

UNE METHODE D'INTEGRATION EFFICACE POUR LA SIMULATION DE TISSUS PAR UN MODELE PHYSIQUE

EFFICIENT INTEGRATION METHOD FOR PHYSICAL CLOTH SIMULATION

SABRINA BENAMEUR, NOUREDDINE DJEDI

Département d'Informatique
Faculté des Sciences Exactes et des Sciences de la Nature et de la Vie
Université Mohamed Khider B. P. 145 Biskra 0700
benameur_s@yahoo.fr
djedinouredine@yahoo.fr

RESUME

La simulation de tissu était basée dans la majorité des travaux sur les systèmes masse-ressorts. Malheureusement, ces systèmes sont incapables de modéliser avec précision l'élasticité d'une surface, et ils restent particulièrement imprécis pour des modèles anisotropes et non linéaires comme le tissu. Actuellement, les modèles basés sur la méthode des éléments finis du premier ordre sont utilisés dans ce genre de simulation, ils fonctionnent sur des maillages de triangles arbitraires, pas forcément réguliers. Afin de contribuer à la résolution du problème de la divergence des simulations nous avons proposé une exploitation efficace de la méthode d'intégration Euler implicite, cette dernière nous a permis d'une part d'assurer la convergence du modèle et d'autre part d'éviter les calculs additionnels tels que l'utilisation du Jacobien ou la résolution d'un grand système linéaire.

MOTS CLES: Simulation de tissu, système de particule, méthode des éléments finis, méthode d'intégration implicite.

ABSTRACT

Cloth simulation was based on the majority of the work on mass-springs systems. Unfortunately, these systems are unable to accurately model the elasticity of a surface and remain particularly imprecise for anisotropic and non-linear models such as cloth. Currently, models based on first order finite elements method are used in this kind of simulation; they operate on arbitrary triangle meshes, and not necessarily on regular grids. In order to solve the problem of the divergence of the simulations, we proposed an efficient exploitation of the implicit Euler integration method. This method allowed us, on the one hand to ensure the convergence of the model and on the other hand to avoid additional calculations such as the use of the Jacobian or the resolution of a large linear system.

KEYWORDS: Cloth simulation, particle system, finite element method, implicit integration method.

ملخص

ارتكزت محاكاة القماش في غالبية أعمال، على أنظمة كتلة-نابض. للأسف، هذه الأنظمة غير قادرة على تمثيل بدقة مرونة السطح، وأنها غير دقيقة ولا سيما بالنسبة لنماذج متباينة وغير خطية مثل القماش. حالياً يتم استخدام النماذج القائمة على العناصر المحدودة ذات الأساس الأول في هذا النوع من المحاكاة، والتي تعمل على شبكات المثلثات المختلفة، وليس بالضرورة العادية. للمساعدة في حل مشكلة المحاكاة المتباينة اقترحنا طريقة فعالة لاستخدام التكامل الضمني Euler، الطريقة المقترحة مكنتنا أولاً من ضمان التقارب في النموذج وأيضاً تجنب حسابات إضافية مثل استخدام مصفوفة Jacobien أو حل نظام خطي كبير.

الكلمات المفتاحية: محاكاة القماش، نظام الجسيمات، طريقة العناصر المحدودة، طريقة التكامل الضمني.

1 INTRODUCTION

Les systèmes masse-ressorts constituent la technique phare pour la simulation de tissus [1, 2]. Dans ce travail, nous nous intéressons plus particulièrement à l'amélioration de deux des critères essentiels entrant dans ce type de simulations, à savoir le réalisme (fidélité de la simulation) et la vitesse de simulation. Pour aboutir à une modélisation réaliste d'un tissu particulier, il faut extraire les propriétés physiques du tissu et les appliquer au modèle du tissu simulé. Actuellement, les mesures objectives des caractéristiques mécaniques et physiques du tissu sont obtenues par plusieurs technologies, en particulier, par celle du KES-F (Kawabata's Evaluation System for Fabrics). Les mesures de ces machines permettent de modéliser un tissu numérique qui reproduit les courbes de Kawabata du tissu réel.

