l'heure actuelle, l'animation 3D est présente dans plusieurs domaines tels que : les jeux vidéo, le cinéma, la publicité, la médecine, etc. La figure 1.3 illustre un exemple d'animation 3D



Figure 1.3 : Exemple d'animation 3D

2. POURQUOI UTILISER L'IMAGERIE 3D ?

Dans la plupart des applications, tous les modes de représentation et les techniques de conception basés sur la 3D servent à fournir une compréhension accrue d'un modèle comportant en réalité les trois dimensions. Leur but principal est de rendre l'environnement de travail plus réaliste et visuel.

Le but de l'utilisation de l'imagerie 3D dans les films est de créer un maximum d'émotions chez le spectateur en le plongeant directement dans une action irréaliste ou difficile à mettre en œuvre par la présence des effets spéciaux physiques ou mécaniques.

En astronomie, l'imagerie 3D permet de suivre le mouvement des astres ou tout simplement d'obtenir une carte animée du ciel vue d'un point quelconque du temps et de l'espace.

L'utilisation de la 3D en médecine est encore plus récente. Le résultat d'examens obtenu à partir du scanner peut être présenté en 3D pour en faciliter la compréhension. Le médecin peut également réaliser une visite virtuelle de l'organe étudié.

L'imagerie 3D est aussi servie en cartographie pour représenter les informations relevées par les satellites ou par les topographes sur le terrain.

3. METHODES D'OBTENTION D'UNE IMAGE 3D

Il y a 2 grandes façons d'obtenir une image 3D : la synthèse d'image et la stéréovision.

3.1. La synthèse d'image

3.1.1. Historique

En 1475, Piero Della Francesca réalisa une peinture en perspective. A cette époque, le dessin fut encore dénommé image tridimensionnelle et la perspective était obtenue par des méthodes graphiques dérivées directement de la géométrie projective.

La figure 1.4 montre un exemple de vue perspective.



Figure 1.4 : La cité idéale attribuée à Piero Della Francesca[3]

Les images de synthèse ont débuté au début des années 1950 aux États-Unis, et étaient réservées à la recherche universitaire. On construisit un système composé d'un tube cathodique et d'un crayon optique, d'après une idée de Ivan Sutherland, du Massachusetts Institute of Technology, puis en 1961 on ajouta sur l'écran une croix pour indiquer la position du crayon optique [3].

En 1975 fut créée une des plus célèbres images de l'infographie, la théière, devenue depuis un objet classique de test pour les applications 3D, illustré sur la Fig. 1.5.

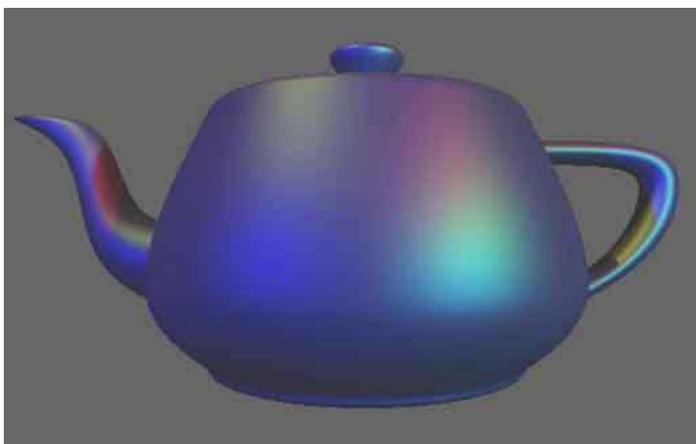


Figure 1.5 : La théière de l'Utah

Jusqu'aux années 1980, minime sont les personnes qui se plongent dans le domaine de la synthèse d'image 3D à cause des coûts matériels. Mais c'était l'apparition des ordinateurs personnels, à partir de 1981, qui a démocratisé l'utilisation de la 3D pour l'étude.

L'année 1990 fut marquée par l'arrivée des matériels informatiques puissants permettant le temps réel, comme des cartes 3D. Ce qui a entraîné un essor important de l'image de synthèse et de la 3D. Depuis, l'accélération de ce dernier est partie intégrante des matériels informatiques.

3.1.2. Définition

La synthèse d'image 3D, appelée aussi l'infographie 3D est un ensemble de techniques notamment issues de la C.A.O qui permet la représentation d'objets en perspective sur un moniteur d'ordinateur [3].

3.1.3. Techniques de la synthèse d'image

La synthèse d'image 3D se décompose essentiellement en deux étapes :
Le **modélisation**, où on peut modéliser ce que l'on veut réaliser ou représenter.
Le **rendu**, où on effectue la visualisation de ce qu'on a modélisé.

a) Modélisation

La modélisation tridimensionnelle est l'étape en infographie tridimensionnelle qui consiste à créer, dans un logiciel de modélisation 3D, un objet en trois dimensions, par ajout, soustraction et modifications de ses constituants [4]. Il existe plusieurs logiciels spécialisés destinés à la modélisation 3D comme 3ds Max, Cinéma 4D, Blender, Maya.

Il existe 4 différentes techniques de modélisation qui sont : la modélisation polygonale, la modélisation par courbe, la modélisation par subdivision de surface et la modélisation par géométrie.

i. Modélisation polygonale

La modélisation polygonale est une modélisation où le modèle est assimilé à un polyèdre composé de sommets, d'arêtes et de faces. Le principe ce type de modélisation est de prendre une primitive standard au début, puis de transformer cette primitive en polygone éditable afin d'obtenir la forme 3D désirée. La figure 1.6 illustre cette méthode.

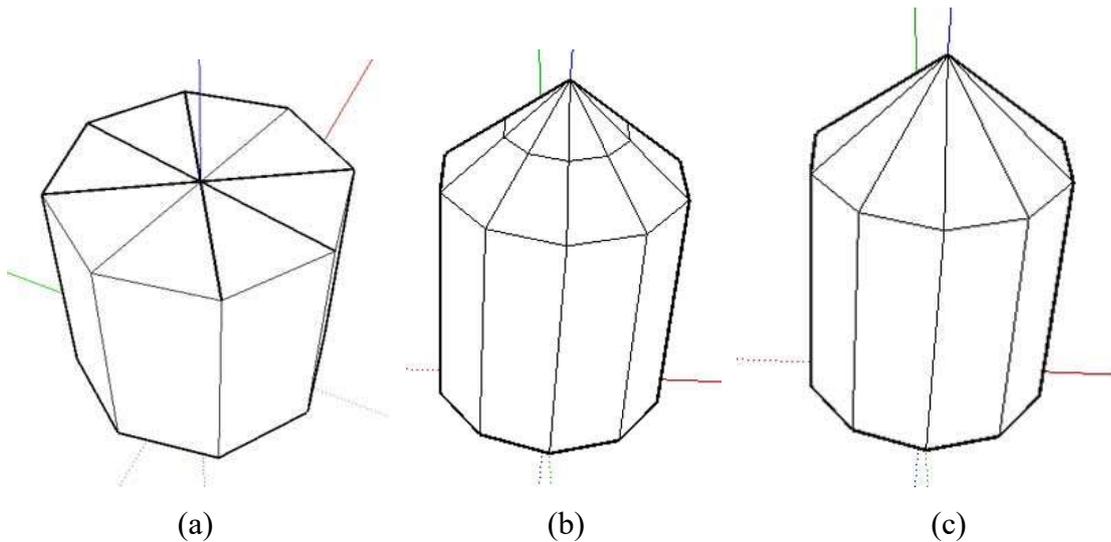


Figure 1.6 : Technique de la modélisation polygonale ; (a) forme primitive (b) première transformation (c) deuxième transformation

ii. Modélisation par courbe

La modélisation par courbe, appelée aussi modélisation par NURBS (Non Uniform Rational Basis Splines), consiste en un réseau de courbes créé grâce à des points de contrôles.

La modélisation par courbe se base sur un maillage adaptatif, conçu pour adapter ses subdivisions à la complexité des courbes dans une région donnée. Une surface parfaitement plane aura un nombre de subdivision très faible ou nul. Cette technique est illustrée sur la Fig. 1.7.

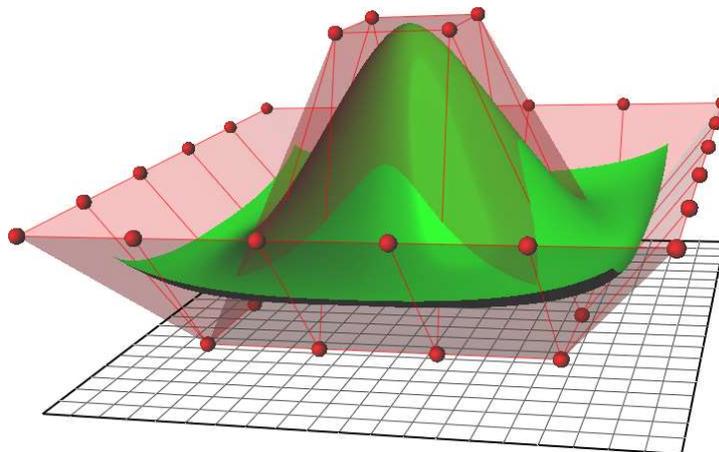


Figure 1.7 : Surface et points de contrôle NURBS

iii. Modélisation par subdivision de surface

La modélisation par subdivision de surface est la combinaison des deux méthodes : polygonale et par NURBS. Elle se rapproche de la modélisation polygonale par les techniques employées lors de la création de la forme, et de la modélisation par NURBS en ce qui concerne l'arrondi de la surface. La figure 1.8 montre un exemple de forme modélisée par la méthode de subdivision de surface.

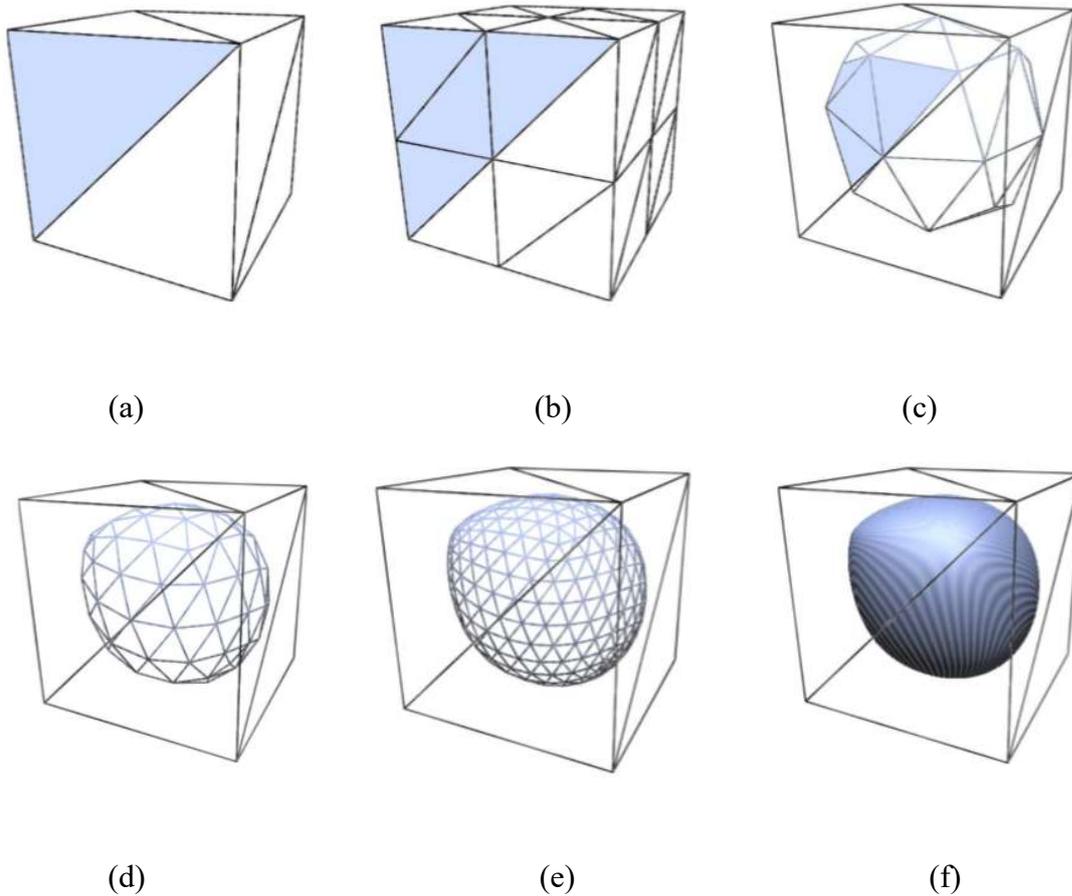


Figure 1.8 : Subdivision d'un cube ; (a) Cube initial (b) Subdivision géométrique du cube (c) Forme obtenue après deuxième subdivision (d) Lissage géométrique (e) Forme obtenue après deuxième lissage géométrique (f) Forme finale désirée

iv. Subdivision géométrique

Cette technique de modélisation géométrique concerne la représentation d'un objet solide comme combinaison d'objets solides simples (exemple : cylindre, sphère, cône, etc.) à l'aide d'opérateurs géométriques booléens (exemple : union, intersection, soustraction) [5]. La figure 1.9 illustre la méthode de modélisation géométrique.

