Simulation visuelle de croissance d'écorces

Sylvain Lefebvre **Fabrice Neyret**
Sylvain.Lefebvre@imag.fr Fabrice.Neyret@imag.fr

iMAGIS[†]-GRAVIR / IMAG-INRIA

Résumé : Afin de pouvoir atteindre le réalisme exigé par les applications actuelles, la synthèse d'images doit être dotée d'outils facilitant la modélisation des scènes naturelles. C'est dans cette optique que nous proposons un modèle de croissance de déchirures appliqué aux écorces. Après une étude de cas qui nous a permis de caractériser le phénomène à représenter, nous utilisons un modèle de matériau simple dont les propriétés physiques en rupture sont connues, pour simuler le comportement complexe d'une écorce. La matière est ainsi représentée par un ensemble d'éléments parallèles capables de se fracturer et de laisser apparaître le substrat. La croissance est automatique une fois les paramètres saisis par l'utilisateur, mais peut aussi être influencée en incisant la surface en cours de simulation. Les déchirures obtenues sont comparables à celles observées sur des écorces réelles. Il est également possible d'en obtenir différentes variétés.

Mots-clés : fractures, déchirures, écorce, croissance, scènes naturelles

1 Introduction

Lorsque l'on désire représenter des scènes naturelles en synthèse d'images, il faut faire face à deux difficultés majeures. Non seulement leur taille, en terme de représentation géométrique, dépasse très largement les capacités des ordinateurs d'aujourd'hui, mais de plus il est long et difficile, pour un artiste, de les modéliser fidèlement tout en conservant une bonne complexité apparente. D'autant plus que les aspects des surfaces naturelles résultent de leur évolution dans le temps, et sont fortement influencés par l'environnement. S'il est donc essentiel de pouvoir réduire la complexité géométrique des scènes naturelles, il faut également fournir aux artistes des outils qui prennent en charge une partie de la réalisation, notamment au niveau des détails.

Dans cette optique, un certain nombre d'études se sont attachées à produire des modèles de croissance d'arbres très réalistes. C'est ce que permet par exemple le logiciel AMAP [dREF+88] du Cirad [Cir, Bio]. De tels algorithmes considèrent généralement que la limite entre la géométrie et le détail se situe au niveau de l'écorce. Celle-ci est donc représentée grâce à une texture, c'est à dire une image appliquée sur le tronc. Néanmoins, ces outils se restreignent pour le moment au placage de la photographie d'un échantillon réel d'écorce. Or les algorithmes de simulation de croissance tiennent compte d'un grand nombre de paramètres comme l'hydrométrie et l'ensoleillement [SSBD01], il est donc important de ne pas briser le réalisme ainsi obtenu par une mauvaise représentation des détails de l'habillage, notamment dans le cas où le point de vue est proche. De plus, disposer d'un véritable modèle de croissance d'écorce permettrait de visualiser l'évolution de celle-ci au cours du vieillissement de l'arbre. L'écorce générée serait ainsi influencée par les mêmes conditions extérieures que l'arbre qui la porte, et lui correspondrait parfaitement. Il serait également possible d'obtenir facilement une grande variété d'individus au sein d'une même espèce.

Notre but est d'obtenir un modèle de croissance d'écorce, capable d'en créer une représentation visuelle, voire géométrique. De plus, nous nous attacherons à offrir un bon contrôle à l'artiste sur l'aspect final du résultat, ce qui implique de pouvoir influencer interactivement la croissance. Comme nous le verrons par la suite, la complexité et la méconnaissance des propriétés physiques précises d'une écorce, mais également l'objectif de maintenir une interactivité entre l'artiste et l'outil, exclu le recours à des résolutions numériques de modèles physiques fins tels que les éléments finis. Ceux-ci sont en effet gourmands en temps de calcul et plus destinés à obtenir des résultats quantitatifs que qualitatifs.

Parmi l'infinie variété d'écorces que l'on peut observer dans la nature, nous nous sommes plus particulièrement intéressés aux écorces présentant de larges déchirures. En effet, ce phénomène est très présent dans la nature et assez peu étudié jusqu'à aujourd'hui. La figure 1 présente quelques écorces de ce type. Notre approche est à la fois basée sur une étude de cas, qui nous a permis

[*] *iMAGIS* est un projet commun CNRS/INRIA/UJF/INPG.
iMAGIS, INRIA Rhône-Alpes - ZIRST, 655 avenue de l'Europe, 38330 Montbonnot Saint Martin, France.

d'extraire des lois de comportement des déchirures, et sur les modèles physique de rupture des matériaux. Nous proposons un simulateur de fracturation d'écorces en cours de croissance dont le coût de calcul réduit autorise une interactivité avec l'utilisateur. Le résultat obtenu peut-être mis sous forme texturelle voire sous forme géométrique afin d'obtenir une écorce en relief.

Cet article est structuré comme suit: nous ferons tout d'abord un rapide tour d'horizon des travaux en synthèse d'images qui traitent de sujets proches puis en 2.2 nous aborderons les principes physiques à la base de la rupture des matériaux. Enfin, nous présenterons en 3 notre modèle de croissance et les résultats obtenus. Un dernier chapitre mettra en évidence les principales limitations de ce premier modèle et les voies de recherche futures.