D'autres méthodes permettent d'estimer les paramètres du tissu en comparant le mouvement dynamique du tissu simulé avec le mouvement d'un tissu réel enregistrés avec une caméra. Néanmoins, il est important d'avoir un temps de calcul raisonnable. La vitesse de la simulation peut être améliorée en employant des modèles physiques et des procédures numériques simples. Les modèles physiques représentent le tissu, soit d'une manière continue, soit d'une manière discrète [3]. Dans le modèle continu, le problème essentiel est la difficulté de déterminer les paramètres mécaniques du modèle. De plus, ils nécessitent un lourd bagage scientifique pour la compréhension des équations physiques. Par contre, les modèles discrets décrivent le tissu comme un ensemble fini de particules. Ceci dans le but de modéliser des phénomènes complexes et globaux à partir de lois comportementales simples et locales agissant sur un ensemble de particules interconnectées. Les systèmes masse-ressort sont un cas particulier des systèmes de particules, ils ont été utilisés dans la majorité des travaux de simulation de tissu et de vêtements [1, 2], car ils sont plus simples à implémenter, présentant néanmoins des insuffisances quant à l'ajustement de leurs paramètres (raideurs des ressorts, masses des points ...).

Les représentations continues simplifiées, telles que les éléments finis du premier ordre, ont récemment été réintroduites pour obtenir un bon compromis entre précision et vitesse de calcul. La condensation des masses (mass lumping) permet aux éléments finis du premier ordre de pouvoir être exprimés comme des systèmes de particules et d'utiliser toutes les techniques d'intégration numérique développées dans ce contexte. Cependant, des adaptations sont nécessaires pour pouvoir gérer correctement le contexte de grandes déformations propre à la simulation des tissus [4].

Une nouvelle approche co-rotationnelle a été proposée et est devenue très répandue, car elle combine la simplicité des calculs en utilisant le tenseur linéaire de Cauchy avec de grandes déformations. Cette méthode a été utilisée avec succès par Etmuss & al. [5] pour simuler des tissus. Elle est essentiellement adaptée pour simuler les matières parfaitement linéaires isotropiques avec de fortes déformations. Le processus de calcul est donc compliqué

par l'ajout de transformations supplémentaires, telles que ces formulations co-rotationnelles.

D'autres méthodes [6] permettent de s'affranchir de ces rotations en utilisant explicitement le calcul du cisaillement, mais malheureusement, ces approximations restent toujours imprécises. Dans le contexte de simulations de grande précision, un modèle de courbure est ajouté en utilisant les schémas définis par [7].

Dans un travail récent, Volino et al. [8] ont présenté un modèle simple et précis même avec de grandes déformations sans avoir besoin de transformation additionnelle comme les formules co-rotationnelles. Ce modèle peut être exprimé comme un système de particules classique (dont les forces des particules sont directement calculées à partir de leurs positions). Ils ont pu obtenir une simulation stable et efficace en utilisant des méthodes d'intégration implicite (Inverse Euler, BDF-2, etc.) en proposant une méthode efficace de calcul du Jacobien. Ils ont mentionné qu'il est possible d'utiliser leur modèle avec l'une des méthodes d'intégration explicite, mais pour assurer la stabilité du modèle de simulation de tissu avec ces méthodes d'intégration il faut utiliser des pas de temps suffisamment petits. Même si les méthodes d'intégration implicite assurent la stabilité du modèle, mais elle nécessite néanmoins des calculs additionnels.

Dans ce travail, nous avons utilisé le modèle basé sur la mécanique des milieux continus de Volino et al. [8] pour la simulation de tissu. Nous avons modélisé le tissu du vêtement par un maillage triangulaire irrégulier en utilisant la méthode des éléments finis du premier ordre pour résoudre l'équation du mouvement. Nous avons essayé de rendre le cadre plus réaliste en ajoutant des forces externes telles que le vent, la gravité et le frottement.

Notre contribution concerne donc la résolution du problème de la divergence du modèle au cours de la simulation, nous avons commencé par l'utilisation des méthodes d'intégration explicite (Euler et Euler modifiée) du fait de leur simplicité d'implémentation. Ces méthodes n'ont pas pu nous donner des résultats sauf dans le cas où on corrige les positions des particules avec la méthode de correction de positions (voir section 3) que nous avons proposée dans [9]. Nous avons essayé donc d'exploiter une méthode implicite, pour cela nous avons implémenté la méthode d'Euler implicite. Afin d'éviter les calculs additionnels tels que la résolution d'un grand système linéaire ou l'utilisation du Jacobien, nous avons proposé une méthode d'exploitation de la méthode d'intégration implicite, elle consiste à calculer dans un premier temps les forces de toutes les particules ensuite faire le calcul des vitesses et positions des particules.

En respectant cet ordre de calcul nous pouvons calculer la vitesse de chaque particule en fonction de sa force au temps $t+h$ et non pas au temps t , ce qui est le principe des méthodes implicites.

