

UNIVERSITÉ DE LIMOGES

École Doctorale Science-Technologie-Santé

Faculté de Sciences et Techniques

Laboratoire Xlim UMR CNRS 6172

Thèse N° [48/2007]

Thèse

pour obtenir le grade de

Docteur de l'Université de Limoges

Discipline : Informatique

Présentée et soutenue par

Salman SHAHIDI

Le 16 octobre 2007

Rendu du vieillissement par efflorescence de matériaux de construction en synthèse d'images

Thèse dirigée par : D. GHAZANFARPOUR

Co-encadrement : S. MERILLOU

JURY :

Jean-Michel DISCHLER, Professeur à l'Université de Strasbourg, Rapporteur
Xavier PUEYO, Professeur à l'Université de Girona (Espagne), Rapporteur
Djamchid GHAZANFARPOUR, Professeur à l'Université de Limoges, Examineur
Michel MERIAUX, Professeur à l'Université de Poitiers, Examineur
Stéphane MERILLOU, Maître de Conférences à l'Université de Limoges, Examineur
Dimitri PLEMENOS, Professeur émérite à l'Université de Limoges, Examineur

Rendu du vieillissement par efflorescence de matériaux de construction en synthèse d'images

Salman SHAHIDI

Résumé

Les images de synthèse paraissent souvent trop lisses, trop parfaites, et trop propres pour les considérer réalistes. Pour résoudre ce problème, un grand nombre de phénomènes de vieillissement doit être pris en considération. Ces phénomènes peuvent apparaître sous différentes formes affectant la géométrie, la réflexion de la lumière et les textures. Ce domaine est actuellement très étudié en synthèse d'images en employant de nouvelles techniques aussi bien en modélisation qu'en rendu.

Cette thèse propose des techniques pour représenter des défauts importants sur les matériaux de construction : efflorescences et effritements. Les méthodes développées dans le cadre de cette thèse proposent de nouveaux algorithmes pour augmenter le réalisme de ce type d'images. Afin d'éviter d'employer un trop grand nombre de paramètres rendant la manipulation difficile, nous proposons d'établir un modèle phénoménologique empirique. Il nous permet d'obtenir des résultats physiquement plausibles avec seulement quelques paramètres intuitifs.

Mots clés : synthèse d'images, matériaux de construction, vieillissement, efflorescence, effritement.

Rendering aging by efflorescence on construction materials in computer graphics

Abstract

Images synthesized by computer graphics methods appear often too smooth, too perfect, and too clean to be considered as realistic. To solve this problem, a great number of aging phenomena must be taken into account. These phenomena can appear with various forms, affecting the geometry, light/matter interactions, and textures. This issue is currently studied more and more in computer graphics by employing new techniques in modeling field as well as in rendering field. This thesis proposes techniques to treat important defects on building materials: efflorescence and crumbling. The methods developed within this thesis provide new algorithms to increase the realism of such images. In order to avoid employing too much parameters, making its handling difficult, we propose to establish a phenomenological empirical model, which enables us to obtain physically plausible results with only a few, intuitive parameters.

Key words: computer graphics, construction materials, aging, efflorescence, crumbling.

Remerciements

Je voudrais commencer par remercier vivement les directeurs de mes travaux, Djamchid GHAZANFARPOUR et Stéphane MERILLOU qui ont su me guider et me donner des coups de pouce tout au long de mes années de recherche.

Je tiens également à remercier Messieurs Xavier PUEYO, Professeur à l'Université de Gérone en Espagne et Jean-Michel DISCHLER, Professeur à l'Université Louis Pasteur de Strasbourg, qui ont accepté d'être les rapporteurs de ma thèse. Leurs commentaires et propositions m'ont été très précieux et utiles pour compléter ce manuscrit.

Mes remerciements vont également à Michel MERIAUX, Professeur à l'Université de Poitiers et Dimitri PLEMENOS Professeur à l'Université de Limoges pour m'avoir fait l'honneur de bien vouloir faire partie du jury.

Mes sincères remerciements vont à tous les gens de notre laboratoire Xlim de l'université de Limoges, particulièrement à Nadir BENMOUNAH doctorant en deuxième année de thèse qui m'a été d'une grande aide pour la correction orthographique de ma thèse.

Un remerciement particulier à Agnès et Djahan NOURANI pour tout ce qu'ils ont fait afin de terminer ce manuscrit.

Je remercie également ma femme Maryam pour sa patience et son soutien.

Table des matières

Table des matières	7
Table des figures	11
1. Introduction	19
1.1. Qu'est-ce que le réalisme ?	19
1.2. Géométrie	20
1.3. Texture	21
1.4. Vieillessement	25
1.5. Éclairage	27
1.6. Contribution	28
1.7. Organisation de ce document	29
2. Modèles de vieillissement	31
2.1. Modélisation de vieillissement	31
2.2. Méthodes de vieillissement	35
2.2.1. Processus chimiques	35
2.2.1.1. Oxydation (Corrosion, Patine)	36
2.2.1.2. Vieillessement de la pierre	41
2.2.2. Processus structurels	41
2.2.2.1. Porosité	41
2.2.2.2. Érosion	42
2.2.2.3. Fissures, fractures, écaillures	44
2.2.2.4. Rayures isolées	49

2.2.2.5.	Accumulation de la poussière	51
2.2.2.6.	Changement d'apparence (Taches)	54
2.2.2.7.	Rides.....	55
2.2.2.8.	Impacts	56
2.2.3.	Processus biologiques	58
2.2.3.1.	Lichens et algues	59
2.2.3.2.	Croissance biologique de la moisissure	60
2.3.	Résumé des méthodes	61
2.4.	Conclusion.....	63
3.	Efflorescence en couche mince	65
3.1.	Travaux précédents	67
3.2.	Physique des efflorescences	70
3.2.1.	Principe phénoménologique d'efflorescence	70
3.2.1.1.	Création	70
3.2.1.2.	Couleur et forme.....	72
3.3.	Synthèse d'efflorescence.....	74
3.3.1.	Obtention d'une brique propre	75
3.3.2.	Efflorescence : points de départ	76
3.3.3.	Efflorescence : processus de développement	80
3.3.4.	Chemin de porosité.....	80
3.3.5.	Interconnexions des pores : zone d'influence	82
3.3.6.	Résumé des paramètres de modèles	85
3.4.	Résultats	86
3.5.	Conclusion.....	89
4.	Cristallisation et effritement.....	91
4.1.	Travaux précédents	94
4.2.	Cristallisation et sous-efflorescence.....	98
4.3.	Simulation des effets de cristallisation de sels	102
4.3.1.	Efflorescence	102
4.3.2.	Vieillissement de la surface de maçonnerie avec effritement (érosion).....	104
4.3.2.1.	Problème d'effritement très fort.....	106
4.4.	Extension.....	108

4.4.1.	Fissures : 1 ^{ère} approche.....	108
4.4.1.1.	Méthodes de fissures	109
•	Techniques basées sur le maillage	110
•	Techniques sans maillage.....	111
4.4.1.2.	Propagation de fissure	111
4.4.2.	Pollutions.....	113
4.5.	Résultats	115
4.6.	Conclusion et perspectives	120
5.	Conclusion et perspectives.....	123

Table des matières

Table des figures

Figure 1-1 : Le problème de la discontinuité de la méthode de texture 2D. Le cube présenté sur l'image du centre a été texturé avec l'image de gauche. Le cube de droite a été texturé avec la méthode de texture solide 3D. On voit bien sur l'image du centre que la texture entre différentes faces du cube n'est pas cohérente.	22
Figure 1-2 : Illustration de différentes formes de vieillissement sur les matériaux de construction.	26
Figure 1-3 : Des constructions affectées par efflorescence.....	27
Figure 2-1 : Lancer de γ -ton à partir d'un environnement hémisphérique. La source de γ -ton rebondit dans la scène et introduit des effets de vieillissement. Image tirée de l'article [CXW*05].....	35
Figure 2-2 : Illustration de l'habillage fin de la ternissure de sulfure de cuivre et de la patine verte rugueuse. Image tirée de l'article de Dorsey et Hanrahan [DH96].....	37
Figure 2-3 : Une comparaison entre l'image réelle (à gauche) et l'image synthétisée (à droite). Image tirée de l'article de Mérillou <i>et al.</i> [MDG01a].....	39
Figure 2-4 : Le résumé de la méthode [LGG*07] : (a) faire vieillir le vrai objet (ici une solution uniformément pulvérisée sur un plateau de cuivre). (b) sauvegarder les formes et les changements de textures de l'objet. (c) calculer des textures sombres et les relier avec les contextes. (d) et (e) diriger par les paramètres de contextes, les informations de textures calculées sont transférées sur des nouveaux objets de synthèses. Image tirée de l'article [LGG*07].....	40
Figure 2-5 : Développement de patine sur les objets en cuivre, avec l'occlusion d'ambient comme contexte. Les images de gauche sont des images originales attaquées par le	

Table des figures

vieillissement. Les images de milieu et de droite sont des images de synthèse, réalisées en transformation des textures synthétisées sur les formes de l'hippocampe et de la fée.	40
Figure 2-6 : (a) Un pot en terre cuite, (b) le pot rendu avec la BRDF de Ward [Ward92], (c) le pot rendu avec la méthode de [MDG00]. Image tirée de l'article Méridou <i>et al.</i> [MDG00].....	42
Figure 2-7 : L'image de gauche présente un relief par modèle d'érosion pour le réseau fluvial et le terrain. L'image de droite présente un paysage complet de montagnes et le réseau fluvial et la mer. Illustration extraite de l'article [KMN88]......	43
Figure 2-8 : L'image de gauche présente une surface originale construite par fractales. L'image de droite présente le résultat obtenu par l'algorithme d'érosion de [MKM89]. Images tirées de l'article [MKM89]......	44
Figure 2-9 : Les 4 dernières images (frame) d'animations des cuvettes qui ont été lâchées sur une surface dure. Chacune des cuvettes a été lâchée de la même hauteur, mais avec d'autres paramètres mentionnés dans [OH99]. Image tirée de l'article [OH99].	46
Figure 2-10 : A gauche une cuvette en céramique vernie, ensuite au centre et à droite étant cassée avec deux distributions différentes de contrainte-force. Image tirée de l'article [SWB00]......	47
Figure 2-11 : Profil de rayure (à gauche), la texture de rayure (à droite), pour la méthode de rayure de [MDG01b]......	50
Figure 2-12 : Un anneau en or rayé par gravure. Image tirée de l'article de Bosch <i>et al.</i> [BPM*04].	51
Figure 2-13 : Cette scène illustre l'encrassement des régions difficilement accessibles avec la méthode de Miller [Mil94]......	52
Figure 2-14 : Deux exemples de poussières. Les images sont tirées de l'article de Hsu et Wong [HW95]......	53
Figure 2-15 : Une série de vieillissements générée par Chen <i>et al.</i> [CXW*05]. De gauche à droite, la prise d'eau qui devient respectivement rouillée et poussiéreuse. Les écarts entre les tuiles sont aussi colonisés par les mousses.....	54
Figure 2-16 : Deux exemples du phénomène de séchage. Les images (a) et (c) sont des images réelles. Les images (b) et (d) sont des images synthétisées, en utilisant les images (a) et (c) respectivement comme les cartes de la partie mouillée. Image tirée de l'article [LGR*05].	55
Figure 2-17 : Cette image présente une pomme fraîche (à gauche) et ridée (à droite).	56
Figure 2-18 : Les images (a) et (c) présentent respectivement un coffre et un cadre de la porte avec l'effet d'impact. Les images (b) et (d) sont les résultats obtenus par Paquette <i>et al.</i> [PPD01].	

Image tirée de l'article [PPD01].....	58
Figure 2-19 : Deux scènes complexes attaquées par les algues vertes sur la statue (image de gauche), et différents types de lichens sur l'arbre, branche de l'arbre tombée au sol, et les pierres. Image tirée de l'article [DGA04].	60
Figure 3-1: Les murs affectés par efflorescence fine.	66
Figure 3-2 : Présentation du modèle de mur. Illustration issue de l'article [LP00].	68
Figure 3-3 : Une texture réelle de mur de briques (gauche) et son masque binaire (droite). Image issue de l'article [LP00].	68
Figure 3-4 : L'image de gauche est la texture d'entrée d'un mur de briques, l'image de droite est le résultat obtenu avec l'algorithme de [LP00].	69
Figure 3-5 : Un escalier synthétisé en utilisant la méthode de [LDG01] avec différents modèles de briques. Image issue de l'article [LDG01].	69
Figure 3-6: Principe de base de migration de sel. Pendant le mouillage (gauche) la solution pénètre par les chemins poreux à l'intérieur du matériau. Pendant l'étape de séchage, des sels sont déposés le long des chemins poreux.	72
Figure 3-7: (a) et (b) zoom avant sur des briques réelles attaquées par efflorescence. (c) et (d) zoom avant sur des pavés attaqués par efflorescence. On voit bien que la méthode de la carte de relief est suffisante pour manipuler les petites variations géométriques et spécifiques d'efflorescence mince dans les images (a), (c) et (d). Simulation d'efflorescence comme sur l'image (b) qui modifie la géométrie de la surface attaquée est présentée dans le chapitre suivant.	73
Figure 3-8 : Effet de sous-efflorescence (crypto-efflorescence) sur le mur de briques.	73
Figure 3-9: Un mur affecté par l'efflorescence fine (gauche), et une image de synthèse réalisée avec notre méthode (droite).....	74
Figure 3-10: Résumé du processus pour l'obtention d'une texture solide classique. Une image digitalisée est employée comme la première couche de la texture solide. Elle est alors extrudée et perturbée pour remplir le bloc complet 3D de couleurs.	76
Figure 3-11 : Zone de points de départ sur une brique.....	77
Figure 3-12: Illustration de la porosité ouverte qui autorise le passage de sel (l'image de gauche), et la porosité fermée qui bloque le passage de sel (l'image de droite).....	78
Figure 3-13: Principe de simulation d'efflorescence. Les points de départ qui traversent le chemin principal de porosité sont choisis dans la zone préférentielle. La zone d'influence est employée	

Table des figures

pour boucher la porosité des interconnexions. 79

Figure 3-14: Le chemin d'efflorescence à l'intérieur d'une maçonnerie (en couleur foncée)..... 82

Figure 3-15 : Les briques affectées par efflorescence. A gauche une brique réelle et à droite une brique rendue avec notre algorithme. La brique de droite a été coupée pour visualiser son intérieur. 86