FIG. 1 – *Différentes espèces présentant des déchirures [Vau93].*

2 Travaux antérieurs

2.1 Synthèse d'images

Nous nous intéressons essentiellement à l'habillage des arbres. Dans ce domaine, il est possible de distinguer deux grandes catégories: l'habillage statique, basé sur des textures éventuellement procédurales, et l'habillage par simulation.

Dans le cas de l'habillage du tronc par une texture, la difficulté majeure concerne la paramétrisation du tronc de l'arbre. Celle-ci définit de quelle manière la texture va être appliquée sur la surface. Or les embranchements, mais aussi les irrégularités dans le diamètre et la courbure du tronc rendent difficile la définition d'une paramétrisation satisfaisante. Bloomental [Blo85], pour construire les embranchements, utilise des courbes splines sur lesquelles est construite une paramétrisation qui, si elle provoque des distortions, n'introduit pas de discontinuité dans l'apparence de l'écorce. J. Hart et B. Baker [HB96] proposent de créer une paramétrisation du tronc en représentant celui-ci par un mélange de cônes implicites. Dans leur article, K. Maritaud *et al.* [MDG00] utilisent des masques de mélange pour appliquer une image d'écorce réelle sur le tronc, sans discontinuités. Enfin, dans le long métrage d'animation “A bugs Life”, les studios Pixar [Stu99] ont utilisé pour les gros plans sur l'arbre deux paramétrisations différentes du tronc. Celles-ci sont mélangées entre elles, ce qui permet de ne conserver les propriétés intéressantes de l'une que sur les zones où elle se comporte mieux que la seconde.

Parmi les travaux orientés vers la croissance d'écorces, P. Federl et P. Prusinkiewicz [PP96] ont proposé une méthode de création de textures craquelées basée sur un réseau masse ressort attaché au tronc. Les ressorts peuvent se déformer sans contrainte en dessous d'un seuil d'élongation. Au dessus de ce seuil, une probabilité de rupture détermine si le ressort doit se briser ou non. K. Hirota *et al.* [HKK98] ont étendu leurs précédents travaux concernant les fissures [HTK98] à un modèle de croissance d'écorce. Celle-ci est représentée par un réseau masses-ressorts à plusieurs couches. Ces deux approches permettent de simuler les fractures de petites échelles, mais pas de larges ouvertures. D'autre part, il est nécessaire d'avoir un grand nombre de ressorts afin d'obtenir des résultats intéressants. A noter que [HKK98] propose une méthode pour traiter les embranchements.

D'autres travaux effectués en synthèse d'image dans le cadre de la simulation de la rupture des matériaux ont un rapport direct avec notre sujet. L'ensemble de ces méthodes se concentrent sur le fait de briser des objets déformables ou solides. Ceci ne concerne qu'une partie de notre problème, dans la mesure où nous désirons simuler la rupture de la croûte superficielle d'un arbre, puis représenter les phénomènes qui interviennent lors de l'élargissement des ouvertures ainsi crées. Ces travaux sont néanmoins d'intérêt pour ce qui concerne la simulation de l'apparition des déchirures. Une des premières représentations de fractures a été introduite par Terzopoulos *et al.* [TF88] en même temps qu'un modèle continu d'objets déformables élastiques, plastiques et visco-élastiques. Les fractures sont représentés par des discontinuités dans le modèle. Norton *et al.* [NTB+91] ont proposé un modèle permettant de briser des objets tridimensionnels. Les objets sont découpés en cubes reliés entre eux par des ressorts. Cette méthode induit un fort aliasing dans les fractures et nécessite donc de découper les objets en de nombreux petits éléments. En 1999, O'Brien *et al.* [OH99] ont utilisé les éléments finis pour déterminer les points d'initiation des fractures et leur direction de propagation. Si la méthode présente des résultats visuellement excellents, elle souffre d'un temps de calcul très élevé dû à la fois à la nécessité de remailler l'objet lors des fractures, mais aussi aux méthodes de résolution employées qui nécessitent un pas de temps fin. Dans leur article Smith, Witkin et Baraff [SWB00] proposent une technique de fracture basée sur des contraintes de distance. Ceci permet de représenter l'objet comme un solide et donc d'éviter les problèmes dûs aux méthodes d'intégration. Néanmoins, il est nécessaire de tétrahédriser l'objet et les fractures suivent les arêtes du maillage. Enfin, Muller *et al.* [MMDJ01] ont présenté une technique permettant de briser des objets en temps réel. Leur approche est basée sur des éléments finis dont la résolution n'intervient que lors des impacts afin de créer les fractures. Le reste du temps les objets sont considérés comme solides. Les fractures devant suivre les plans des tétrahèdres, les formes obtenues sont assez grossières et perdent en réalisme.

2.2 Eléments de physique

Une rupture apparaît dans un matériau lorsque les contraintes internes dépassent un seuil de résistance. Le lien entre atomes est alors brisé et la rupture s'initie. Celle-ci se propage tant que le système n'est pas revenu dans un état énergétique stable, à l'équilibre. Les fractures se propagent orthogonalement à la direction d'effort maximal. Les imperfections du matériau ont une forte influence sur son comportement en rupture. Il faut distinguer deux modes de rupture:

- **rupture fragile**: ce type de rupture nécessite peu d'énergie et se propage donc rapidement dans le matériau. Elle résulte généralement en une brisure rapide de l'objet.
- **rupture ductile**: la rupture ductile se distingue de la rupture fragile par la présence d'une zone de déformation plastique aux points de propagation. L'énergie est dissipée en déformation plastique et la fracture est donc moins brutale.