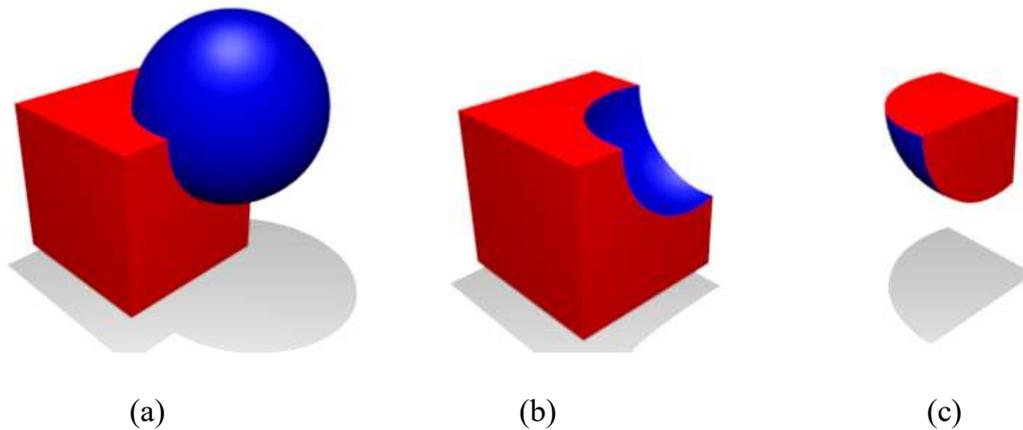


Figure 1.9 : Modélisation géométrique ; (a) Union de deux objets (b) Soustraction d'un objet de l'autre (c) intersection des deux objets

b) Rendu en temps réel

Le rendu est l'ensemble des calculs opérés afin d'obtenir une projection bidimensionnelle de la scène 3D. Les différentes phases du rendu sont : la couleur, la texture, l'éclairage et la caméra.

i. Couleur

Une fois la modélisation 3D effectuée, l'affectation de couleurs à l'objet rend la scène plus réaliste. Pour cela, on utilise les couleurs dérivant des couleurs de base Rouge, Verte et Bleue du modèle RGB. La figure 1.10 montre les trois couleurs de bases et ses couleurs dérivées.

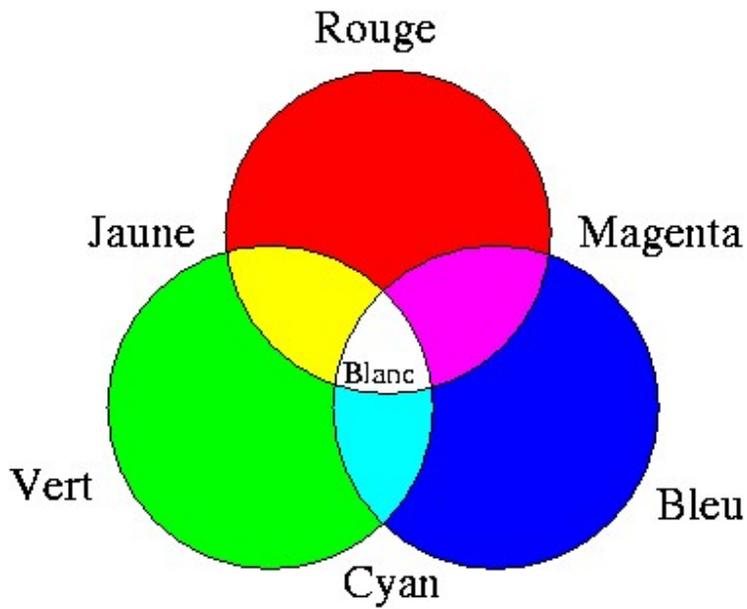


Figure 1.10 : Couleurs de bases et couleurs dérivées

ii. Texture

Pour la plupart des objets, les couleurs ne suffisent pas. Dans ce cas, il faut lui appliquer une texture. Une texture est une image en 2D que l'on va poser sur l'image 3D modélisée pour lui donner un aspect spécifique comme la pierre ou le bois. Cette opération s'appelle le **Mapping**.

Il existe 3 types de Mapping :

Le **Mapping planaire** où on projette l'image sur le plan. (Fig. 1.11)

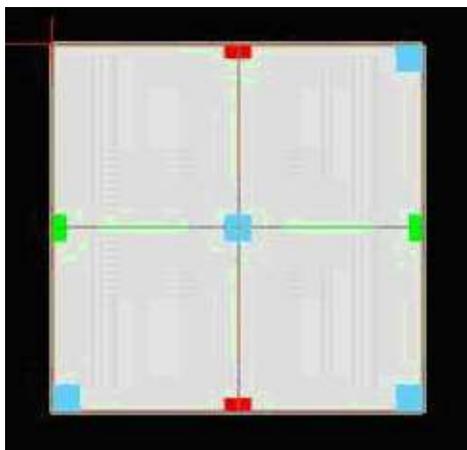


Figure 1.11 : Mapping planaire

iii. Eclairage

Pour bien mettre en valeur les objets et l'environnement de synthèse, il faut aussi modéliser la lumière. Les différents types de lumière pouvant être modélisés sont :

- La lumière ambiante : c'est le modèle le plus simple. On considère qu'il existe une source lumineuse présente partout et qui éclaire de manière égale dans toutes les directions.
- La réflexion diffuse : l'intensité en un point d'une surface dépend de l'angle formé entre le rayon de lumière qui touche le point de la surface et la normale à la surface. Plus l'angle formé entre le rayon de lumière et la normale au plan est faible, plus l'intensité lumineuse réfléchie visible par l'observateur est forte.
- La réflexion spéculaire : se différencie du modèle de diffusion en faisant intervenir le point d'observation
- Les sources multiples où il suffit d'additionner toutes les formules issues de chaque source de lumière avec celles issues de la lumière ambiante.
- Les modèles d'ombrage : ils permettent de calculer l'intensité de la lumière par rapport à un polygone, ce qui permet de simplifier le calcul de l'éclairage sur un objet de synthèse. Il existe plusieurs modèles dont les plus utilisés sont l'ombrage plat, l'ombrage de Gouraud et l'ombrage de Phong [6].

iv. Caméra

L'espace réel est de nature tridimensionnelle, alors que les outils usuels de formation d'une image, comme l'écran par exemple, sont bidimensionnels. Pour cela, il faut chercher une fonction qui transforme l'image 3D en 2D, c'est ce qu'on appelle la projection. Le résultat de la projection provoque la notion de perspective.

Les différents types de perspectives sont :

- La perspective conique avec points de fuite : les objets loin sont représentés petits par rapport aux objets proches.
- La perspective axonométrique : la taille de l'objet ne varie pas avec l'éloignement ; l'éloignement est figuré par un déplacement dans le plan de la figure.

3.2. La stéréovision

La Stéréovision consiste en la localisation dans l'espace d'objets filmés simultanément sous des angles différents par au moins deux caméras en position générale.

Cette opération se décompose en trois phases principales :

La calibration des caméras, c'est-à-dire la détermination des paramètres intrinsèques des capteurs.

L'association (ou appariement), c'est la reconnaissance sur chaque paire d'images les pixels correspondantes au même objet réel.

La reconstruction de la scène, ou le calcul des coordonnées des objets la constituant uniquement à partir des images fournies par les capteurs [7].

La figure 1.14 illustre la stéréovision

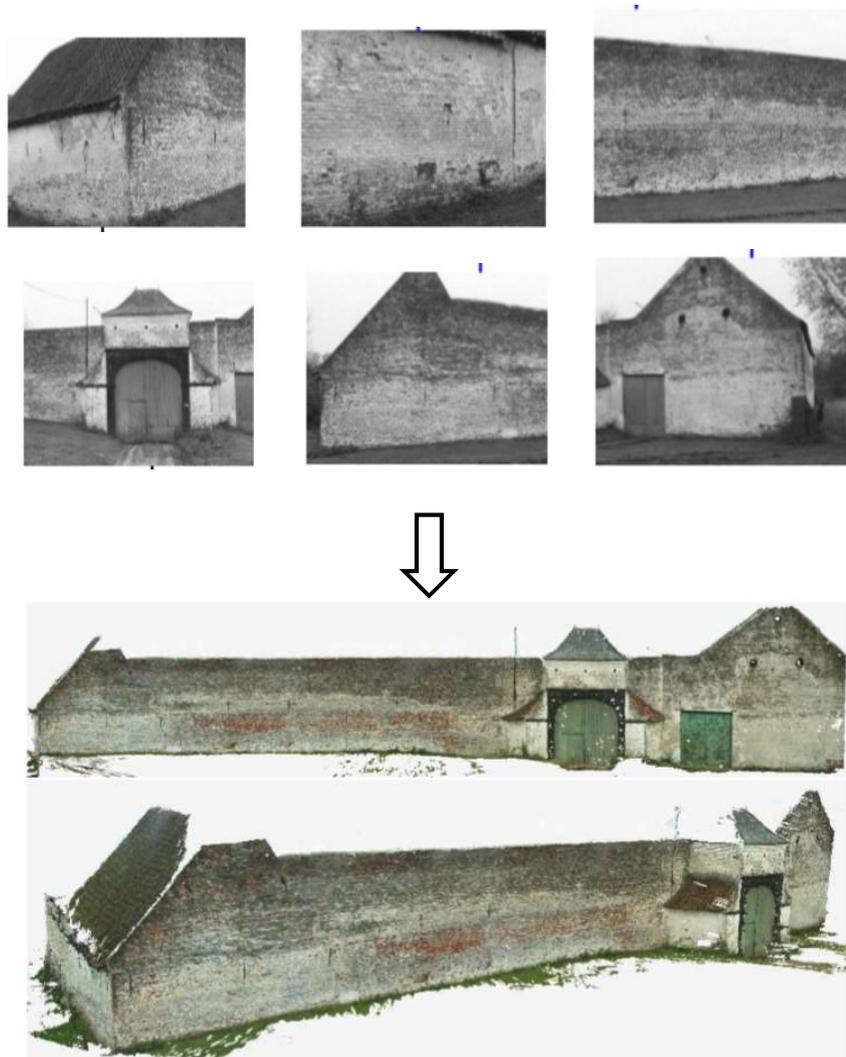


Figure 1.14 : Illustration de la stéréovision

4. LES DIFFERENTS TYPES D'IMAGE 3D

Il existe plusieurs types d'image 3D qui sont : la 3D temps réel, la 3D précalculée et la 3D hybride.

3D temps réel

La 3D temps réel est une méthode de représentation pour laquelle chaque image composant l'animation est rendue dans l'instant qui précède son affichage. La vitesse de rendu doit permettre une animation fluide. Le temps de rendu en 3D temps réel est imperceptible, il doit être inférieur à la persistance rétinienne. Elle est utilisée dans les jeux vidéo et dans nombreuses applications : simulations, visualisation architecturale, visualisation médicale, visite virtuelle. La 3D temps réel permet de ce fait un grand degré d'interactivité : possibilités d'immersion, de contrôle d'animation, d'interactivité avec la scène 3D.

3D précalculée

Opposé à la 3D temps réel, la 3D précalculée, dans sa mesure, le rendu des données 3D est immédiat et est une vidéo. Son avantage principal se trouve dans le fait qu'elle permet d'obtenir une très grande qualité d'image et un réalisme poussé. De ce fait, elle est souvent utilisée dans la création d'images, d'effets spéciaux et de films d'animation.

3D hybride

La 3D hybride vise à améliorer le photoréalisme de la 3D temps réel en pré-calculant (et donc en figeant) certains paramètres dont le calcul est coûteux mais dont la qualité est indispensable au réalisme de l'image.

5. CONCLUSION

L'image tridimensionnelle était donc présente dans la vie de l'homme depuis longtemps, mais c'était l'arrivée des matériels informatiques très puissants qui a accéléré son utilisation dans plusieurs domaines tels que : le cinéma, l'astronomie, la médecine, la cartographie et la conception de simulateur. La synthèse d'images et la stéréovision forment les deux méthodes qui permettent d'obtenir une image 3D.

La modélisation 3D des objets, le rendu et l'animation 3D rendent l'environnement et la scène plus réaliste.

Chapitre II

THEORIE SUR LA PROPAGATION DU FEU

1. DEFINITIONS

1.1. Qu'est-ce que la Pyrotechnie ?

La **pyrotechnie** est la science de la combustion des matériaux sans participation de l'oxygène de l'air [8]. Autrement dit, la pyrotechnie est l'art d'utiliser le feu.

1.2. Le feu

Le **feu** est la production d'une flamme par une réaction chimique exothermique d'oxydation appelée combustion.