Figure 3-16: L'évolution de l'efflorescence en fonction du temps et la porosité. (a) une image synthétisée avec les paramètres : $N = 256$, $p = 0,30$, $N_s = 9 (26 * p)$, $N_c = 10$, $L_d = 2$, $N_p = (N * N) * p * L_d = 47185$, $k=0,02$, $N_d = 943$, $T_p = 300$. (b) les mêmes paramètres que dans l'image (a) sauf $N_c=15$. (c) les mêmes paramètres que dans l'image (a) sauf $p=0,36$ et $N_c = 20$ 87

Figure 3-17: Différents effets de vieillissement dus à l'efflorescence. Le mur (a) ne présente pas d'attaque visible. Le mur (b) est attaqué sur sa partie gauche. Le mur (c) est attaqué sur les parties hautes et basses. 88

Figure 3-18: Une scène complète composée de différentes briques et mortier attaquées par efflorescence fine. 89

Figure 4-1 : Des exemples des effets de vieillissement par cristallisation, qui ont été obtenus avec des traitements spéciaux (environnement) au cours du temps par Hees et Brocken [HB04]. De haut en bas : après 4 jours, 3 mois, et 48 mois. Sur les colonnes 1 et 3, les briques sont contaminées par le Na_2SO_4 (sulfate de sodium). Sur les colonnes 2 et 4, les briques sont contaminées par $NaCl$ (chlorure de sodium). Après 4 jours, le mur attaqué par solution de Na_2SO_4 montre l'apparition de l'efflorescence sur les joints de mortier et sur les bords des briques. Après 3 mois, le modèle de l'efflorescence est le même, mais les parties des joints de mortier ont des effets de grains (effritement fin). Après 48 mois les effets de l'effritement et l'érosion apparaissent. On peut observer l'apparition de craquelures sur la brique contaminée par le $NaCl$ (l'image en bas de la 2^{ème} colonne). Les images sont tirées de l'article [HB04]. 92

Figure 4-2 : Le schéma du système. Nous adoptons la méthode solide 3D de texture pour synthétiser une maçonnerie propre. Nous faisons un bloc de couleurs discret tridimensionnel B de la taille N^3 . Le bloc B est produit avec extrusion d'un échantillon de photographie en la perturbant, qui représente une vue de la texture 3D désirée. Pour synthétiser la maçonnerie, on peut appliquer le bloc de couleurs B à une silhouette (maillage) de maçonnerie. 93

Figure 4-3 : Une particule d'eau contient la concentration du matériau S_i . Cette particule peut rouler ou tomber de la surface. À chaque étape, les échanges se produisent entre la particule et l'objet. D_i est la concentration du matériau déposée sur la surface. Image issue de l'article

Dorsey <i>et al.</i> [DPH96].....	95
Figure 4-4 : Le mur original (gauche) et le mur après la simulation d'écoulement. Image issue de l'article de Dorsey <i>et al.</i> [DPH96].	95
Figure 4-5 : L'image de gauche présente le passage de l'humidité qui contient différents composants chimiques. L'image de droite présente le vieillissement sur les pierres réelles. L'image est tirée directement de l'article [DEJ*99].....	96
Figure 4-6 : La statue du Sphinx originale (a) et vieillie (b). Image tirée de l'article [DEJ*99]...	97
Figure 4-7 : Les statues attaquées par différentes sources de vieillissement. L'image est tirée de l'article [DEJ*99].....	98
Figure 4-8 : La croissance de cristaux.....	100
Figure 4-9 : Principe de transfert de sels. (a) Les sels dans la solution pénètrent dans la maçonnerie. (b) La solution se déplace par la force de capillarité à la surface. L'eau sur la surface s'évapore et dépose « <i>efflorescence</i> ». (c) La solution se déplace par la force de capillarité à l'intérieur de la maçonnerie et s'approche de la surface. L'eau interne s'évapore en déposant les cristaux appelés « <i>sous-efflorescence</i> ».....	101
Figure 4-10 : Représentation de l'effet de la pression de cristaux de sels. Les zones blanches sont les grains en cristal (l'image de gauche) menant à la déformation extérieure (l'image de droite).	101
Figure 4-11 : Trois images réelles des dommages structuraux. Dans la rangée supérieure, nous pouvons voir l'érosion et l'effritement (à gauche), et l'élimination de la couche extérieure (à droite). Dans l'image du bas tous les problèmes d'efflorescence, d'effritement et l'élimination de la couche extérieure sont réunis.	102
Figure 4-12 : (a) Une image réelle de briques attaquées par efflorescence. (b) Brique affectée par efflorescence sans modification de sa géométrie. (c) Utilisation de la méthode de carte de relief pour altérer la surface (la méthode utilisée dans le chapitre précédent). (d) Utilisation de la méthode de carte de déplacements pour altérer la surface. Pour synthétiser l'image (d), nous avons les paramètres suivants : $N = 128$, $p = 0,3$, $N_s = 8 (26 * p)$, $N_c = 10$, $L_d = 2$, $N_p = (N * N) * p * L_d = 9830$, $k = 0,03$, $N_d = 294$, $T_p = 300$, $H_d = 0,2$	104
Figure 4-13 : La distance H pour le point M sur la face visible de la brique et son image M' sur le cristal.	105
Figure 4-14 : Représentation d'érosion sur les images réelles et synthétisées, (a) une image réelle de brique effritée, (b) une brique synthétisée propre, (c) une brique synthétisée avec	

Table des figures

efflorescence mais sans changement géométrique (d) une brique synthétisée et effritée ; pour obtenir une brique effritée, nous avons employé une carte de déplacements négatifs en éliminant la couleur d'efflorescence. Les paramètres de vieillissements pour l'image (d) sont les mêmes que dans la Figure 4-12(d), mais avec $T_p = 100$, au lieu de $T_p = 300$	106
Figure 4-15 : Un exemple réel d'altération très forte sur un mur.	107
Figure 4-16 : Processus de modification du maillage. (a) : un modèle de texture, (b) un maillage de brique subdivisée, (c) une brique déformée avec la texture (a). Ici pour plus de visibilité le maillage de brique est trop fin, dans la pratique la subdivision $15 * 15 * 15$ est suffisante. De plus, la texture a été appliquée seulement sur la face visible avant du maillage, mais dans la pratique, la texture est appliquée sur toutes les faces visibles. (d) Rendu du résultat. Noter que la texture (a) est en plus utilisée comme une carte de hauteur.....	107
Figure 4-17: Une galerie de fissures sur les maçonneries.....	109
Figure 4-18 : Propagation de fissure. Chaque rangée montre un aspect de fissure. De la colonne de gauche vers la colonne de droite on voit bien la fissuration de surface. Chaque ensemble en plus de la fissure est aussi soumis à une déformation. Cet effet est plus visible sur la deuxième rangée.	112
Figure 4-19 : L'effet de pollution sur les matériaux de construction.....	113
Figure 4-20 : Différents aspects de taches dues à la pollution. La méthode de carte de relief avec « déplacements négatifs» pour altérer la surface a été utilisée. La taille de texture pour les images (a) et (b) : $N = 128$, et pour les images (c) et (d) : $N = 256$. Les autres paramètres sont : $p = 0,3$, $N_d = 5000$, $T_p = 300$, $H_d = 0,1$. Nous utilisons le paramètre $N_c=3$ pour l'image (a), et $N_c=10$ pour les images (b), (c) et (d). Ce paramètre est utilisé pour diversifier les degrés de pollution, par exemple. Les images (c) et (d) montrent l'aspect de pollution à l'intérieur des briques.	115
Figure 4-21 : Un mur pollué.....	115
Figure 4-22 : Une image réelle de pavé (à gauche) et celle de synthèse (à droite).....	116
Figure 4-23 : Deux paysages de synthèse.	117
Figure 4-24 : L'image de gauche présente un mur réel effrité. L'image de droite présente un mur de synthèse.	118
Figure 4-25 : Le détail de changement géométrique causé par efflorescence (l'image de gauche) et effritement (l'image de droite) sur la surface.	118
Figure 4-26 : Une galerie représentative d'altération très dure de surface.	119

Figure 4-27 : La construction polluée par différents matériaux. La deuxième rangée de l'image présente des agrandissements de la première rangée. 120

Table des figures

1. Introduction

1.1. Qu'est-ce que le réalisme ?

Dans le domaine de l'infographie, l'un des objectifs les plus communs est de répliquer l'aspect des objets réels dans un environnement numérique simulé. La décennie passée a vu un énorme progrès en puissance de calcul et en matériels graphiques dédiés. Les progrès actuels ont de plus en plus de « réalisme ». Dans le domaine du jeu vidéo chaque année, le joueur remarque une amélioration de la qualité graphique et de la simulation. Les voitures de course ressemblent plus aux vraies voitures. Nous pouvons simuler des matériaux de construction de plus en plus réalistes. Dans le domaine du rendu réaliste les architectes disposent de simulation de lumière et de matériaux spécifiques afin de créer des bâtiments qui ressembleront aux bâtiments réels.

Mais qu'est-ce que le réalisme ? Comment pouvons-nous comprendre ce qui rend une image « réaliste » et pourquoi certaines images ou scènes sont réalistes alors que d'autres ne le sont pas ?

Margaret Hagen [Hag86] a présenté le concept selon lequel l'imagination humaine transformerait une situation objectivement virtuelle comme image ou la scène en subjectivement réelle. La fantaisie peut jouer ainsi un rôle essentiel dans l'infographie. Il est possible de prolonger son concept de base et d'identifier trois variétés de réalisme dans l'infographie [Fer03] :

- Le réalisme physique dans lequel l'image fournit la même stimulation visuelle que la photographie de scène.

1. Introduction

- Le photo réalisme dans lequel l'image produit la même réponse visuelle que la photographie de scène.
- Le réalisme fonctionnel dans lequel l'image fournit les mêmes informations visuelles que la scène.

Ces critères ensemble peuvent être employés pour évaluer le réalisme d'un grand nombre de techniques d'infographie. Cependant, dans certaines applications comme les jeux vidéo ou le cinéma, la seule perception n'est pas suffisante pour nous mener à estimer que la scène est « réaliste ». Dans ce cas, en plus de la qualité graphique des images il faut considérer le réalisme du mouvement et des déformations.

Bien que la notion de réalisme soit difficile à appréhender, nous croyons que le photo réalisme est la meilleure définition pour évaluer les résultats dans le cadre de cette thèse. En effet, notre objectif est de développer une technique permettant de créer facilement des effets d'usure sur les matériaux de construction, tels que l'efflorescence et l'effritement. Nous ne nous sommes pas intéressés aux animations, mais particulièrement aux résultats proches d'une image réelle statique. Nous faisons juste quelques comparaisons visuelles entre des photographies et des images réalisées avec notre système de rendu afin de vérifier le niveau de réalisme atteint.

Pour atteindre un niveau acceptable de photo réalisme on doit considérer la géométrie, les textures, et les différents phénomènes de vieillissement sur chaque objet de la scène. De plus il faut tenir compte des aspects d'interactions de la lumière avec le matériau.

1.2. Géométrie

En infographie la géométrie 3D d'un objet dans la scène peut être décrite de différentes manières. La représentation la plus commune est la maille de polygone. Les autres méthodes pour représenter les objets 3D incluent les surfaces de NURBS (non-uniform rational B-splines), et les surfaces de subdivision. Il y a un large éventail d'autres représentations 3D d'objets qui sont implicites ou explicites. Par exemple, la représentation volumétrique est l'entité 3D qui peut avoir l'information à l'intérieur du volume en utilisant des particules comme voxels.

Chaque méthode a ses avantages et ses inconvénients. L'avantage principal de la représentation polygonale est qu'elle est la plus simple et la plus rapide à rendre comparée à

d'autres représentations. L'inconvénient de cette méthode est qu'elle est incapable de représenter correctement les surfaces incurvées, donc un grand nombre de polygones doivent être employés pour rapprocher des courbes d'une façon visuellement satisfaisante. Pour les avantages de cette représentation et sachant que particulièrement dans le cadre de cette thèse (synthèse des défauts de surface sur les matériaux de construction), nous n'avons pas besoin de courbes lisses, nous avons décidé de représenter les scènes avec cette méthode.

Bien sûr, l'apparence des objets dans le monde réel ne dépend pas seulement de la représentation géométrique. A cette modélisation géométrique, il faut ajouter d'autres détails par le biais de texture qui contrôlent l'apparence des surfaces, ainsi l'interaction de la lumière avec l'objet, permettant à la lumière de réfléchir dans des directions privilégiées.

1.3. Texture

L'analyse et la synthèse de texture sont très importantes pour l'infographie, comme la vision et le traitement d'images, puisque beaucoup d'objets réels montrent des variations spatiales complexes sur leurs surfaces extérieures. Les textures permettent d'ajouter, sur les surfaces, ces détails qui sont habituellement trop complexes pour être modélisés directement (par exemple en créant une géométrie fine qui représente chaque petite perturbation et détail de surface).

Les textures bidimensionnelles [BN76] sont efficaces pour appliquer un aspect réaliste aux objets qui ont naturellement des aspects 2D, telles que la peinture sur les murs par exemple. Cependant, il y a quelques inconvénients principaux inhérents à cette approche : la déformation et la discontinuité des textures aussi bien que le manque de troisième information de dimension (des effets géométriques fins ne peuvent pas être rendus correctement).

Afin d'éviter tout problème de texture 2D (plaquage de texture), Gardner [Gar84, Gar85], Peachey [Pea85], et Perlin [Per85] ont présenté l'idée des textures 3D solides pour représenter des objets avec leurs propriétés de surface. Une texture solide peut être représentée comme un tableau 3D de voxels (éléments volumétriques discrets) qui contient des paramètres de couleur ou de matériau. Par opposition au plaquage de texture 2D, la texturisation solide consiste en un découpage de l'objet, selon certains matériaux, du bloc de matériau. La texture solide se définit comme une texture T, directement dans un espace 3D au lieu de l'espace 2D. Par conséquent, à

1. Introduction

n'importe quel point $P(x, y, z)$ de n'importe quel objet dans la scène, on peut simplement associer un voxel $T(x, y, z)$ correspondant. La Figure 1-1 donne un exemple de discontinuité de texture 2D et résolution de ce problème avec la texture 3D.

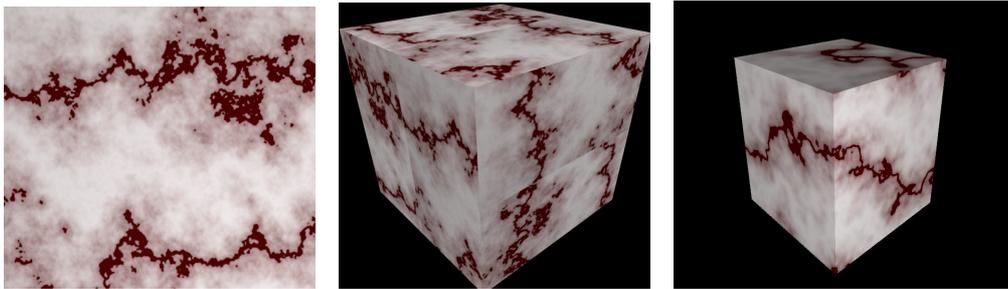


Figure 1-1 : Le problème de la discontinuité de la méthode de texture 2D. Le cube présenté sur l'image du centre a été texturé avec l'image de gauche. Le cube de droite a été texturé avec la méthode de texture solide 3D. On voit bien sur l'image du centre que la texture entre différentes faces du cube n'est pas cohérente.