1.1 Vue d'ensemble

Dans cette section, nous donnons une vue d'ensemble sur la méthode de simulation de tissu. Ce dernier est simulé par un système de particules, qui est représenté par un maillage triangulaire irrégulier. Chaque particule a une masse m , une position P et une vitesse V .

A chaque étape de la simulation, nous effectuons les phases suivantes:

- Calculer les forces appliquées à chaque particule (voir la section 2.1)
- Déterminer la nouvelle vitesse ainsi que la nouvelle position de chaque particule (voir la section 2.2).
- Effectuer la correction des positions (voir section 3) afin d'améliorer l'animation.
- Gérer la mise à jour des positions s'il y a une éventuelle collision du tissu avec une quelconque primitive d'une scène plus réaliste (voir la section 2.3).

2 SIMULATION DU TISSU PAR MODELE PHYSIQUE

2.1 Le modèle de tissu

Le modèle présenté ici est un croisement entre un modèle basé sur la mécanique des milieux continus et un système de particules. Nous avons utilisé un maillage triangulaire irrégulier pour présenter le tissu. Pour cela, nous avons choisi la méthode des éléments finis du premier ordre. Cette méthode nous a permis de résoudre l'équation du mouvement et ceci en nous basant sur le modèle de Pascal Volino présenté dans [8]. Dans ce modèle, il est a été démontré que l'utilisation d'une représentation continue simplifiée comme la technique des éléments finis du premier ordre, permet d'obtenir un bon compromis entre la précision et la vitesse de calcul. Ce modèle consiste donc à représenter le tissu par un système de particule, dont chaque triangle du maillage représente un élément. Chaque élément est traité séparément pour réaliser ensuite un assemblage qui satisfait l'équilibre des forces en chaque sommet. En effet, ce modèle permet d'exprimer explicitement et précisément l'état de contrainte et de déformation dans la surface d'un triangle de tissu en fonction des positions et des forces de ses sommets.

Le but est de calculer l'état de déformation d'un triangle directement à partir des positions de leur sommet. Chaque élément (triangle) est défini par les coordonnées paramétriques 2D (u_a, v_a) , (u_b, v_b) , (u_c, v_c) de ses sommets et par les coordonnées 3D (les positions de ses sommets) P_a, P_b et P_c après sa déformation. Les vecteurs U et V dans la direction de trame (*wefi*) et chaîne (*Warp*) sont exprimés en coordonnées 3D, ils seront utilisés pour mesurer l'état de déformation d'un élément.

Au début, dans une étape de prétraitement on calcule les

facteurs de distribution des sommets des triangles comme suit [8]:

$$\begin{cases} r_{ua} = d^{-1}(v_b - v_c) & r_{va} = d^{-1}(u_c - u_b) \\ r_{ub} = d^{-1}(v_c - v_a) & r_{vb} = d^{-1}(u_a - u_c) \\ r_{uc} = d^{-1}(v_a - v_b) & r_{vc} = d^{-1}(u_b - u_a) \end{cases} \quad (1)$$

$$d = u_a(v_b - v_c) + u_b(v_c - v_a) + u_c(v_a - v_b) \quad (2)$$

Durant la simulation, on doit calculer à chaque itération les forces appliquées aux particules pour déterminer leurs vitesses et positions correspondantes. Pour cela et selon le travail proposé dans [8] on calcule pour chaque élément du tissu les caractéristiques :

- les vecteurs U et V par l'équation suivante :

$$U = \sum_{i \in (a,b,c)} r_{ui} P_i \quad V = \sum_{i \in (a,b,c)} r_{vi} P_i \quad (3)$$

Dans ce cas, chaque vecteur U et V correspond à la somme des positions courante des sommets du triangle. Ces positions sont pondérées par les facteurs de distribution calculés à l'aide de la formule (1) donnée précédemment:

- les valeurs de déformation ε_{uu} , ε_{vv} , ε_{uv} par l'équation (4) suivante:

$$\begin{cases} \varepsilon_{uu} = \frac{1}{2}(U^T U - 1) \\ \varepsilon_{vv} = \frac{1}{2}(V^T V - 1) \\ \varepsilon_{uv} = \frac{1}{2}(U^T V + V^T U) \end{cases} \quad (4)$$

- Les contraintes σ_{uu} , σ_{vv} , σ_{uv} par l'équation (5) ci-dessous en utilisant le comportement mécanique du matériel ayant seulement la propriété d'élasticité.

$$\begin{bmatrix} \sigma_{uu} \\ \sigma_{vv} \\ \sigma_{uv} \end{bmatrix} = E \begin{bmatrix} \varepsilon_{uu} \\ \varepsilon_{vv} \\ \varepsilon_{uv} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Dans ce cas, la matrice symétrique E représente la rigidité élastique du matériel.

