

Ministère de l'Education Nationale, de la Recherche et de la Technologie

CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET METIERS

INSTITUT d'INFORMATIQUE d'ENTREPRISE



Mémoire présenté en vue d'obtenir
LE DIPLÔME D'INGÉNIEUR I.I.E.

Rapport Final

MODELISATION DES DEFORMATIONS SUR UN
MODELE VOXEL AVEC RETOUR HAPTIQUE

Vincent LE LIGEOUR
Stage de 3e année

Directeur de Stage : M. Abderrahmane Kheddar, McF - HdR

Soutenu le 01/07/03 devant :
Mme L. PETRUCCI, Présidente
M. D. ROUSSEL, Examineur
M. A. Kheddar, Maître de stage

Stage effectué au LSC en partenariat avec Touch-HapSys
Du 3 Février 2003 au 28 Juin 2003

Table des matières

1	Les tables	3
	Table des Figures	3
	Liste des Tables	3
2	Résumé	5
3	Fiche signalétique	6
4	Remerciements	7
5	Mémoire	8
5.1	Encadrement et environnement	8
5.1.1	Présentation du laboratoire	8
5.1.2	Coordonnées	8
5.1.3	Ressources mises à disposition	9
5.2	Introduction aux voxels	10
5.2.1	Qu'est-ce que le retour haptique	10
5.2.2	Pourquoi un système temps réel	11
5.2.3	Qu'est-ce qu'un voxel	11
5.2.4	Avantages - Inconvénients	12
5.2.5	Domaines d'application	13
5.3	Etat de l'art	13
5.3.1	Approche par grille flottante	13
5.3.2	Approche par ChainMail	16
5.3.3	Approche par les éléments finis	19
5.3.4	Approche par des systèmes masse-ressort	19
5.3.5	Approche par les LevelSet	20
5.3.6	Approche par Squeletisation	21
5.3.7	Approche par contraintes	23
5.3.8	Approche par la mécanique des fluides	23
5.3.9	Tableau Comparatif	24
5.3.10	Conclusion	24
5.4	Approche envisagée	24
5.4.1	Le voxel en tant qu'agent	24
5.4.2	Grille fixe vs. grille flottante	26
5.4.3	Une discrétisation de l'espace	26
5.5	Techniques envisagées	27
5.5.1	Les équations de diffusion	27
5.5.2	Les équations eulériennes	31
5.6	L'approche particulière - Rôle de l'agent	34
5.6.1	Dans le cadre des corps rigides	34
5.6.2	Dans le cadre des corps déformables et des fluides	36
5.6.3	Framework de tests	37

5.6.4	Résultats obtenus	38
	Références	39

1 Les tables

Table des figures

1	Phantom Desktop System	9
2	SGI Octane	10
3	Du pixel (en rouge) au voxel (en bleu)	12
4	Les différentes étapes de la reconstruction 3D	13
5	Structure d'un voxel	14
6	Carte d'occupation	15
7	Résultat d'une déformation volumique (objet 40x40x40; carte d'occupation 200x200x200)	15
8	Algorithme du ChainMail	17
9	Structure du ChainMail	17
10	Exemple de ChainMail	17
11	ChainMail 1D	18
12	ChainMail 2D	18
13	S-ChainMail	19
14	Treillis d'un système masse-ressort	20
15	Principe des LevelSet	21
16	Exemple à base de LevelSet	21
17	Principe de squeletisation	22
18	Exemple de squeletisation	22
19	Approche surfacique	25
20	Approche volumique	25
21	Diffusion au niveau n	28
22	Diffusion au niveau n+1	29
23	Principe de l'approche particulière	32
24	Limitation de l'approche particulière simple	33
25	Approche particulière évoluée	33
26	Principe de la voxelisation	35
27	Exemple d'objet voxelisé	36
28	Framework multi-fenêtré	38

Liste des tableaux

1	Tableau comparatif (La solution voxel)	12
2	Structure d'un élément simple	13
3	Structure d'un élément lié	14
4	Algorithme de vérification de la carte d'occupation	15
5	Algorithme de retrait d'un élément de la carte d'occupation	16
6	Algorithme de mise à jour de la carte d'occupation	16
7	Calcul de la réponse à une collision	16
8	Tableau comparatif (État de l'Art)	24

9	Tableau comparatif (grille fixe vs. grille flottante)	26
10	Tableau comparatif (Méthodes de diffusion)	31
11	Algorithme de voxelisation	35

2 Résumé

Le but de ce stage de recherche est de modéliser des déformations et ce sur un modèle voxel, le voxel étant à la 3D ce que le pixel est à la 2D, un atome de l'espace. Tout ceci en incorporant également un rendu haptique. L'objectif est d'arriver à incorporer un modèle comportemental dans chaque voxel, pour qu'il agisse en tant qu'agent indépendant.

Il fallait pour cela trouver une modélisation cohérente et adéquate pour les voxels. C'est à ce moment que les plus importantes limites de la modélisation arrivent :

- Problème de bufferisation
- Problème de discrétisation
- Problème d'espace mémoire du à la taille d'une donnée « voxel ».

Pour cela plusieurs méthodes ont été employées. Dans un premier temps une approche à base d'équations de diffusion. Cette approche est intéressante car totalement nouvelle. Des résultats intéressants ont été obtenus, mais il est resté des problèmes de cohérence (conservation du volume) et d'effet aux limites. Dans un deuxième temps on a pu s'intéresser à une approche à base de particules, totalement novatrice, car ce sont les voxels qui font évoluer ces particules et non pas comme dans d'autres cadres de recherche des particules se déplaçant dans un monde voxel.

Cette approche est donc totalement novatrice car elle prend le contre-pied des approches standard en mettant réellement le voxel au centre de la modélisation et non pas comme dans d'autres articles en l'utilisant uniquement pour l'affichage.

Les résultats obtenus sont relativement bons. En effet les modélisations proposées, bien que totalement novatrices, ont produit des résultats plus ou moins réalistes. Et la dernière modélisation semble pouvoir aboutir à une modélisation très intéressante.

Ce début de recherche doit vraisemblablement pouvoir aboutir sur un sujet de recherche.

Les articles m'ayant le plus inspirés sont :

- [FG99] qui présente une bonne partie des ressources disponibles sur ce sujet
- [GKHS98] qui proposent une approche novatrice et très intéressante.

3 Fiche signalétique

Ministère de l'Education Nationale, de la Recherche et de la Technologie
CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET METIERS
INSTITUT d'INFORMATIQUE d'ENTREPRISE



Mémoire d'ingénieur I.I.E.

MODELISATION DES DEFORMATIONS SUR UN MODELE VOXEL AVEC RETOUR HAPTIQUE

Auteurs : Vincent LE LIGEOUR

Directeur de recherche : M. Abderrahmane Kheddar, McF - HdR

Descriptif : Le but de ce stage de recherche est de modéliser des déformations et ce sur un modèle voxel, le voxel étant à la 3D ce que le pixel est à la 2D, un atome de l'espace. Tout ceci en incorporant également un rendu haptique. L'objectif est d'arriver à incorporer un modèle comportemental dans chaque voxel, pour qu'il agisse en tant qu'agent indépendant.

4 Remerciements

J'aimerais dans un premier temps remercier M. Kheddar, mon maître de stage, pour m'avoir proposé un sujet de stage totalement novateur, et m'avoir donné les moyens matériels d'aboutir à de bons résultats.

J'aimerais, par la suite remercier M. Chavand, directeur du LSC, de m'avoir permis d'intégrer son équipe de recherche au sein du département de Réalité Virtuelle du LSC.

J'aimerais également remercier M. Pocheville, M. Bouyer ainsi que M. Devine, co-stagiaires au sein du département RV du LSC, pour leur soutien et les diverses aides qu'ils m'ont fourni.

Enfin, j'aimerais remercier Mme. Petrucci et M. Roussel, jurys de mémoire, pour leur remarques constructives ayant permis de perfectionner le compte-rendu de mes travaux

5 Mémoire

5.1 Encadrement et environnement

5.1.1 Présentation du laboratoire

Les activités du Laboratoire Systèmes Complexes sont centrées essentiellement sur la problématique de la Machine Intelligente. Il s'agit de réaliser des machines ou systèmes physiques qui sont en mesure de percevoir et d'agir dans un environnement variable (connu ou inconnu), capables de raisonner de façon rationnelle sur une diversité de tâches ou de données et sur les moyens nécessaires pour les accomplir de façon autonome ou en coopération avec un opérateur humain. Cet objectif nécessite une démarche scientifique et technique menant en parallèle et étroitement les développements de la théorie et de l'expérimentation. Ainsi les chercheurs du laboratoire investissent leurs efforts dans l'approfondissement des principaux thèmes de la machine intelligente au niveau des concepts et méthodes, et de la mise en oeuvre des résultats théoriques sur des processus réels.

Les activités s'articulent autour de trois thèmes, eux-mêmes organisés en sous thèmes, concernant l'acquisition des données, leur traitement, le raisonnement, la modélisation et le contrôle des systèmes :

- ☞ Traitement des données et modélisation
- ☞ Réalité virtuelle et Vision artificielle
- ☞ Modélisation et Contrôle des machines complexes

Mon stage va être centré sur le deuxième thème : Réalité virtuelle et Vision artificielle.

Les concepts de la Réalité virtuelle appliqués à la supervision et au contrôle des machines et systèmes complexes conduisent à l'étude et au développement d'Interfaces Homme - Machine avancées mettant en oeuvre des canaux multi sensoriels.

5.1.2 Coordonnées

Coordonnées du maître de stage :

Abderrahmane Kheddar
40, rue du Pelvoux
91020 Courcouronnes

Tel : 01.69.47.75.64
Mail : kheddar@cemif.univ-evry.fr

Coordonnées personnelles :

Vincent LE LIGEOUR
36, Bd. de l'Yerres
91000 Evry

Tel : 06.88.98.24.58
Mail : leligeour@iie.cnam.fr

5.1.3 Ressources mises à disposition

Il est mis à ma disposition des outils de pointe pour permettre au stage de se dérouler dans les meilleures conditions.

Dans un premier temps l'interface haptique. C'est un «*PHANTOMTM Desktop System*» [Fig. 1]. C'est un produit de la recherche du MIT «*Massachusetts Institute of Technology*», vendu à seulement 400 exemplaires depuis 10 ans. Ce système permet un positionnement ainsi qu'un retour d'effort en trois dimensions. L'espace utile est de 16 x 13 x 13 cm et permet un retour d'effort allant jusqu'à 6,4N. Il est livré avec un ensemble de bibliothèques permettant d'appliquer divers effets complexes (comme la vibration ou le contact) mais également des fonctions de bases (comme acquérir la position suivant 6 degrés de liberté ou appliquer un effort suivant trois directions).