1.3. Qu'appelle-t-on incendie ?

Un **incendie** est un feu violent et destructeur pour les activités humaines ou la nature. L'incendie est une réaction de combustion non maîtrisée dans le temps et l'espace [9].

2. LA COMBUSTION

2.1. Définition

La combustion est une réaction chimique dégageant de la chaleur et de la lumière. Cette réaction chimique ne peut se produire que si l'on réunit trois éléments :

Le **combustible**, qui peut être un gaz (par exemples : butane, propane, dihydrogène, etc.) ou un liquide (par exemples : essence, gasoil, kérosène, etc.) ou un corps solide (par exemples : bois, plastique, etc.)

Le **comburant**, qui est souvent l'air ambiant et plus particulièrement de l'un de ses composants principaux, le dioxygène.

L'**énergie d'activation**, qui déclenche la réaction (par exemples : flamme, radiation, électricité, pression, etc.)

2.2. Le triangle du feu

L'ensemble formé par les deux composés chimiques (combustible et comburant) et la source d'énergie (énergie d'activation) s'appelle le **triangle du feu**, illustré sur la Fig. 2.1.



Figure 2.1 : Triangle du feu

2.3. Les différents types de combustion

Il existe différents types de combustions :

- **Combustion complète** : air en quantité suffisante pour entretenir la combustion, la réaction provoque un dégagement de CO_2 (dioxyde de carbone)
- **Combustion incomplète** : air en quantité insuffisante pour entretenir la combustion, un des produits formés est le CO (monoxyde de carbone)
- **Combustion lente** : par exemple, la rouille
- **Combustion spontanée** : par exemple, la fermentation
- **Combustion vive** : appelée aussi combustion "classique", par exemple, le feu dans la cheminée
- **Combustion très vive ou instantanée** : par exemple, la déflagration ou la détonation

3. MECANISME DU FEU

3.1. Les types de feux

Les feux sont aussi divers que nombreux, caractérisés par les différents corps combustibles et inflammables. Cependant, il est possible de classer les feux en cinq grandes catégories : les feux de classe A, de classe B, de classe C, de classe D et les hors qualifications.

3.1.1. Les feux secs (Classe A)

Ils concernent les matériaux solides, généralement de nature organique, dont la combustion se fait normalement avec une formation de braises. Une des caractéristiques des feux de classe A est d'avoir deux modes de combustion: la combustion vive avec flammes et la combustion lente sans flammes, mais avec formation de braises incandescentes.

Exemples : bois, papier, tissus, etc.

3.1.2. Les feux gras (Classe B)

Ce sont les feux de liquides ou de solides liquéfiables; leur combustion se fait sans formation de braises profondes.

Exemples : l'essence, les alcools, le fuel, les solvants, certaines matières plastiques courantes fréquemment utilisées en matière d'isolation (polystyrène, polyéthylène).

3.1.3. Les feux de gaz (Classe C)

Les feux de gaz à température ambiante, pour brûler, doivent être mélangés à l'air afin de constituer un mélange dans des proportions convenables. Ces mélanges gazeux sont explosifs.

Exemples : les gaz du groupe des alcanes

3.1.4. Les feux de métaux (Classe D)

Exposé à l'air, un fer placé dans une flamme ne brûle pas mais devient tout simplement incandescence. En revanche, de la laine de fer brûle en produisant des étincelles.

La combustion d'un métal dans l'air est d'autant plus facile que le métal est divisé. Pour être amené à combustion, les feux de métaux exigent une forte élévation de température.

Exemples : aluminium, magnésium, sodium, etc.

3.1.5. Les hors qualifications

Dans cette catégorie sont classés les feux de graisses végétales, de graisses animales, d'huile de cuisson, d'électricité.

3.2. Comportement au feu des matériaux

Le comportement au feu des matériaux est apprécié selon deux critères :

- La **résistance au feu** des matériaux, c'est-à-dire le temps pendant lequel le matériau peut jouer le rôle qui lui est dévolu malgré l'action de l'incendie;
- La **réaction au feu** des matériaux, c'est-à-dire la représentation d'un matériau en tant qu'aliment du feu (combustibilité, inflammabilité), définie par l'Arrêté du 21 novembre 2002.

3.2.1. Résistance au feu

Dans les classifications françaises, les trois critères permettant de classer la résistance au feu d'un matériau sont : la résistance mécanique sous charge, l'étanchéité aux gaz chauds et aux flammes ainsi que l'absence d'émission de gaz inflammables sur la face non exposée au feu et l'isolation thermique.

A ces trois critères sont ajoutés le degré de résistance au feu (exprimé en temps requis). Les valeurs conventionnelles sont: 1/4 h, 1/2 h, 3/4 h, 1 h, 2 h, 3 h, 4 h et 6 h. Le tableau I représente la classification Française de la résistance au feu d'un matériau.

Tableau I : Classification Française de la résistance au feu d'un matériau

Classement	Résistance mécanique sous charge	Etanchéité aux gaz chauds et aux flammes	Isolation thermique	Degré de résistance au feu
Stable au feu ou SF	+	-	-	1/4 h à 6h
Pare-flammes ou PF	+	+	-	1/4 h à 6h
Coupe-feu ou CP	+	+	+	1/4 h à 6h

Exemples :

- un poteau peut être SF 1/4 h jusqu'à SF 6 h;
- une porte peuvent être PF 1/4 h jusqu'à PF 6 h

Dans les normes européennes, la définition des caractéristiques de résistance au feu est identique à celle décrite précédemment mais leur désignation est différente :

stabilité au feu : (capacité portante) SF deviens R;

pare-flammes : (étanchéité au feu) PF deviens E;

coupe-feu : (isolation thermique) CF deviendra REI.

Pour le degré de résistance au feu, il n'est plus exprimé en h mais en mn.

Exemples :

- SF 1 h deviendra R 60 ;
- PF 1/2 h deviendra E 30

3.2.2. Réaction au feu

C'est la manière dont un matériau (béton, bois, papier, etc.) va se comporter comme combustible. Cette réaction est définie après des essais normalisés au sein de centres agréés. La réaction au feu des matériaux est définie par l'arrêté du 21 novembre 2002. Dans la classification française, il existe un classement sous norme NF P92-507, composé de 5

catégories qui définissent la réaction au feu des matériaux : ils vont de M0 pour l'ininflammable à M4 pour désigner les matériaux les plus inflammables jusqu'à leur propension à la propagation du feu. La réaction au feu d'un matériau est classée selon deux caractères : la combustibilité et l'inflammabilité, montrée sur le tableau II.

Tableau II : Classification française de la réaction au feu d'un matériau [10]

	Combustibilité	Inflammabilité	Exemples
M0	Incombustible		Pierre, brique, ciment, acier, etc.
M1	Combustible	Ininflammable	Matériaux composites, PVC, polyester, etc.
M2	Combustible	difficilement inflammable	Moquette murale, panneau de particules
M3	Combustible	moyennement inflammable	Bois, caoutchouc, laine, etc.
M4	Combustible	facilement inflammable	papier, polypropylène
NC	non classé	non classé	

L'arrêté du 21 novembre 2002 (modifié) relatif à la réaction au feu des produits de construction et d'aménagement, introduit désormais les « **euroclasses** » de réaction au feu.

Les euroclasses, définies dans la norme européenne EN 13501-1, sont un système de classement en cinq catégories d'exigence : A1, A2, B, C, D, E, F (F correspondant au NC du classement M).

Le tableau III explique la signification de chaque classe des euroclasses de réaction au feu.

Tableau III : Signification des euroclasses

Classement	Signification
A1 et A2	Très peu combustible
B	Contribution très limitée
C	Contribution limitée
D	Acceptable mais satisfait à l'essai SBI
E	Acceptable mais satisfait à la petite
F	Aucune performance de réaction au feu

Les euroclasses tiennent aussi compte de deux autres critères essentiels (après tests en laboratoire) [9] :

l'opacité des fumées (quantité et vitesse) notée *s* pour *smoke*

- s1 : faible quantité/vitesse
- s2 : moyenne quantité/vitesse
- s3 : haute quantité/vitesse

les gouttelettes et débris enflammés notées *d* pour *droplets*

- d0 : aucun débris
- d1 : aucun débris dont la combustion ne dure pas plus de 10 secondes
- d2 : ni d0 ni d1

4. PROPAGATION DU FEU

La propagation du feu amène à définir la notion de front de flammes.

4.1. Front de feu

Le front de feu ou front de flammes est le domaine spatial dans lequel la combustion produit des flammes apparentes. Le front de feu est la zone frontière entre le combustible non brûlé et le combustible brûlé, qui concentre l'essentiel de l'activité de l'incendie [11].

Le front de feu caractérisé par :

La vitesse de propagation : elle est fortement liée à la vitesse du vent, exprimé en m/s ou km/h

La puissance du front de feu : C'est l'énergie libérée par unité de temps par unité de longueur du front de feu. Elle est exprimée en watt par mètre linéaire de front de feu (W/m)

En particulier, pour les gaz au repos, si D_T est le coefficient de diffusion thermique et T le temps de réaction, la vitesse du front de flamme v_T est donnée par l'Eq. 2.1.

$$v_T = \sqrt{\frac{D_T}{T}} \quad (2.1)$$

Et l'épaisseur de flammes e vaut :

$$e = \sqrt{T \cdot D_T} \quad (2.2)$$

La vitesse de réaction suit une loi d'Arrhenius, on en déduit que la vitesse du front a la forme :

$$v_L = v_0 \cdot \exp\left(-\frac{E_A}{2kT}\right) \quad (2.3)$$

où E_A est l'énergie d'activation, k la constante de Boltzmann et T la température absolue du gaz.

La figure 2.2 illustre un modèle de propagation du front de flamme des feux de forêts.

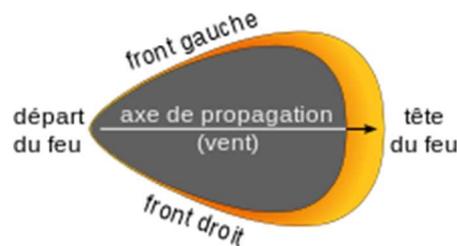


Figure 2.2 : Modèle de propagation des feux de forêts

4.2. Modes de propagation du feu

Le feu se propage par transfert de chaleur et par déplacement de substances en combustion

4.2.1. Par transfert de chaleur

Un transfert de chaleur est un processus d'échange d'énergie entre 2 points de l'espace se produisant lorsqu'une différence de température existe entre ces 2 points. Il existe 3 modes de transmission de la chaleur qui le transfert par rayonnement, par conduction et par convection.

a) Par rayonnement

Il s'agit d'une émission d'énergie sous forme électromagnétique pouvant être absorbée par un corps sous forme d'énergie thermique. Le transfert peut se réaliser dans le vide sans la présence de matière. L'exemple caractéristique de ce type de transfert est le rayonnement du soleil dans l'espace. Dans l'exemple illustré par la Fig.2.3, le transfert de chaleur par rayonnement se passe aux niveaux des surfaces des deux toits où T_i représente les températures sur les toits i et Q_i ses quantités de chaleur.

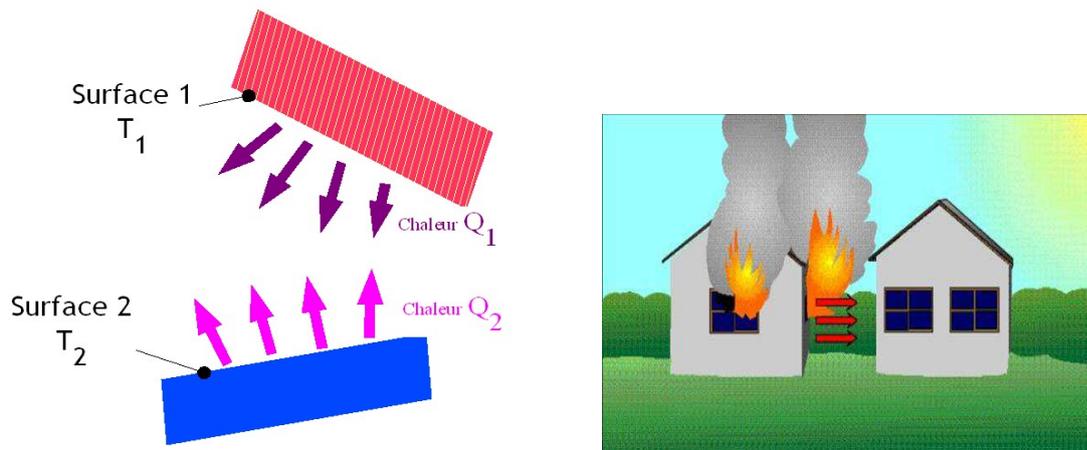


Figure 2.3 : Schémas représentatif du rayonnement thermique

b) Par conduction

La conduction thermique est le mode de transfert thermique provoqué par une différence de température entre deux régions d'un même milieu ou entre deux milieux en contact sans déplacement appréciable de molécules. Ce transfert thermique spontané d'une région de température élevée vers une région de température plus basse obéit à la loi de Fourier [9].