À partir des équations précédentes, on détermine les forces des sommets du triangle courant F_a , F_b et F_c selon l'équation suivante :

$$F_j = -\frac{dI}{2}(\sigma_{uu}(r_{uj}U) + \sigma_{vv}(r_{vj}V) + \sigma_{uv}(r_{uj}V + r_{vj}U)) \quad (6)$$

Une simulation plus réaliste du mouvement du vêtement nécessite l'ajout explicite de paramètres tels que : le vent, la gravité et le frottement. Ces paramètres sont modélisés par des forces externes notées respectivement F_v , F_{gr} et F_{fr} .

La gravitation F_{gr} est une force simple à représenter, dirigée vers le bas et proportionnelle à la masse. La force de frottement F_{fr} est souvent introduite pour donner une certaine stabilité à la simulation. Elle agit directement en sens opposé sur la vitesse de particule par l'équation suivante :

$$\vec{F}_{fr} = -C\vec{V}_i \quad (7)$$

Où C est le coefficient de viscosité du milieu.

L'effet du vent sur le tissu est calculé pour chaque triangle individuellement. La force du vent F_v appliquée à chaque particule sera donc la somme de la force du vent appliquée à ses triangles voisins. Cette force doit être calculée à chaque itération par :

$$F_v = N * (\|N\| \cdot V_v) \quad (8)$$

Où N est la normale du triangle ayant la norme $\|N\|$ et V_v : la vitesse du vent.

L'algorithme suivant résume les étapes précédentes:

Algorithme Calcul_force

- Prétraitement
 - Pour chaque élément (triangle), calculer et sauvegarder les facteurs de distribution des sommets en utilisant la formule (1) ;
- Traitement
 - Pour chaque élément, calculer les vecteurs U et V à partir de P_a, P_b, P_c en utilisant la formule (3) ;
 - Calculer les valeurs des déformations $\varepsilon_{uu}, \varepsilon_{vv}, \varepsilon_{uv}$ en utilisant la formule (4) ;
 - Calculer les valeurs des contraintes $\sigma_{uu}, \sigma_{vv}, \sigma_{uv}$ en utilisant la formule (5) ;
 - Calculer les forces des particules F_a, F_b et F_c en utilisant la formule (6) ;
 - Ajouter aux forces des particules les forces externes du vent, de la gravité et du frottement, notées respectivement F_v, F_{gr} et F_{fr} ;

2.2 Méthode d'intégration

De la formulation du modèle mécanique du système, il résulte un système d'équations différentielles régissant l'évolution de la géométrie en fonction du temps. Il peut être intégré par des méthodes d'intégration explicites ou implicites

Les méthodes d'intégration explicites sont les méthodes les plus simples pour la résolution des systèmes différentiels ordinaires du premier ordre. Elles considèrent la prédiction du futur état du système directement à partir de la valeur des dérivés. Elles sont très faciles à mettre en œuvre et plus rapide pour atteindre une précision donnée. Cela est particulièrement vrai pour les méthodes d'ordre élevé, qui offrent une très grande précision si le pas de temps est assez petit, mais elles divergent brusquement si le pas du temps dépasse un certain seuil. C'est la raison pour laquelle un système efficace de contrôle du pas de temps est essentiel pour la mise en œuvre de ces méthodes [6].

La méthode numérique la plus simple et la plus ancienne est la méthode d'Euler explicite. Elle calcul l'état (vitesse et position) suivant du tissu au temps $t+h$ en évaluant les forces au temps t . Formellement, la méthode d'Euler est décrite par les équations suivantes :

$$\begin{cases} v(t+h) = v(t) + \frac{h}{m} F(t) \\ p(t+h) = p(t) + h * v(t) \end{cases} \quad (9)$$

En implémentant cette méthode d'intégration, nous avons remarqué que le système diverge dès les premières itérations, il fallait utiliser la méthode de correction de positions que nous avons proposée (voir section 3) pour assurer une stabilité de la simulation.

Une variante de la méthode d'Euler permet d'obtenir une plus grande stabilité. La seule modification à effectuer est que:

$$p(t+h) = p(t) + h * v(t)$$

Deviant:

$$p(t+h) = p(t) + h * v(t+h) \quad (10)$$

L'astuce consiste simplement à utiliser la vitesse exprimée au temps $t+h$ et non pas au temps t .

Après l'implémentation de la méthode d'Euler modifiée, nous avons constaté qu'elle nécessite également une correction des positions de particules pour assurer la convergence.