FIG. 1 – *Phantom Desktop System*

Ce système était connecté à une station SGI Octane [Fig. 2], une station de travail permettant de traiter et d'afficher des images en trois dimensions avec une très grande rapidité.



FIG. 2 – *SGI Octane*

De plus une station de travail personnelle m'a été fournie, à savoir un Pentium 4TM cadencé à 2 GHz, muni de 512 Mo de RAM et d'une carte vidéo de type RadeonTM. Nous avons alors installé sur cette machine une Debian et un Windows 2000 Professionnel©.

De plus durant le stage il devait être mis à ma disposition une carte accélératrice Voxel pour pouvoir afficher en temps réel les volumes calculés ou éventuellement une librairie permettant le traitement aisé de donnée voxel.

5.2 Introduction aux voxels

5.2.1 Qu'est-ce que le retour haptique

Qu'est-ce que le retour haptique ?

Le retour haptique est un retour sensoriel. Il est souvent ajouté en complément d'un retour visuel en réalité virtuelle. A la différence du retour visuel ou sonore c'est un élément d'immersion dans une scène très varié et très complexe à mettre en œuvre.

Il existe plusieurs types de mécanismes de rendu haptique. Le mécanisme classique est un bras manipulateur (par exemple 6 axes) avec un retour d'effort suivant certains axes [Fig. 1]. Ce type d'outil permet en plus d'un retour haptique d'avoir un moyen d'exploration tridimensionnel (ce qu'une souris classique ne permet pas). Les autres systèmes peuvent être des systèmes spécifiques (simulation d'un muscle particulier ou d'une articulation) ou alors des systèmes à résolution plus petite (systèmes permettant la simulation de texture ou de températures).

L'intérêt du système haptique est qu'il permet dans la majorité des cas d'appréhender et de simuler des pratiques (simulations d'accouchements, palpations de traumatismes du genou, etc.). Il permet de pratiquer des interventions avec outils dans des environnements tels que des opérations chirurgicales.

Le rendu haptique dans un monde volumique a fait l'objet de certaines recherches [AS96] [CCO02].

5.2.2 Pourquoi un système temps réel

On peut définir la qualité «temps-réel» d'une application comme étant l'aptitude d'une application à répondre à des sollicitations de l'environnement contrôlé, en des temps de réponse en relation avec la constante de temps dominante dans cet environnement.

Lors du développement de cette application il a fallu conserver tout au long l'idée de temps réel. En effet, les applications de réalité virtuelle ont par essence besoin que le temps de réponse avec l'utilisateur soit correct.

Il existe différents degrés de temps réel :

- Exactitude logique (*logical correctness*) : sorties adéquates en fonction des entrées, assurant le comportement désiré pour le système suite à des événements et aux données communiquées.
- Exactitude temporelle (*timeliness*) : rencontre des contraintes temporelles. Les sorties sont présentées au bon moment. On peut distinguer différents niveaux de contraintes temporelles :
 - ☞ **soft** : système dont la performance est dégradée mais sans engendrer des conséquences dramatiques si les contraintes temporelles ne sont pas rencontrées (résultat avec un retard ou non effectué occasionnellement, avec une limite maximale habituellement; ex.: multimédia, jeux vidéo).
 - ☞ **hard** : système dont l'incapacité de rencontrer les contraintes temporelles cause la faute du système (quelque chose de très grave arrive si le système ne répond pas à temps: ex. système de contrôle d'un avion).
 - ☞ **firm** : contrainte hard mais où une faible probabilité de manquer les limites temporelles peut être tolérée (autre définition: peut manquer un deadline occasionnellement, sans qu'il soit bénéfique de fournir le résultat avec un retard).

Après étude du système et des résultats demandés, on peut conclure que la contrainte temporelle d'une application haptique doit être catégorisée en «firm».

Pour ce faire il existe certaines recherches sur le couple voxel - temps réel utilisant par exemple la carte accélératrice voxel VolumeProTM[KDC⁺00] ou alors des environnements de travail [MFNF01].

5.2.3 Qu'est-ce qu'un voxel

«Un voxel est à la troisième dimension ce que le pixel est à la deuxième dimension» [Fig. 3]. C'est par cette comparaison que l'on peut le mieux décrire un voxel. En d'autres termes c'est l'unité de traitement volumique.

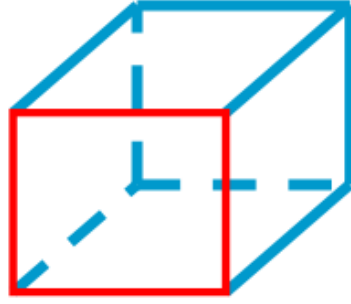


FIG. 3 – Du pixel (en rouge) au voxel (en bleu)

Par la suite les interprétations d'un tel élément peuvent changer, et les modèles également. Certains parleront de grilles flottantes [FG99] ou de grilles fixes.

5.2.4 Avantages - Inconvénients

Comme toute approche, le voxel présente des avantages et des inconvénients. Il faut ensuite pour le problème envisagé analyser les différents éléments [Tab. 1] et opter pour la solution adéquate.

Caractéristique	Approche surfacique	Approche volumique
Pré calcul	Pré calcul important depuis l'imagerie médicale prédéfinie. Il faut re-mailler l'ensemble des objets [Fig. 4].	Aucun pré calcul, on utilise directement les données issues de l'image tridimensionnelle.
Espace mémoire	Espace mémoire restreint (nuage de points).	Espace mémoire très important. Les données doivent être connues pour tous les éléments atomiques (voxel) de la scène.
Exactitude physique	Le modèle est uniquement physique, il ne peut donc pas tenir compte de la nature volumique de l'objet modélisé.	La modélisation est totalement volumique. Elle tient compte de l'ensemble du corps solide, y compris l'intérieur de ce dernier.
Rapidité d'évolution d'une scène	Les modèles gèrent en général les interactions entre points et objets. Cela nécessite donc un très grand nombre de calculs globaux. Mais de nombreuses méthodes d'optimisation existent.	La gestion des mouvements et des interactions peuvent se faire de manière locale. On peut donc grandement sérialiser les opérations à effectuer. En revanche les optimisations sont peu fréquentes.

TAB. 1 – Tableau comparatif (La solution voxel)



FIG. 4 – *Les différentes étapes de la reconstruction 3D*

5.2.5 Domaines d'application

Les domaines d'application des voxels sont l'ensemble des personnes utilisant l'imagerie tridimensionnelle comme base de traitement. On pense bien sûr dans un premier temps à l'ensemble des intervenants médicaux qui ont de nombreux systèmes d'acquisition 3D (IRM, scanner, microscopie confocale, etc.).

Mais cette approche peut se généraliser aux domaines ayant besoin d'un traitement volumique de l'information (simulation de déformation d'objets, etc.).

Concernant les applications possibles, on peut noter les simulations dans un premier temps (simulations médicales, de chocs de solides, etc.) ou dans un deuxième temps si le modèle peut être validé, la prédiction de déformations ou d'interventions.

5.3 Etat de l'art

5.3.1 Approche par grille flottante

L'approche par grille flottante est l'approche la plus répandue dans le domaine de la simulation à base de voxels. S. Frisken expose l'ensemble des techniques d'animation existantes [FG99], depuis la modélisation jusqu'aux déformations en passant par les techniques de détection de collision.

Sa représentation voxel [Fig. 5] est basée sur un élément constituant un sommet du voxel [Tab. 2], relié par des liaisons à ses 6 plus proches voisins [Tab. 3].

```

Struct ElementsLiesSimplesStruct {
    Unsigned char intensite;
    Unsigned char liens;
} ElementsLiesSimples;
  
```

TAB. 2 – *Structure d'un élément simple*

```

Struct ElementsLiesStruct {
  Unsigned char r, v, b, alpha;
  Unsigned char type;
  Float x, y, z;
  Struct ElementsLies *haut, *bas, *droite, *gauche, *devant, *derrière;
} ElementsLies;

```

TAB. 3 – *Structure d'un élément lié*

Le terme de grille flottante provient du fait que cette grille n'est pas fixe. En effet lors de la déformation les différents éléments bougent et font évoluer la grille. On fait, en fait, évoluer un nuage de points avec des liaisons entre eux.

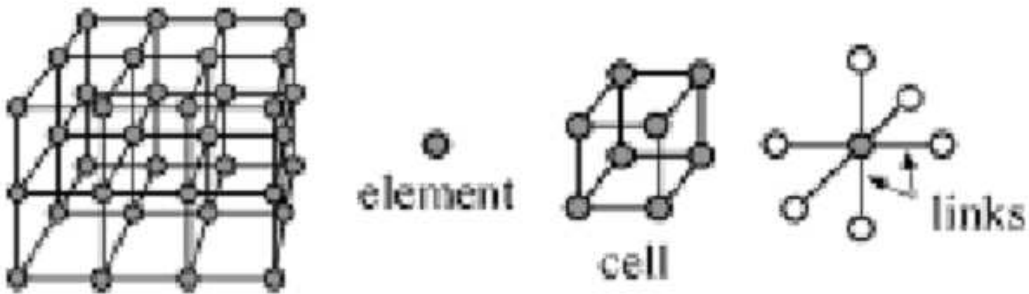


FIG. 5 – *Structure d'un voxel*

L'avantage de la représentation par voxel est que cette dernière permet une détection des collisions relativement facile. En effet, le procédé est celui basé sur des cartes d'occupation [Fig. 6]. Le principe est le suivant : on prend le nuage de points et on le «map» sur une grille fixe puis il ne reste plus qu'à détecter les voxels appartenant à plusieurs éléments à la fois. Ensuite par un procédé de «backtracking¹» (traçage arrière) on peut remonter au moment de la collision [Fig. 7].