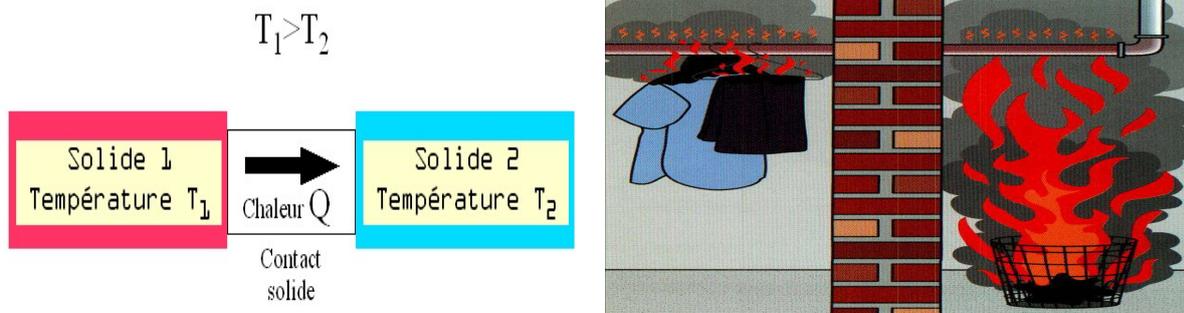


Figure 2.4 : Schémas représentatifs de la conduction

c) Par Convection

La convection est un transfert de chaleur par mouvements macroscopiques du gaz dont la masse transporte la chaleur qu'elle contient. Lorsque cette masse atteint un obstacle froid (par exemple un plafond), elle lui transfère sa chaleur, refroidit et retombe, il a donc un mouvement de « roulement ».

La figure 2.5 illustre le transfert de chaleur par convection

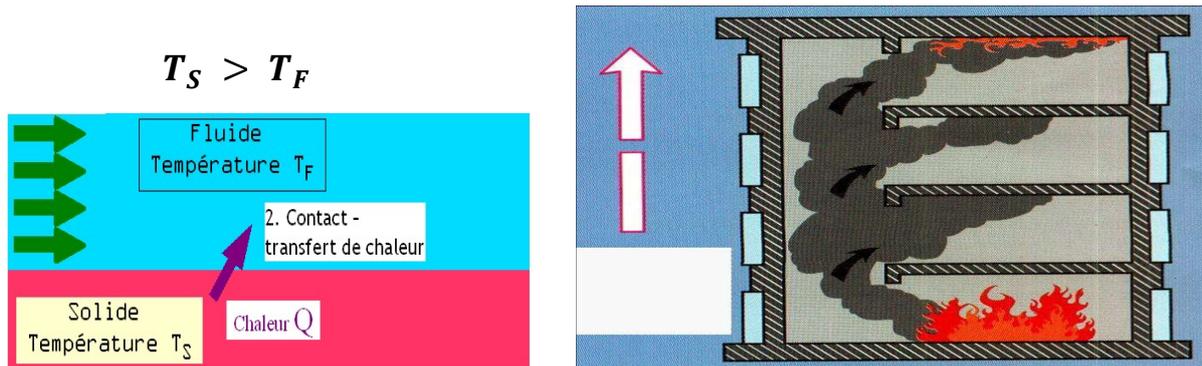


Figure 2.5 : Schémas représentatif de la convection

4.2.2. Par déplacement de substances en combustion

a) Les solides

La propagation se fait par brandons ou escarbilles.

- Brandons : fragments de solides en ignition pouvant franchir, suivant la force du vent des distances souvent importantes. Ce mode de propagation caractérise les feux de forêts, qui peut atteindre de 100 jusqu'à 150 mètres.
- Escarbilles : petites particules incandescentes. Leur danger se limite à quelques mètres

b) Les liquides

Le transfert est de plus en plus limité, les cuvettes de rétention permettant d'éviter ce problème.

c) Les gaz

Dans un feu où la combustion est souvent incomplète, il subsiste des nappes de gaz imbrûlés. La combustion de ces nappes peut se poursuivre sur une distance notable avec parfois rupture de flamme, puis réinflammation à une distance variable par un nouvel appel d'air.

4.3. Equations de propagation du feu sur un matériau solide

Lors d'un incendie, l'étape préliminaire qui conduit à l'apparition d'une flamme est appelée : **l'ignition**. Cette étape est généralement décrite comme une succession de trois processus :

- le préchauffage du matériau sans réaction jusqu'à ce qu'une température de **pyrolyse** soit atteinte, il est caractérisé par un temps de pyrolyse (t_{py}). Le phénomène de pyrolyse correspond à la dégradation du matériau en vapeur de combustible sous l'effet de la chaleur.
- le mélange de vapeurs avec l'oxygène et les réactions de combustion en phase gaz. Cette étape est caractérisée par un temps de mélange (t_M).
- une réaction exothermique apparaît dans le cas où la température du mélange est suffisante. Ce dernier processus est caractérisé par un temps d'induction (t_I).

Le temps total nécessaire pour aboutir à l'ignition peut être simplement exprimé comme l'addition de ces trois temps caractéristiques.

$$t_{ig} = t_{py} + t_M + t_I \quad (2.4)$$

Une fois l'ignition atteinte, la combustion est amorcée moyennant une température suffisante pour permettre l'inflammation du mélange gazeux formé. Ensuite, la pyrolyse entretient cette combustion en fournissant le combustible nécessaire. Il y a donc un transfert de chaleur entre la flamme et le matériau. La loi de Newton donne l'expression de la quantité de chaleur δQ qui traverse une surface dS pendant l'intervalle de temps dt , et illustrée à la Fig.2.6.

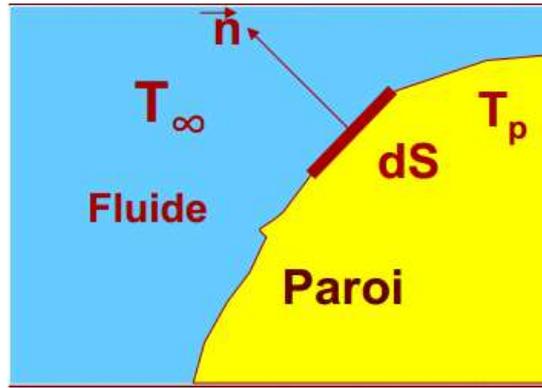


Figure 2.6 : Quantité de chaleur qui traverse une surface dS

$$\frac{\delta Q}{dt} = h (T_p - T_\infty) \cdot dS \quad (2.5)$$

où h est appelé le coefficient de transfert convectif. Il est exprimé en $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$.

$T_p - T_\infty$ représente la différence de température entre le fluide et le solide, elle est exprimée en °K.

Le tableau IV représente des valeurs typiques de h pour des fluides.

Tableau IV : Valeurs typiques du coefficient convectif

Fluides	$h (W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1})$
Gaz	10 – 300
Eau	300 – 12 000
Huile	50 – 1 700

Jean Joseph Fourier a aussi développé une théorie analytique pour décrire la conduction de la chaleur dans les matériaux. Dans sa théorie, l'énergie par unité de temps traversant une surface unitaire peut-être calculée par la relation :

$$\vec{j} = -\lambda \cdot \overrightarrow{grad}T \quad (2.6)$$

où λ est la conductivité thermique du matériau, elle est exprimée en $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$. Plus la valeur de cette conductivité thermique est faible et plus le matériau est isolant, plus cette valeur est

grande, plus le matériau est conducteur. Le signe moins dans la loi de Fourier traduit l'orientation de \vec{j} vers les basses températures.

Le tableau V représente les valeurs typiques de la conductivité thermique de quelques matériaux à la température 20°C.

Tableau V : Valeurs de la conductivité thermique de quelques matériaux à 20°C

Matériaux	Conductivité thermique
Aluminium	237
Fer	80
Terre sèche	0,75
Bois de pin (parallèle aux fibres)	0,36
Bois de pin (perpendiculaire aux fibres)	0,15
Polystyrène	0,04
Diamant	1000 – 2600
Graphite	500 – 2000
Verre	1,2

L'équation de la chaleur en une dimension est donnée par l'équation différentielle partielle :

$$\frac{\partial u}{\partial t}(x, t) = \frac{\lambda}{\rho c} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}(x, t) \quad (2.7)$$

où $x \in \mathbb{R}$ et $t > 0$

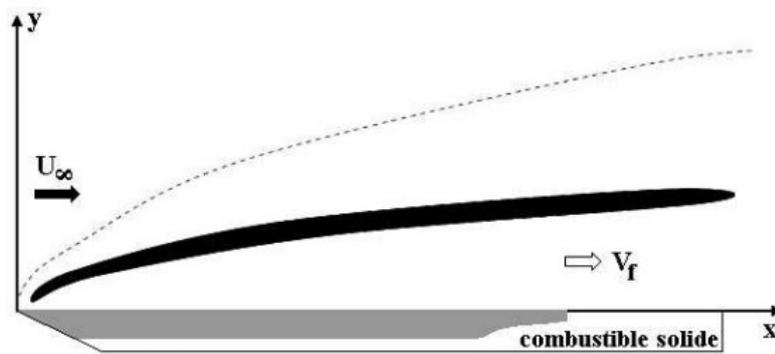
ρ représente la masse volumique du matériau, c sa chaleur thermique et λ sa conductivité thermique. Ici, $u(x, t)$ est la température à la position x et à l'instant $t > 0$. En général, la valeur de $u(x, t)$ en $t = 0$ est donnée, elle correspond à la température d'ignition T_{ig} .

Une fois la combustion initiée, la flamme va ensuite pouvoir se propager. La propagation consiste en un déplacement de la partie pyrolysée vers la partie non pyrolysée du solide. Ce phénomène est caractérisé par la vitesse de propagation de la flamme V_f ($m \cdot s^{-1}$). Il est dû à l'échange de transferts thermiques entre la flamme et le combustible. L'équation de l'énergie transférée (flux de chaleur) \dot{q}'' (en $J \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$) en fonction de la masse volumique du matériau ρ (en $kg \cdot m^{-3}$), de son épaisseur δ (en m), de la vitesse de propagation de la flamme V_f

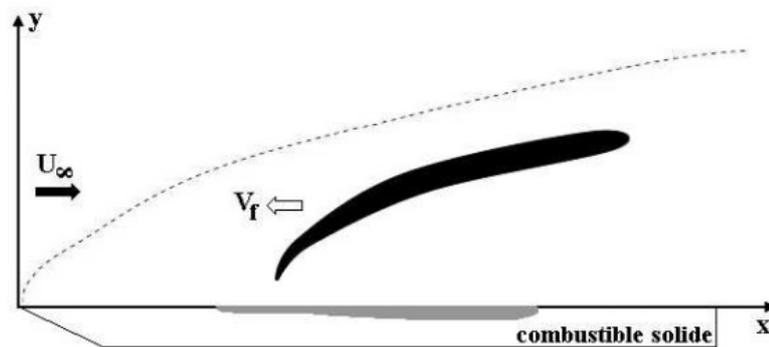
(en m.s^{-1}), de la chaleur spécifique C_p (en $\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$) et de la variation de température entre la température d'ignition T_{ig} (en $^{\circ}\text{K}$) et la température du solide T_s (en $^{\circ}\text{K}$) est donnée par la relation :

$$\dot{q}'' = \rho V_f \delta C_p (T_{ig} - T_s) \quad (2.7)$$

Cette équation est appelée l'équation fondamentale de la propagation du feu, où le terme $C_p(T_{ig} - T_s)$ correspond à l'enthalpie de préchauffage de la zone devant le front de flamme. Ce flux de chaleur dépend aussi de la configuration de la propagation. Deux types de propagation peuvent se présenter : la propagation à co-courant et la propagation à courant opposé. La figure 2.7 propose un schéma synthétique de ces deux configurations.