Afin de contourner le problème de l'instabilité, des méthodes d'intégration implicites sont utilisées. Elles sont utilisées pour la première fois dans le domaine de la simulation de tissu par [10]. La méthode de Backward Euler est l'implémentation de base des méthodes implicites. Contrairement aux méthodes d'intégration explicites, cette méthode utilise les forces au temps t+h. Elle effectue le calcul de l'état du système en utilisant la dérivée prédite pour le prochain pas du temps et non pas au pas du temps courant.

Formellement, la méthode d'Euler implicite (Backward Euler) est décrite par les équations suivantes:

$$\begin{cases} v(t+h) = v(t) + \frac{h}{m} F(t+h) \\ p(t+h) = p(t) + h * v(t+h) \end{cases} \quad (11)$$

Outre la méthode d'Euler implicite, d'autres méthodes implicites d'ordre supérieur plus précises existent, telles que la méthode de point milieu inverse, qui est malgré de sa simplicité elle présente quelques problèmes d'instabilité. Une solution simple consiste à faire une interpolation entre les équations des méthodes d'Euler et de point milieu, tel que proposé dans [6].

D'autres travaux ont choisi différentes méthodes implicites, mais quelle que soit la variation choisie, la difficulté majeure dans l'utilisation de méthodes d'intégration implicites est qu'elles impliquent la résolution d'un grand système d'équations linéaires pour chaque itération. Ceci étant le problème essentiel des méthodes d'intégration implicites. Par conséquent, diverses approches ont été proposées pour résoudre ce problème [6, 8, 10, 11, 12]. De toute façon, dans le cadre de simulations non linéaires telles que le tissu, quand une bonne précision et une stabilité sont nécessaires, il faut faire recours au Jacobien correspondant à l'état actuel, Volino et al. [8] ont proposé une méthode de calcul simplifiée du Jacobien. Mais l'évaluation du Jacobien reste toujours très compliquée en terme de compréhension et de calcul de sa formule.

Dans ce travail nous avons essayé de tirer profit des méthodes implicites, pour cela nous avons implémenté la méthode d'Euler implicite et ceci sans la résolution d'un grand système linéaire ni l'utilisation du Jacobien. Notre contribution consiste à calculer d'abord les forces de toutes les particules ensuite faire le calcul des vitesses et positions des particules.

De cette manière, nous pouvons calculer la vitesse de chaque particule en fonction de sa force au temps t+h et non pas au temps t, ce qui est le principe des méthodes implicites.

Algorithme calcul_vitesse_position

/* Dans cet algorithme on utilise le pas du temps h, avec F_i^{t+h} représente la somme des forces appliquées à la particule i à l'itération t+h et V_i^t et V_i^{t+h} respectivement P_i^t et P_i^{t+h} qui représentent les vitesses resp. les positions de la particule i aux itérations t et t+h. */

Début

Calcul_force ; //Calcul des forces de toutes les particules.

Pour (chaque particule i) faire

$$\begin{aligned} V_i^{t+h} &= V_i^t + h \frac{F_i^{t+h}}{2 * m_i} \\ P_i^{t+h} &= P_i^t + h V_i^{t+h} \end{aligned}$$

Fin pour

Fin

Nous avons pu obtenir avec cette méthode des résultats stables dans le cas d'animation des pièces de tissu de faible résolution (avec un nombre réduit de particules) mais une fois la résolution augmente il devient nécessaire de corriger les positions des particules pour assurer la convergence.

2.3 La gestion de collision

Dans ce travail, nous avons essayé de gérer le problème de collision du tissu avec des primitives simple comme la sphère et le cylindre. Le principe de la gestion de collision avec ces objets est dans ce cas plus simple. En effet, à chaque itération, on teste si la particule est à l'intérieur de l'objet. Dans le cas de la sphère, par exemple, on teste si la distance entre la position de la particule et son centre est inférieure à son rayon. Si c'est le cas alors il y a collision et il faut donc déplacer la particule au plus proche point dans la surface de la sphère (voir l'algorithme suivant).