1. Suivi arrière, en fait on garde un historique pour voir quand a eu lieu la collision

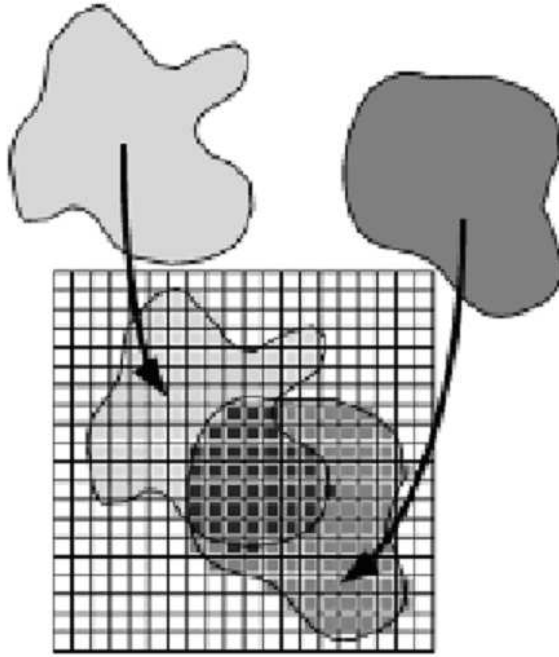


FIG. 6 – Carte d'occupation

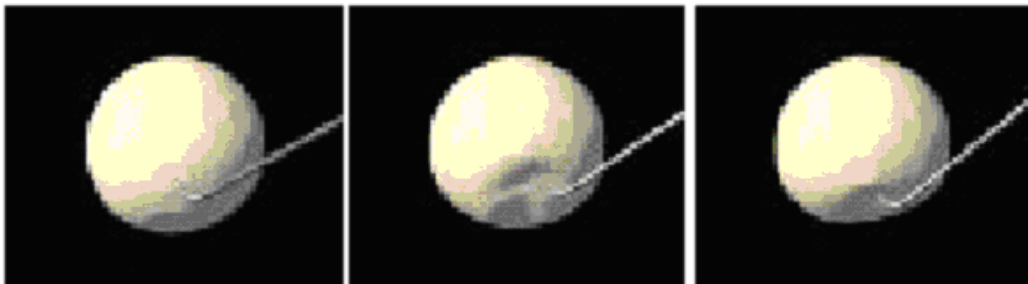


FIG. 7 – Résultat d'une déformation volumique (objet $40 \times 40 \times 40$; carte d'occupation $200 \times 200 \times 200$)

Pour tous les éléments non nuls Mapper la position des nouveaux éléments sur la carte d'occupation Si la cellule est occupée par un autre objet alors Collision détectée Réduire la taille des pas pour le backtracking Exit

TAB. 4 – Algorithme de vérification de la carte d'occupation

Pour tous les éléments non nuls Mapper la position des anciens éléments sur la carte d'occupation Si le pointeur de la carte d'occupation est égal au pointeur de l'élément alors Mettre le pointeur de la carte d'occupation à NULL

TAB. 5 – *Algorithme de retrait d'un élément de la carte d'occupation*

Pour tous les éléments non nuls Mettre la nouvelle position de l'élément Mapper la nouvelle position de l'élément sur la carte d'occupation Mettre le pointeur de la carte d'occupation a la valeur du pointeur
--

TAB. 6 – *Algorithme de mise à jour de la carte d'occupation*

Rigidité du solide considéré mise à une valeur k Force appliquée au solide mise à F=0 Moment de torsion mis à T=0 Pour tous les éléments non nuls Vérifier la carte d'occupation Si collision Récupérer la profondeur de l'objet au point de collision depth Calculer le gradient de profondeur au point de collision gdepth $F = F + k * depth * gdepth = F + f$ $T = T + t = T + (f \times r)$

TAB. 7 – *Calcul de la réponse à une collision*

5.3.2 Approche par ChainMail

Le ChainMail est une méthode de déformation rapide et permettant de modéliser les déformations d'objets rigides déformables, élastiques et plastiques en ajustant les paramètres des élément constitutifs. On peut alors déformer des objets de plus de 125000 éléments en temps réel. Une telle capacité de traitement est très appréciable lorsque l'on se place dans le modèle voxel, étant donné le grand nombre d'éléments atomiques à traiter.

L'algorithme du ChainMail [Fig. 8] est le suivant. Dans un premier temps il faut avoir un nœud que l'on déplace. Il faut par la suite utiliser la structure du ChainMail [Fig. 9]. Si la distance entre le point traité et le voisin traité est supérieure à la distance max, on place le voisin à cette distance max et on le note comme ayant été déplacé (pour la récursivité de l'algorithme). Si la distance est inférieure à la distance minimum on place alors le voisin à cette distance minimum.

$\text{if } (x - x_{\text{left}}) < \text{minDx}, x = x_{\text{left}} + \text{minDx};$
 $\text{else if } (x - x_{\text{left}}) > \text{maxDx}, x = x_{\text{left}} + \text{maxDx};$
 $\text{if } (y - y_{\text{left}}) < -\text{maxHorizDy}, y = y_{\text{left}} - \text{maxHorizDy};$
 $\text{else if } (y - y_{\text{left}}) > \text{maxHorizDy}, y = y_{\text{left}} + \text{maxHorizDy};$

FIG. 8 – *Algorithme du ChainMail*

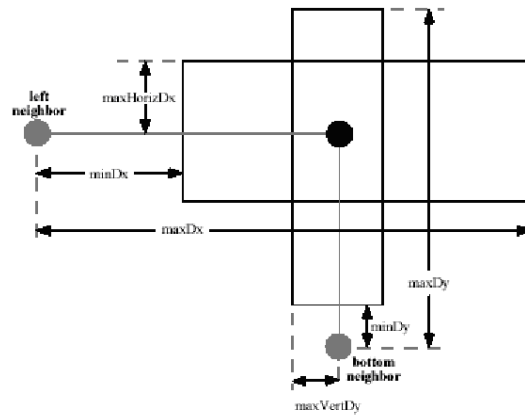


FIG. 9 – *Structure du ChainMail*

On pourra noter que pour appliquer un tel algorithme il est préférable d'avoir certains points limites (en fait des points fixes dans le référentiel de base [Fig. 10]).

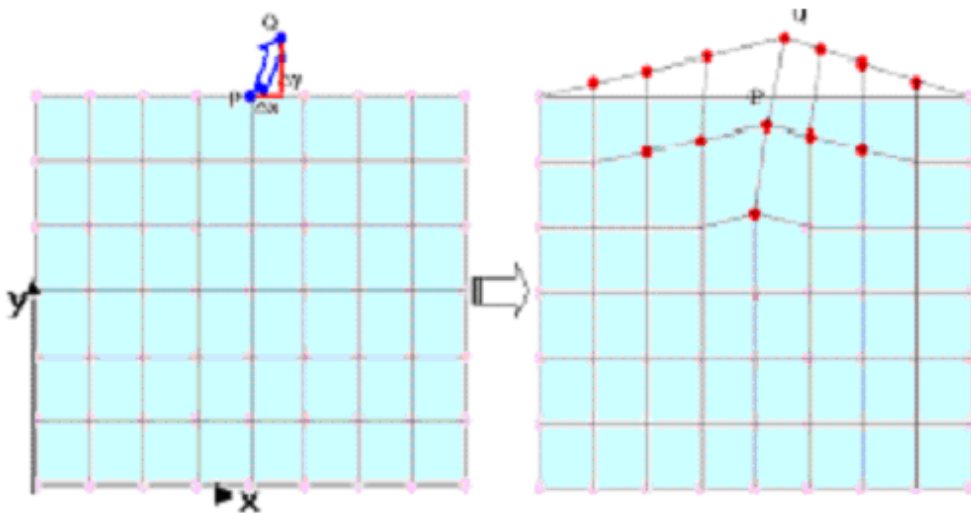


FIG. 10 – *Exemple de ChainMail*

Cette méthode a par contre un point faible, c'est qu'elle n'assure pas un niveau d'énergie interne minimum à l'objet. Pour ce faire on applique souvent par la suite à l'objet la méthode de relaxation élastique qui stabilise l'état d'énergie de l'objet.

On pourra noter que cette méthode a l'avantage de pouvoir s'utiliser dans n'importe quelle dimension [Fig. 11] [Fig. 12]. Comme le montre S. Frisken [FG97] on peut aisément porter cette méthode en 3 dimensions [PKSK02].

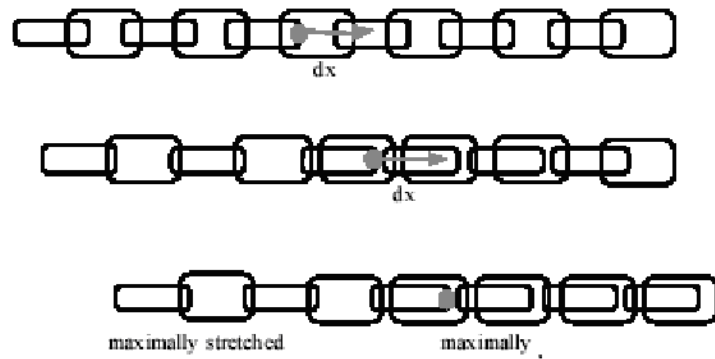


FIG. 11 – *ChainMail 1D*

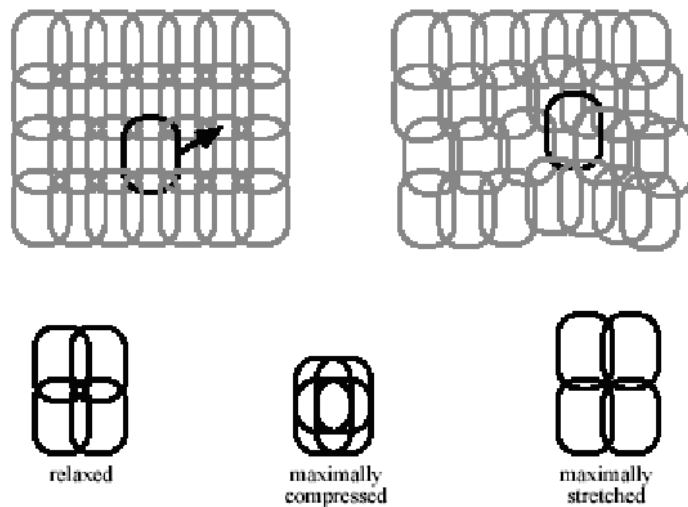


FIG. 12 – *ChainMail 2D*

Par la suite pour les déformations qui ont eu besoin d'un facteur dynamique on peut citer le S-ChainMail [Fig 13] qui rajoute en plus d'un chainmail normal, l'effet dynamique d'un ressort.

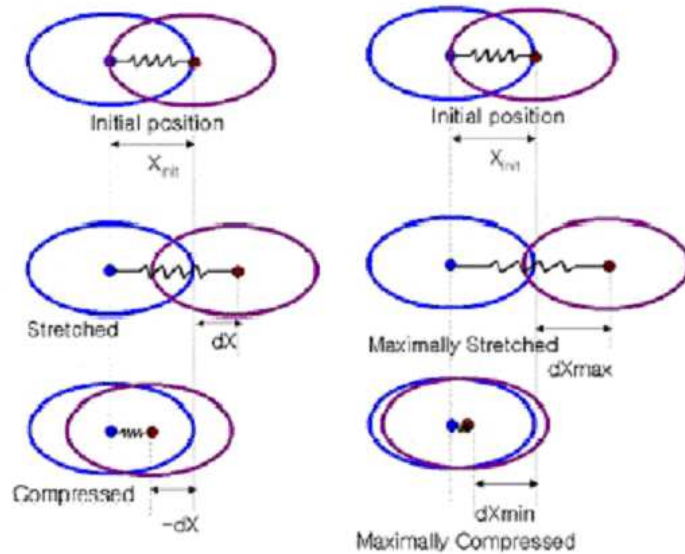


FIG. 13 – *S-ChainMail*

5.3.3 Approche par les éléments finis

L'approche par les éléments finis (FEM) est une approche relativement connue pour les déformations surfaciques. Et il existe un grand nombre d'optimisations. Le domaine où la FEM est pertinente est lors de la simulation des déformations de matériaux complexes, comme les tissus humains, les muscles du visage, les yeux, etc. En revanche elle devient inadéquate lorsque le nombre de points à traiter devient trop important.