(a)



(b)

Figure 2.7 : Schéma synthétique de la propagation d'une flamme sur une surface solide horizontale ; (a) propagation co-courant (b) propagation opposée

Dans la Fig.2.6, la vitesse U_{∞} est équivalente à un entraînement d'air provoqué par le vent pour les feux en extérieur ou à une convection naturelle engendrée par la propagation de la flamme. La zone grise présente sur le combustible solide correspond à la zone ayant déjà subi la pyrolyse. La propagation à co-courant correspond à une vitesse de cet entraînement d'air dans la même direction que la vitesse de propagation de la flamme et à courant opposé dans le sens inverse. La vitesse de propagation est donc logiquement plus élevée dans le cas du co-courant. La propagation de la flamme dépend aussi de l'orientation de la surface du matériau solide : horizontale ou verticale. En particulier, pour le cas d'une propagation à co-courant pour une plaque combustible solide en position verticale, différents types de transfert de chaleur sont mis en jeu : la convection de la flamme vers le solide \dot{q}_{cv}'' , le rayonnement de la flamme vers le solide \dot{q}_r'' , le rayonnement du solide vers la flamme $\dot{q}_{s,r}''$. Des pertes de chaleur s'ajoutent à cela telles que : la conduction à travers le solide $\dot{q}_{s,c}''$ (si l'épaisseur n'est pas trop faible) et le rayonnement de la flamme vers l'extérieur $\dot{q}_{L,r}''$. Deux hauteurs jouent un rôle pour caractériser la combustion d'un matériau solide : la hauteur de pyrolyse h_{py} et la hauteur de la flamme h_f données par l'Eq.2.8 et l'Eq.2.9.

$$h_f = 4,2 \left(\frac{HRR}{\rho_{air} c_{p,air} T_{air} \sqrt{g}} \right)^{2/3} \quad (2.8)$$

$$h_f \approx h_{py}^{\alpha} \quad (2.9)$$

avec g la constante gravitationnelle ($m.s^{-2}$) et des paramètres de l'air ambiant : ρ_{air} la masse volumique ($kg.m^{-3}$), T_{air} la température ($^{\circ}K$), $C_{p,air}$ la capacité calorifique ($J.kg^{-1}.K^{-1}$). HRR (de l'anglais Heat Release Rate) représente le dégagement de chaleur, il est obtenu à partir du taux de combustion R ($kg.m^{-2}.s^{-1}$) suivant la relation :

$$HRR = x \Delta h_c \quad (2.10)$$

Où S est la surface du combustible (m^2), x un coefficient permettant de rendre compte d'une combustion incomplète ($x = 1$ si l'on considère une combustion complète) et Δh_c la chaleur de combustion ($J.kg^{-1}$).

Et enfin, une dernière caractéristique est la perte de masse MLR (de l'anglais Mass Loss Rate), donnée par l'Eq.2.11 :

$$MLR = R \quad (2.11)$$

La figure 2.8 illustre les mécanismes mis en jeu lors de la propagation d'une flamme sur une paroi verticale de combustible solide.

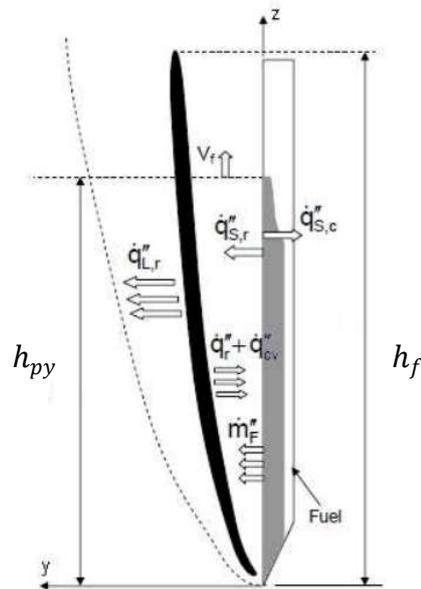


Figure 2.8 : Schéma des mécanismes mis en jeu lors de la propagation d'une flamme sur une paroi verticale de combustible solide

5. CONCLUSION

La réaction chimique de combustion ne peut se produire que si l'on réunit trois éléments (le combustible, le comburant, l'énergie d'activation) du triangle de feu en quantités suffisantes. Le mécanisme du feu permet de classer les feux en 5 catégories, selon le type de matériau soumis à la combustion et la nature du produit formé après la combustion. La résistance au feu et la réaction au feu des matériaux permettent de décrire le comportement au feu des matériaux.

La combustion se manifeste par l'apparition de la flamme. La propagation de la flamme est due au transfert de chaleur par rayonnement, par conduction et par convection entre le combustible et le fluide.

Plusieurs paramètres tels que la variation entre la température d'ignition et la température du solide, le flux de chaleur, la masse volumique et épaisseur du matériau, la chaleur spécifique et la vitesse de flamme sont mis en jeu pour étudier la propagation de la flamme sur un combustible solide, grâce à l'équation fondamentale de la propagation du feu.

Chapitre III

FiFoSi

Connaissant à présent les types de feux de forêts, les paramètres nécessaires mis en jeu dans son développement, nous pouvons en faire une simulation 3D.

1. LES OUTILS DE SIMULATION

Pour faire la simulation, nous avons utilisé deux outils :

- Le logiciel 3DS MAX pour la modélisation des éléments constitutifs de la forêt. Ce logiciel intègre dans sa fonctionnalité la méthode de modélisation polygonale et celle de modélisation par courbe afin de rendre les objets plus réels.
- Le moteur de jeu qui s'appelle Unity 3D pour développer. Son moteur physique 3D temps réel est très performant. C'est un moteur de jeu multiplateforme, c'est-à-dire qu'il peut être installé sous plusieurs systèmes d'exploitation différents comme Windows et MacOS. Les projets réalisés avec Unity peuvent être exportés vers iOS, Android, Windows, Xbox et Playstation.

2. MODELISATION DES ELEMENTS CONSTITUTIFS DE LA FORET

La forêt est essentiellement composée d'espèces végétales comme les herbes, les litières et les arbres. Pour la modélisation, nous avons utilisé la méthode de subdivision de surface du logiciel 3DS Max qui intègre à la fois la modélisation polygonale et la modélisation par NURBS. Une fois les objets voulus modélisés, ils sont exportés dans le moteur de jeu Unity. La figure 4.1 représente un modèle de l'arbre modélisé avec 3DS Max après avoir fait le rendu.



Figure 3.1 : Modélisation d'un arbre avec 3DS Max

3. REALISATION DE LA PARTICULE FEU

Unity est un meilleur outil pour réaliser les effets de particules car il intègre dans sa fonctionnalité un composant appelé « Particle System » ou Système de particule. Ce composant possède des sous-composants qui permettent de spécifier une particule pour obtenir les effets voulus. Par exemple, pour créer le feu de la Fig. 4.2, les valeurs de ses sous-composants sont données sur la Fig. 4.3.

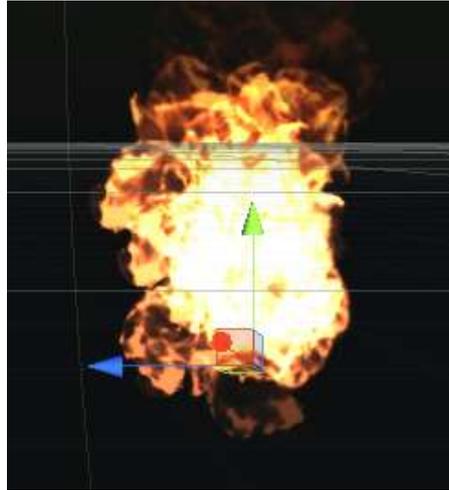


Figure 3.2 : Réalisation de la particule feu avec Unity 3D

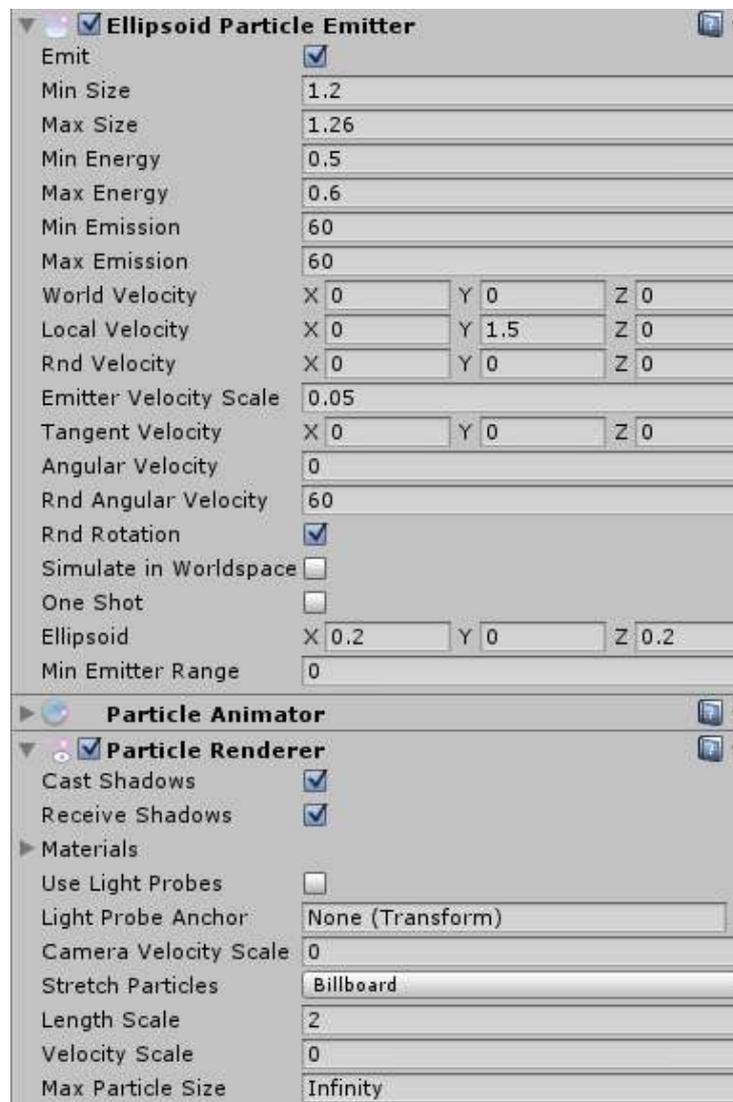


Figure 3.3 : Valeurs des sous-composants pour la réalisation du feu de la Fig.4.2

4. COMPORTEMENTS DE LA PARTICULE FEU

Le feu se comporte dynamiquement et intelligemment. Son comportement est développé avec des scripts (voir Annexe 2) écrits en langage JavaScript. Les herbes et les arbres de la forêt sont des espèces végétales inflammables et combustibles. Ces espèces végétales sont définies selon leur comportement au feu (réaction au feu et résistance au feu) et selon leurs caractères qui jouent des rôles dans la propagation (vitesse et hauteur de la flamme). En effet, après avoir lancé une énergie pour activer le feu, une flamme se produit et va se propager. La propagation de la flamme se déroule comme suit :

- la flamme active détecte les espèces végétales qui lui sont proche.
- la flamme de ces espèces végétales voisines sera active à leur tour après un instant donné (temps prédéfinis selon les caractères de l'espèce végétale concernée).
- Chaque flamme de l'espèce végétale possède leur propre hauteur et leur propre durée d'inflammation.
- Les lieux déjà traversés par la flamme ne sont plus inflammables.

5. PRESENTATION DE FiFoSi

5.1. Configuration matérielle et logicielle

Les configurations minimales pour lancer notre logiciel sont :

- RAM : 2Go
- Carte graphique : 1 Go
- Disque dur : 80 Go
- Processeur : core i5 2.0 GHz
- Système d'exploitation : Windows 7

Durant le développement et la conception de FiFoSi, nous avons utilisé une machine qui a une configuration de :

- RAM : 8Go
- Carte graphique : 4Go
- Disque dur : 500 Go
- Processeur : core i7 3,2 GHz
- Système d'exploitation : Windows 8

5.2. Présentation de FiFoSi

FiFoSi est développé avec le moteur de jeu Unity. Il simule un incendie de forêt suivant la densité et l'humidité de l'air de ce milieu. Lors du lancement de FiFoSi, une fenêtre de configuration apparaît avec les deux onglets « Graphic » et « Input ». Le premier permet de choisir la résolution de l'écran qui varie de 512 * 584 à 1366 * 768 et la qualité de l'affichage qui varie de « Fatest » à « Fantastic ». Par défaut, la qualité du graphique est « Good ». Le mode d'affichage permet de choisir entre le mode plein écran et le mode fenêtré. On a le mode plein écran si « Windowed » est décoché, sinon on sera en mode fenêtré. Le second permet de changer les touches de contrôles utilisées par l'utilisateur durant le lancement du logiciel. La figure 3.4 illustre la fenêtre de configuration de FiFoSi.