Il existe un lien entre les ruptures fragiles et ductiles. En effet, un objet qui présente habituellement des fractures ductiles peut néanmoins former des fractures fragiles lorsqu'il est soumis à des efforts brefs ou intenses. La rupture fragile est modélisée par la mécanique des fractures élastiques [Bro91, And95, TF88].

Il existe deux approches distinctes au problème de la rupture des matériaux élastiques. L'approche d'Inglis [Ing13], basée sur les efforts, permet d'évaluer l'intensité des contraintes aux extrémités d'une fracture. L'effort dépend directement du rapport entre la longueur et la largeur. L'approche de Griffith [Gri20] définit la condition limite de fracture comme l'instant où l'agrandissement de la fissure a lieu sous des conditions d'équilibre, sans changement brutal de l'énergie totale du système. Ainsi, pour qu'une fissure dans une plaque soumise à une contrainte s'agrandisse, il doit y avoir assez d'énergie potentielle emmagasinée pour compenser la création des nouvelles surfaces.

3 Modélisation d'écorces

Dans cette section, nous décrivons notre modèle "fondamental" de génération d'écorces. L'habillage visuel fera l'objet de la section 4. Une écorce est un matériau extrêmement complexe (cf. [Vau93, MS]). Il peut-être fibreux, présenter une multitude de couches plus ou moins liées entre elles, et ses propriétés mécaniques peuvent grandement varier le long du tronc de l'arbre. Il nous a donc semblé vain de vouloir modéliser fidelèment sa structure. Nous avons donc préféré une approche phénoménologique: à partir d'observations d'écorces, nous avons extrait un certain nombre de structures et comportements. Par la suite, nous allons simuler un matériau ayant des propriétés mécaniques simples mais dont le comportement global correspondra à nos observations.

- présence de larges déchirures de formes similaires résultant de la croissance de l'arbre;
- conservation de la surface d'origine;
- influence entre déchirures;

– apparition de lamelles entre déchirures proches;
– fracturation de la croûte à différentes échelles (refracture à l'intérieur des déchirures déja ouvertes);
– différents modes d'ouverture (manière dont la matière se comporte dans la déchirure).

3.1 Hypothèses

Afin de faciliter la modélisation, nous avons formulé les hypothèses suivantes:

– la croûte simulée subit une déformation dûe à une croissance des couches de matière inférieures. Mécaniquement, elle n'a pas d'influence rétroactive sur celles-ci, par contre son comportement propre détermine son aspect visuel. Dans le cas des arbres, comme expliqué dans [Vau93], les tissus en croissance sont situés en profondeur sous l'écorce.
– le phénomène de déchirure est supposé quasi-statique: à chaque instant simulé le système est à l'équilibre. Cette hypothèse est confirmée par l'observation: si l'on découpe un échantillon d'écorce, elle reste dans son état initial.
– le matériau est globalement plastique, mais a un comportement instantané élastique dû à la petite échelle de temps des élongations (cf. relations fracture fragile/ductile en section 2.2). Le mécanisme de rupture est donc celui des fractures élastiques.
– la plaque de matière simulée est soumise à une succession de petites élongations instantanées.
– la croissance s'effectue dans une direction privilégié fixée. En effet, le tronc d'un arbre subit une croissance uniquement radiale.

Pour obtenir des performances en temps de calcul qui autorisent l'interactivité, mais aussi à cause de la complexité des phénomènes mis en jeu, la simulation par éléments finis à été écartée. En effet, ce type d'approche est pertinent lorsque l'on possède un modèle précis décrivant le phénomène, comme c'est le cas des ruptures fragiles de matériaux homogènes simulées dans [OH99]. En revanche, elle n'est pas indiquée lorsque le phénomène dépend de nombreux paramètres mal connus et délicats à mettre en évidence. D'autre part, comme l'objectif est la synthèse d'image, l'on s'attache à créer un modèle qui, tout en étant soutenu par des bases physiques précises, se veut visuellement convainquant et facile à contrôler. Il ne s'agit pas d'obtenir des informations quantitatives sur les propriétés d'un matériau, mais bien de simuler qualitativement son comportement.

3.2 Modélisation des déchirures

Notre modèle de comportement distingue trois phénomènes:

– l'initiation des déchirures, c'est à dire la fracture de la croûte.
– la propagation des déchirures.
– l'ouverture des déchirures.

Le but est de contrôler ces trois phénomènes soit en utilisant des résultats physiques, soit en créant des lois de comportement phénoménologiques à partir d'observations. La figure 2 réunit le synopsis de notre modélisation du phénomène.