Dans leur article, Kaufman, Chen et Zhu [ZCK98b] montrent clairement que le but recherché n'est pas le temps réel ni la rapidité des calculs, mais un résultat biomécaniquement correct. Ils procèdent néanmoins à des hiérarchisations des éléments et à des simplifications de calculs pour écourter les traitements.

5.3.4 Approche par des systèmes masse-ressort

L'approche par système masse-ressort est une approche qui provient également des traitements surfaciques [ZCK98a]. Elle est dans ce cas beaucoup plus simple à mettre en place que la FEM. Elle présente en revanche l'inconvénient d'être moins visuellement convenable que cette dernière.

Lorsque l'on passe en trois dimensions par contre les temps de calcul s'allongent, car pour conserver un aspect certes pas exact, mais même visuellement probable, il faut considérablement augmenter le nombre de liaisons entre éléments [Fig. 14] et donc augmenter le nombre d'équations à résoudre.

En effet, il faut pour chaque élément :

- 1 masse,
- 6 ressorts structuraux (chaque éléments avec ses 6 plus proches voisins),
- 8 ressorts de cohésion (entre l'élément et chaque centre de chaque celule dont il est un sommet),
- 6 ressorts de flexion (entre l'élément et ses 6 plus proches voisins).

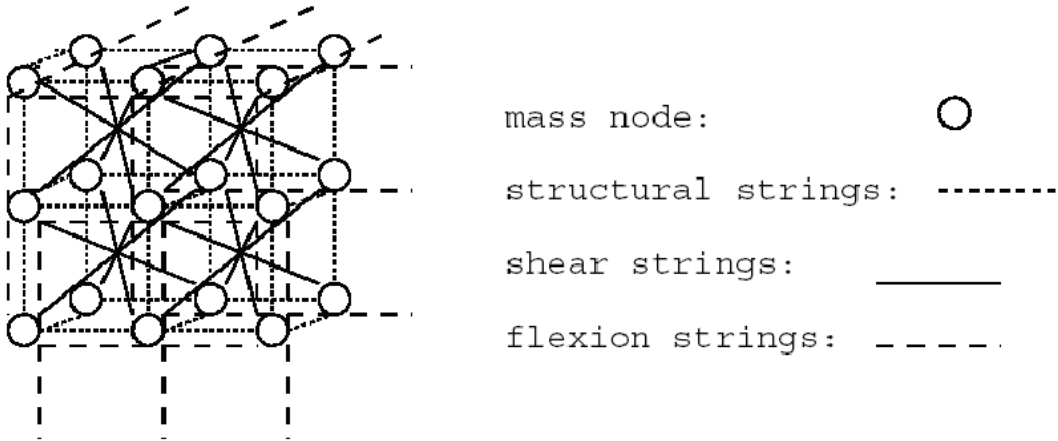


FIG. 14 – Treillis d'un système masse-ressort

5.3.5 Approche par les LevelSet

La méthode dite des «Level Set» exposé dans [Set97] et [SA98] semble également intéressante. La fonction première de ce genre de méthode est de faire évoluer des fronts d'onde dans le temps en utilisant des forces. Mais la déformation d'un objet est aussi une propagation à l'aide de force. L'intérêt était que lors de la première partie du stage nous voulions nous intéresser à des équations de propagation.

Le problème des propagations dites standard est qu'elles ont tendance à faire s'interpénétrer les fronts et à ne pas pouvoir s'étendre simplement à la troisième dimension. Il suffit en effet d'augmenter la dimension du cône de support. La méthode des «Level Set» dépasse ce problème. Elle se base sur un cône contenant le contour (en fait le front d'onde pour être plus exact) à faire évoluer. Sur [Fig. 15] le contour initial appelé niveau 0 est représenté en gras (rouge).

Pour procéder à une telle évolution en 3 dimensions (ce qui est faisable [BC02] [Fig. 16]), je pense qu'il suffit de passer dans un espace de dimension 4 pour représenter un «hyper-cône».

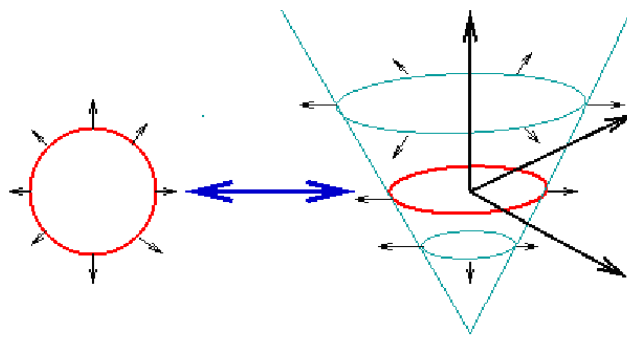


FIG. 15 – *Principe des LevelSet*

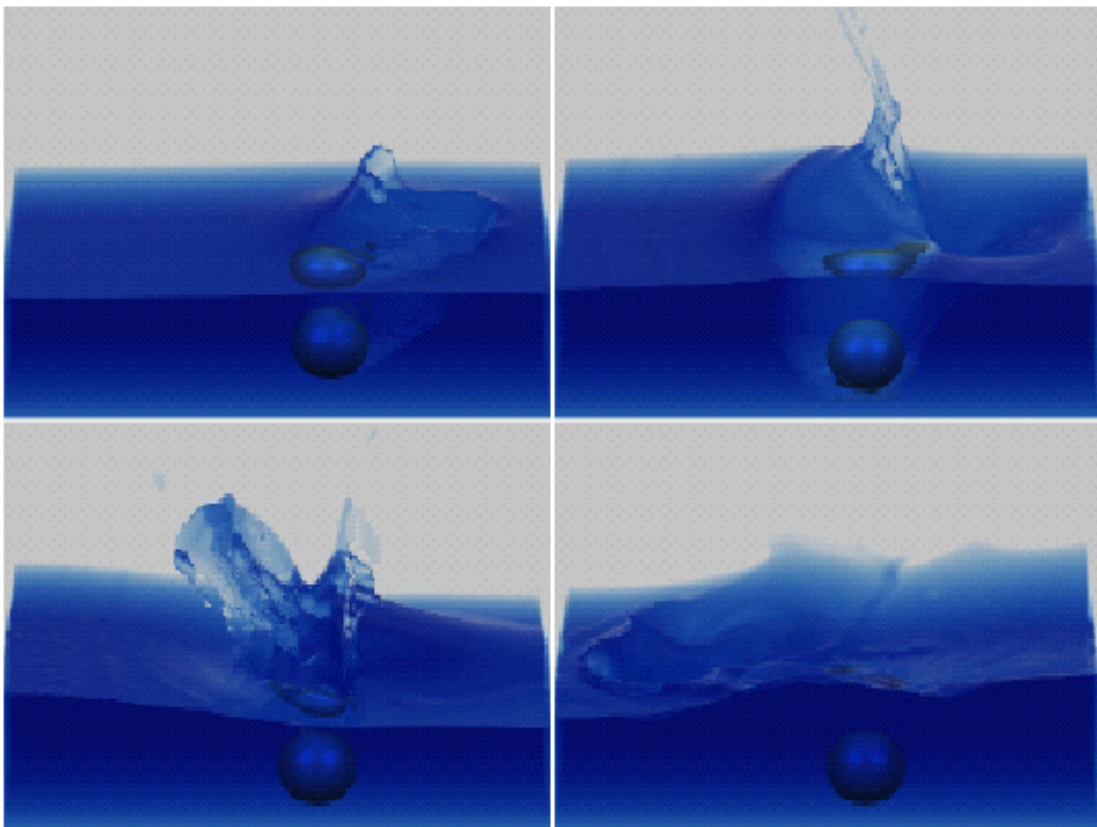


FIG. 16 – *Exemple à base de LevelSet*

5.3.6 Approche par Squeletisation

La squeletisation est une approche très intéressante. En effet c'est une approche qui permet de réduire considérablement le nombre d'éléments de l'objet à calculer. Cette approche peut être très utile en supplément d'une approche voxel standard pour permettre

de diminuer la quantité de calcul et ainsi pouvoir modéliser des déformations en temps réel avec un rendu relativement bon [Fig. 18].

Le principe d'une telle modélisation [Fig. 17] réside dans une fonction de transformation réversible. Il faut dans un premier temps poser quelques notations. Soit DT la Distance Transform² et MNDT: Mean Neighbor Distance Transform³ qui est en fait la moyenne des DT des 26 plus proches voisins.

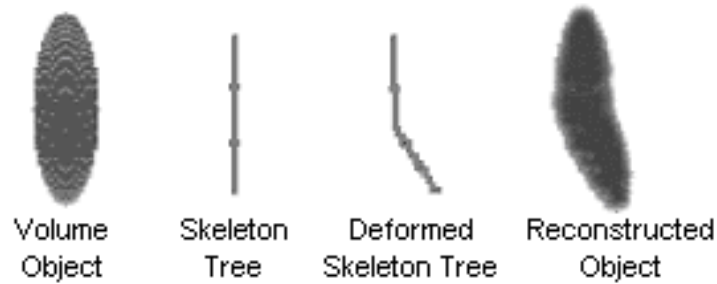


FIG. 17 – *Principe de squeletisation*



FIG. 18 – *Exemple de squeletisation*

L'algorithme de squeletisation est le suivant :

- On marque les voxels en intérieur/extérieur/limite
- Initialisation: On calcul la DT 3/4/5 (face/arête/point) des voxels frontières.
- Propagation: On propage ces DT aux voxels intérieurs (semblable au calcul d'un plus court chemin)
- On calcule la MNDT des voxels intérieurs
- Si $\|DT - MNDT\| > \text{seuil}$, ce voxel appartient au squelette

Cet algorithme est en $O(n)$, et il permet néanmoins de réduire le nombre de voxels à traiter de 10 à 60 fois (selon l'objet de base).

2. Transformé de distance

3. Transformé de distance représentative du voisinage

On peut conclure en disant que ce type d'algorithme est globalement très intéressant, mais qu'il nécessite d'être couplé à une méthode d'évolution des corps. Elle vient comme un complément permettant de réduire la complexité des objets.

5.3.7 Approche par contraintes

L'approche par contraintes [vOB95] est une approche singulière permettant de réduire le nombre d'équations par l'inclusion de contraintes dans ces dernières. Pour cela on se place dans une mécanique du point et non plus de l'objet.