Algorithme gestion_collision

Début

Pour chaque particule i faire

Calculer la distance (d) entre la particule et le centre de la sphère

Si $d < R$ alors // R : rayon de la sphère

$$V = P_i - C$$

// P_i : position de la particule

// C : centre de la sphère

$$V1 = \text{Normaliser}(V)$$

$$V2 = V1 * R$$

$$P_i = P_i + V2 \quad // \text{ on projette la particule sur la surface de}$$

la sphère

Fin si

Fin pour

Fin

3 CORRECTION DES POSITIONS

Au cours de la simulation, nous avons remarqué que les valeurs des positions augmentent rapidement ce qui entraîne toujours l'augmentation des forces et des vitesses. Afin de résoudre ce problème, nous avons proposé une méthode de correction de positions des particules, et ceci en remplaçant la position de chaque particule par la moyenne entre ses deux positions successives selon l'algorithme suivant :

Algorithme Correction de position

Pour (chaque particule) **faire**

Pour(nb=1 à n_it) **faire**//n_it: nombre d'itérations

// Calculer la différence diff entre les positions P à l'instant t et t+1 de la particule:

$$\text{diff} = P^{t+1} - P^t ;$$

// Calculer la distance dist entre les positions P à l'instant t et t+1 de la particule :

$$\text{dist} = \|\text{diff}\| ;$$

Si (dist>seuil) **alors**// le seuil est déterminé après plusieurs tests

//Corriger la position courante:

$$P^{t+1} = P^t + \text{diff}/2;$$

Finsi

Fin pour

Si (dist>seuil) **alors**

//Corriger la vitesse selon le pas h de temps:

$$V^{t+1} = (P^{t+1} - P^t)/h;$$

Finsi

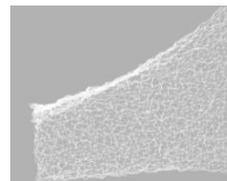
Fin pour

Cette méthode nous a permis de réduire le taux d'erreur du déplacement (voir section 4). Et par conséquent, elle a pu assurer la convergence de la simulation.

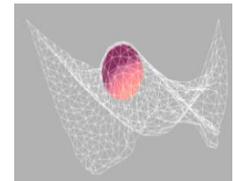
4 RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

Dans cette section nous présentons les résultats de notre méthode d'animation de tissu. Les simulations sont exécutées sur un processeur Intel Core (TM) I5 CPU 680 @ 3.60 GHz, et 4 Go de RAM. Les modèles de tissus que nous

avons utilisés sont représentés par un maillage triangulaire irrégulier généré par Fashionizer (qui est un outil de conception de vêtements virtuels, développé au Laboratoire MIRALab à l'université de Genève). Dans nos tests expérimentaux, nous avons utilisé différentes pièces de tissus ayant des tailles et des résolutions (nombre de triangles) différentes. Les résultats montrent que le temps d'exécution augmente d'une façon exponentielle avec l'augmentation de la résolution du maillage (voir figures 1, 2 et 3).

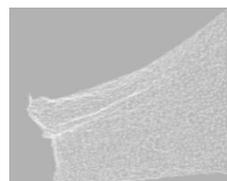


Tissu 1 : 4847 triangles
T=58 s et 20 ms

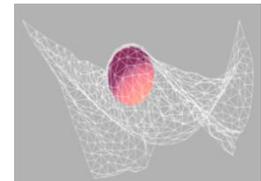


Tissu2 : 961 triangles
T=11 s et 710 ms

Figure 01 : Animation de pièces de tissus (Méthode d'Euler, 2000 itérations)

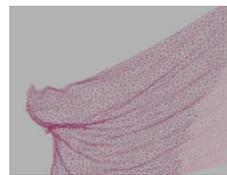


Tissu1:4847 triangles
T=57 s et 460 ms

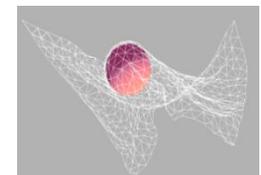


Tissu2 : 961 triangles
T=11 s et 990 ms

Figure 02: Animation de pièces de tissus (Méthode d'Euler modifiée, 2000 itérations)



Tissu1 : 4847 triangles
T=58 s et 715 ms

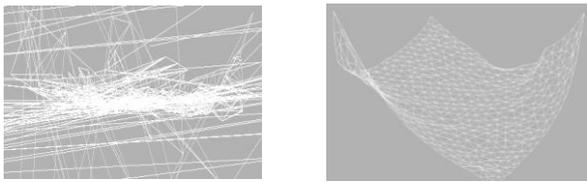


Tissu2 : 961 triangles
T=12 s et 144 ms

Figure 03 : Animation de pièces de tissus (Méthode d'Euler implicite, 2000 itérations)

Les figures ci-dessus nous montrent des animations de pièces de tissus avec des méthodes d'intégration différentes. Nous avons remarqué que le mouvement avec les méthodes d'Euler explicite est un peu rigide, tandis qu'avec la méthode implicite l'animation est plus réaliste.