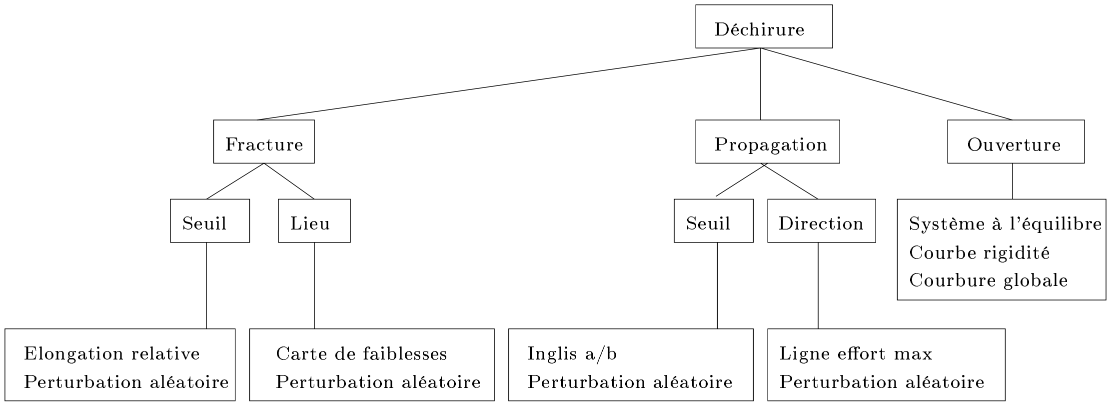

FIG. 2 – *Principe de fonctionnement du simulateur.*

3.3 Modélisation du matériau

Comme l'illustre la figure 3, nous avons représenté la matière par une série de *bandelettes* parallèles à la direction d'élongation et capables de se fracturer. Lors de la fracturation, des éléments plus souples que la croûte sont introduits entre les lèvres de la fracture. Ceux-ci permettent de simuler le comportement en ouverture des déchirures.

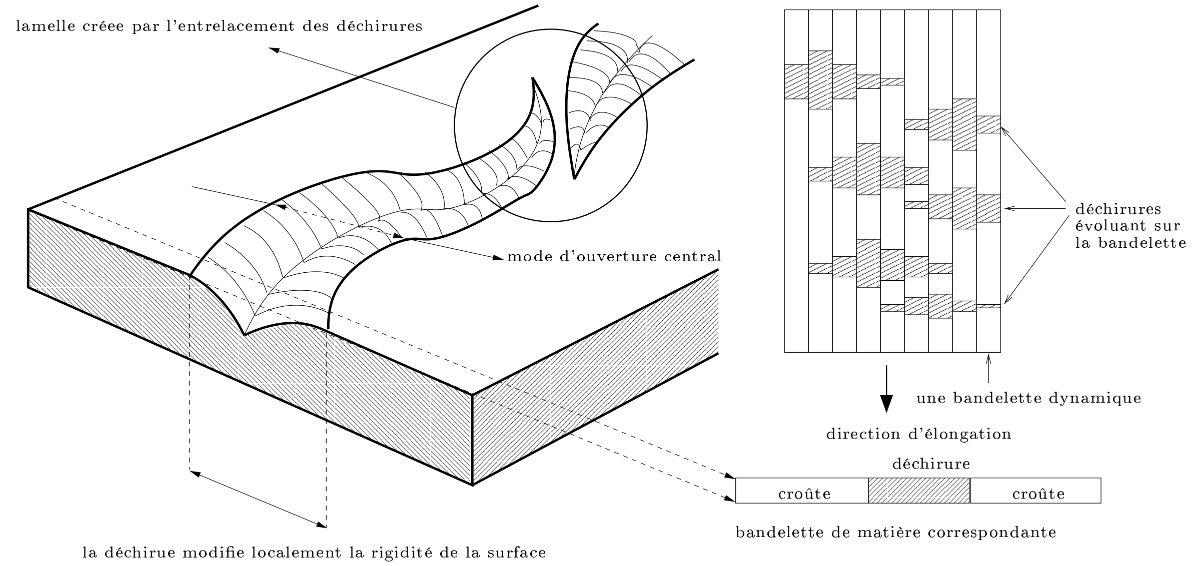

FIG. 3 – *A gauche: étude d'une déchirure, à droite: notre modélisation en bandelettes.*

D'après les hypothèses faites précédemment, les bandelettes doivent avoir un comportement globalement plastique, mais leur réponse à une élongation suffisamment rapide est purement élastique. Une élongation suffisamment rapide est une élongation dont l'échelle de temps est très inférieure à l'échelle de plasticité du matériau. La direction d'élongation est fixe et parallèle aux bandelettes.

Chaque bandelette est constituée d'une chaîne d'éléments qui peuvent être soit de la croûte (surface présente à l'origine), soit l'intérieur d'une déchirure (surface qui apparaît). Même si le comportement global des éléments est plastique, c'est leur comportement élastique instantané qui nous intéresse pour la facturation, c'est pourquoi nous les appellerons *éléments élastiques*. Les déchirures sont donc représentées par des éléments insérés sur les bandelettes de matière lors d'une fracture de la croûte, ou une propagation d'une déchirure voisine. Leur élargissement est contrôlé en modifiant la raideur des éléments élastiques qui les composent. La figure 3 montre l'état d'une plaque de matière en cours de simulation.

Note sur les raideurs des éléments élastiques

Selon la loi de Hooke, un élément élastique linéaire 1D de raideur K, subissant une élongation e produit un effort $F = Ke$. Néanmoins il faut bien distinguer *raideur du matériau* et *raideur de l'élément*. En effet, un élément de longueur à vide l_0 constitué d'une matière de raideur R présente une raideur propre $K = \frac{R}{l_0}$. Ceci est très important car lorsqu'un élément de croûte se rompt, il doit être scindé en deux éléments équivalents. Leur raideur doit donc être ajustée en conséquence (cf. figure 4). Les éléments de déchirure, eux, n'ont pas le comportement d'une matière élastique dans le sens où leur rigidité ne suit pas cette loi (cf. section 3.3, paragraphe Ouverture).