L'équation est simple : la dynamique des corps rigides est égale à la dynamique des points plus des contraintes. Le problème est que cette approche modélise des corps rigides ou alors il faut gérer les interactions sous forme de liaisons et pour chacune d'elle en déduire les contraintes à appliquer. Cette méthode a quand même l'avantage de conserver très bien l'énergie du système.

5.3.8 Approche par la mécanique des fluides

La mécanique des fluides [FF01] est un domaine connexe à l'animation de corps déformables. En effet, on peut dans un premier temps penser qu'en augmentant la viscosité ou la masse volumique du liquide, on pourrait arriver à des corps déformables. L'avantage serait de pouvoir alors utiliser l'ensemble des connaissances existantes sur l'animation de fluide pour arriver aux corps déformables.

Cette approche a un point faible. C'est qu'elle est très gourmande en temps de calcul et que les approches envisagées pour résoudre les équations de Navier-Stokes sont de simplifier les termes qui dans notre cas seraient prépondérants. Mais si le temps réel n'est pas un problème, on peut arriver à des résultats extrêmement réalistes [Fig. 16].

5.3.9 Tableau Comparatif

Approche	Avantages	Inconvénients
Grille Flottante	Approche très documentée	Une approche par grille flottante n'est rien d'autre qu'une approche surfacique avec plus de liaisons, ce n'est pas le sens de ma recherche
ChainMail	Très rapide	Se base sur une grille flottante
Élément finis	Approche réaliste	Complexe à mettre en oeuvre et ne convient pas aux larges déformations mais plus aux petits muscles
Masse - Ressort	Rapide et simple	Pas très réaliste et se base sur une grille flottante
Level Set	Méthode extrêmement réaliste pour la propagation de fronts	Très lourd en temps de calcul, ne se prête pas vraiment aux déformations sans l'ajout d'autres méthodes
Squeletisation	Permet de réduire le nombre d'éléments à traiter	Ne peut être utilisé exclusivement
Contraintes	Permet de réduire le nombre d'équations	S'applique aux corps rigides, contraintes non triviales à trouver pour un système
Fluides	Approche réaliste	Très gourmand en temps de calcul, particularité visqueuse non prise en compte dans l'état de l'art

TAB. 8 – *Tableau comparatif (État de l'Art)*

5.3.10 Conclusion

Etant donné que la totalité des approches voxel se basent sur des approches dites par grille flottante et non pas sur un voxel en tant qu'agent [5.4.1], ces approches ne sont pas utiles en tant que telles. On peut quand même relever certaines méthodes qui pourraient être utilisées (ChainMail, Squeletisation).

5.4 Approche envisagée

5.4.1 Le voxel en tant qu'agent

Le but du voxel en tant qu'agent est de prendre le contre pied des approches standard. En effet, il s'agit de mettre le voxel au coeur de la représentation et de la simulation pour

réellement pouvoir prendre en considération l'approche volumique (et non une simple grille flottante) et en faisant fi des problèmes de calcul en créant un voxel «agent» qui aura le contrôle sur les flux le traversant.

Il gèrera indépendamment l'évolution de la scène. L'avantage d'une telle approche c'est qu'elle peut permettre une parallélisation des calculs.

Pour prouver cela on peut analyser les phases de traitement d'une approche standard dite surfacique et celle de l'approche envisagée dans le cadre d'une simulation haptique de déformation sur une base d'image voxel.

Dans une approche surfacique [Fig. 19] les calculs sont très sérialisés et une très grande phase pré calcul est nécessaire pour reconstruire les objets à partir des images voxel. Dans une approche volumique [Fig. 20] en revanche L'application est au centre de la simulation, et les calculs sont hautement parallélisés. En outre il est possible de travailler directement sur les objets numérisés. On diminue ainsi les défauts et imperfections dus à la reconstruction.

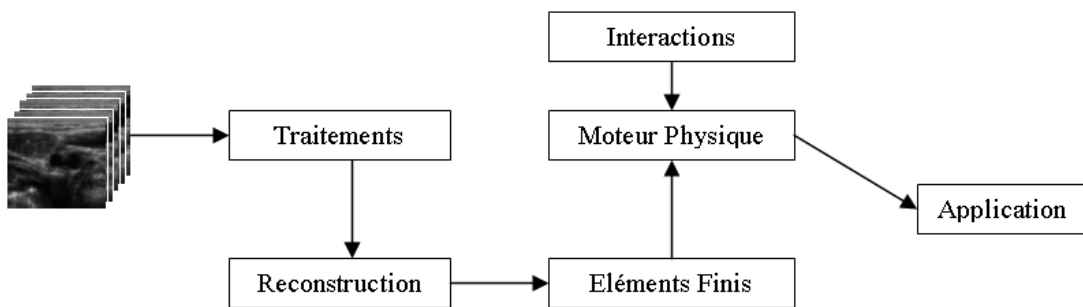


FIG. 19 – *Approche surfacique*

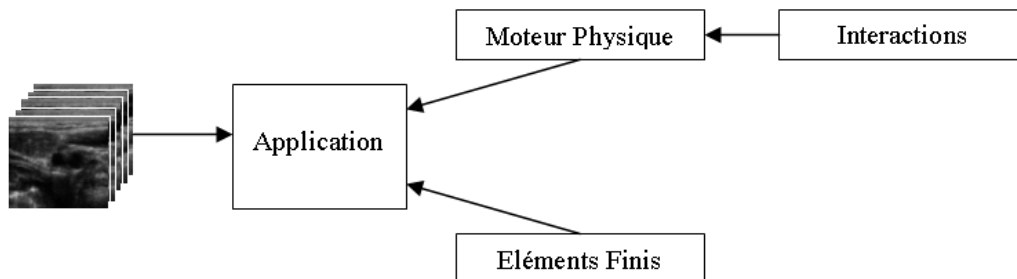


FIG. 20 – *Approche volumique*

5.4.2 Grille fixe vs. grille flottante

L'approche par grille flottante et par grille fixe sont des approches totalement différentes d'une même modélisation [Tab. 9] : celle des voxels. L'approche par grille flottante place la représentation structurelle au centre de la modélisation. L'approche par grille fixe quand à elle, place le voxel en tant qu'agent au centre de la modélisation.

L'approche par grille flottante présente un certain nombre d'avantages. En effet elle permet d'appliquer beaucoup de résultats déjà connus au modèle volumique. Mais cela se base sur un leurre. En effet, cette approche n'est pas réellement volumique en tant que telle mais juste une extension de l'approche surfacique. On modélise un volume comme une surface avec en plus des liaisons avec des points intérieurs au volume. C'est comme si l'on rajoutait des points à l'intérieur du volume. Ce n'est pas réellement ce que l'on peut appeler une approche novatrice mais plus une extension de ce qui se fait déjà.

L'approche par grille fixe en revanche est réellement nouvelle. Contrairement à l'approche par grille flottante il existe très peu d'articles sur ce sujet. Ceci en fait un domaine complexe où il faut trouver les modèles comportementaux et physiques à appliquer. Cette approche met le voxel au centre de la représentation et le présente ainsi comme un agent [5.4.1].

Problème	Grille flottante	Grille fixe
Taille des données	Importante car on doit avoir un nombre de points supérieur à celui du nombre de voxel.	Moins importante car on se base directement sur l'élément représentatif.
Documentation	Très importante de part l'origine surfacique des techniques.	Très faible voire inexistante.
Pertinence de la modélisation	Modélisation issue de la représentation surfacique.	Modélisation mettant l'élément atomique au coeur de la représentation.
Parallélisme des calculs	Modèle très fortement sérialisé de par les très fortes interactions entre particules.	Si l'on parvient à un voxel en tant qu'agent les calculs seront fortement parallélisés.
Discrétisation	Aucun problème, elle se fait après tous les calculs.	C'est le problème de cette modélisation, il faut trouver une parade.

TAB. 9 – *Tableau comparatif (grille fixe vs. grille flottante)*

5.4.3 Une discrétisation de l'espace

Comme on peut le voir [Tab. 9], la discrétisation est l'un des aspects négatifs de la modélisation par grille fixe, plaçant le voxel au centre de la modélisation.

La discrétisation est un problème relativement intéressant à traiter. Mais dans notre

cas, c'est un aspect critique de la modélisation. Il faut donc lui porter une attention toute particulière. Effectivement il ne s'agit pas juste de discrétiser la scène au moment de l'affichage (comme ce serait le cas dans une approche par grille flottante). Il faut que cette discrétisation soit partie intégrante de la méthode.

Étant donné qu'un voxel «agent» ne peut pas se déplacer de part sa nature, il faut trouver un moyen d'insérer la quantité de petit déplacement à l'intérieur de cette structure. On ne peut par contre pas se baser sur les approches existantes en 2 dimensions, car ces dernières, tout comme l'approche par grille flottante, ne font que discrétiser une situation continue au moment de l'affichage.

5.5 Techniques envisagées

5.5.1 Les équations de diffusion

Pour rappel, une équation de diffusion est de type :

$$\nabla^2 u = \frac{1}{\alpha^2} \frac{\partial u}{\partial t}$$

A modélisation novatrice, approche novatrice. En effet l'approche par diffusion dans le cadre de déformations est quelque chose de très peu orthodoxe. Cette idée vient du fait que l'on peut considérer une déformation comme une propagation combinée avec des conditions limites. Cette méthode est inspirée sous certains aspects par la méthode dite des «Snakes» qui permettent de cerner des contours. Car bien que la modification soit volumique, c'est réellement un contour qui va être déformé (c'est la raison pour laquelle les LevelSet ont été étudiés).

Pour cela il a fallu élaborer un modèle de données suffisamment générique pour permette d'implémenter une méthode de diffusion de façon très facile. C'est à ce moment que la représentation par agent est devenue intéressante. Il suffit en effet d'implémenter un modèle et automatiquement le comportement global de la diffusion changera.

Pour faciliter la modélisation et également la visualisation des résultats, j'ai choisi de me restreindre à une étude en 2 dimensions. Cette restriction ne devrait pas affecter un éventuel passage à la troisième dimension.

Tout d'abord je vais expliciter la méthode générale d'application de ces équations. Elle se base sur un quadrillage de «pixels» (qui deviendront des «voxels»). Ainsi que sur une diffusion par niveaux, en d'autres termes une diffusion récursive sur des pixels voisins.

Cette méthode se base sur une hiérarchie de niveaux [Fig. 21] [Fig. 22]. Il faut aussi choisir le nombre de niveaux de diffusion, qui est en fait le taux de récursivité de l'algorithme.