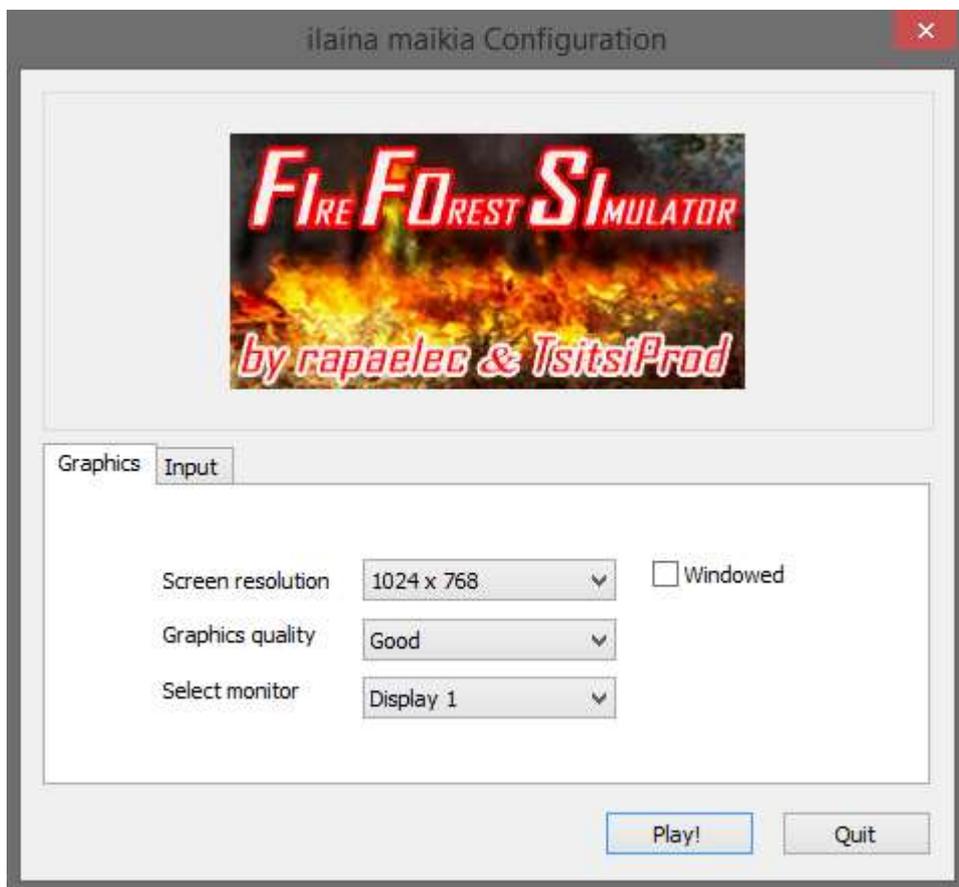


Figure 3.4 : Fenêtre de configuration de FiFoSi

Le bouton **Play** permet de lancer l'application et **Quit** pour la quitter.

Une fois le bouton **Play** cliqué, le menu principal de FiFoSi apparaît comme illustré sur la Fig. 4.5. Ce menu est composé de trois boutons : le bouton **Préférences**, **crédit** et **Quitter**.



Figure 3.5 : Menu Principal de FiFoSi

5.2.1. Le bouton **Préférences**

Une fois ce bouton cliqué, la fenêtre de la Fig. 4.6 apparaît. Cette fenêtre est composée de quatre boutons qui sont : **fort**, **moyen** et **faible**; permettant de choisir la densité de la forêt. Pour la simulation, on a choisi un terrain de 10 unity × 10 unity correspondant à 10m × 10m en réel. Dans Unity, l'unité de mesure de la distance est le « unity » ou « unité ». Le bouton **Retour** permet de revenir au menu précédent.



Figure 3.6 : Fenêtre qui permet le choix de la densité de la forêt

- la **densité** est **faible** si le couvert forestier est inférieur à 60%. La figure 3.7 illustre une faible densité de la forêt.

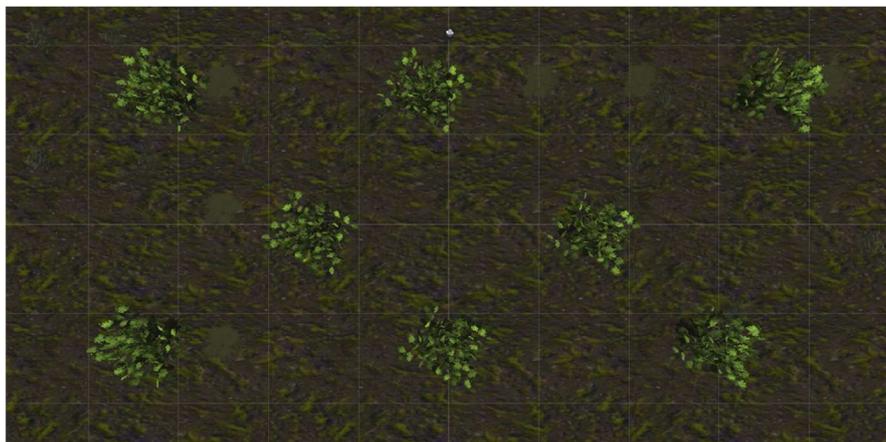


Figure 3.7 : Illustration d'une faible densité de la forêt (vue d'oiseau)

- La **densité** est **moyenne** si 60 à 80% de la superficie est sous couvert forestier, comme illustré sur la Fig.4.8.

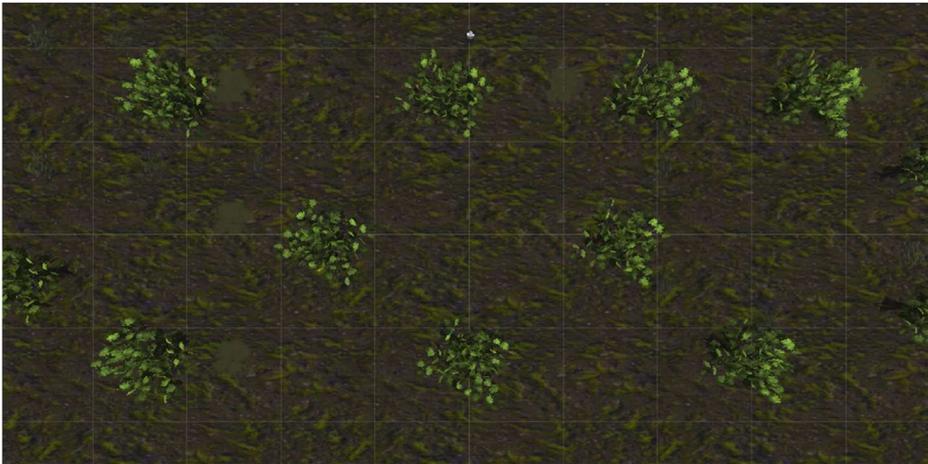


Figure 3.8 : Illustration de la densité moyenne de la forêt (vue d'oiseau)

- La **forte densité** de la forêt, illustrée sur la figure 3.9, correspond à un couvert forestier supérieur à 80%.

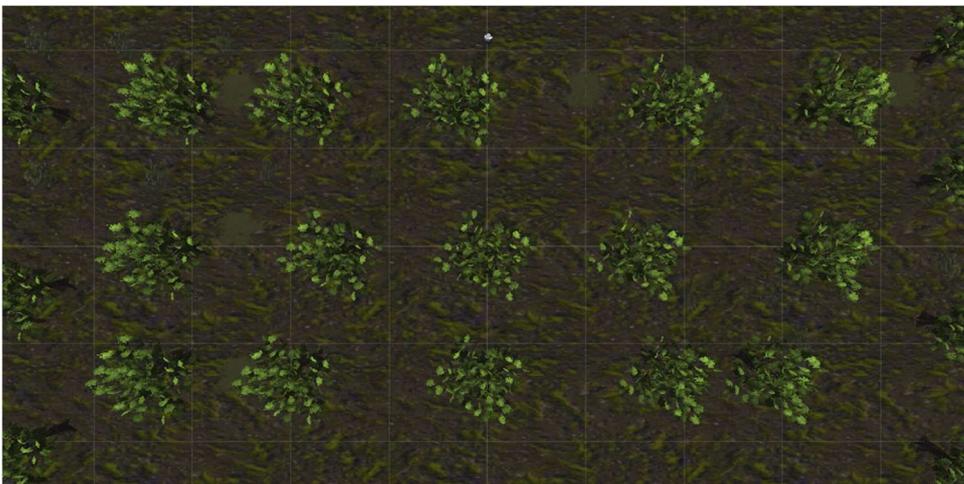


Figure 3.9 : Illustration de la forte densité de la forêt (vue d'oiseau)

La densité de la forêt a un effet majeur dans un feu de forêt. Plus précisément, l'intensité de réaction est grande quand elle est élevée. Ce fait est expliqué par l'eq. A.10.

Après avoir choisi la densité de la forêt, une fenêtre qui permet de sélectionner l'humidité relative de l'air apparaît. L'humidité relative de l'air est divisée en quatre qui sont : 0 à 25%, 26 à 45%, 46 à 75% et 76 à 100%. Le risque d'inflammabilité dépend de ce paramètre.

La diminution de la température entraîne son élévation, ce qui entraîne par conséquence le ralentissement ou même l'arrêt de la propagation. Ce fait est expliqué par les équations : éq.2.5, éq.2.6 et éq.2.8. Le bouton **Retour** permet de retourner à la fenêtre précédente. Cette fenêtre est illustrée sur la Fig. 4.10.



Figure 3.10 : Fenêtre qui permet de choisir l'humidité de l'air

5.2.2. Le bouton **Crédit**

La clique sur ce bouton permet l'apparition de la fenêtre (voir Fig.4.11) qui résume le mémoire. Le bouton **Quitter** de cette fenêtre permet de retourner au menu principal de FiFoSi.

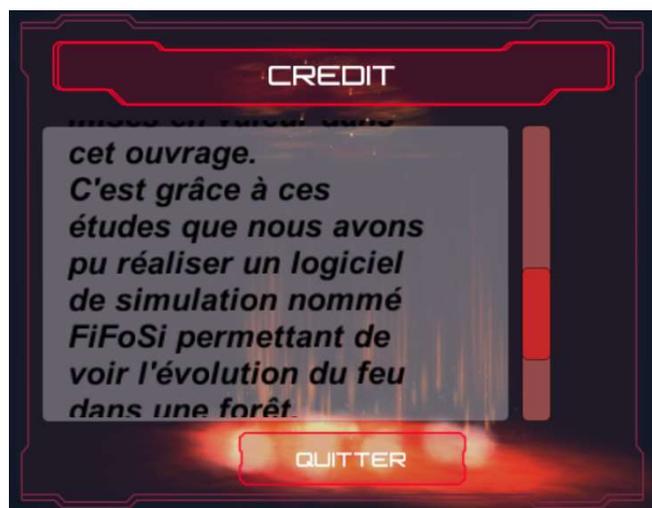


Figure 3.11 : Fenêtre Crédit

5.2.3. Le bouton Quitter

La clique sur ce bouton permet de quitter l'application.

6. SIMULATION DE L'INCENDIE DE FORET

La simulation commence après que l'utilisateur a cliqué sur l'un de ces types d'humidité. Pour la simulation, nous avons choisi une forte densité de la forêt avec une humidité relative de l'air de 0 à 25%. La figure 3.12 montre le début de la simulation, c'est-à-dire que l'ensemble des éléments de la forêt est encore intact.



Figure 3.12 : Début de la simulation pour une forte densité de la forêt et une humidité de 0 à 20%

Dans cette fenêtre, le bouton **Retour** en haut à gauche permet de retourner au menu principal de FiFoSi. On constate aussi la présence de la petite carte en haut à droite de l'écran. Cette carte aide l'utilisateur à voir de façon globale l'évolution du feu et le positionnement de l'agent dans la forêt. Pour différencier l'agent des autres éléments constitutifs de la forêt, comme montré sur la Fig.3.13, il est marqué une petite étoile brillante.

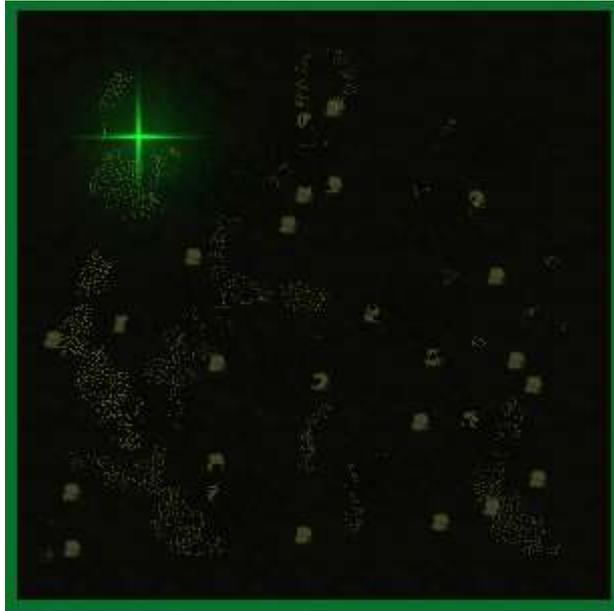


Figure 3.13 : Carte pour une forte densité de la forêt et une humidité de l'air de 0 à 20%

Pour initialiser le feu, c'est-à-dire pour lancer une petite énergie pour activer le feu, il faut que l'utilisateur clique sur le bouton gauche de la souris. Après avoir cliqué sur ce bouton, une petite branche animée d'un feu est lancée. La direction du lancement est toujours perpendiculaire au plan de l'écran et vers l'avant de l'agent. Seuls les parties combustibles peuvent prendre feu. Une branche lancée sur le sol ne peut pas démarrer l'incendie. La figure 4.14 montre le début du feu après un lancement sur un élément combustible.