Il est possible de produire des textures 3D solides directement d'après des échantillons de géométries d'objets (en disposant d'un scanner 3D par exemple). Cependant, le problème principal soulevé par les textures solides réside dans les modèles de synthèse des textures. Tandis que les textures 2D peuvent être capturées avec une photographie simple, il est en général très difficile de balayer et digitaliser un objet 3D en coupant de nombreuses tranches minces du matériau. Pour les matériaux durs tels que la brique ou le béton, ce type de processus destructif peut être impossible. Quelques techniques d'exploration non destructives existent, y compris la formation d'image de résonance magnétique, et la tomographie; cependant ces techniques exigent des instruments de mesure coûteux, et sont seulement faisables dans certains domaines de matériaux. Même si une texture solide peut être obtenue à partir d'un objet physique, le résultat est limité dans l'espace et la résolution. Afin de texturer un modèle géométrique qui est plus grand que le volume de texture, la texture 3D peut être tuilée dans l'espace, mais cette méthode peut avoir comme conséquence les mauvais résultats le long des coutures de texture.

Une alternative importante à la représentation de voxel réside dans l'utilisation de textures solides procédurales. Dans cette famille de méthodes qui a été présentée par Cook en 1984 [Coo84], une fonction 3D peut renvoyer les informations de texture à chaque point

quelconque dans l'espace. Afin de définir le terrain, l'arbre, le courant de l'eau, et les textures de nuages, Gardner [Gar84, Gar85] a utilisé empiriquement des additions et des multiplications de vagues de sinus. Toujours de façon empirique, Peachey [Pea85] a proposé la transposition en 3D de techniques bidimensionnelles de synthèse de textures bien connues telles que la méthode de bombardement présentée dans [SA79]. Il a obtenu, des textures solides du bois et du granit par exemple. Basé sur l'observation que la plupart des aspects normaux ont une structure plus ou moins aléatoire, le bruit de Perlin et les fonctions de turbulence [Per85], sont largement acceptés en infographie. En utilisant différentes procédures, divers genres d'images réalistes contenant du marbre, des nuages, et des vagues d'océan peuvent être produits.

Bien que les techniques empiriques procédurales puissent produire des textures synthétiques réalistes sans avoir besoin des textures d'entrées, elles sont relativement difficiles à prévoir et à contrôler (excepté après une pratique importante). Par exemple, un changement même faible de la valeur d'un paramètre peut résulter en une image très différente.

Les approches analytiques procédurales peuvent résoudre les problèmes des méthodes empiriques. Ces approches sont intéressantes pour synthétiser « automatiquement » des textures solides. Le principe se propose d'employer une ou plusieurs vues 2D (données physiques comme une photographie) de la texture désirée. La première méthode de cette sorte, employant l'analyse spectrale, a été présentée par Ghazanfarpour et Dischler dans [GD95]. Cette approche analytique a été améliorée dans [GD96, DGF98] en utilisant des multiples vues orthogonales pour synthétiser des textures solides avec un contrôle plus efficace le long de tous les axes. Lefebvre et Poulin [LP00] ont proposé une méthode analytique spectrale afin de synthétiser les modèles structurés de bois et de mur. Une autre méthode analytique basée sur une analyse pyramidale a été présentée dans [HB95]. Cette méthode a été améliorée à deux reprises, la première modification a été apportée par De Bonet [De97] pour générer des textures structurées, et la deuxième a été effectuée par Simoncelli et Portilla [SP98] qui ont utilisé les statistiques récapitulant la relation entre les échantillons dans une pyramide navigable [SFA*92] pour synthétiser une texture.

Les modèles basés physiques sont une autre approche intéressante dans le cadre de texture solide procédurale. Il est possible de synthétiser certaines textures en simulant directement leurs procédés de générations physiques. Des modèles biologiques tels que la fourrure, les écailles, et la peau peuvent être modélisés en utilisant la diffusion de réaction

1. Introduction

[Tur91, WK91] et la texturisation cellulaire [FLC*95, Wor96]. Desbenoit *et al.* [DGA04] ont étudié la croissance des lichens. Dorsey *et al.* [DPH96] ont proposé un modèle pour tenir compte de la saleté apportée sur des surfaces par les procédés d'écoulement. Buchanan [Buc98] a proposé un modèle pour synthétiser des textures de bois solides. Certains phénomènes de vieillissement de la pierre peuvent être reproduits correctement par les simulations détaillées [DEJ*99]. Hirota *et al.* [HTK98] ont proposé une approche pour produire des modèles de fissures. Plus tard, ils ont étendu leur travail pour simuler les fissures 3D [HTK00]. Les patines et la corrosion destructive ont été étudiées dans [DH96, MDG01a]. La création des modèles solides présentée par Cutler *et al.* [CDM*02] permet d'appliquer le vieillissement sur quelques objets avec les opérateurs spécifiques. Desbenoit *et al.* [DGA05] présentent une méthode interactive pour modéliser des fissures et des ruptures sur des matériaux tels que le verre, le métal, le bois, et la pierre.

Malheureusement, ces méthodes sont limitées à un nombre restreint de textures. De plus, ces méthodes ont besoin de beaucoup de ressources (mémoire et CPU), et la simulation prend également beaucoup de temps. L'avantage principal d'une approche physique est qu'elle mène souvent aux résultats justes, habituellement près de la réalité (ça dépend du degré de précision du modèle).

Les cartes de relief, développées par Blinn [Bli78], affectent virtuellement des surfaces d'objets, en les faisant sembler rugueux, froissés ou bosselés. Il s'agit en fait d'un simple contrôle de la norme ou la direction de la normale sur la surface avant de calculer les ombrages, sans changement réel de la géométrie fondamentale du modèle. Ainsi, le résultat sur la silhouette de l'objet sera lisse et non réaliste. Les cartes de déplacement [Coo84] représentent un prolongement des cartes de relief pour résoudre ses limitations. Les points sont vraiment déplacés le long de leurs normales afin de changer la géométrie de la surface. Par conséquent, tous les problèmes des cartes de relief peuvent être correctement résolus mais avec un temps plus élevé de calcul. Max [Max88] a proposé une méthode qui améliore le temps de calcul, mais cette amélioration est limitée aux ombres sur l'objet lui-même (self-shadows). Cependant, même avec cette extension de carte de relief on ne peut pas résoudre le problème de la surface structurée très complexe comme le coton ou la fourrure. Par conséquent les autres genres d'approches qui peuvent s'appeler *textures géométriques* sont apparues plus tard [DG01].

1.4. Vieillessement

Bien que les dernières techniques d'infographie nous permettent de synthétiser les images virtuelles avec un certain réalisme, on peut facilement distinguer les images synthétiques des photographies réelles dans la plupart des cas. Cela prouve que les images synthétiques ont certaines caractéristiques en commun qui les rendent différentes des images photographiques. Ces caractéristiques sont en particulier la propreté des surfaces synthétiques d'objets. Les objets synthétiques sont habituellement parfaitement lisses, ordonnés et propres. D'autre part, des objets réels sont habituellement couverts de certaines imperfections et de défauts tels que les phénomènes de « *vieillessement* ». Ces derniers sont une famille très importante, qui incluent par exemple la pollution, la poussière, l'effritement, l'érosion, le corrosion, les efflorescences, les taches, etc.

Il existe différentes définitions du vieillissement selon le domaine scientifique concerné (par exemple sciences de matériaux, géologie, mécanique). En synthèse d'image la définition de base du phénomène du vieillissement peut être : tout processus qui détériore les objets. Ces processus peuvent être influencés par :

- Les facteurs externes, tels que les conditions atmosphériques, les conditions d'usage, et les dégâts mécaniques.
- Les facteurs internes, qui sont intrinsèques aux matériaux eux-mêmes, par exemple dus à leur fabrication.

Presque tous les objets réels qui nous entourent sont affectés par différents phénomènes de vieillissement, et donc on ne peut trouver que difficilement des objets parfaits et impeccables. Idéalement, on peut penser à une solution générique, qui nous permet de tenir compte du paramètre de temps dans les systèmes de rendu. Cependant, un nombre très important de paramètres serait oublié. Donc on ne peut pas considérer que le vieillissement est un seul phénomène à résoudre, mais beaucoup de phénomènes qui sont réunis ensemble.

Un modèle automatique et contrôlable de simulation de vieillissement de bâtiment et matériaux de construction donnerait une crédibilité importante aux environnements virtuels. Le monde virtuel sera beaucoup plus proche de l'univers réel, si dans un univers virtuel nous pouvons modéliser les briques et les mortiers dégradés, érodés ou encore attaqués par efflorescence au fil du temps, les métaux corrodés, les lichens et algues colonisent les murs, etc.

1. Introduction

Les briques et les maçonneries exposées à l'environnement sont attaquées par les contaminants atmosphériques comme les oxydes de carbone, les sulfures et l'azote qui contiennent l'eau de la pluie (l'acide de l'eau de la pluie par exemple). Ces liquides ne sont pas confinés sur les surfaces des objets mais ils pénètrent à l'intérieur des surfaces à une certaine distance, parce que les matériaux de construction tels que les briques et les bétons sont poreux [PKB*95]. La Figure 1-2 montre des différents phénomènes du vieillissement sur les matériaux de construction.

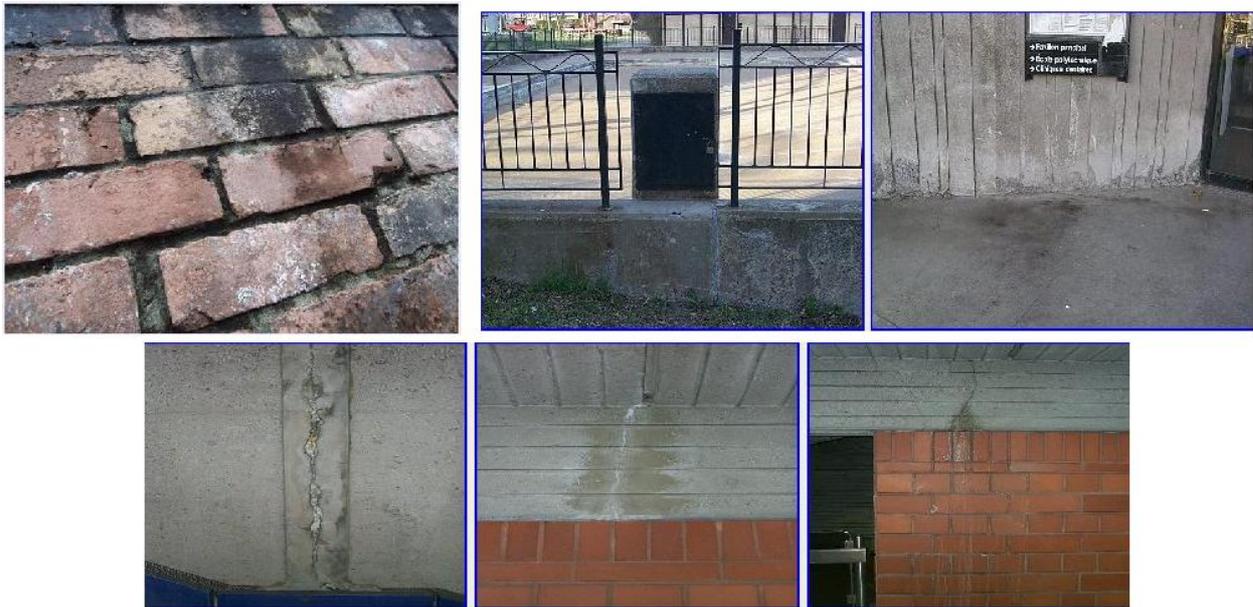


Figure 1-2 : Illustration de différentes formes de vieillissement sur les matériaux de construction : Pollution, Effritements, Fissures, Efflorescences.

Une des causes principales de la détérioration des matériaux de construction poreux est la détérioration par le transport d'humidité et de sel. L'efflorescence est un phénomène de dépôt/pénétration de sel se produisant sur une grande variété de matériaux. En particulier, ce défaut est de grande importance dans le cas des matériaux de construction, spécifiquement les briques et les bétons [HAC*01]. La Figure 1-3 présente des constructions affectées par ce phénomène.

Comme nous pouvons le constater, pour arriver à un réalisme satisfaisant on doit tenir compte aussi des effets de détérioration sur la surface. Nous présenterons dans le prochain chapitre les méthodes spécifiques et les processus de détérioration.



Figure 1-3 : Des constructions affectées par efflorescence

1.5. Éclairage

Pour obtenir des images réalistes, la représentation géométrique et l'application de textures et de vieillissement seules ne sont pas suffisantes. L'interaction entre la lumière et les objets de la scène en plus doit être modélisée, nécessitant une quantification du comportement des objets éclairés. Différents modèles d'éclairages ont été proposés : éclairage local (l'éclairage est calculé à partir de l'interaction directe entre les sources lumineuses et les objets) et global (tenant compte en plus de l'interaction directe entre les lumières et les objets, les lumières indirectes de la réflexion provenant d'autres surfaces dans la scène) [SP94].

Dans la pratique, en illumination globale, les lumières émanent des rayons de photons dans toutes les directions qui bombardent la scène. Quand ces photons frappent un objet, certains sont absorbés et d'autres sont reflétés et réfractés. Ces deux derniers (les rayons non absorbés) vont alors frapper d'autres surfaces. Le processus continue ainsi pendant un certain nombre d'itérations. Ce procédé permet notamment de voir les objets d'une scène qui ne sont pas illuminés directement par des lumières ou des réflexions de surfaces brillantes.

En illumination locale, il existe plusieurs effets de réflexions, mais les algorithmes les plus courants, basés sur des données empiriques pour calculer cette illumination, sont : L'algorithme de Lambert [ON94], Algorithme de Cornell [LFT*97], Algorithme de Phong [Pho75].

D'autres algorithmes parfois plus réalistes mais plus coûteux existent tels que Cook-Torrance [CT81], He-Torrance-Sillion-Greenberg [HTS*91], modèle multicouches Kubelka-

Munk [Cal93], Callet [Cal96], Oren et Nayer [ON94], Ward [Ward92], et Poulin/Fournier [PF90, Kaj85]. Ces modèles sont basés sur des fondements physiques. Parmi ces algorithmes, certains sont adaptés à un phénomène ou à un matériau particulier. Il existe aussi des algorithmes pour la conversion de micro-géométrie sous la forme de BRDF (Fonction de Distribution Bidirectionnelle de Réflexion.) [WAT92].