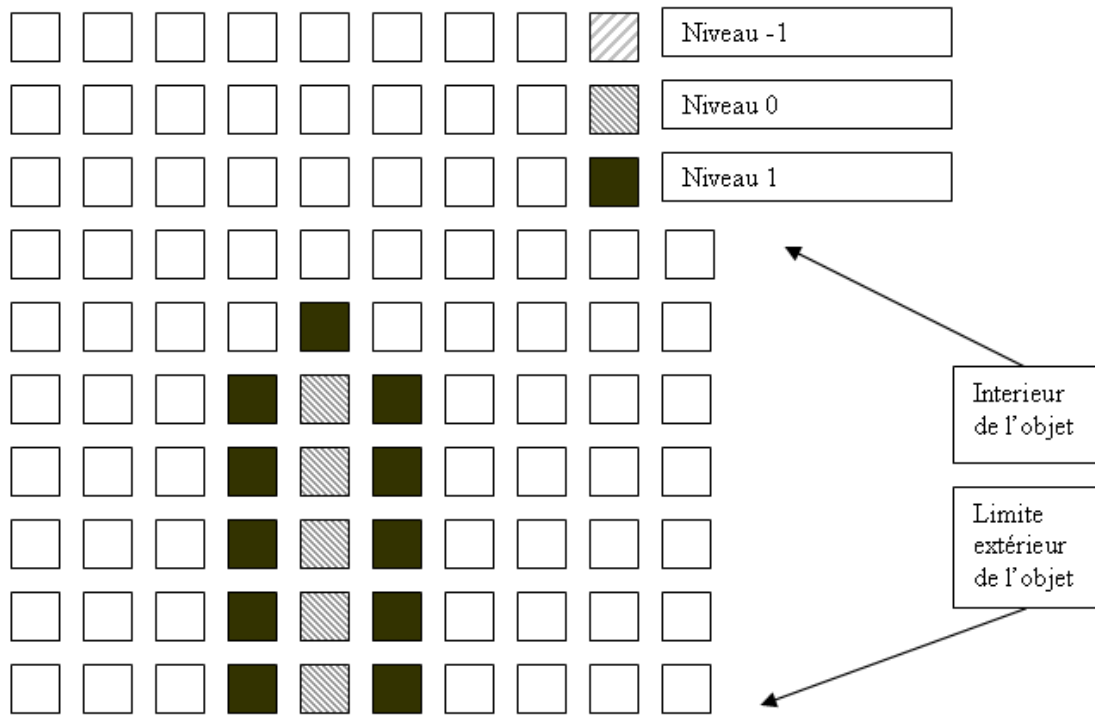


FIG. 21 – Diffusion au niveau n

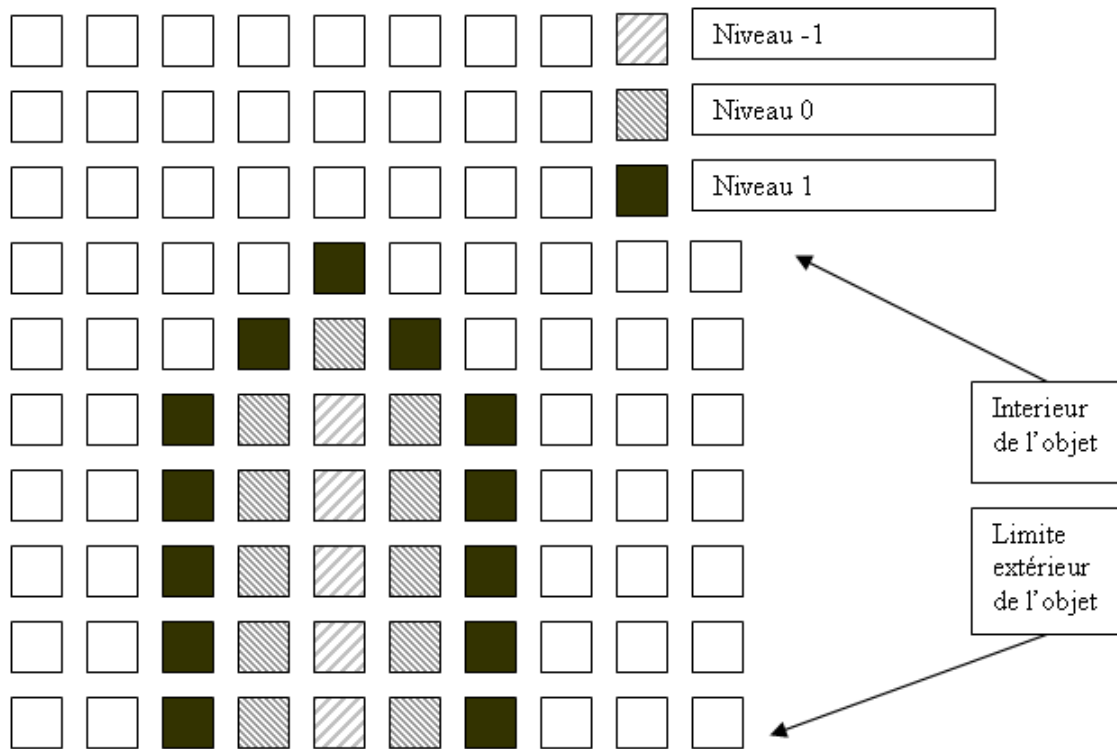


FIG. 22 – Diffusion au niveau $n+1$

Seuls les pixels à l'intérieur du contour initial sont modifiés par cette diffusion. Le principe commun à ces trois diffusions est le suivant :

- On propage le potentiel aux k -voisins (avec k la connexité du pixel) moyennant que les voisins soient «acceptables», ce qui diffère d'une propagation à l'autre
- Si le potentiel dépasse un seuil $S1$ (que l'on nommera également seuil de diffusion) on diffuse le surplus de potentiel dans les voxels qui peuvent l'accueillir.
- Si le potentiel dépasse un seuil $S2$ (que l'on nommera également seuil de destruction) on supprime tout simplement le voxel en diffusant tout le potentiel aux voxels voisins pouvant l'accueillir. Cela signifie que le voxel se vide. Son potentiel est comme poussé vers les voxels suivants.

Les trois méthodes diffèrent en fait sur le choix des pixels voisins auxquels est appliquée la diffusion.

Méthode 1 : Cette première méthode est une méthode que je qualifierais de méthode «Avec propagation au même niveau et aux niveaux supérieur et vers l'arrière» (diffusion D1). Elle se caractérise par l'absence de propagation vers l'avant et par une amplification du phénomène de pénétration en raison de la propagation sur le même niveau. La diffusion se fait donc sur les pixels de niveau 0 ou supérieur et vers les pixels de degré de pénétration⁴ décroissant.

4. On appelle degré de pénétration la distance séparant le pixel du contour depuis lequel l'élément

Méthode 2 : La seconde méthode est en fait une variante de la première. Elle pourrait se décrire comme «Avec propagation au même niveau et aux niveaux supérieurs et vers l’avant» (diffusion D2). Elle reprend le même principe que le précédent mais elle n’intègre pas la notion de propagation vers les degrés de potentiel décroissant.

Méthode 3 : Enfin la troisième méthode se distingue des autres. En effet on pourrait la qualifier de «Avec propagation aux niveaux supérieurs ou égaux et dans toutes les directions» (diffusion D3). Cette méthode est celle que l’on peut assimiler à une «vraie» diffusion. Elle en comporte les avantages et les inconvénients, à savoir une anisotropie ce qui est un inconvénient car l’endroit par lequel rentre l’objet solide n’a pas les mêmes propriétés que le reste de l’espace. L’avantage c’est que la propagation est facile : «vers les pixels plus loin».

Les résultats obtenus sur chacune des trois diffusions sont les suivants :

- La diffusion D1 comporte l’énorme avantage d’être visuellement réaliste. Effectivement lorsque l’on insère un objet dans un objet déformable on remarque très nettement que ce dernier s’enfonce tout en modifiant de façon «volumique» l’enveloppe de la zone déformable. Mais elle pose quand même quelques problèmes. Pour des raisons de vraisemblance physique sur ces équations il n’a pas été possible d’avoir une conservation du potentiel global de l’objet dans le volume. Ceci conduit à ce que j’appellerais des effets de bord au sens premier du terme c’est-à-dire que lors d’une pénétration d’un objet sur les bords ou si le potentiel est suffisamment puissant sur les bords ces derniers font apparaître des cas pathologiques n’ayant aucun sens physique.
- La diffusion D2 quant à elle semble en théorie plus prometteuse que la première. Car tout en gardant normalement un aspect visuel acceptable, elle devait en plus permettre de propager le potentiel vers l’avant afin de voir apparaître une réelle zone de compression à l’endroit de contact entre l’objet déformable et l’objet déformant. Mais lors de l’implémentation de cette méthode il est apparu que mettre à jour un pixel déjà traité posait des problèmes d’anisotropie. En effet le parcours des pixels mis à jour joue une importance. Autant la propagation dans les degrés de pénétration décroissants supprime l’une des anisotropies de mise à jour, autant celle dans l’autre direction ne peut être résolue. C’est de ce point que vient le problème constaté. Cette méthode n’est donc malheureusement pas visuellement probante.
- La diffusion D3 est celle qui se rapproche le plus de la diffusion physique réelle. En effet on met à jour uniquement les pixels qui n’appartiennent pas au front et n’ayant pas encore été traités. Elle semble donc la plus à même de représenter une diffusion. Le problème est que nous souhaitons représenter une déformation en se basant sur la physique des diffusions. Cette diffusion a donc un gros inconvénient c’est qu’elle est totalement isotrope. En effet l’entrée de l’objet déformant dans l’objet déformable n’est plus prise en compte. Ainsi le potentiel se diffuse également au bord de l’objet déformable et en son centre. On ne voit donc plus apparaître de déformation

déformant est entré dans l’objet.

de surface. On pouvait bien entendu s'attendre à ce genre de résultats car on devait obtenir une réelle diffusion. Ce point peut sans doute être dépassé en munissant les pixels extérieurs aux objets de potentiels extrêmes (par exemple négatifs), mais ceci ne réglerait pas le cœur du problème, et les travaux dans d'autres directions semblent plus prometteurs.

Les différents résultats sont récapitulés ci-dessous [Tab. 10].

Méthode	Avantages	Inconvénients
D1	Aspect réaliste	Pas de conservation du potentiel
D2	Aspect presque réaliste	Problème d'anisotropie
D3	Compensés par l'inconvénient	Aucun aspect de déformation visible

TAB. 10 – *Tableau comparatif (Méthodes de diffusion)*

5.5.2 Les équations eulériennes

Dans le domaine des voxels, les équations d'Euler se traduisent ainsi :

$$\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \cdot \frac{dx}{dt} + \frac{\partial}{\partial y} \cdot \frac{dy}{dt} + \frac{\partial}{\partial z} \cdot \frac{dz}{dt}$$

Une telle approche se base sur les flux. Elle est tout à fait adaptée à l'approche sur grille fixe qui nous intéresse. Elles cumulent à une dérivée par rapport au temps, les dérivées par rapport à l'espace. C'est à ce moment que les premières pistes de l'implémentation choisie sont apparues.