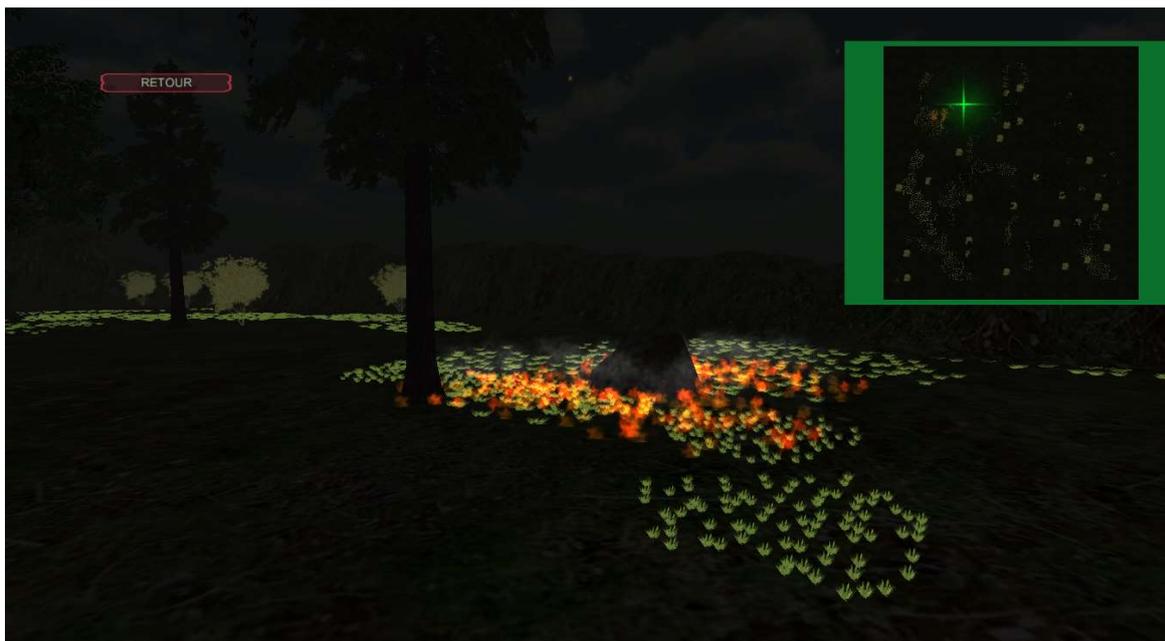


Figure 3.14 : Début du feu

L'échelle temporelle est de 1/10, c'est-à-dire que 1s sur la simulation équivaut à 10s en temps réel. Sur la simulation, la vitesse de propagation du feu sur la surface est 15unités par minute, ce qui correspond à une vitesse réelle de 1,5m/min. La figure 4.15 montre l'état de la forêt après 20s du début du feu dans la simulation.



Figure 4.15 : Etat de la forêt après 20s du début du feu

Le feu continue à se propager car les arbres sont très proches. Après 40s de simulation, le feu se trouve déjà à peu près 9 ou 10unités du début du feu. La figure 4.16 illustre l'état de la forêt après 40s du début du feu.



Figure 3.16 : Etat de la forêt après 40s du début du feu

Après 1min de simulation, le feu est passé sur plus de la moitié de l'ensemble des espèces végétales. La figure 3.17 illustre l'état de la forêt après 1min du début du feu.



Figure 3.17 : Etat de la forêt après 1min du début de feu

Durant la simulation, on a pu constater la différence de la vitesse de propagation pour les deux types de feux qui sont : les feux de cimes et les feux de surfaces, les feux de sols étant négligés. Ces deux types de feux sont montrés sur la Fig. 4.18 et la Fig. 4.19.

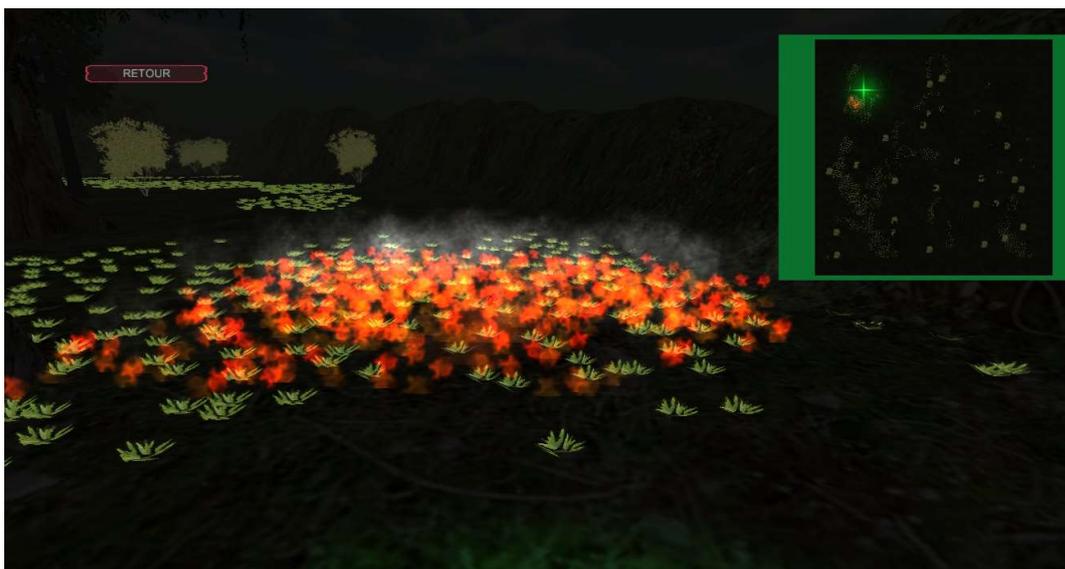


Figure 3.18: Les feux de surface dans la simulation



Figure 3.19 : Les feux de cimes dans la simulation

7. CONCLUSION

On peut donc simuler en 3D un incendie de forêt. La manipulation de FiFoSi est facile. Il permet de visualiser à l'échelle macroscopique l'évolution du feu durant l'incendie. Mais pour avoir une meilleure précision et obtenir beaucoup plus de réalisme dans la simulation, il faut avoir un ordinateur performant et puissant.

CONCLUSION

Plusieurs domaines utilisent en ce moment l'imagerie 3D pour faire de la simulation. Il existe de nombreuses techniques pour obtenir une image 3D. Ces méthodes vont de l'utilisation d'images de synthèse à la reconstruction 3D à partir d'images.

L'équation fondamentale de la propagation du feu permet d'étudier la propagation du feu sur les matériaux solides. Pour les feux de forêts, il existe plusieurs méthodes qui servent à étudier sa propagation. Ces méthodes possèdent leurs propres avantages et inconvénients et se basent sur la connaissance des paramètres jouant des rôles dans la propagation.

L'objectif de ce mémoire est de créer un simulateur de feux afin de prévoir la propagation du feu et de prévenir les risques d'incendies dans un milieu, tout en connaissant l'origine du feu. Pour modéliser les scènes, j'ai utilisé la méthode de la synthèse d'images. La méthode de la modélisation polygonale et par subdivision de surfaces semblaient les méthodes les plus appropriées pour rendre les arbres, les herbes et les éléments de la scène plus réels.

FiFoSi est un logiciel de simulation de feux de forêts. Il permet de suivre l'évolution du feu dans la forêt afin de déduire les moments et les lieux favorables pour l'extinction. Il est multiplateforme, c'est à dire qu'il peut être utilisé sous différents systèmes d'exploitation tels que Windows, Linux ou MacOS. L'installation sur les tablettes et les téléphones possédant les systèmes d'exploitation Android ou iOS est aussi possible.

Jusqu'ici, FiFoSi est un logiciel qui peut aider les secouristes ou les simples personnes intéressées. Il peut être encore amélioré dans sa fonctionnalité en ajoutant des données qui peuvent servir comme informations pour les utilisateurs. Il faut pour cela travailler avec les responsables qui suivent chaque année l'évolution du feu de forêts afin d'avoir des données fiables.

Annexe 1

3DS MAX ET UNITY

1. 3DS Max

1.1. Définition

Autodesk 3DS Max (ou simplement 3ds Max ou 3ds) est un logiciel de modélisation et d'animation 3D, développé par la société Autodesk. Avec Maya, Softimage XSI, Lightwave, Houdini et Blender, il est l'un des logiciels de référence dans le domaine de l'infographie 3D [14]. Les logos de 3ds Max à partir de 2013 et à partir de 2015 sont illustrés sur la Fig. A.1.

Le logiciel est ainsi conçu sur une architecture modulaire, compatible avec de multiples *plug-ins* (extensions). Ses scripts sont écrits dans un langage propriétaire appelé Maxscript. Il intègre actuellement de nombreuses fonctionnalités, comme le moteur de rendu *Mental Ray*, le rendu de cheveux et de poil avec le plugin *Shave and HairCut*, le moteur d'animation de personnage *Character Studio*, associés avec 3ds Max sous la forme d'un plugin.



(a)



(b)

Figure A.1 : Logos de 3ds Max : (a) : à partir de 2013, (b) : à partir de 2015

La figure A.2 illustre des images créées avec le logiciel 3ds Max.



Figure A.2 : Images créées avec 3ds Max

1.2. Présentation de 3ds Max

Après avoir lancé 3ds Max, on se tombe sur sa fenêtre principale qui contient la barre des menus, la vue 3D, la barre des temps et les *outliners*.

- La barre des menus contient les menus habituels qu'on trouve dans les logiciels (fichiers, édition, outils, etc.)
- La vue 3D est le lieu où on effectue la modélisation d'objets et on organise les scènes.
- La barre des temps permet de visualiser l'animation.
- Les différents panneaux qui permettent de créer, Modifier, la Hiérarchie, le Mouvement et les utilitaires.

La figure A.3 illustre la fenêtre principale de 3ds Max.



Figure A.3 : Fenêtre principale de 3ds Max

2. UNITY

2.1. Définition

Unity est un logiciel 3D temps réel et multimédia ainsi qu'un moteur 3D et physique utilisé pour la création de jeux en réseaux, d'animation en temps réel, de contenu interactif comportant de l'audio, de la vidéo et des objets 3D. Le logiciel a la particularité d'utiliser un éditeur de script compatible mono C#, JavaScript et Boo. Il ne permet pas la modélisation, mais permet de créer des scènes supportant des éclairages, des terrains, des caméras, des textures. La figure A.4 illustre le logo de Unity.



Figure A.4 : Logo de Unity

2.2. Présentation de Unity

Une fois Unity lancé, une fenêtre qui permet la création de nouveau projet ou l'ouverture d'un autre déjà présent apparaît. Dans le cas où on veut créer un nouveau projet, une liste des paquets qu'on souhaitera importer apparaît. Cette liste est composée de scripts, de skyboxes, de tree creators, etc. Cette fenêtre est illustrée sur la figure A.5.

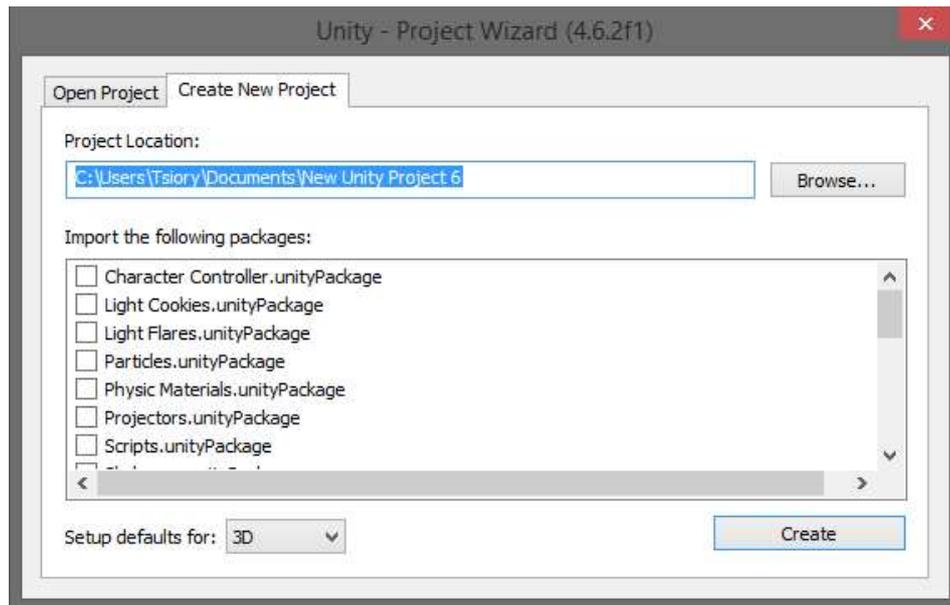


Figure A.5 : Présentation de Unity

2.3. Les différents panneaux

Après avoir choisi de créer un nouveau projet ou lancer un autre préexistant, une fenêtre avec plusieurs panneaux (voir Fig. A.6) apparaît. Ces panneaux sont : Toolbar, Inspector, Scene, Project, Hierarchy et Game View.