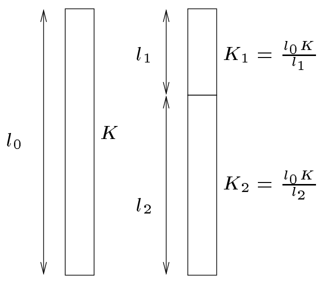

FIG. 4 – *Raideur des éléments élastiques.*

Le phénomène simulé étant supposé quasi-statique, les éléments élastiques d'une bandelette doivent être à l'équilibre. A chaque pas de temps, le système d'équations formé par les éléments de chaque bandelette doit donc être résolu. La résolution s'effectue avec la méthode du gradient bi-conjugué, proposée par la librairie ITL[1].

1. Iterative Template Library

L'algorithme de simulation est le suivant:

```
pour chaque bandelette
  élongation
  résoudre l'équilibre
  tant qu'un élément vérifie le critère de fracture
       choisir le lieu de fracture
       fracturer l'élément
       résoudre l'équilibre
  fin tant que
  propager les fractures
fin pour
```

Fracture

Le critère de fracture est basé sur l'élongation relative instantanée des éléments élastiques. L'élongation relative reflète directement l'énergie dépensé par l'élément, ce qui rejoint l'approche énergétique de Griffith.

Bien entendu, le choix du seuil doit être effectué dans des bornes raisonnables. En effet, à cause de la raideur de la matière apparaissant dans la déchirure, il est possible de se trouver dans un schéma itératif infini. L'étude ci-après a pour but de déterminer dans quelles bornes doit être choisi le seuil de fracture.

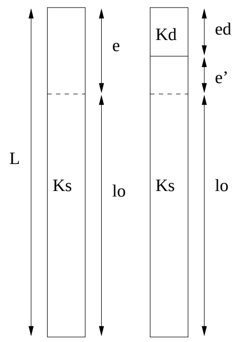

FIG. 5 – *Evaluation du critère de fracture.*

La figure 5 présente un élément élastique de raideur K_s, longueur L, longueur à vide l_0 avant et après fracture. Soit S le seuil de fracture, la bande se fracturant l'élongation relative de l'élément dépasse ce seuil, et donc $\frac{e}{l_0} > S$. Or l'on souhaite obtenir $\frac{e'}{l_0} < S$ après fracture afin que l'élément ne soit pas fracturé une seconde fois. La raideur de l'élément de déchirure est K_d, sa longueur e_d. Puisque le système est à l'équilibre, les équations suivantes peuvent être posées:

$$\begin{aligned} e + l_0 &= L \\ e' + e_d + l_0 &= L \\ K_S e' - K_d e_d &= 0 \end{aligned} \qquad \text{d'où } e' = e\left(\frac{K_d}{K_s + K_d}\right) \qquad \text{et donc } S > \frac{e}{l_0}\left(\frac{K_d}{K_s + K_d}\right)$$

Cependant, si l'on choisit un seuil de fracture trop important, aucune fracture n'apparaîtra. Soit Pas_{elong} le pas d'élongation par image pour garantir l'apparition de fractures, il faut $\frac{Pas_{elong}}{l_0} > S$. Or lors de la première itération, la longueur totale des éléments élastiques d'une bandelette est normalisée à 1.0, il faut donc choisir S tel que $S < Pas_{elong}$.

Dans la nature, les fractures n'apparaissent pas simultanément, et ceci est d'autant plus vrai que les matériaux sont non homogènes. Nous modélisons cette non homogénéité en bruitant le seuil de fracture. En pratique, nous choisissons un seuil égal au pas d'élongation et faisons uniquement varier le paramètre de bruit. Nous obtenons ainsi un bon indicateur de la densité de fractures, contrôlable par l'utilisateur.

Propagation

La propagation des fractures est effectuée en décidant si un élément de déchirure d'une bandelette doit ou non fracturer la bandelette voisine. Les liens de parenté sont conservés afin de construire une structure arborescente que nous appelons *squelette des déchirures*. Le critère de propagation est basé sur les constatations d'Inglis (cf. section 2.2). Nous utilisons donc le rapport longueur/largeur des déchirures, qui reflète la contrainte en bout de déchirure. La direction de propagation est choisie selon deux éléments:

- la physique des ruptures, qui indique qu'une fissure suit les lignes d'effort maximum. Au-dessus et en-dessous d'une déchirure, les lignes d'effort maximum sont courbées parallèlement à sa forme. L'observation permet de confirmer que les déchirures ont généralement tendance à s'entrelacer plutôt que se rencontrer.
- un bruit qui permet de simuler des propagations plus ou moins anguleuses, aspects fréquemment rencontrés lors de l'observation des écorces d'arbre.

Ouverture
Le comportement des déchirures en écartement dépend directement de la raideur des éléments qui les composent. Celle-ci est donc ajustée à chaque pas de simulation afin de contrôler l'élargissement. En pratique, la raideur des déchirures est telle que l'élongation instantanée soit la même quelle que soit la longueur à vide des éléments. Ainsi une déchirure venant de s'ouvrir aura le même comportement en élongation qu'une plus ancienne déchirure déjà largement ouverte.

Néanmoins ceci n'est pas satisfaisant, car des artefacts visuels apparaissent au bout de plusieurs dizaines de pas de simulation. Ceux-ci consistent en un glissement visible entre deux bandelettes adjacentes et proviennent de l'absence de couplage direct entre celles-ci, ce qui provoque des effets de cisaillement non désirables.