Le principe est que les dérivées partielles par rapport à la position peuvent faire penser à une quantité de mouvement, une sorte de potentiel gardé en mémoire par le voxel. C'est ainsi qu'est venue l'idée de l'approche quasi particulaire. En effet, au départ tout ce comportait comme si la particule du voxel portait la partie décimale d'une position et le voxel la partie entière [Fig. 23].

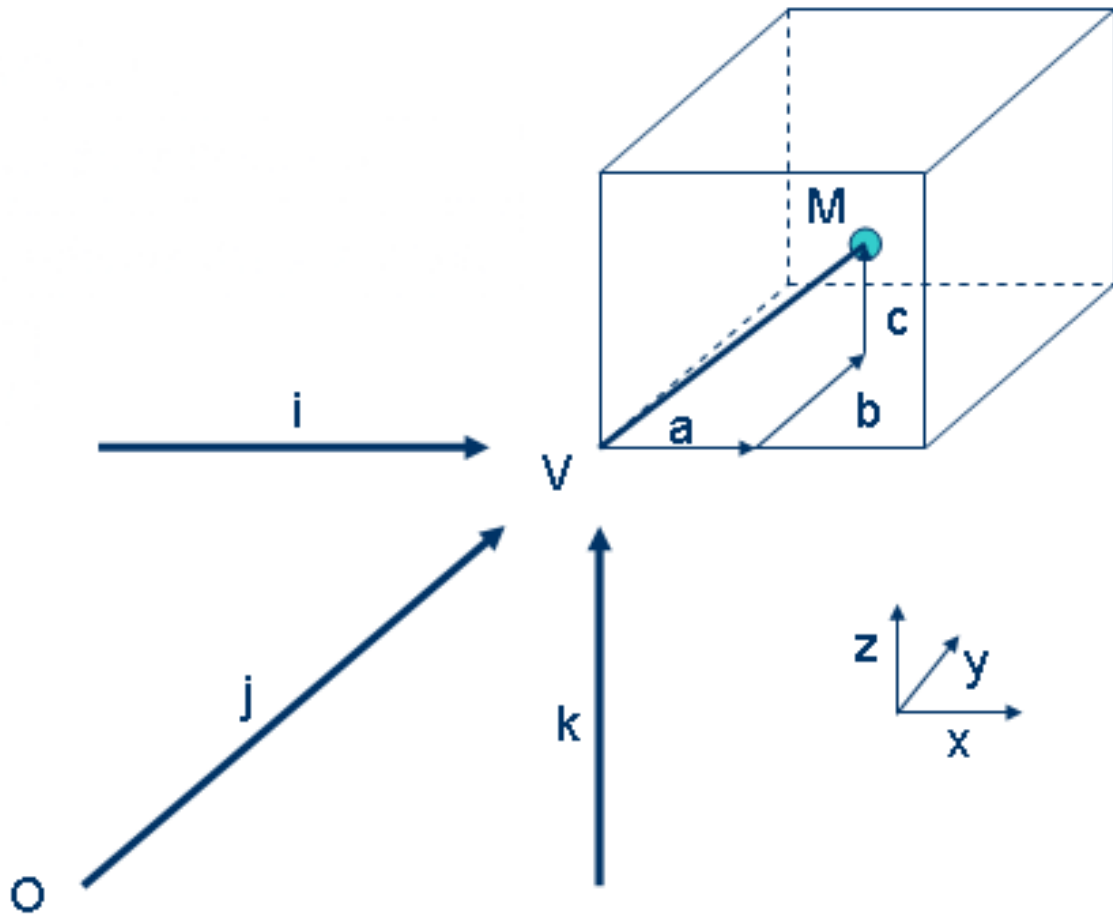


FIG. 23 – *Principe de l'approche particulière*

Cette approche a tout de même une limitation [Fig. 24] qui est de présenter une non stabilité à la rotation. En effet il peut arriver que deux particules soient présentes en même temps dans un voxel, et dans ce cas alors l'une d'entre elles est détruite.

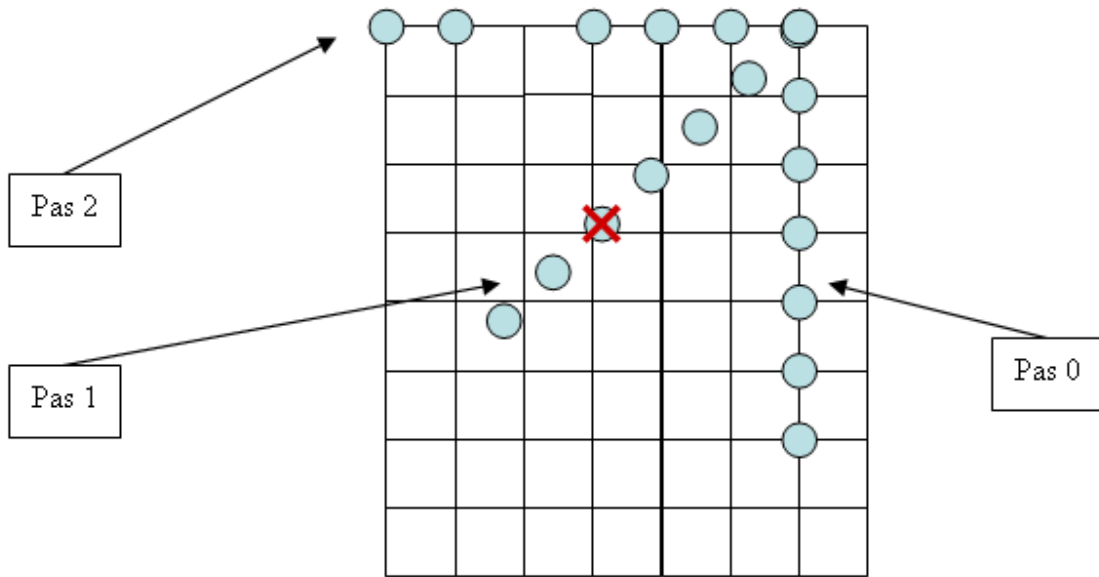


FIG. 24 – *Limitation de l'approche particulaire simple*

La parade à un tel problème est d'augmenter le nombre de particules pouvant être gérées par un voxel [Fig. 25]. Ainsi un objet reste stable par rotation.

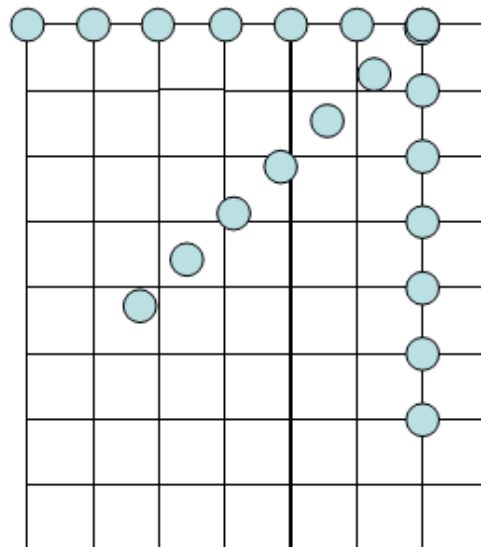


FIG. 25 – *Approche particulaire évoluée*

5.6 L'approche particulière - Rôle de l'agent

5.6.1 Dans le cadre des corps rigides

Dans un premier temps le cadre des corps non déformable a été traité. En effet c'est une première étape pour vérifier que les modèles sont exacts.

Le premier problème à apparaître était de pouvoir modéliser des objets. En effet je n'avais en début de stage aucun objet modélisé de façon volumique. J'ai donc exploré deux axes différents pour modéliser des corps :

- Dans un premier temps à partir de primitives (boules pleines et creuses, parallélépipèdes rectangles pleins ou creux) et d'opérateurs tels que l'union. Cette approche est particulièrement intéressante car elle permet de générer de façon très simple des objets géométriques. Le seul problème est qu'il faut prendre le temps de la modélisation et que ces modèles sont figés dans le corps du programme.
- Dans un deuxième temps je me suis intéressé à l'implémentation dans le monde voxel des modèles de type points/faces/normales. C'est un format simple à traiter et d'usage relativement courant. De plus je bénéficie d'outils de manipulation de tels fichier (homothéties, translations et rotations) ainsi que la possibilité d'importation de fichier 3D Studio dans ce format. Ceci permet d'avoir un grand nombre d'objets à disposition pour les phases de tests.

Mais lors de l'implémentation de la gestion des objets à partir de fichiers, il est apparu un problème : il faut reconstituer un objet volumique (à base de voxels) à partir d'un objet surfacique (à base de points). Il a donc fallu procéder à une voxelisation de la scène.

On pourrait dans un premier temps penser à utiliser l'algorithme de Bresenham que l'on pourrait généraliser en 3 dimensions. Or cette extension n'est pas possible. Effectivement l'algorithme de Bresenham privilégie un axe et explore le second. Pour l'approche voxel une telle méthode est impossible, il faut donc chercher dans une autre direction. C'est alors que j'ai mis au point un algorithme simple de voxelisation [Fig. 26].

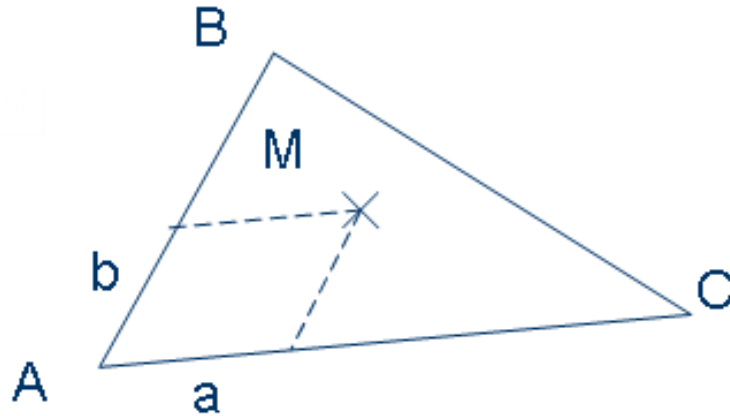


FIG. 26 – *Principe de la voxelisation*

Le principe est le suivant [Tab. 11]:

Pour chaque face (ABC) Pour chaque arête de la face on calcule la projection sur chaque axe On prend la plus grande valeur Lmax On choisit alors de «parcourir» la face ABC Pas de voxelisation = TailleVoxel / Lmax Pour α de 0 à 1 Pour β de 0 à $1 - \alpha$ $M = A + \alpha.AB + \beta.AC$
--

TAB. 11 – *Algorithme de voxelisation*

Par la suite si M est dans un voxel non encore «allumé», il suffit d'initialiser la particule de ce voxel en (0,0,0)

Enfin voici un objet voxelisé par cet algorithme [Fig. 27].