1.6. Contribution

Dans ce chapitre nous avons décrit la notion de réalisme en synthèse d'image et les éléments fondamentaux qui y sont liés. Parmi les différentes notions de réalisme, nous avons décidé de prendre la méthode photo réalisme.

Nous avons expliqué qu'il faut bien représenter la géométrie de l'objet. A cette géométrie il faut ajouter les autres détails comme la texture et l'effet de vieillissement. On doit également bien modéliser l'interaction lumière/matière.

Les travaux antérieurs les plus fondamentaux sur les méthodes de texture, surtout les méthodes solides 3D, sont présentés dans ce chapitre. Nous avons revu les méthodes 3D procédurales empiriques, analytiques, et les méthodes basées physiques. Nous avons montré que les méthodes 3D de texture sont de très bonnes alternatives aux méthodes 2D, mais aucune des méthodes présentées n'est parfaite. En effet, bien qu'il y ait des méthodes générales et spécifiques pour analyser et synthétiser les différentes textures, il n'y a aucune méthode automatique capable de générer les textures de construction humaine de façon correcte car dans les constructions humaines, le vieillissement n'est pas pris en compte. Pour résoudre ce problème, un grand nombre de phénomènes tels que des accumulations de saleté (taches) et de poussière, fissures, efflorescence, effritement, et rayures doit être pris en considération.

Les méthodes basées sur les textures sont, pour le moment, le moyen le plus simple d'ajouter des détails de vieillissement à un objet sans avoir besoin de modélisation géométrique. Elles sont parfaitement intégrées dans les outils graphiques.

Notre but est de générer les textures vieilles des murs attaqués par efflorescence et effritement. Afin d'obtenir les briques propres réalistes (sans efflorescence), nous proposons d'employer une technique classique solide de texture. Alors on peut manipuler cette texture

solide pour présenter l'efflorescence. D'après les informations fournies par ces efflorescences on peut générer différentes textures d'effritement.

Pour accélérer le processus de conception, on peut commencer par des photographies de l'effet désiré [War98] ou des textures prêtes à l'emploi issues de bibliothèques incluant des matériaux spécifiques vieillies par des processus communs. Dans le cadre de cette thèse nous utilisons des photographies d'objets réels.

Nous allons présenter un état de l'art dans le prochain chapitre en récapitulant les différentes méthodes de vieillissement déjà proposées en infographie. Aussi nous verrons précisément comment on peut simuler quasiment tous les types d'efflorescence y compris le cas où ce phénomène change la géométrie de la surface. De plus nous allons simuler de façon phénoménologique les problèmes d'effritement et l'altération de surface de mur.

1.7. Organisation de ce document

- Le deuxième chapitre aborde en détails les méthodes existantes en synthèse d'image concernant le phénomène de vieillissement et détérioration de surface. Nous définissons d'abord les différents processus de vieillissement, puis nous présentons les différentes méthodes déjà conçues pour manipuler les différents processus de vieillissement dans le domaine de la synthèse d'images avec leurs avantages et leurs inconvénients.
- Dans le troisième chapitre, nous présenterons d'abord les différents travaux existants pour construire des scènes comportant les matériaux de construction, puis un modèle phénoménologique empirique afin de synthétiser l'efflorescence fine sur des briques et mortiers. L'efflorescence fine (en couches minces) est très commune car elle affecte un grand nombre de constructions humaines et a des effets visuels importants. Notre méthode est phénoménologique car l'efflorescence est un problème physique complexe qui peut être défini selon différents paramètres.
- Toujours dans le cadre de défauts de matériaux de construction, particulièrement brique et mortier, le chapitre 4 présente d'autres défauts dus aux efflorescences. Nous allons employer le même modèle de la texture 3D afin de synthétiser l'efflorescence sur la maçonnerie, en étudiant d'autres aspects visuels comme la modification de la géométrie et

1. Introduction

certains dégâts mécaniques tel que l'effritement et éclatement de la partie extérieure de la surface. Cette méthode, comme la précédente reste phénoménologique et simple de mise en œuvre car elle est basée sur les méthodes bien connues de textures solides et cartes de déplacement. Le modèle et la méthode employés sont performants car ils ne consomment pas beaucoup de mémoire et ne nécessitent pas de longs temps de calculs.

Le modèle décrit peut être étendu pour prendre en compte de nombreux autres aspects pratiques du vieillissement tels que la pollution et les fissures. Nous aborderons une extension de notre méthode dans ces directions.

- Les méthodes développées dans le cadre de ce document fournissent de nouveaux algorithmes pour augmenter le réalisme des images contenant des matériaux de construction, grâce à des paramètres intuitifs et simples à contrôler. Cependant présenter des images où le vieillissement affectant d'autres composantes de la scène nécessite de nombreuses autres études. Nous présentons ceci dans les conclusions et les perspectives de nos travaux au dernier chapitre.

2. Modèles de vieillissement

En face d'un grand nombre de paramètres modélisant le vieillissement en infographie, nous proposons de classer les effets de vieillissement par types de processus :

- les processus chimiques qui comportent une transformation chimique sur les matériaux.
- les processus structurels qui changent la géométrie de l'objet sans aucune transformation liée au changement de composition des matériaux.
- les processus biologiques qui développent des organismes vivants sur les matériaux.

Puisque l'un des objectifs importants de l'infographie est d'obtenir des images réalistes, différentes méthodes ont été conçues pour manipuler ces différents processus dans le domaine du rendu. La représentation de la lumière et ses interactions avec les matériaux virtuels est étudiée depuis longtemps, en fournissant de nombreux modèles pour créer des résultats plus ou moins satisfaisants. Afin d'améliorer la qualité des images, beaucoup de travaux ont été faits dans les autres domaines de l'infographie tels que des méthodes basées sur les textures, des techniques géométriques, des techniques basées physiques et des techniques empiriques.

Dans les parties suivantes, nous allons voir les phénomènes mis en jeu lors du vieillissement des matériaux.

2.1. Modélisation de vieillissement

La modélisation des variations de textures associées au vieillissement est importante pour produire des scènes réalistes. Dans la pratique, de telles textures sont produites par des

2. Modèles de vieillissement

combinaisons compétentes du traitement des photographies numériques et de la peinture numérique artistique, en utilisant des méthodes comme celles décrites par Demers [Dem01]. Pour fournir des outils plus puissants pour modéliser les textures au-delà d'un processus pixel-par-pixel et de la manipulation des coordonnées de texture, de nombreux chercheurs ont proposé des méthodes pour produire systématiquement les textures complexes qui sont associées aux processus physiques.

Les méthodes procédurales de texture [Gar84, Coo84, Gar85, Pea85, EMP*94, EMP*03], le placage de texture [Cat74, BN76], les cartes de relief [Bli78], et les cartes de déplacement [Coo84, Max88, WTL*04], sont communément employées pour ajouter des détails et se révèlent importantes pour les modèles de vieillissement (voir [PPD01] pour plus de détails).

Les textures permettent d'ajouter sur les surfaces ces détails qui sont habituellement trop complexes pour être modélisés directement. En plaquant une image sur la surface [Cat74, BN76], on peut modifier ses couleurs, ses paramètres d'ombrages (BRDF), perturber l'orientation de ses normales [Bli78] ou altérer sa géométrie [Coo84, Max88, WTL*04].

Les méthodes basées sur les textures sont parfaitement intégrées dans les matériels graphiques actuels et permettent une accélération significative des processus de synthèses.

Cependant, créer des textures manuellement ou paramétrer les méthodes procédurales de texture [Gar84, Coo84, Gar85, Pea85, EMP*94, EMP*03] prend du temps et exige des qualifications artistiques et techniques. De plus, ces différents phénomènes exigent des méthodes spécifiques avec différents paramètres.

D'autres méthodes de modélisation des effets de vieillissement sont basées sur la modification de la géométrie et représentent une issue spécifique au problème de vieillissement.

La sculpture virtuelle et les systèmes de simulation chirurgicale sont parmi les techniques géométriques les plus reliées aux détails de surfaces.

Néanmoins, les modifications de détails fins sont difficiles, et par conséquent, inconfortables pour des effets répétitifs.

Les méthodes basées physiques et les méthodes empiriques ou leur combinaison ont été présentées en simulant le processus physique réel adapté aux effets spécifiques. Ces systèmes donnent normalement des résultats précis et réalistes. Mais cette exactitude nécessite souvent un maillage complexe et donc un coût significatif en mémoire et en temps de calcul.

Des modèles biologiques tels que la fourrure, les écailles et la peau, qui ne sont pas des défauts dus au vieillissement, peuvent être modélisés en utilisant le principe de réaction-diffusion [Tur91, WK91] ou les textures cellulaires [FLC*95, Wor96].

La simulation d'écoulement [DPH96] emploie la gravité et les équations différentielles pour rapprocher l'interaction de la pluie sur un objet en simulant des taches sur la pierre ou le béton.

Dans [DEJ*99], les effets de l'eau sur la pierre sont représentés en résolvant des équations différentielles complexes pour contrôler le changement des propriétés des roches.

La simulation des phénomènes de séchage et d'humidité sur les objets qui changent l'apparence du matériau (par exemple l'humidité fait foncer la couleur de diffusion) est réalisée par Lu *et al.* [LGR*05].

D'autres techniques basées physiques simulent des fissures [HTK98, HTK00, ADK*02] ou même encore des éclatements ou des fractures [OH99].

Puisque modéliser un objet et son vieillissement est un processus qui nécessite un important travail de modélisation, les scanner 3D ont été utilisés comme méthode pour obtenir les modèles numériques détaillés pour des applications d'infographie et dans certains cas spécifiquement liés au vieillissement. Le traitement des données capturées à partir des objets scannés en 3D est devenu un domaine très actif en infographie. Lu *et al.* [LGG*07] ont proposé un modèle permettant de capturer des données physiques, incluant les mesures de forme et d'autres facteurs environnementaux, tout en prenant en compte un aspect variable des objets soumis à différents phénomènes physiques.

Les techniques empiriques essaient d'imiter l'aspect de l'effet, plutôt que le processus physique qui a lieu. Ces techniques mènent souvent à des systèmes plus simples avec un contrôle plus intuitif.

Par exemple, l'accessibilité d'ombrage présentée dans [Mil94] rapproche l'accumulation de la saleté dans les coins et les secteurs difficiles d'accès en considérant des facteurs géométriques locaux. L'accumulation de la poussière [HW95, CXW*05] est simulée par une source de poussière contrôlable par l'utilisateur.

Beaucoup de gens ont tenté de modéliser les patines ou les rouilles métalliques : Becket et Badler [BB90], Dorsey et Hanrahan [DH96], Gobron et Chiba [GC97], Wong *et al.* [WNH97],

2. Modèles de vieillissement

Chang et Shih [CS00, CS03], Mérillou *et al.* [MDG01a], Chen *et al.* [CXW*05], et Lu *et al.* [LGG*07] par exemple. Pour faciliter la conception des textures de patines métalliques, Dorsey et Hanrahan [DH96] ont rassemblé une collection d'outils pour concevoir, combiner et rendre des textures d'épaisseurs variables.

Les scènes réelles sont souvent très complexes et se composent d'un grand nombre d'objets et matériaux différents. Ainsi, ces objets et matériaux peuvent être soumis à une variété infinie de conditions externes (exposition à l'atmosphère, occlusion, ...). Le calcul d'une scène vieillie qui semble réaliste peut comporter l'utilisation de nombreuses techniques de vieillissement. Des recherches ont également été faites sur l'intégration de plusieurs processus de vieillissement dans un système cohérent et simple de vieillissement. Par exemple :

- Becket et Badler [BB90] ont proposé des règles spécifiques pour modéliser chaque processus de vieillissement avec la conception d'un langage spécifique développé par des auteurs, pour une interaction facile.
- Wong *et al.* [WNH97] emploient des sources de tendance qui représentent l'occurrence potentielle de l'imperfection de la surface.
- Chen *et al.* [CXW*05] ont utilisé l'algorithme de traçage de γ -ton (se prononce gamma-ton) pour simuler différents effets de vieillissement tels que la poussière, la rouille, l'érosion. Il s'agit d'un algorithme permettant d'introduire des particules de vieillissement, ressemblant à la méthode de traçage de photon [Jen96]. Premièrement des particules de γ -ton sont créées à partir de différentes sources et sont dirigées dans la scène. Quand les particules se heurtent à la géométrie, elles s'installent sur l'objet et s'accumulent ou transportent des substances sur l'objet avant la déviation (Figure 2-1). Une fois que la simulation de particules est complète, la scène peut être rendue avec les informations du vieillissement. Ainsi, une méthode BRDF pour chaque point de la scène est calculée à partir de la quantité de substance cumulée à ce point.

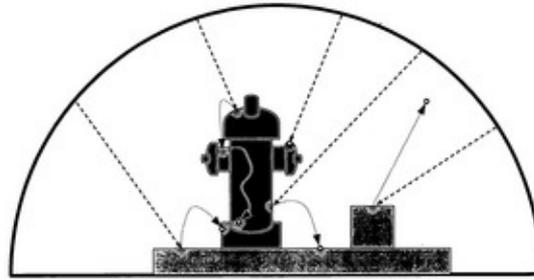


Figure 2-1 : Lancer de γ -ton à partir d'un environnement hémisphérique. La source de γ -ton rebondit dans la scène et introduit des effets de vieillissement. Image tirée de l'article [CXW*05].

- Lu *et al.* [LGG*07] présentent une méthode pour simuler des textures progressivement variables. Ils ont présenté une approche générale pour modéliser une large portée des phénomènes de vieillissement. Ils ont introduit l'idée des paramètres de contextes pour contrôler ces textures. En reliant les textures et les paramètres de contextes sur un objet de test, on peut transférer des textures générées sur d'autres objets. Les contextes sont calculés à partir d'un objet réel affecté par un vieillissement et sont contrôlés par l'occlusion ambiante, la direction principale, la courbure de la surface, l'orientation de la surface et l'épaisseur de couche de matériau de vieillissement sur l'objet. Les phénomènes chimiques comme les patines et les rouilles, les dégâts structurels comme l'écaillage, et les effets biologiques comme la croissance de moisissure peuvent être pris en compte.

2.2. Méthodes de vieillissement

Nous présentons dans cette section les différentes méthodes spécifiques conçues pour, ou reliées aux effets de vieillissement. Nous définissons d'abord les différents processus de vieillissement.