Afin d'apporter une solution à ce problème, nous avons mis en place une courbe de contrôle de la raideur des déchirures, modifiable par l'utilisateur. Elle définie la raideur de chaque élément en fonction de son écartement. Il est donc possible par cet intermédiaire d'avoir un contrôle global sur la forme des déchirures. Ceci permet de simuler l'influence du substrat qui s'oppose à l'ouverture des déchirures.

4 Habillage du modèle

Une fois la position et la largeur des déchirures calculées par le modèle, il est nécessaire d'habiller le résultat afin d'obtenir une image visuellement intéressante. Les données résultant du calcul sont les éléments correspondant aux déchirures. Pour chaque élément, on dispose des coordonnées d'apparition de la déchirure dans l'espace du matériau initial avant déchirure, que l'on nomme *espace matière*. De plus, lors de la propagation d'une déchirure, un lien relie l'élément introduit a celui qui a décidé de se propager. Lorsqu'un élément de déchirure est inséré sur un élément de déchirure déjà présent, les deux sont fusionnés. Cet événement correspond à la rencontre de deux déchirures; les liens de parenté entre éléments de déchirure forment ainsi un graphe. Il faut donc tout d'abord utiliser ces informations afin de reconstruire des silhouettes continues à partir de ces résultats discrets. Afin de pouvoir effectuer les rendu final de l'écorce, les étapes suivantes doivent être effectuées:

- reconstruction des silhouettes des déchirures à partir des données discrètes,
- construction d'un maillage s'appuyant sur les contours des déchirures,
- placage de texture sur les différentes régions du maillage,
- éventuellement, mise en relief des déchirures.

Reconstruction des silhouettes
La première étape consiste à créer des polygones correspondant aux déchirures à partir des liaisons entre les éléments les constituant. Pour cela il suffit de remarquer que chacune correspond à une composante connexe du graphe dont les noeuds sont les éléments et les arêtes les liens de parenté entre eux. De cette manière, un squelette est défini pour chaque déchirure par le sous graphe de la composante connexe correspondante. Ensuite, un polygone entourant chaque squelette est crée. A cette fin, il est important de remarquer que deux noeuds voisins dans un squelette de déchirure sont par construction séparés selon l'axe orthogonal à la direction d'élongation par une distance égale à l'épaisseur d'une bandelette du modèle. Grâce à cette propriété il est possible d'écrire un algorithme, linéaire en nombre d'arêtes, de création d'un polygone non convexe à trous délimitant l'intérieur des déchirures. Le principe de l'algorithme est de parcourir le squelette en créant les arêtes du polygone autour des liens. A cette fin, la configuration des noeuds de chaque lien est examinée, les arêtes sont crées en conséquence. Il existe de nombreux cas à traiter, la figure 6 présente les plus courants.

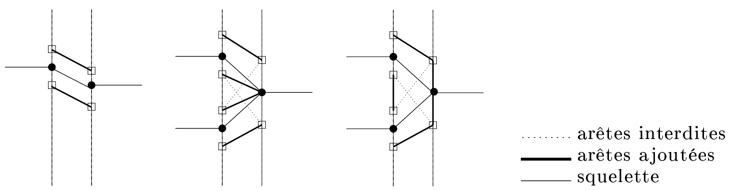

Fig. 6 – *Différents cas à traiter pour la polygonisation.*

Triangulation
Une fois les polygones des déchirures créés, reste à les trianguler afin de pouvoir effectuer l'affichage. Notre triangulation doit pouvoir traiter les polygones non convexes à trous et de plus présenter une bonne cohérence entre les images successives. Après divers tests, notre choix s'est porté sur la librairie *Triangle* [She96] qui effectue efficacement des triangulations de Delaunay contraintes.

Texturage
Nous devons calculer les coordonnées de texture associées à la croûte et aux fractures durant la croissance. Chaque élément de déchirure possède une coordonnée dans l'espace matière, qui correspond au lieu où la fracture est apparue. L'intérieur d'une déchirure est habillé en fonction de son mode d'ouverture. Ainsi, la matière peut rester collée à une bordure ou bien fixe autour de la ligne de fracture tandis que les lèvres découvrent progressivement le substrat.

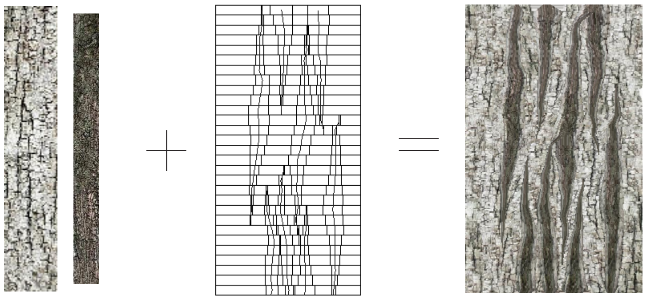

FIG. 7 – *Texturage.*

Mise en relief
Afin de donner plus de réalisme aux déchirures, nous avons implémenté une mise en relief. Celle-ci se justifie y compris dans le cas où l'on souhaite générer des images échantillons, car il est alors possible de suggérer le relief dans la texture en jouant sur l'ombrage et le *bump-mapping*. La mise en relief est effectuée en ajoutant des courbes de niveau entre les bords et le centre des déchirures durant l'étape de polygonisation. Par la suite, nous choisissons une fonction de profil qui sculpte le relief de la déchirure entre le bord et le centre. Les courbes de niveau sont paramétrées entre [0,1], 0 correspondant au bord et 1 au centre. La hauteur de chaque courbe de niveau est ajustée par les courbes de profil, dont quelques exemples sont présentés figure 8.