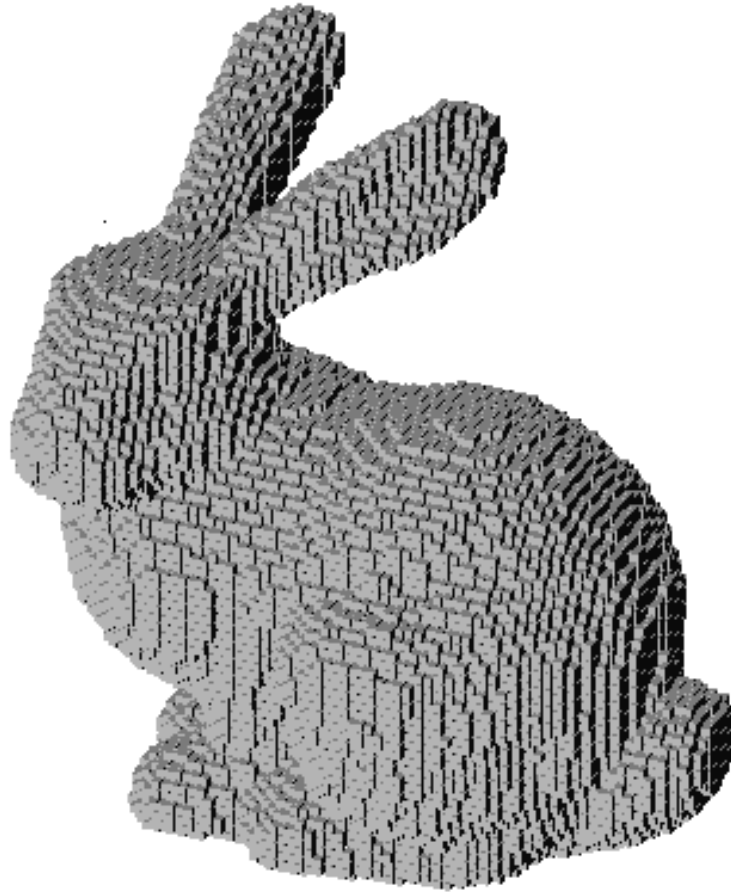


FIG. 27 – *Exemple d'objet voxelisé*

Cet algorithme a l'inconvénient d'uniquement modéliser la surface de l'objet dans le monde volumique. Ceci provient du fait qu'il aurait été très long de développer un voxelisateur qui modélise l'intérieur des objets, en effet même pour des objets convexes, beaucoup de traitements auraient été nécessaires. Néanmoins l'objet reste une modélisation volumique. L'objectif d'avoir un objet volumique est donc atteint.

5.6.2 Dans le cadre des corps déformables et des fluides

Le cadre des corps déformables et des fluides semble pouvoir se dériver de l'approche particulière d'un objet. En effet la mécanique des fluides se base sur des flux de matière (particules) au travers d'éléments atomiques (les voxels). Même si le modèle précédemment cité n'a pas été implémenté dans le cadre d'objet déformables, on peut être en mesure de supposer qu'une telle approche pourrait être envisagée.

Il faudra néanmoins faire attention à certaines petites choses notamment les grandes déformations qui pourraient étirer le modèle particulaire de telle façon que son traitement

par les voxels pourrait faire apparaître des trous dans la structure de l'objet.

5.6.3 Framework de tests

Pour valider mon modèle, un environnement graphique de test à été mis en place. Son but est de :

- Valider la représentation voxel d'un objet (de façon visuelle)
- Valider l'évolution d'un corps surfacique revoxelisé
- Valider l'évolution d'un corps volumique
- Comparer l'évolution d'un corps volumique au même corps surfacique revoxelisé (et ce afin de valider le modèle d'évolution volumique).

Pour arriver à un tel objectif, il fallait avoir un environnement multi-fenêtré afin de bien pouvoir cerner toutes les évolutions et ce de manière simultanée [Fig. 28].

Une fois l'environnement mis en place il fallait pouvoir procéder aux simulations et pouvoir exploiter les résultats. Pour cela j'ai développé un ensemble de classes me permettant de valider mes résultats :

- Une classe chronomètre multi-environnement. Cette dernière permet de mesurer des durées avec une très grande précision, aussi bien sous Linux que sous Windows®. Ceci m'a permis de permettre de calculer le framerate de mon application ainsi que des temps de calcul (voxelisation d'un objet, parcours de l'ensemble des voxels d'un objet, etc.).
- Une classe voxel. Cette classe est l'atome de la représentation d'une scène. Elle contient un voxel avec sa position, ses voisins, un lien vers le moteur physique, etc.
- Une classe objetVoxel. Cette classe est en fait une collection de liens vers des voxels, elle permet de suivre rapidement l'évolution d'un voxel et d'intervenir par exemple sur l'ensemble des voxels d'un objet.
- Une classe modèle. Elle permet de gérer des modèles surfaciques de façon très aisée (à partir de la représentation Points/Faces/Normales).
- Une classe moteurPhysique. Cette classe permet d'avoir un moteur physique à part pouvant être interchangé pour permettre d'éventuelles améliorations.

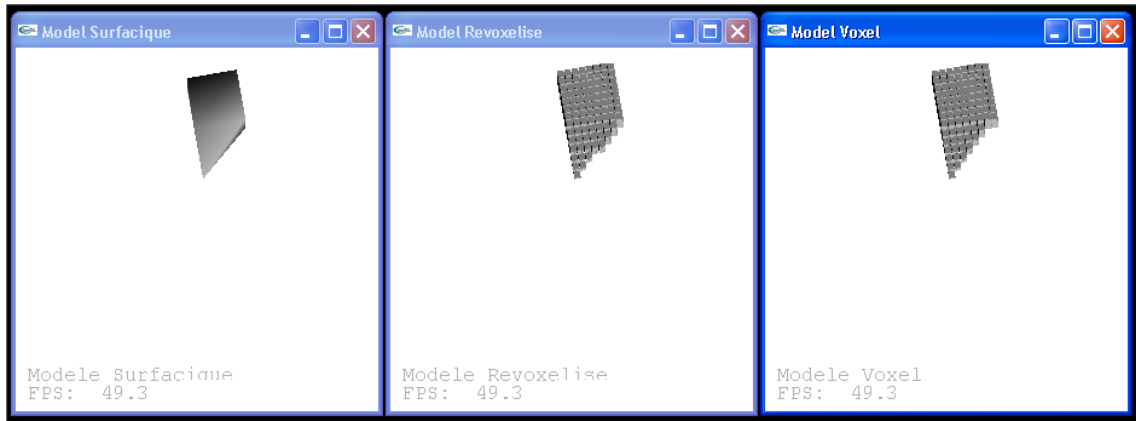


FIG. 28 – *Framework multi-fenêtré*

5.6.4 Résultats obtenus

Les résultats obtenus sont dans l'ensemble plutôt encourageants. En effet, avant ces travaux il n'existait à ma connaissance aucune parution concernant une telle approche du voxel. Néanmoins ces travaux ont permis de poser les bases d'une telle modélisation et pointer les points faibles et les dangers.

Pour résumer les résultats sont les suivants :

- Voxelisation d'un objet quelconque
- Validation théorique et pratique du modèle dans le cadre des objets non déformables
- Validation des fondements théoriques dans le cadre des corps fluides et déformables

Références

- [AS96] R.S. Avila and L.M. Sobierajski. A haptic interaction method for volume visualization. In *Visualization'96*, pages 197–204, San Francisco, Octobre 1996.
- [BC02] J. Andreas Bærentzen and Niels Jorgen Christensen. Volume sculpting using the level-set method. In *Shape Modeling International 2002 (SMI'02)*, Banff, Canada, Mai 2002.
- [CCO02] J. Corso, J. Chhugani, and A. Okamura. Interactive haptic rendering of deformable surfaces based on the medial axis transform. In *Eurohaptics*, pages 92–98, Edimbourg, Ecosse, Juillet 2002.
- [FF01] Nick Foster and Ronald Fedkiw. Practical animation of liquids. In *SIGGRAPH Symposium on Volume Visualization and Graphics*, 2001.
- [FG97] Sarah F. Frisken-Gibson. 3d chainmail: a fast algorithm for deforming volumetric objects. In *Interactive 3D Graphics Conference*, Avril 1997.
- [FG99] Sarah F. Frisken-Gibson. Using Linked Volumes to Model Object Collisions, Deformation, Cutting, Carving, and Joining. In *IEEE Tran. On Visualisation and Computer Graphics*, volume 5 No. 4, pages 33–348, Juin 1999.
- [GKHS98] Nikhil Gagvani, D. Kenchammana-Hosekote, and D. Silver. Volume animation using the skeleton tree. *IEEE Symposium on Volume Visualization*, pages 47–53, 1998.
- [KDC⁺00] A. Kaufman, F. Dacheille, B. Chen, K. Kreeger, N. Zhang, Q. Tang, and H. Hua. Real-time volume rendering. *Special Issue on 3D Imaging of the International Journal of Imaging Systems and Technology*, 2000.
- [MFNF01] Isabel Manssour, Sérgio Furuie, Luciana Nedel, and Carla Freitas. A framework to visualize and interact with multimodal medical images. *International workshop on volume graphics*, 2001.
- [PKSK02] Jinah Park Park, Sang-Youn Kim, Seung-Woo Son, and Dong-Soo Kwon. Shape retaining chain linked model for real-time volume haptic rendering. In *SIGGRAPH Symposium on Volume Visualization and Graphics*, Boston, MA, Etats-Unis, Octobre 2002.
- [SA98] J.A. Sethian and D. Adalsteinsson. The fast construction of extension velocities in level set methods. *Journal of Computational Physics*, 148:2–22, 1998.
- [Set97] J.A. Sethian. Level set methods: An act of violence. *American Scientist*, 85 (3), 1997.
- [vOB95] Kess van Overveld and Bart Barenbrug. All you need is force: A constraint-based approach for rigid body dynamics in computer animation. In *Eurohaptics: Computer Animation and Simulation*, Maastricht, The Netherlands, 1995.
- [ZCK98a] Qing-hong Zhu, Yan Chen, and Arie Kaufman. Physically-based Animation of Volumetric Objects. In *Computer Animation Conference*, Philadelphia, PA, Etats-Unis, 1998.

- [ZCK98b] Qing-hong Zhu, Yan Chen, and Arie Kaufman. Real-time Biomechanically-based Muscle Volume Deformation using FEM. *Computer Graphics Forum*, pages 275–284, 1998.