2.2.1. Processus chimiques

Les processus chimiques transforment le matériau original en une substance avec une composition différente, et différentes caractéristiques physiques. Les exemples des modèles de

changement de composition chimique incluent la patine métallique [DH96, WNH97, CS00, CS03, LGG*07], la corrosion [BB90, GC97, MDG01a, LGG*07] et le vieillissement de la pierre [DEJ*99].

2.2.1.1. Oxydation (Corrosion, Patine)

L'oxydation est un phénomène dû à la détérioration d'un matériau en fonction de son environnement. Presque tous les types de matériaux sont attaqués par ce phénomène mais seuls les métaux sont soumis à une corrosion plus importante, visible à l'oeil humain.

La corrosion ou les patines métalliques sont des phénomènes communs que l'on peut souvent observer et qu'on ne peut pas empêcher malgré des études bien précises sur leur apparition.

Becket et Badler [BB90] ont tenté de simuler le développement de la rouille itérativement. La distribution de rouille est faite en fonction de la position de l'objet. La densité de la rouille est contrôlée par le nombre de pas de simulation calculés.

Leur méthode représente la partie rouillée à l'aide d'une texture 2D changeant d'aspect au fil du temps. Cette stratégie est simple et pourrait être améliorée efficacement en initialisant la texture afin de stocker des informations additionnelles, telles que la géométrie ou la BRDF calculée en chacun des points de l'objet.

Dorsey et Hanrahan [DH96] ont essayé de simplifier et de modéliser le processus de formation des patines métalliques due à l'oxydation.

En raison de la nature complexe du procédé d'oxydation, les auteurs ont choisi d'approcher le problème de façon phénoménologique, en reproduisant le résultat de façon visuellement plausible du comportement physique. Le cuivre a été choisi comme base pour observer la formation des patines formées par le processus d'oxydation atmosphérique, se traduisant par l'apparition d'une couche terne à la surface de l'objet, formant une base de dépôt d'oxydes de cuivre, de sulfures et de sels de cuivre organiques et inorganiques pouvant se développer.

La surface est d'abord définie par différentes couches. Chaque couche est composée d'une surface homogène et dispose de ses caractéristiques de réflexions. Des opérateurs

d'érosion des couches, du polissage ou de remplissage sont utilisés pour le développement de chaque couche. Ces opérateurs ont comme entrée des textures qui contrôlent leur application. Le résultat (la surface affectée) est alors obtenu par une superposition de couches sur lesquelles ces opérateurs sont appliqués. Pour simuler la variation de l'épaisseur avec le temps, les auteurs appliquent divers opérateurs sur la surface considérée.

Leurs travaux permettent d'obtenir des images réalistes, mais les processus d'oxydations sont très difficiles à modéliser. L'utilisateur doit connaître les composantes des diverses couches du matériau attaqué puis déterminer un nombre important de paramètres.

La Figure 2-2 montre une statue rendue avec la méthode de Dorsey et Hanrahan [DH96].

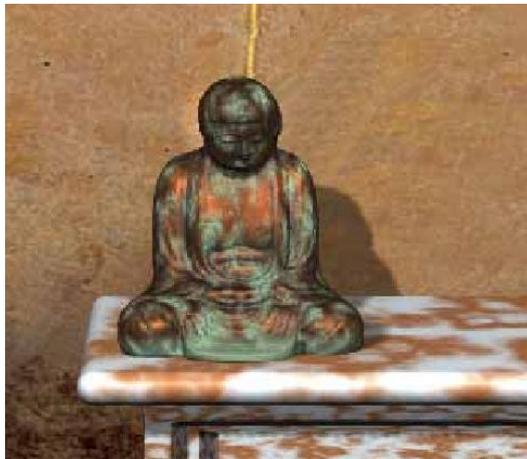


Figure 2-2 : Illustration de l'habillage fin de la ternissure de sulfure de cuivre et de la patine verte rugueuse. Image tirée de l'article de Dorsey et Hanrahan [DH96].

Gobron et Chiba [GC97] ont simulé les effets d'écoulement de liquides et la corrosion.

L'écoulement est semblable au travail de Dorsey *et al.* [DPH96], en utilisant la propagation d'eau et des dépôts et la dissolution. La modélisation de la corrosion est effectuée à l'aide de la méthode de Becket et Badler [BB90], en ajoutant des nouveaux pixels de rouille et en propageant ces pixels de rouille vers ses voisins dans l'espace texture.

Cette technique permet la mise en relation de deux phénomènes différents et complexes mais les résultats de cette méthode ne sont pas visuellement réalistes.

2. Modèles de vieillissement

Wong *et al.* [WNH97] ont proposé une approche dépendante de la géométrie de l'objet pour simuler les patines en distribuant efficacement les patines métalliques à la surface de l'objet.

Bien que les auteurs arrivent à une distribution correcte des patines sur l'objet, les résultats apparaissent peu réalistes.

Chang et Shih [CS00] ont tenté de simuler ce même effet sur les métaux enterrés (les objets antiques), en utilisant les règles de L-systems [Lin68, PL90, Han92]. Plus tard en 2003, ils ont étendu leurs études pour les objets rouillés dans la mer [CS03].

Les paramètres d'évolutions des patines et des rouilles sont faciles à régler et les résultats obtenus dans les deux cas (métaux enterrés [CS00] et métaux enfouis sous la mer [CS03]) sont réalistes. Les règles nécessaires pour simuler les objets attaqués sont peu nombreuses, même pour un objet complexe. Cependant, cette méthode nécessite que l'objet considéré soit très finement maillé, et engendre donc un coût de mémoire élevé. Ainsi, implanter ces règles n'est pas intuitif et nécessite une certaine expérience.

Afin de simuler la corrosion atmosphérique, Mérillou *et al.* [MDG01a] ont proposé un modèle physique phénoménologique fondé sur des résultats expérimentaux.

Leur modèle permet de simuler plusieurs types de corrosions telles que la corrosion uniforme, galvanique, par piqûre ou même l'aération différentielle.

La simulation de rouille est faite sur une texture 2D en considérant que les points de départ de la rouille sont placés aléatoirement et se propagent aussi de façon aléatoire sur leurs voisinages.

Chaque texel (élément de texture) prend en compte les caractéristiques visuelles importantes telles que la réflectivité, la couleur et la géométrie. Le rendu est réalisé à l'aide de la méthode BTF (Bidirectional texture function) [Dis98].

En fournissant différents paramètres physiques et empiriques, cette méthode permet à l'utilisateur d'avoir un contrôle satisfaisant du comportement de la corrosion.

Bien qu'obtenant des résultats réalistes (voir Figure 2-3), cette technique travaille dans un espace 2D et ne peut donc pas s'appliquer au volume entier d'un objet.



Figure 2-3 : Une comparaison entre l'image réelle (à gauche) et l'image synthétisée (à droite). Image tirée de l'article de Mérellou *et al.* [MDG01a].

Lu *et al.* [LGG*07] proposent un système qui combine des techniques de différents secteurs, qui peuvent être divisés en deux catégories : des procédures pour produire « *une texture de contexte* » et les outils et algorithmes qui sont nécessaires pour appliquer cette texture à un nouvel objet synthétique. La génération « *d'une texture de contexte* » commence par un ensemble d'expériences contrôlées sur de vrais objets attaqués par des phénomènes d'oxydation. Pendant que ce processus se développe, la forme (géométrie) et le changement de texture de l'objet sont sauvegardés, à des étapes régulières de temps. De plus, ils mesurent tous les autres facteurs qui peuvent influencer l'effet de vieillissement. Comme le changement de texture provoqué par un phénomène physique dépendra de la géométrie de l'objet et d'autres paramètres expérimentaux [WNH97], ils analysent ces interactions en 2^{ème} étape. Ils identifient les paramètres de contexte qui décrivent l'objet, peuvent approximativement modéliser le vieillissement. Les étapes ci-dessus doivent être exécutées juste une fois pour chaque texture, qui modélise un certain phénomène. Pour appliquer la texture à un autre objet, ils fournissent un algorithme de transfert, qui est basé sur les techniques de synthèse de texture. La synthèse est guidée par les paramètres de contexte afin de modéliser les variations systématiques des textures. La Figure 2-4 récapitule ces processus.

La Figure 2-5 montre le développement de patines sur des objets en cuivre. L'objet de source est le plateau de cuisine en cuivre, et les cibles sont un hippocampe en cuivre et une statue de fée en cuivre. Le paramètre de contexte est « *l'occlusion ambiante* » (voir la section 2.1).

2. Modèles de vieillissement

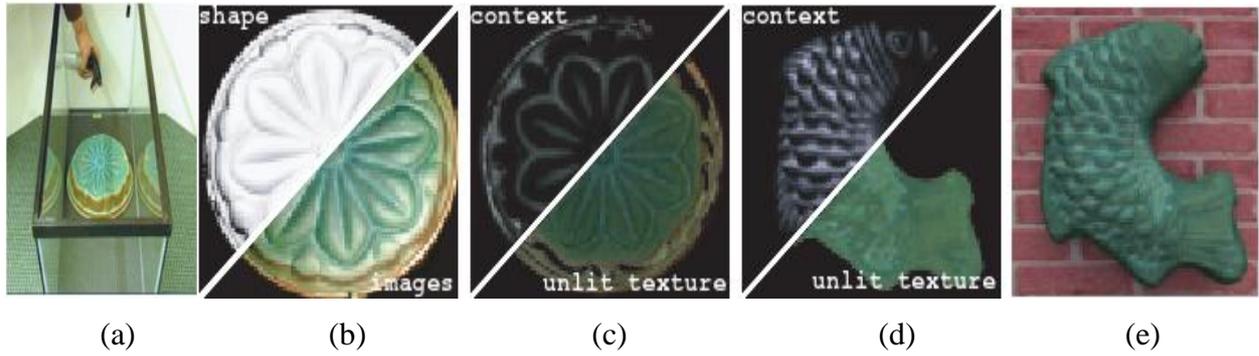


Figure 2-4 : Le résumé de la méthode [LGG*07] : (a) faire vieillir le vrai objet (ici une solution uniformément pulvérisée sur un plateau de cuivre). (b) sauvegarder les formes et les changements de textures de l'objet. (c) calculer des textures sombres et les relier avec les contextes. (d) et (e) diriger par les paramètres de contextes, les informations de textures calculées sont transférées sur des nouveaux objets de synthèses. Image tirée de l'article [LGG*07].

Cette méthode donne des résultats réalistes avec un temps de calcul raisonnable. Les temps de calcul pour l'hippocampe (365 421 triangles) et la fée (478 004 triangles) sont de 12 et 30 minutes respectivement, par exemple. L'ajustement local d'objet, normalement peut prendre moins d'une seconde, donc on peut utiliser cette méthode même pour certaines applications en temps réel. Cependant cette technique exige des instruments de mesure coûteux, ainsi qu'une analyse très précise des contextes pour simuler le vieillissement de matériaux.



Figure 2-5 : Développement de patine sur les objets en cuivre, avec l'occlusion d'ambient comme contexte. Les images de gauche sont des images originales attaquées par le vieillissement. Les images de milieu et de droite sont des images de synthèse, réalisées en transformation des textures synthétisées sur les formes de l'hippocampe et de la fée.

2.2.1.2. Vieillissement de la pierre

Julie Dorsey et al. [DEJ*99] ont développé une méthode pour modéliser et rendre les changements de la forme et de l'aspect de réflexion de la pierre dus au processus de vieillissement avec le temps. Le processus de vieillissement de la pierre est simplifié et représenté par le transport de l'humidité, dissolution et recristallisation des minéraux, transformation chimique des minéraux et dépôt des polluants atmosphériques.

Note : Cette technique est décrite de façon plus détaillée dans le chapitre 4, où nous présentons la cristallisation et l'effritement.

2.2.2. Processus structurels

Les processus structurels impliquent la désintégration d'un matériau aux fragments, ou le transport et le dépôt de matériau, tels que la saleté (tache) et les sels (cristallisation). Les phénomènes induits par les contraintes et les ruptures mécaniques incluent les fissures [HTK98, HTK00], les écaillures [WNH97, GC01a, PPD02], les rayures [BB90, BL99, MDG01b, BPM*04], les impacts [PPD01], la porosité [MDG00], l'érosion [KMN88], etc. Les exemples des procédés de transport incluent l'accumulation de la poussière [HW95, Mil94] et l'écoulement de liquide [DPH96]. Notons que nous avons considéré certains défauts comme la porosité ou la rugosité comme les défauts structurels. Cette hypothèse n'est pas tout à fait juste, car ces défauts sont dus à la fabrication d'origine du matériau, et ne sont pas liés aux effets du vieillissement.

2.2.2.1. Porosité

Normalement beaucoup de matériaux comportent des pores qui induisent des changements de distribution bidirectionnelle de réflexion (BRDF), se traduisant visuellement par une diminution de la réflexion spéculaire, et étant donc ainsi étroitement liée aux caractéristiques géométriques des surfaces considérées.

Afin de simuler ce phénomène, Mérimou *et al.* [MDG00] ont présenté un modèle de BRDF amélioré, prenant en compte la porosité, modélisée par différentes particules cylindriques

2. Modèles de vieillissement

orthogonales à la surface et perturbant leurs géométries à l'aide de la fonction de turbulence de Perlin [Per85].

L'ajout de ces particules permet une diminution de la composante spéculaire, diminuant ainsi l'ensemble des composantes diffuses et spéculaires.

Cette méthode a l'avantage d'être cohérente au modèle BRDF original en ce qui concerne les propriétés physiques de réflexion.

De plus, elle n'engendre pas de coûts de calculs supplémentaires significatifs en comparaison avec le modèle original.

La Figure 2-6 représente respectivement une photographie réelle d'un pot en terre cuite, une image de synthèse utilisant la méthode BRDF de Ward [Ward92] sans porosité, et une image de synthèse obtenue avec la BRDF de Ward transformé.