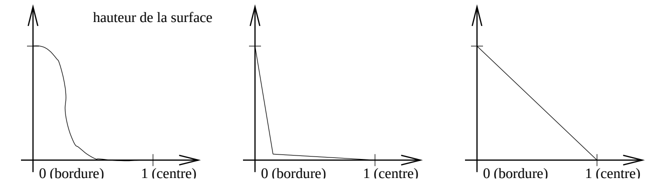

FIG. 8 – *Courbes de profils.*

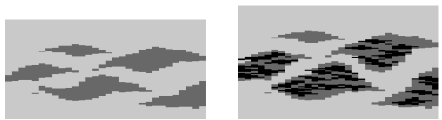

FIG. 9 – *Simulation de différents niveaux de déchirures.*

4.1 Simulation des différents niveaux de déchirure

Il existe parfois plusieurs niveaux de déchirures sur les matériaux à croûte. Ceci est du au changement d'état de la matière qui apparaît à l'intérieur d'une zone déchirée. En effet, la plupart du temps ses propriétés physiques changent à cause d'un phénomène de durcissement (séchage, cuisson, etc ...) et la matière apparue à l'intérieur de la déchirure se comporte comme une nouvelle croûte. Représenter ce phénomène dans la simulation s'est avéré relativement simple: il suffit de considérer les parties déjà déchirées comme de la croûte avec une raideur inférieure. Ainsi, des nouvelles fractures apparaissent d'autant plus facilement que la nouvelle croûte est moins rigide que l'ancienne, donc plus propice à s'allonger et à se fracturer.

5 Résultats

5.1 Modèle de croissance

Notre modèle de croissance autorise un bon contrôle sur la simulation d'écorces, tant au niveau de la densité de fractures que de le forme et leur propagation. Il est ainsi possible de simuler tout une gamme de déchirures, des ruptures fragiles aux déchirures molles. La figure Fig.10 en montre différents types générées par notre modèle en faisant varier les coefficients de rigidité, le seuil de fracture et la perturbation de la direction de propagation.

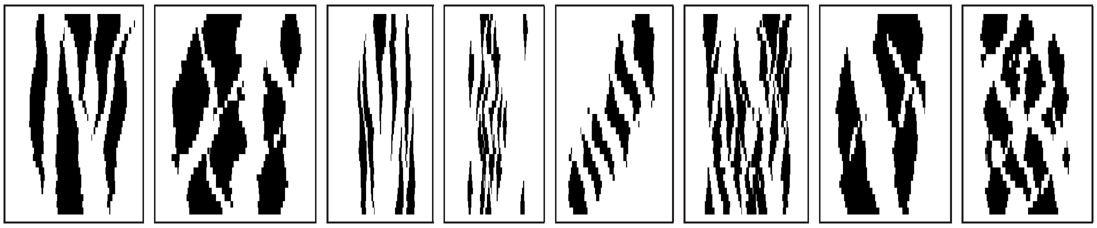

FIG. 10 – *Différents types de déchirures.*

5.2 Habillage

Les résultats finaux sont obtenus en habillant les modèles géométriques avec deux textures. La première représente l'écorce non déchirée (i.e. l'espace matière), la seconde l'intérieur des déchirures ouvertes (cf. figure 11).

FIG. 11 – *Exemple de textures utilisées pour la croûte et l´intérieur des déchirures.*

La figure 12 montre la croissance progressive d'une écorce. L'animation du squelette a été calculée en environ 15 secondes, l'habillage a nécessité 11 secondes pour l'ensemble des huit images sur une station O2 Silicon Graphics à 180 MHz. Afin de valider l'approche, nous avons tenté de reproduire une écorce réelle. La figure 13 présente à droite l'écorce de référence et à gauche l'écorce de synthèse que nous avons pu obtenir. Le point important est de remarquer que la forme et la distribution des déchirures sont similaires. Les textures d'habillage ont été extraites de l'image réelle. Enfin, la figure Fig.14 présente deux écorces différentes d'une même espèce d'arbre générées avec notre modèle. Il est ainsi possible de générer une grande variété d'écorces similaires au sein de la même espèce. La figure 15 illustre le cas d´une écorce présentant des déchirures type rupture fragile.

6 Limites, perspectives et conclusion

Nous avons posé les bases d'un modèle de synthèse et d'animation de déchirures, que nous avons appliqué à la simulation de croissance d'écorces. La modélisation par un matériau simple, nous permet de simuler efficacement le phénomène de déchirure grâce à des lois de comportement déduites de l'observation. Notre simulateur à été conçu pour offrir le maximum de souplesse à l'utilisateur. Nous contribuons ainsi au besoin croissant de pouvoir réaliser des scènes naturelles, et notamment des arbres convainquant, alors qu'il y avait un manque en matière de représentation d'écorces. Les résultats obtenus démontrent la faisabilité d'un tel modèle, même s'il reste bien entendu de nombreuses limitations à dépasser.

L'hypothèse de direction privilégiée limite le modèle actuel à des croissances s'effectuant dans une direction unique et sur des topologies cylindriques. Toutefois, elle est bien adapté à la croissance d'arbres car ce problème présente une direction d'élongation fixe (radiale).