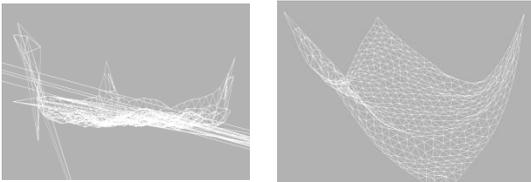
Les exemples suivants (figure 4, 5 et 6) nous montrent l'utilité de la méthode de correction des positions des particules. Nous pouvons remarquer la divergence du modèle: dès les premières itérations (méthodes explicites) et après quelque itération avec la méthode implicite.



Sans correction de positions
32 itérations

Avec correction de position
2000 itérations

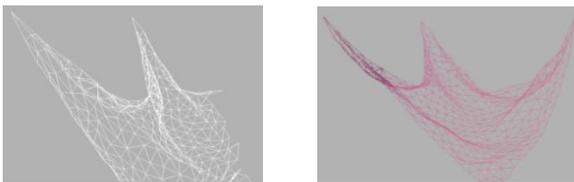
Figure 04 : Animation d'une pièce de tissu de 990 triangles (Méthode d'Euler)



Sans correction de positions
32 itérations

Avec correction de position
2000 itérations

Figure 05 : Animation d'une pièce de tissu de 990 triangles (Méthode d'Euler modifiée)

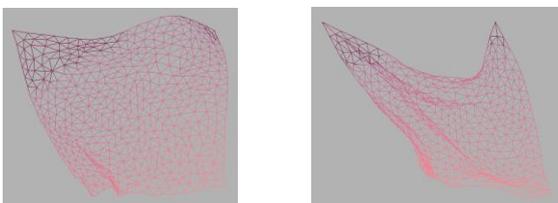


Sans correction de positions
115 itérations

Avec correction de position
2000 itérations

Figure 06 : Animation d'une pièce de tissu de 990 triangles (Méthode d'Euler implicite)

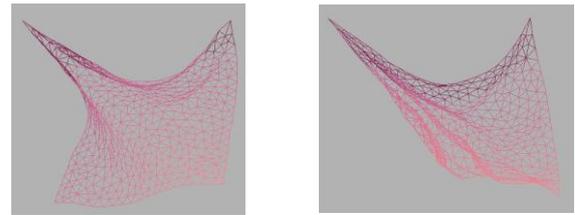
Nous illustrons dans les exemples ci-dessous l'animation de pièces de tissu de différents types de tissu (coton, lin et soie). Dans les figures 7, 8 et 9, nous montrons que le mouvement du tissu dépend de son type c.-à-d. les propriétés physiques du tissu.



Méthode d'Euler modifiée

Méthode d'Euler implicite

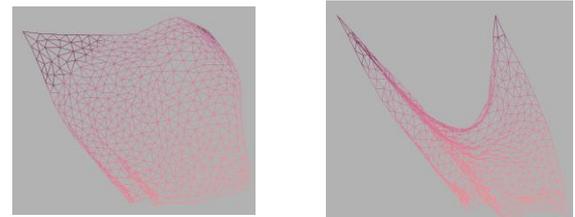
Figure 07 : Animation d'une pièce de tissu en coton de 990 triangles



Méthode d'Euler modifiée

Méthode d'Euler implicite

Figure 08 : Animation d'une pièce de tissu en lin de 990 triangles



Méthode d'Euler modifiée

Méthode d'Euler implicite

Figure 09 : Animation d'une pièce de tissu en soie de 990 triangles

4.1 Etude comparative

Volino et al. ont mentionné dans [8] que l'utilisation des méthodes implicite dans la résolution des équations du mouvement peut donner des résultats satisfaisants pour cela ils ont proposé une méthode de calcul du Jacobien. Cette méthode leur permet d'avoir une simulation stable (un exemple est illustré dans figure 10). Mais puisque l'évaluation du Jacobien est un peu compliquée et nécessite toujours un calcul additionnel. Nous avons proposé une méthode implicite efficace sans aucun calcul supplémentaire. Un exemple d'animation stable est illustré dans la figure 11.