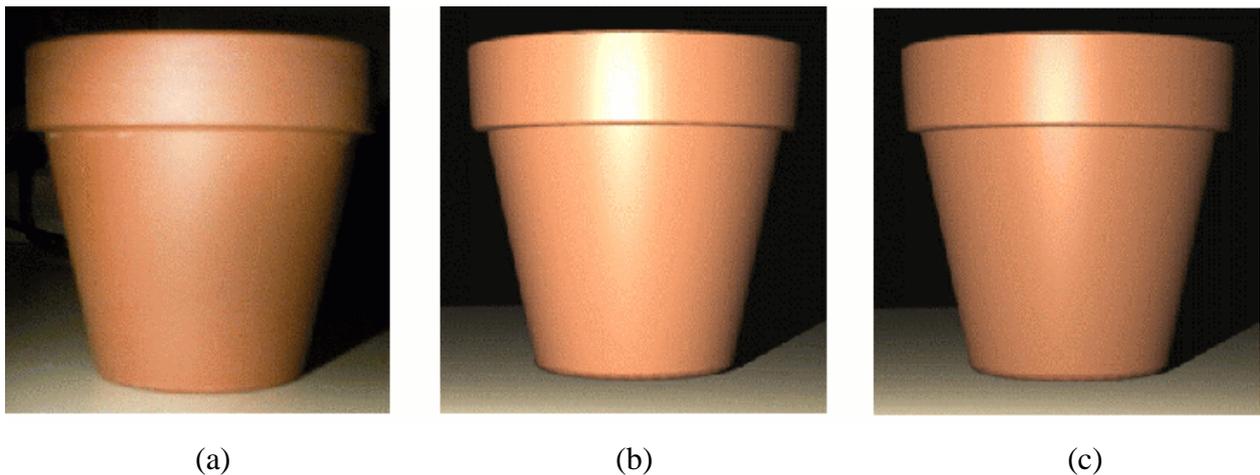


Figure 2-6 : (a) Un pot en terre cuite, (b) le pot rendu avec la BRDF de Ward [Ward92], (c) le pot rendu avec la méthode de [MDG00]. Image tirée de l'article Méridou *et al.* [MDG00].

2.2.2.2. Érosion

L'érosion est le processus de dégradation et de transformation du relief d'un objet, causée par certains agents externes. L'érosion façonne une infinité de paysages parfois très impressionnants. Un relief dont le modèle s'explique principalement par l'érosion est dit « *relief d'érosion.* » L'érosion est favorisée par la pente du sol, le climat (changements brusques et

importants de température, vents forts, orages), par la composition physique (roche tendre et cristallisation de sel) et chimique (roche soluble) de la roche.

Kelley *et al.* [KMN88] ont réalisé des modèles empiriques de l'érosion de jet d'eau. Le réseau fluvial (maillage) complexe est développé par subdivisions successives d'un seul jet d'eau selon des règles empiriques. Ce réseau fluvial est alors interpolé en utilisant les paramètres de tension pour former les profils des vallées.

Les résultats obtenus sont réalistes (la Figure 2-7). Les paramètres de système sont simples à contrôler. Le temps de calcul est très court. Mais on ne peut pas positionner plusieurs jets d'eau correctement.

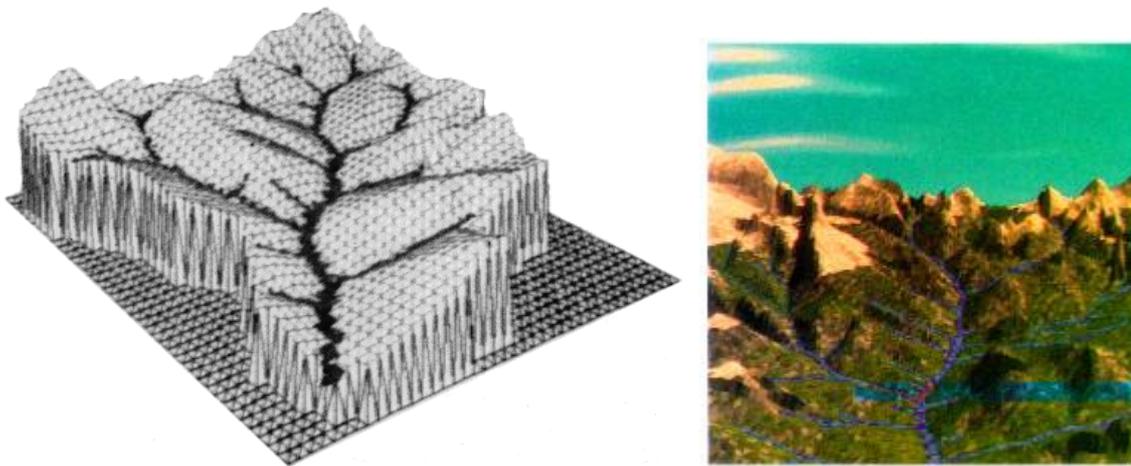


Figure 2-7 : L'image de gauche présente un relief par modèle d'érosion pour le réseau fluvial et le terrain. L'image de droite présente un paysage complet de montagnes et le réseau fluvial et la mer. Illustration extraite de l'article [KMN88].

Musgrave *et al.* [MKM89] ont employé les fractales pour modéliser l'érosion. Tout d'abord ils ont distribué à la surface une carte de déplacement en utilisant des fonctions fractales et des bruits. Ensuite, ils ont appliqué à la surface des érosions pour créer le réseau fluvial simple. Les résultats obtenus sont réalistes (la Figure 2-8).

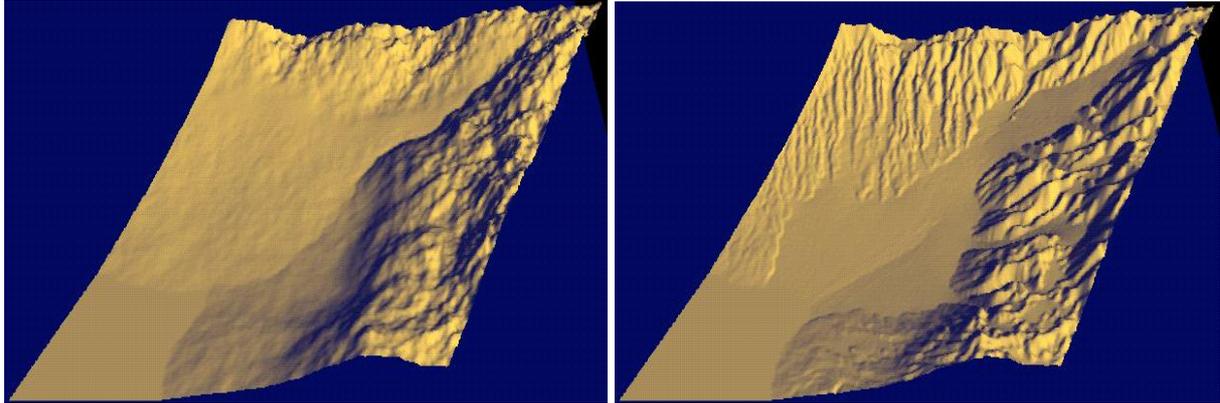


Figure 2-8 : L'image de gauche présente une surface originale construite par fractales. L'image de droite présente le résultat obtenu par l'algorithme d'érosion de [MKM89]. Images tirées de l'article [MKM89].

2.2.2.3. Fissures, fractures, écaillures

Cette catégorie regroupe les détails nés de la présence de forces mécaniques tels que les forces de frottement, les chocs et les forces de tension qui donnent lieu à la formation de fissures, fractures et d'écaillures.

La formation des fissures et des fractures est principalement traitée par une simulation physique [HTK98, OH99, HTK00, GC01b, OBH02], tout comme les écaillures [WNH97, GC01a, PPD02]. L'approche de la simulation physique offre des résultats réalistes mais est extrêmement coûteuse.

La fissure est une désintégration systématique des liaisons de matériaux (raccordements). Sa forme change selon le matériau, la géométrie de l'objet, et probablement, des contraintes extérieures. Une craquelure peut apparaître quand les contraintes internes (les tensions) d'un matériau sont plus grandes que la résistance du matériau : Une liaison solide se casse sous tension, puis ses voisins, etc.

Hirota *et al.* [HTK98] proposent l'utilisation d'un réseau de masse ressort pour simuler l'apparition de fissures sur des objets. Les déformations et les forces internes sont décrites par ce réseau et les fissures sont créées en rompant les ressorts. Les auteurs proposent de ne modéliser les fissures qu'en surface, se justifiant en citant des exemples du monde réel (goudron, écorces par exemple) dont les fissures ne sont visibles qu'en surface. Cela a l'avantage de simplifier les problèmes.

Les résultats obtenus à partir de cette méthode sont pourvus d'un certain réalisme, mais le rendu des craquelures souffre d'aliassage ainsi qu'un temps de calcul énorme. De plus, il ne peut traiter des fissures se propageant à l'intérieur de l'objet ni la destruction complète de l'objet causé par plusieurs fissures, ce qui exige un modèle 3D. Dans cet esprit Hirota *et al.* [HTK00] ont proposé une méthode en améliorant leur dernier travail pour la simulation des fissures 3D basé sur un modèle du ressort 3D.

Gobron et Chiba [GC01b] présentent une méthode semi-physique permettant de fissurer les objets 3D en maillage triangulé. Bien que les paramètres ne soient pas faciles à contrôler, les résultats obtenus sont réalistes.

Terzopoulos et Fleischer [TF88] ont présenté un modèle de déformation basé sur des lois physiques. Le modèle de simulation proposé s'intéresse aux déformations visco-élastiques et plastiques d'objets ainsi qu'aux fractures. Dans cet article, les auteurs proposent la prise en compte d'un comportement inélastique d'un corps à partir d'un modèle de représentation des déformations.

Cette méthode est réalisée à partir du maillage de la surface de l'objet. Même si leur méthode peut-être utilisée pour toute animation de déformation, les résultats obtenus sont peu réalistes.

Norton *et al.* [NTB*91] ont proposé une méthode de simulation physique pour conduire l'animation d'objets qui se brisent. La fracture est modélisée par des objets flexibles tridimensionnels comme limite du comportement élastique. L'objet est modélisé par un maillage de petits objets pour mieux s'adapter aux contours de l'objet principal.

Pour cette méthode l'ajustement des paramètres n'est pas très simple, de plus, le temps de calcul est important, et les images obtenues ne sont pas réalistes.

Le modèle de Neff et Fiume [NF99] est basé sur la notion de « *blast curve* » qui donne la force qui pousse l'objet vers l'explosion en fonction de la distance du centre de matériau explosif. Leur approche est basée sur la notion de la rupture rapide dans laquelle les microfissures d'un matériau ainsi que les forces exercées écartent rapidement les particules de l'objet pour le fragmenter.

La simulation à partir de cette méthode est rapide, l'ajustement des paramètres est facile, vu leur petit nombre.

2. Modèles de vieillissement

Mazarak *et al.* [MMA99] ont présenté une méthode physique simulant l'impact de vagues sur les objets. Ils ont représenté un objet avec des voxels et des liens entre eux. La fracture se produit quand les liens entre les voxels sont brisés. Malgré la simplicité de cette méthode, les résultats sont peu réalistes.

O'Brien et Hodgins [OH99] proposent un modèle permettant la simulation de fractures pour des objets fragiles qui ont un comportement purement élastique jusqu'à ce que survienne la fracture. Le modèle proposé s'appuie sur un modèle continu de la mécanique et sur la méthode des éléments finis (FEM) pour résoudre les équations différentielles provenant du modèle continu.

En analysant le tenseur calculé sur un modèle d'éléments finis, la simulation détermine où les fissures devraient lancer et dans quelles directions elles devraient se propager. L'objet est alors remaillé dynamiquement pour s'adapter aux fissures. Avec leur système on peut obtenir des animations de brisures de façon réaliste. La Figure 2-9 montre certains résultats de cette méthode.

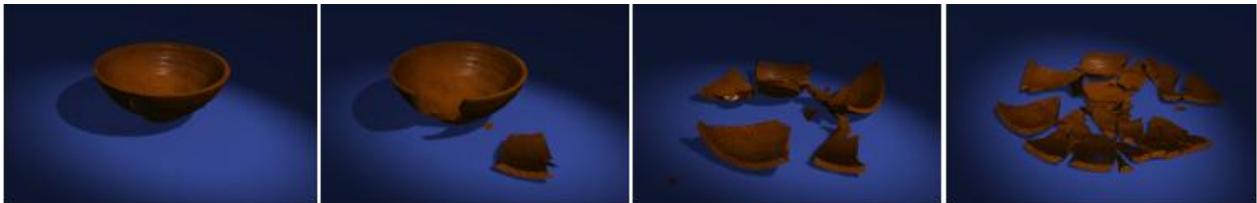


Figure 2-9 : Les 4 dernières images (frame) d'animations des cuvettes qui ont été lâchées sur une surface dure. Chacune des cuvettes a été lâchée de la même hauteur, mais avec d'autres paramètres mentionnés dans [OH99]. Image tirée de l'article [OH99].

Smith *et al.* [SWB00] avaient présenté une méthode pour la simulation rapide et contrôlable de l'éclatement d'objets fragiles sous impact. Cette méthode, dérivée des méthodes masse ressort, considère un objet comme étant représenté par un ensemble de points de masse mis en relation par des contraintes linéaires de distance. Cette utilisation des contraintes de distance au lieu de ressort permet d'accroître un gain significatif dans la vitesse, tout en gardant toujours un ajustement fin du comportement de rupture.

Les forces exercées près de ces contraintes pendant l'impact sont calculées en utilisant les multiplicateurs de Lagrange. Ces forces de contraintes sont alors employées pour déterminer quand et où l'objet se cassera, et pour calculer les vitesses des nouveaux fragments créés.

Cette méthode qui est limitée pour les objets fragiles donne des résultats peu réalistes comme on peut voir sur la Figure 2-10.



Figure 2-10 : A gauche une cuvette en céramique vernie, ensuite au centre et à droite étant cassée avec deux distributions différentes de contrainte-force. Image tirée de l'article [SWB00].

Dans [OBH02] O'Brien *et al.* décrivent une méthode pour animer les ruptures ductiles en matériaux solides communs tels que le plastique et le métal. La technique proposée reprend les mêmes bases que la précédente [OH99].

Afin de pouvoir prendre en compte la déformation plastique d'un matériau, une modification est faite au niveau de l'expression de la métrique de déformation permettant le calcul des forces internes. Une autre modification qui survient par rapport à l'algorithme précédent est la mise à jour de la déformation plastique à chaque pas d'intégration.

Les images obtenues sont un peu plus réalistes par rapport à la méthode précédente [OH99], car comme il en est fait la remarque dans l'article, peu d'objets réels ont un comportement purement élastique. Il y a même un nombre important d'objets dont le comportement va alterner plusieurs fois entre régime plastique et régime élastique.

Récemment, Zhang *et al.* [ZZS*06] ont proposé une méthode hybride composée par la méthode sans maillage (basé sur les particules) et la méthode éléments finis (basé sur le maillage). La simulation commence par un maillage tétraédrique. Quand la contrainte des éléments atteint un seuil, les noeuds associés sont convertis en particules de masse. Leur

2. Modèles de vieillissement

technique est bien adaptée pour présenter les débris de fracture. Aussi cette méthode a l'avantage de réunir tous les types de fissures qu'on peut créer par les méthodes éléments finis et sans maillage avec un seul algorithme. Mais les auteurs ont décrit leur algorithme de maillage d'objet comme très coûteux en temps.

Les fissures causent également l'écaillage de la couche de peinture avec le temps. C'est un effet visuel important dû à la grande diversité des surfaces affectées (presque toutes les surfaces peintes).