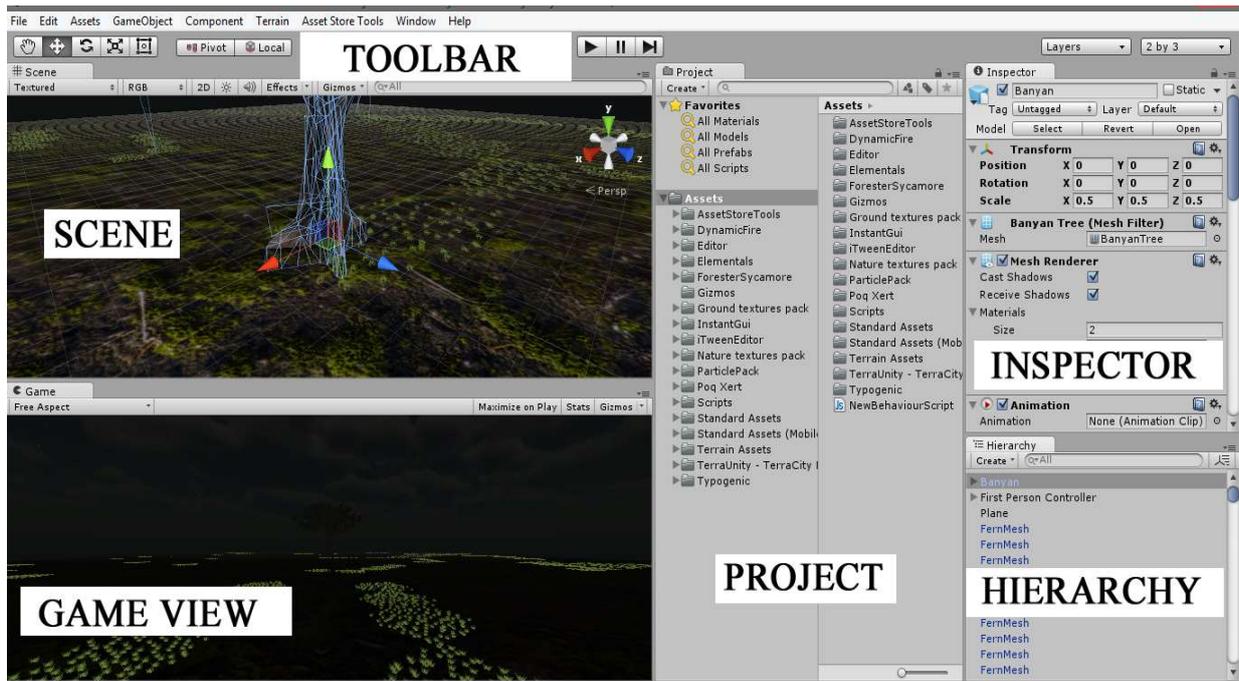


Figure A.6 : Les différents panneaux de Unity

Toolbar : C'est la barre des tâches qui permet la gestion des panneaux, la gestion des mouvements du gameobject, le lancement, la pause et l'arrêt de la simulation.

Inspector : Tous les composants tels que les scripts, les lumières et les meshes sont appelés « GameObjects » dans Unity. Le panneau inspector permet de voir les attributs, les composants et les propriétés du gameobject.

Scène : C'est le panneau où on peut faire une modification globale de la scène du projet. On peut positionner les caméras, les joueurs et tous les autres gameobjects.

Game view : Toutes les modifications effectuées dans le panneau scène sont affectées au panneau Game view. C'est un petit aperçu en avance de ce qu'on va voir dans la simulation.

Project : C'est dans ce panneau qu'on peut constater la liste des assets disponibles dans le projet. On peut importer et exporter des assets dans cette section.

Hierarchy : Elle contient tous les gameobjects dans la scène.

Annexe 2

SCRIPT

Les scripts sont écrits avec le langage Javascript.

1. Script permettant le lancement du bois

La portion de script suivant permet le lancement d'un morceau du gameobject nommé molotov.

```
var Molotov : Transform;  
function Update ()  
  {  
    if (Input.GetMouseButtonUp(0))  
      {  
        var mol = Instantiate(Molotov, transform.position,  
Quaternion.identity);  
        mol.rigidbody.AddForce(600 * transform.forward);  
        Physics.IgnoreCollision(transform.root.collider, mol.collider);  
      }  
  }
```

2. Script permettant l'activation du feu et sa propagation sur le terrain

Une fois le Molotov lancé, si le terrain contient un point qui peut prendre feu, alors l'incendie commence et se propage. Le script qui permet ce fait est comme suit :

```
var fireSpread : float = 3.0;  
var fireParticle : Transform;  
var spreadTime : float = 3.0;  
var burnTime : float = 6.0;  
var burnOnStart = false;
```

```

private var fireStarted : boolean = false;
private var fTime : float = 0.0;
private var burnP : Transform;
private var fireSp : boolean = false;

function Update ()
{
    if (fireStarted && (Time.time - fTime) >= spreadTime && !fireSp)
        spreadFire();
    if (fireStarted && (Time.time - fTime) >= burnTime)
        endFire();
}

```

Le script qui permet l'initialisation du feu est :

```

function Start()
{
    if (burnOnStart)
        startFire();
}

function startFire()
{
    if (!fireStarted)
    {
        fireStarted = true;
        burnP = Instantiate(fireParticle, transform.position, Quaternion.identity);
        burnP.parent = transform;
        fTime = Time.time;
    }
}

```

Le script qui permet l'arrêt de la propagation est :

```
function endFire()  
  {  
    fireStarted = false;  
    if (burnP.particleEmitter)  
      burnP.particleEmitter.emit = false;  
      for (var child : Transform in burnP)  
        if (child.particleEmitter)  
          child.particleEmitter.emit = false;  
          Destroy(this);  
    }
```

Le script qui entraîne la propagation du feu est :

```
function spreadFire()  
  {  
    if (Physics.OverlapSphere(transform.position, fireSpread))  
      {  
        var InRange = Physics.OverlapSphere(transform.position, fireSpread);  
        for (var all : Collider in InRange)  
          {  
            if (all.GetComponent("FirePoint"))  
              all.SendMessage("startFire");  
          }  
      }  
  }
```

Annexe 3

MODELE DE ROTHERMEL

1. LES DONNES PHYSIQUES

Dans l'équation qui permet de déterminer la vitesse de propagation selon Rothermel,

w_0 : Compacité du combustible sec (kg/m^2)

δ : Epaisseur de la couverture végétale (m)

σ : Rapport de la surface au volume d'une particule de combustible (cm^{-1})

H : Chaleur contenue dans une particule de combustible (kJ/kg)

ρ_p : Masse volumique d'une particule sèche (kg/m^3)

M_f : Humidité des particules de combustible (masse humide/ masse sèche)

S_T : Pourcentage massique de minéraux des particules de combustible

S_e : Pourcentage massique de minéraux des particules de combustible

U : Vitesse du vent à mi- flamme (m/min)

$\tan \phi$: Pente, accroissement vertical/distance horizontale

M_x : Humidité d'extinction

2. LES EQUATIONS

L'équation A.1 permet de calculer la masse volumique de la particule sèche :

$$\rho_b = w_0/\delta \quad (A.1)$$

L'équation A.2 permet de calculer la compacité :

$$\beta = \rho_b/\rho_p \quad (A.2)$$

L'équation A.3 permet de calculer le taux de réaction maximale

$$\Gamma_{max} = (0.0591 + 2.926\sigma^{-1.5})^{-1} \quad (\text{A.3})$$

L'équation A.4 permet de calculer la capacité optimale

$$\beta_{op} = 0.204\sigma^{-0.8189} \quad (\text{A.4})$$

L'équation A.5 permet de calculer le taux de réaction optimale

$$\Gamma = \Gamma_{pmax} (\beta/\beta_{op})^A e^{A(1-\beta/\beta_{op})} \quad (\text{A.5})$$

avec

$$A = (6.723\sigma^{0.1} - 7.27) \quad (\text{A.6})$$

L'équation A.7 permet de calculer le coefficient d'humectage humide

$$\eta_M = 1 - 2.59 \frac{M_f}{M_x} + 5.11 \left(\frac{M_f}{M_x} \right)^2 - 3.52 \left(\frac{M_f}{M_x} \right)^3 \quad (\text{A.7})$$

L'équation A.8 permet de calculer le coefficient d'humectage minéral

$$\eta_S = 0.174S_e^{-0.19} \quad (\text{A.8})$$

L'équation A.9 permet de calculer la masse volumique nette

$$w_n = \frac{w_0}{1 - S_T} \quad (\text{A.9})$$

L'équation A.10 permet de calculer l'intensité de réaction

$$I_R = \Gamma w_n h \eta_M \eta_S \quad (\text{A.10})$$

L'équation A.11 permet de calculer le pourcentage du flux servant pour le préchauffage

$$\xi = (192 + 7.9095\sigma)^{-1} e^{(0.792+3.760\sigma^{0.5})(\beta+0.1)} \quad (\text{A.11})$$

$$C = 7.47e^{-0.8711\sigma^{0.55}} \quad (\text{A.12})$$

$$B = 0.1599\sigma^{0.54} \quad (\text{A.13})$$

$$E = 0.715e^{-0.01094\sigma} \quad (\text{A.14})$$

L'équation A.15 permet de calculer le coefficient de chauffage effectif

$$\varepsilon = e^{-4.528/\sigma} \quad (\text{A.15})$$

L'équation A.16 permet de calculer la chaleur de préchauffage

$$Q_{ig} = 581 + 2594M_f \quad (\text{A.16})$$

3. EXEMPLE DE DONNEES

La litière de bois mort nous a permis d'obtenir les données suivantes :

- $\sigma = 81,3 \text{ cm}^{-1}$
- $\delta = 1,27^{-2} \text{ m}$
- $\rho_p = 466 \text{ kg.m}^{-3}$
- $H = 17550 \text{ kJ/kg}$
- $M_f = 0,04$
- $M_x = 0,30$
- $S_T = 0,00347$
- $S_E = 0,00322$
- $\tan \emptyset = 0$
- $U = 15 \text{ m/min}$

Pour les combustibles aériens, $b < 0,02$ avec une vitesse du vent faible et $M_x = 0,15$

REFERENCES

- [1] : E559 IA, Filtrage et Segmentation d'images, 5^{ème} année, Département Electronique, ESPA, 2011 – 2012
- [2] : « Image numérique » ; www.wikipedia.org/wiki/Image_numérique, Février 2015
- [3] : « Infographie tridimensionnelle » ;
www.wikipedia.org/wiki/Infographie_tridimensionnelle, Février 2015
- [4] : « Modélisation tridimensionnelle » ;
www.wikipedia.org/wiki/Modélisation_tridimensionnelle, Février 2015
- [5] : « Géométrie de construction des solides » ;
www.wikipedia.org/wiki/Géométrie_de_construction_de_solides, Février 2015
- [6] : « Synthèse d'images avancée » ; www.labri.fr/~granier/Cours/MM2/2010-2011/,
Février 2015
- [7] : « Mise en correspondance Reconstruction 3D » ; <https://prezi.com/m2dwbsmxzwlz/view/>,
Février 2015
- [8] : « Pyrotechnie » ; www.wikipedia.org/wiki/Pyrotechnie, Mars 2015
- [9] : « Incendie » ; www.wikipedia.org/wiki/Incendie, Mars 2015
- [10] : « Classement de réaction et de résistance au feu » ;
www.fr.wikipedia.org/wiki/Classement_de_réaction_et_de_résistance_au_feu, Mars 2015
- [11] : Pierre-Yves Colin, « Protection des forêts contre l'incendie », 2001
- [12] : Johnson, E. A., « Fire and Vegetation Dynamics » ; Cambridge Studies in Ecology,
(Cambridge University Press, 1995)
- [13] : Jonathan Margerit, « Modélisation et simulation numérique des feux de forêts », HAL,
Novembre 2003
- [14] : « Autodesk 3ds Max » ; www.wikipedia.org/wiki/Autodesk_3ds_Max, Juin 2015

Auteurs : RAKOTOARIVELO Hery Tiana Patrick

Titre : Modelisation de la propagation du feu

Nombre de pages : 60

Nombre de figures : 41

Nombre de tableaux : 8

Tous les domaines de la vie utilisent aujourd'hui l'imagerie 3D, soit pour faire de l'animation, soit pour faire de la simulation. Ce mémoire est consacré sur la réalisation d'un simulateur de propagation de feux afin de prévoir la propagation du feu dans un milieu. A part les généralités sur l'imagerie 3D, les théories sur la propagation du feu plus particulièrement sont mises en valeur dans cet ouvrage. C'est grâce à ces études que nous avons pu réaliser un logiciel de simulation nommé FiFoSi permettant de voir l'évolution d'un feu dans une forêt.

Mots clés : 3D, simulateur, feu de forêt, FiFoSi, propagation du feu

Encadreur : Mr. RAMNDRIAMAROSON Rivo Mahandrisoa

Contacts :

Patrick : - Lot 2K 48 bis Ankadivato

rapaelec@gmail.com

- +261 (0) 32 67 702 77