Figure 10 : Un calcul précis du Jacobien est nécessaire pour avoir une simulation stable [8]

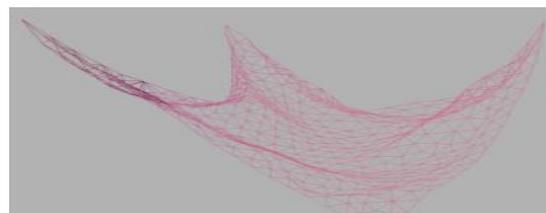


Figure 11 : Tissu suspendu en 3 points (la simulation reste stable)

4.2 Discussion des résultats

D'après les résultats obtenus dans cette étude expérimentale nous pouvons dire que :

- Plus la résolution de maillage augmente plus le temps d'exécution augmente.
- L'utilisation des méthodes d'intégration explicite ou implicite nécessite la correction de positions des particules pour obtenir des simulations stables. Mais avec les méthodes explicites, il faut appliquer la correction de position avec plus d'itérations qu'avec la méthode implicite.
- Avec la méthode d'intégration implicite, nous avons pu obtenir des mouvements de tissu plus réaliste.
- La correction de positions nous a permis d'obtenir des résultats plus acceptables avec plus d'itérations.
- Le mouvement de tissu dépend des propriétés physiques de tissu.
- Il est difficile de fixer les paramètres des forces externes, car chaque pièce de tissu nécessite des paramètres différents (selon sa taille, sa forme, sa position et son type).

5 CONCLUSION

Dans ce travail, nous avons présenté notre modèle d'animation de tissu basé sur la méthode des éléments finis du premier ordre. Nous avons exprimé ce modèle par un système de particules simple.

Néanmoins, le problème de la divergence de la simulation reste posé. Afin de contribuer à la résolution du problème de la divergence du modèle au cours de la simulation, nous avons proposé une implémentation efficace de la méthode d'Euler implicite. La méthode proposée nous a permis d'éviter les calculs additionnels tels que la résolution d'un grand système linéaire ou l'utilisation du Jacobien.

Néanmoins, nous envisageons de prendre en considération des améliorations telles que :

- L'ajout d'un module pour le traitement de collision avec le corps humain qui peut augmenter largement le taux de réalisme dans le cas de la simulation de vêtement.
- La comparaison entre les résultats obtenus avec des mouvements de tissus réels pris par une caméra peut renforcer l'évaluation du système.
- Une comparaison entre le modèle utilisé et le système masse-ressort peut montrer les avantages de l'utilisation de la méthode des éléments finis dans la simulation de tissu.

REFERENCES

- [1] N. Magnenat-Thalmann, P. Volino. From early draping to haute couture models: 20 years of research. *The Visual Computer*, n° 21: pp. 506-519, 2005.
- [2] K. Choi, H. Ko. Research problems in clothing simulation. *Computer Aided Design*, Vol. 37, n°6: pp. 585-592, 2005.
- [3] H. Charfi. Amélioration de la modélisation et de la simulation des vêtements en 3D, Thèse de doctorat de l'université de Paris 6, 2006.
- [4] M-P. Cani, C. Larboulette, N. Magnenat-Thalmann et P. Volino. Les Techniques d'habillage : Peau, Vêtements Et Chevelures, Le traité de la Réalité Virtuelle. Volume 5. Les humains virtuels, Chapitre 8 pages 161–182. Presse de l'Ecole des Mines de Paris, 2009.
- [5] O.Etzmuss, M.Keckeisen, W.Strasser: A fast finite element solution for cloth modeling. In *Proceedings of the 11th Pacific Conference on Computer Graphics and Applications (Washington, DC, USA)*, PG '03, IEEE Computer Society, pp. 244–, 2003.
- [6] P. Volino and N. Magnenat-Thalmann. Implicit midpoint integration and adaptive damping for efficient cloth simulation. *Computer Animation and Virtual Worlds*, 16(3-4): pp. 163-175, 2005.
- [7] P. Volino and N. Magnenat-Thalmann. Simple linear bending stiffness in particle systems. In *Proceedings of the Eurographics/ACM SIGGRAPH Symposium on Computer Animation*, Vienna, Austria, 2006.
- [8] P. Volino and N. Magnenat-Thalmann, F.Faure. A simple approach to nonlinear tensile stiffness for accurate cloth simulation. *ACM Trans. Graph.* Vol. 28, n°4, pp. 105:1–105:16, Sept. 2009.
- [9] S. Benameur, N. Djedi. Mutli-resolution Cloth Simulation based on Particle Position Correction, *International Journal of Computer Applications (IJCA)*. Vol. 143, N°6, pp. 29-36, June 2016.
- [10] D. Baraff, A. Witkin. Large steps in cloth simulation, *SIGGRAPH Computer Graphics*, pp. 43-54. 1998.
- [11] M. Desbrun, P. Schröder, and A. Barr. Interactive animation of structured deformable objects. *Proc. of Graphics Interface'99*, 1999.
- [12] Y-M.Kang, J-H.Choi, H-G.Cho, D-H.Lee and C-J.Park. Interactive animation of mass-spring based flexible objects, in *Proc. Of WCSG 2000*, pp. 322-329, Plzen, Czech, 2000.