Après quelques années d'exposition de peintures, des fissures apparaissent sur les portes peintes en bois, ayant souvent comme résultat l'apparition d'écaillures de la couche de peinture en bois. Ces effets visuels peuvent être très significatifs, il est donc important de les inclure parmi les phénomènes à reproduire par les méthodes d'infographie. Comme tous les effets de vieillissement et de dégradation, simuler et rendre de tels phénomènes apporte aux images un certain réalisme.

Wong *et al.* [WNH97] ont présenté une méthode simple pour ajouter et positionner la zone écaillée sur un objet. Leur méthode considère un type particulier d'écaillures.

Gobron et Chiba [GC01a] ont proposé une technique cellulaire automate basée sur leur méthode de fissure [GC01b] pour simuler les peintures écaillées. Ils emploient un ensemble de fissures défini comme entrée. Ces fissures et les modèles associés permettent de grouper les cellules d'écaillures aussi bien que de contrôler leurs étapes finales de parcours. Cette technique cependant n'explique pas les caractéristiques de couche/surface physiques telles que l'adhérence et les différentiels de contraintes mécaniques. Cette méthode donne des résultats peu réalistes.

Paquette *et al.* [PPD02] ont proposé une méthode physique inspirée de génération de fissures et écaillures sur les couches de peinture. Leur modèle est représenté avec les propriétés de la surface en une grille 2D et avec un ensemble de segments représentant des craquelures. Ces craquelures sont propagées sur la surface en calculant pour chaque étape, la tension et les forces d'adhérence et les comparant aux forces maximales de coupure et de craquelure que la couche de peinture peut tolérer avant d'ajouter l'écaillage. La tension d'élasticité est détendue dans les cellules fermées d'un segment de craquelure. Quand deux craquelures sont assez étroites (dans la même cellule), leur intersection est forcée en ajoutant des segments de craquelure. En conclusion, ayant des chemins de fissures et leur largeur, la simulation de fissure est passée à la

phase de rendu. L'étape suivante consiste à créer la géométrie du défaut et la mettre directement sur la surface.

Cette approche produit des résultats visuellement réalistes. S'il le désire, l'utilisateur peut générer des fissures avec différentes textures pour décrire les différentes propriétés de surfaces.

2.2.2.4. Rayures isolées

Les rayures isolées sont l'autre exemple qui s'inscrit également dans les processus de changement d'aspects visuels dus au vieillissement des surfaces.

Bien que leurs microgéométries ne soient pas visibles, elles sont individuellement perceptibles par l'œil humain, se trouvant dans une représentation d'échelle entre BRDF et texture.

Afin de simuler ce phénomène, on a besoin de connaître leurs positions sur la surface, pour déterminer où on peut calculer le BRDF des rayures au lieu du BRDF de la surface ordinaire. Pour localiser les rayures, certaines méthodes proposées sont basées sur le plaquage d'une texture, qui représente le chemin de rayure [BB90, BL99, MDG01b], ou sur la définition d'une courbe sur l'objet à rayer [BPM*04].

Les auteurs qui ont proposé en premier le rendu des rayures isolées sont Becket et Badler [BB90] qui ont développé un système permettant une simulation de divers types de défauts sur des surfaces et en utilisant des techniques 2D de génération de texture.

Les rayures sont ainsi considérées comme des lignes droites de longueurs et de directions variables. Leur comportement vis-à-vis de la lumière réfléchi est alors simulé simplement en assignant une intensité aléatoire à chacune des lignes, sans tenir compte de leur comportement anisotrope (la réflexion ne dépend pas de la position des sources lumineuses et de l'observateur).

Quelques années plus tard, Buchanan et Lalonde [BL99] ont proposé un modèle permettant de prendre en compte le caractère anisotrope de ce phénomène.

Les auteurs utilisent la même approche que précédemment afin de représenter ce phénomène en stockant en mémoire la liste de rayures croisant chaque élément de texture.

Durant la phase de rendu, la BRDF, en chacun des points de la surface, est alors calculée en ajoutant le maximum de réflexions de toutes les rayures se croisant.

2. Modèles de vieillissement

Un inconvénient majeur à ce modèle réside dans son incapacité à considérer la micro-géométrie d'une rayure, qui modifie les propriétés de réflexion.

Pour pallier à ce problème, Mérillou *et al.* [MDG01b] ont proposé un modèle permettant de prendre en compte la micro-géométrie d'une rayure considérée.

Pour cela, les auteurs ont déterminé un profil générique de rayures après l'analyse et ont localisé les rayures sur la surface de l'objet rayé en plaquant la texture 2D désirée.

La Figure 2-11 montre respectivement ce profil et la localisation des rayures sous forme d'une vue en coupe dans un plan perpendiculaire à la tangente de la rayure.

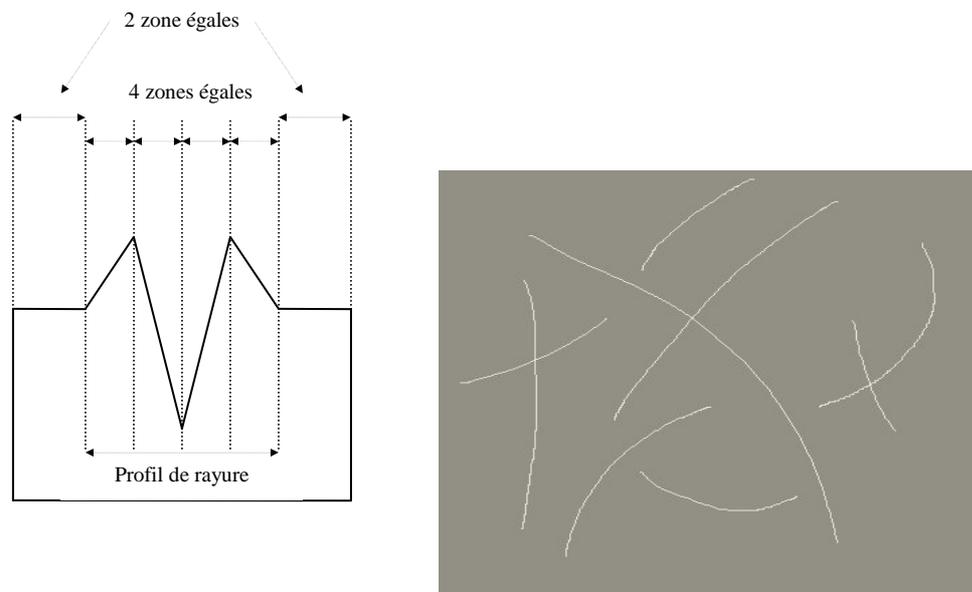


Figure 2-11 : Profil de rayure (à gauche), la texture de rayure (à droite), pour la méthode de rayure de [MDG01b].

Ce modèle respecte parfaitement le comportement anisotrope des rayures et offre de nombreux avantages, tels que son utilisation avec n'importe quels modèles de BRDF ou même son application à la simulation de surfaces multicouches rayées.

Cependant, en considérant la géométrie constante, la micro-géométrie des rayures apparaît très limitée, notamment pour les profils de rayure mais également au long des chemins

(la Figure 2-11). Par conséquent, il apparaît bien difficile d'indiquer un profil si la vraie rayure ne peut pas être mesurée.

Bosch *et al.* [BPM*04] ont proposé une méthode pour améliorer la méthode de [MDG01b] en définissant une géométrie correcte pour présenter les rayures. Leur algorithme permet de modéliser des rayures complexes, en tenant compte du changement de géométrie notamment dans le cas d'un chemin de rayure variable.

Les auteurs proposent ainsi la définition du chemin rayé, correspondant à la rayure observée sur l'objet (courbe de rayure), au lieu d'utiliser une texture. Ce qui permet de visualiser des rayures en fonction de la résolution de la texture et de l'angle de vue, mais aussi de calculer les paramètres de BRDF des rayures considérées de manière plus simple et plus précise. La Figure 2-12 montre le résultat obtenu d'après cette méthode.



Figure 2-12 : Un anneau en or rayé par gravure. Image tirée de l'article de Bosch *et al.* [BPM*04].

2.2.2.5. Accumulation de la poussière

L'accumulation de poussières constitue une catégorie importante des phénomènes de détériorations, se présentant habituellement dans presque tous les environnements.

Tout d'abord Blinn [Bli82] s'est intéressé à simuler ce phénomène en le représentant sous forme d'une couche homogène semi-transparente composée de particules d'albédo faible. Il a réalisé d'abord des nuages en supposant qu'ils se composent des particules réfléchissantes sphériques, trop petites pour être vues individuellement. Pour simplifier le modèle, Blinn [Bli82] le limite à des petites particules d'albédo faible et propose plusieurs fonctions de phase qui caractérisent tous les éclats d'une particule en fonction de l'angle entre la lumière et des positions

2. Modèles de vieillissement

de l'oeil. Puis, il a défini une profondeur optique comme paramètre de contrôle, qui permet de tenir compte du diamètre et de l'épaisseur de particules.

Avec des résultats réalistes, ce modèle est facile à utiliser mais il ne tient pas compte des réflexions multiples de la source lumineuse sur les particules. De plus, la localisation de la quantité de poussières sur l'objet semble aléatoire et n'est pas préférentielle.

Miller [Mil94] a introduit la notion de cartes d'accessibilités dans les modèles polygonaux. Intuitivement, une sphère est placée le long de la normale d'un polygone. Le rayon de cette sphère est augmenté jusqu'à ce que la sphère touche un autre polygone du modèle, ce qui permet de représenter la proximité du reste de la surface par rapport au centre de ce polygone. Le rayon de la sphère est alors utilisé afin d'atténuer la couleur de la surface dans les crevasses d'objet, simulant ainsi l'effet d'occlusion, mais aussi leur accumulation de poussières, les rendant ainsi plus sombres.

Cette méthode donne des résultats peu réalistes car les objets semblent avoir été encrassés de façon uniforme et l'emplacement et l'orientation des polygones ne peut pas accumuler différentes quantités de poussières. La Figure 2-13 montre une scène obtenue avec cette méthode. Noter qu'elle ne traite pas le vieillissement tout seul. On peut le voir comme l'outil (surtout avec la mention d'accessibilité dans cette méthode) pour détecter les parties affectées de l'objet, utilisables avec l'autre méthode de réflexion de la lumière pour obtenir les résultats plus réalistes.

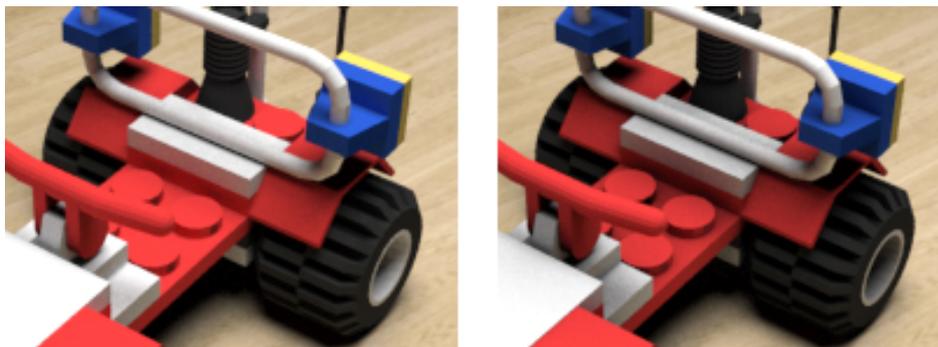


Figure 2-13 : Cette scène illustre l'encrassement des régions difficilement accessibles avec la méthode de Miller [Mil94].

Hsu et Wong [HW95] ont proposé une méthode empirique analogue à l'utilisation de sources de lumière (dont la distribution peut être calculée sur le modèle de Phong [Pho75]) pour simuler visuellement l'effet de l'accumulation de la poussière sur les surfaces des objets. Tout comme une source de lumière émet un champ de lumière, une source de poussières émet un « *champ de poussières* ». La quantité de poussières déposée dépend des propriétés de surfaces telles que : l'inclinaison et l'adhérence. Cette quantité est alors ajustée selon quelques facteurs externes : exposition de surface au vent et son altération. La quantité calculée de poussières est finalement perturbée par une fonction de bruit au temps de rendu pour éviter une disposition de poussières trop uniforme.

Les résultats de cette méthode sont réalistes. La

Figure 2-14 donne deux exemples tirés de [HW95].

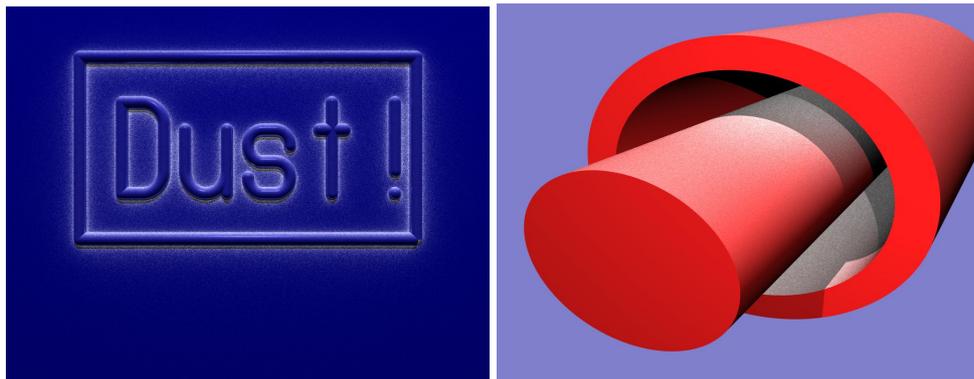


Figure 2-14 : Deux exemples de poussières. Les images sont tirées de l'article de Hsu et Wong [HW95].

En utilisant la méthode de tracé de γ -ton (voir la section 2.1), Chen *et al.* [CXW*05] ont obtenu une série de vieillissement. Cette méthode donne des résultats réalistes avec moins d'effort pour l'utilisateur. Mais la distribution des particules de γ -ton dans la scène prend du temps et ne peut pas être interactive.

La Figure 2-15 donne un exemple qui montre l'existence de la corrosion et de la poussière en même temps.