Actuellement, nous n'avons pas proposé de gestion des embranchements. Bien entendu, il est toujours possible de générer des échantillons d'écorces puis de les appliquer au modèle d'arbre. Dans ce cas, nous nous ramènerions a la problématique du placage de texture sur un tronc, lequel est cependant loin d'être trivial (voir [MDG00]). Néanmoins en tenant compte de la géométrie locale durant la simulation, nous pensons pouvoir gérer les embranchements afin d'obtenir une croissance cohérente. Une autre des améliorations possibles serait de pouvoir modifier a posteriori la forme des déchirures en perturbant les bordures, ce qui permettrait de les rendre plus ou moins lisses. Il nous faut également tenir compte des différents niveaux de déchirures lors de la phase d'habillage. L'introduction d'une loi contrôlant la refracture pourrait permettre de simuler le durcissement progressif de la matière nouvellement apparue. Nous pensons également représenter lors de l'habillage un certain nombre de phénomènes liés aux déchirures, comme les micro-fractures qui apparaissent sur les lamelles et les arrachements de matière entre les bordures.

Nous travaillons actuellement à une version plus élaborée, capable de gérer des croissances non-homogènes sur des topologies plus complexes, et notamment des zones d'embranchement.

Références

[And95] T.L. Anderson. *Fracture Mechanics, Fundamental and Applications.* CRC Press, 1995.

[Bio] Bionatics. Amap. `http://www.jmg-graphics.com/amap.htm`.

[Blo85] Jules Bloomenthal. Modeling the mighty maple. In *Computer Graphics (SIGGRAPH '85 Proceedings)*, 1985.

[Bro91] D. Broek. *Elementary Engineering Fracture Mechanics.* Kluwer Academic, 1991.

[Cir] Cirad. Produits du cirad: Amap.
`http://www.cirad.fr/produits/amap/amap.html`
`http://www.cirad.fr/produits/amap/pepinieres/pepinieres.shtml`.

[dREF+88] P. de Reffye, C. Edelin, J. Franson, M. Jaeger, and C. Puech. Plant models faithful to botanical structure and development, 1988.

[Gri20] A.A. Griffith. The phenomena of rupture and flow in solids. *Philosophical Transactions*, 221:163–198, 1920.

[HB96] J. Hart and B. Baker. Implicit modeling of tree surfaces, 1996. In Implicit Surfaces '96.

[HKK98] K. Hirota, H. Kato, and T. Kaneko. A physically-based simulation model of growing tree barks. *IPSJ Journal*, 39(11), 1998. in Japanese.

[HTK98] K. Hirota, Y. Tanoue, and T. Kaneko. Generation of crack patterns with a physical model. *The Visual Computer*, 1998.

[Ing13] C.E. Inglis. Stresses in a plate due to the presence of cracks and sharp corners. *Transactions of the Institute of Naval Architects*, 55:219–241, 1913.

[MDG00] K. Maritaud, J. M. Dischler, and D. Ghazanfarpour. Rendu réaliste d'arbres à courte distance. In *AFIG'00, (Actes des 13èmes journées de l'AFIG)*, 2000.

[MMDJ01] M. Muller, L. McMillian, J. Dorsey, and R. Jagnow. Real-time deformation and fracture of stiff materials. In *Eurographics Workshop on Animation*, 2001.

[MS] W. Marie and TD Think Different SARL.
`http://www.site-en-bois.net/php/album/ecorces.phtml`.

[NTB+91] A. Norton, G. Turk, B. Bacon, J. Gerth, and P. Sweeney. Animation of fracture by physical modeling. *Visual Computer*, 7:210–219, 1991.

[OH99] J.F. O'Brien and J.K. Hodgins. Graphical modeling and animation of brittle fracture. In *SIGGRAPH'99 Conference Proceedings*, pages 137–146. ACM SIGGRAPH, 1999.

[PP96] Federl P. and Prusinkiewicz P. A texture model for cracked surfaces, with an application to tree bark. In *Proceedings of Western Computer Graphics Symposium*, pages 23–29, March 1996.

[She96] Jonathan Richard Shewchuk. Triangle: Engineering a 2D Quality Mesh Generator and Delaunay Triangulator. In *Applied Computational Geometry: Towards Geometric Engineering.* Springer-Verlag, 1996.

[SSBD01] Cyril Soler, François Sillion, Frédéric Blaise, and Philippe Dereffye. A physiological plant growth simulation engine based on accurate radiant energy transfer. Technical Report 4116, INRIA, IMAGIS / LIAMA, February 2001. 31 pages.

[Stu99] Pixar Animation Studios. Flagrant abuses of a perfectly nice texture system. In *SIGGRAPH Course Notes 24*, 1999.

[SWB00] Jeffrey Smith, Andrew Witkin, and David Baraff. Fast and controllable simulation of the shattering of brittle objects. In *Graphics Interface*, May 2000.

[TF88] D. Terzopoulos and K. Fleisher. Modeling inelastic deformation: Viscoelasticity, plasticity, fracture. 1988.

[Vau93] H. Vaucher. *Guide des écorces.* DELACHAUX et NIESTLE, 1993. ISBN 2-603-00850-1.

FIG. 12 – *Quelques étapes de la croissance d'une écorce.*

FIG. 13 – *Comparaison au réel; l'écorce de synthèse est à gauche.*

FIG. 14 – *Ecorces différentes de même espèce générées par notre modèle. Les fractures à petite échelle proviennent de la texture.*

FIG. 15 – *Déchirures de type fragile.*