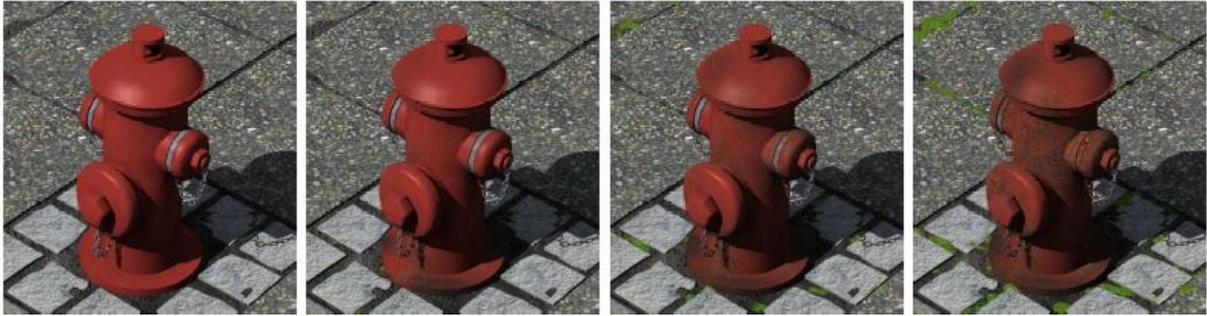


Figure 2-15 : Une série de vieillissements générée par Chen *et al.* [CXW*05]. De gauche à droite, la prise d'eau qui devient respectivement rouillée et poussiéreuse. Les écarts entre les tuiles sont aussi colonisés par les mousses.

2.2.2.6. Changement d'apparence (Taches)

Des taches ou des cernes peuvent apparaître lorsque les objets sont en contact avec certains environnements.

A l'aide d'une texture 2D générée avec une technique fractale, Becket et Badler [BB90] ont traité des taches et des éclaboussures.

Cette méthode apparaît limitée dans le sens où on ne peut pas simuler l'écoulement et les éclaboussures en fonction de la géométrie de l'objet.

Dorsey *et al.* [DPH96] ont tenté de simuler les taches en imitant des résultats plausibles plutôt que de modéliser exactement le processus. Ce travail est un des travaux le plus reliés au travail présenté pour simuler la pollution due à l'accumulation de saleté, et donc il sera décrit dans le chapitre 4.

Lu *et al.* [LGR*05] ont proposé la synthèse de l'effet de mouillage et séchage de l'objet. Bien que ces phénomènes ne sont pas liés aux effets du vieillissement, le principe de leur méthode peut être dans la même direction que les méthodes de vieillissement. D'abord ils ont analysé le phénomène de séchage sur un échantillon de pierre par acquisition de données. A partir de ces données ils ont créé différentes couches de texture 2D pour le séchage et le mouillage. En plaquant ces textures sur un objet 3D qui est créé avec un scanner 3D, on peut avoir des effets de changement de l'apparence sur l'objet.

La Figure 2-16 montre un exemple de ce phénomène appliqué sur une statue de lion.

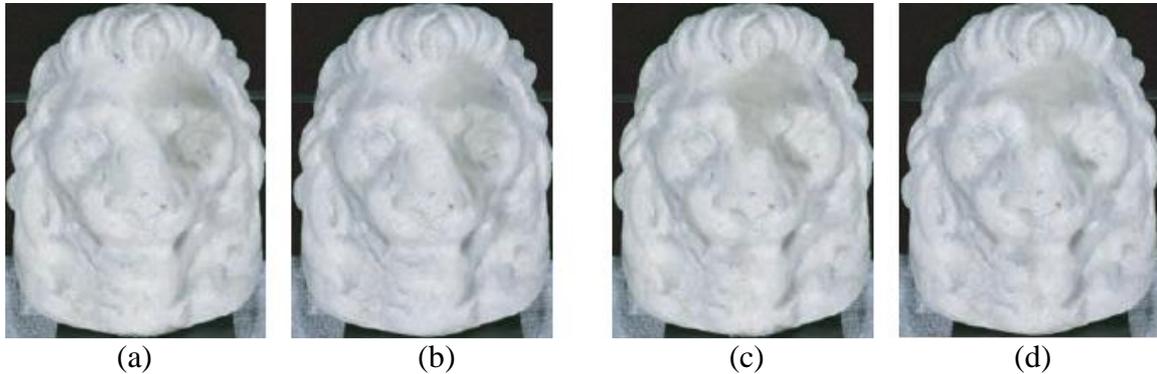


Figure 2-16 : Deux exemples du phénomène de séchage. Les images (a) et (c) sont des images réelles. Les images (b) et (d) sont des images synthétisées, en utilisant les images (a) et (c) respectivement comme les cartes de la partie mouillée. Image tirée de l'article [LGR*05].

Récemment, afin de produire l'aspect de la saleté (tache), Lu *et al.* [LGG*07] en utilisant la méthode de *contexte*, ont capturé l'effet de l'accumulation de saleté en ramassant les particules fines des taches de l'extérieur, en les dispersant dans un « *nuage de taches* », puis en le passant au travers d'un tamis. L'objet témoin a été placé au milieu des particules dispersées (voir les sections 2.1 et 2.2.1.1 pour plus de détails sur l'article [LGG*07]).

2.2.2.7. Rides

Les rides sont présentes sur beaucoup de matériaux tels que la peau humaine et la peau des fruits (La peau est une feuille continue et protectrice qui enveloppe les organes).

Blinn [Bli78] a présenté pour la première fois la méthode de la carte de relief qui peut faire de telles perturbations. Cette méthode qui donne des résultats réalistes est aussi très simple à contrôler (Figure 2-17).

Wu *et al.* [WKT97] ont présenté un modèle, avec lequel on peut modéliser et animer la déformation de la peau, basé sur un modèle biomécanique des rides dynamiques. Il y a trois modules principaux dans le processus entier : conception de muscle, déformation de la peau et simulation des rides. Les muscles sont représentés à l'aide de surface spline, puis ils sont maillés par les triangles correspondant à la peau. La déformation de la peau est réalisée à partir d'un

2. Modèles de vieillissement

modèle élastique et d'un modèle plastique respectivement pour les rides expressives et les rides de vieillissement (Les rides expressives sont habituellement transversales aux fibres de muscle pendant certaines activités comme le fait d'embrasser).



Figure 2-17 : Cette image présente une pomme fraîche (à gauche) et ridée (à droite).

Avec la méthode de Wu *et al.* [WKT97], contrôler les positions de rides est simple, les résultats de simulation de rides de vieillissement sont plausibles, mais l'ajustement des différents paramètres entre trois processus, pour obtenir le visage désiré est difficile.

2.2.2.8. Impacts

Les impacts sont provoqués par différentes forces externes qui altèrent la géométrie de l'objet de façon bien visible.

Différentes techniques de déformation des objets existent : les cartes de relief [Bli78], les cartes de déplacements [Coo84, Max88, WTL*04], la sculpture volumétrique [GH91, Bae98, WK95], le système de la sculpture de BSP(Binary Space Partitioning) [Nay90] et de CSG (Constructive Solid Geometry) [MOT99], des systèmes de simulation chirurgicale [CEO93, BMG99], le collage de surface [BBF95, CMB97], les méthodes basées sur les équations différentielles [DQ00], les FFD (Free Form Deformation) [SP86, Coq90].

Les systèmes de sculpture de Naylor [Nay90] et de Mizuno *et al.* [MOT99] permettent la modification et la représentation exacte de la géométrie complexe contrairement aux méthodes d'approximation d'échantillonnage de sculpture du volume. La surface peut être simplement

modifiée à partir de certains points de contrôles. Mais les outils normalement ne sont pas basés-physiques, et l'intérieur de la géométrie manque généralement d'informations sur les propriétés physiques internes du modèle, qui seraient nécessaires pour créer des déformations complexes. En outre, certaines déformations peuvent créer des intersections difficiles à détecter ou empêcher. De plus, appliquer des changements topologiques à un modèle, tel que le perçage d'un objet, est très dur en utilisant seulement une description à base surface.

Une autre approche intuitive pour créer des modèles d'impact est la « *sculpture interactive* », dans laquelle l'utilisateur modifie un objet solide avec des outils [Coq90, PT92, WGG99, ACF*99] qui peuvent librement pénétrer dans l'objet à n'importe quelle profondeur. De tels systèmes sont typiquement basés sur la représentation volumétrique (voxels ou octrees) [Bae98, GH91, WK95] de l'objet. Un des avantages de représentation volumétrique est qu'il soutient les opérations et les simulations robustes de sculpture. Cependant, les modèles volumétriques manquent souvent des bons effets visuels et ils souffrent de problème d'artefacts provoqués par la subdivision discrète et régulière, car un volume de haute résolution est nécessaire pour représenter un modèle complexe, ceci peut rendre le stockage coûteux et l'interactivité lente.

Des systèmes de simulation chirurgicale ont été conçus pour permettre une réponse rapide et précise à la pression [CEO93] et aux coupes des organes [BMG99]. Ils fonctionnent bien pour quelques interactions, mais ils ne sont pas adaptés pour des processus répétitifs ou de lourdes tâches.

Nous présentons ici la technique de Paquette *et al.* [PPD01] de façon plus détaillée. Ils ont proposé une méthode simple et rapide qui permet d'ajouter des effets d'impacts sur des objets. Leur simulation pour pousser la surface est *ad hoc*. Les modèles *ad hoc* sont des modèles qui ne considèrent pas les processus physiques de phénomènes, seuls les résultats visuels plausibles comptent. Ces modèles sont souvent plus simples et rapides, bien qu'ils donnent des résultats réalistes.

Leur système utilise un outil et les paramètres désirés pour faire une trajectoire d'impacts sur un objet maillé. L'outil est un objet de déplacement qui entre en collision avec l'objet à déformer. L'intersection entre l'objet et l'outil crée la trajectoire d'impact. Les mailles sur la trajectoire d'impact sont modifiées de sorte qu'ils donnent les résultats désirés. Afin d'améliorer la contrôlabilité du modèle, les auteurs fournissent le placement automatique d'impact dans une

2. Modèles de vieillissement

zone définie par l'utilisateur à une densité définie par l'utilisateur. Pour garder leur modèle intuitif, les auteurs ne présentent pas les propriétés mécaniques de la surface. Ceci peut mener à des résultats réalistes, après processus d'essais/erreurs. Le résultat est une nouvelle maille pour l'objet âgé qui peut être réutilisé dans n'importe quel moteur de rendu.

La Figure 2-18 montre certains résultats de cette méthode.

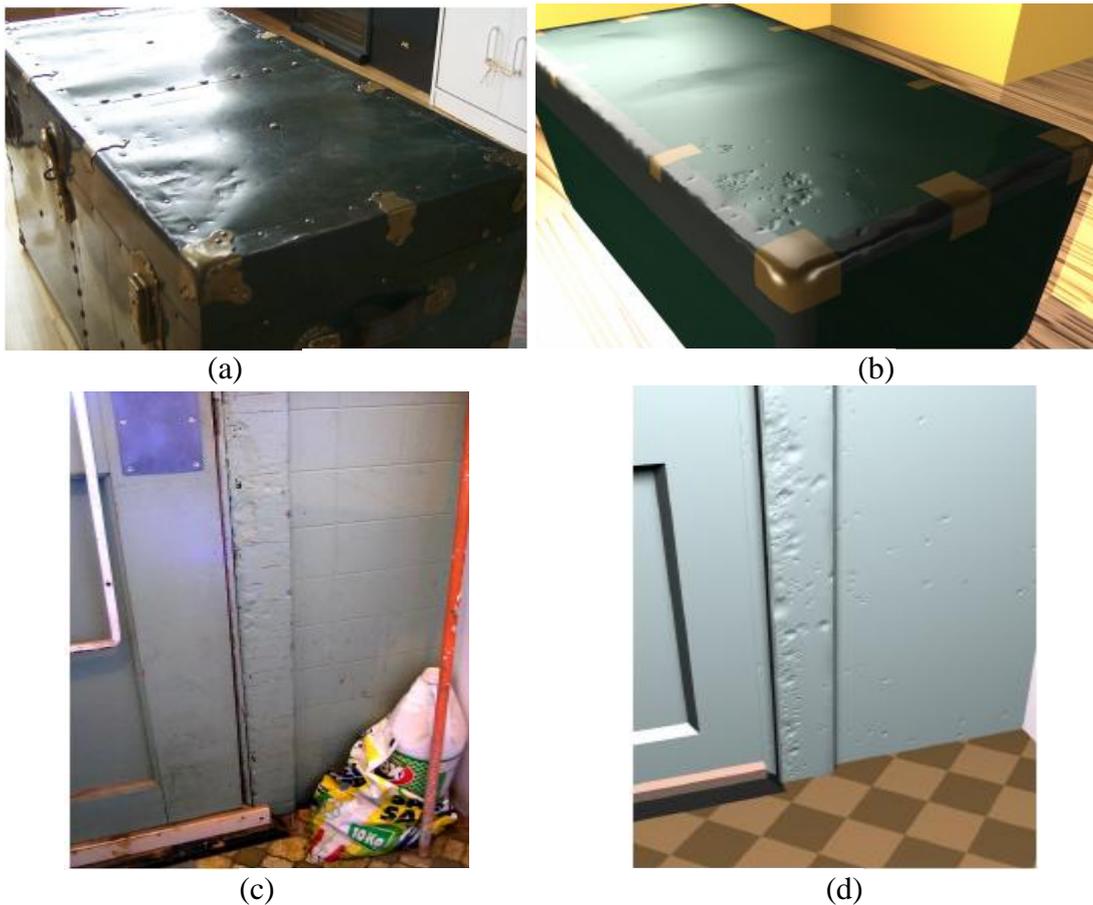


Figure 2-18 : Les images (a) et (c) présentent respectivement un coffre et un cadre de la porte avec l'effet d'impact. Les images (b) et (d) sont les résultats obtenus par Paquette *et al.* [PPD01]. Image tirée de l'article [PPD01].

2.2.3. Processus biologiques

Les processus biologiques comportent le développement des modèles sur des surfaces, liés à des organismes vivants, tels que des algues, des moisissures, et des champignons. Des

exemples d'aspect de matériaux affectés par la croissance biologique sont la simulation de la colonisation de lichen [DGA04] et la simulation de moisissure [BB90, LGG*07].

2.2.3.1. Lichens et algues

Réaliser des paysages couverts par les végétations est un des problèmes majeurs en infographie qui est relié au vieillissement et aux altérations de surface.

Summer [Sum01] a développé un modèle mathématique basé sur un modèle de « *Diffusion limitée d'Agrégation (DLA)* » [WS81]. Le principe consiste à déplacer une particule aléatoirement dans un coin contenant un agrégat de particules et à solidifier sa position s'il entre en contact avec le groupe de particules.

Malheureusement, cette approche ne tient pas compte des caractéristiques de l'environnement et ne crée que les modèles réguliers presque parfaits avec des lobes égaux qui ne peuvent pas être trouvés dans la nature. De plus, des centaines ou même des milliers de particules sont nécessaires pour produire un groupe simple de lichen, ce qui est coûteux en temps et exige de la mémoire.

Cutler *et al.* [CDM*02] ont présenté une statue en pierre vieillie, où les algues ont été représentées par les particules colorées. Leur méthode, comme toutes les méthodes où les lichens sont modélisés à base des textures, échoue à créer des images réalistes convaincantes car ils ne capturent pas les modèles tridimensionnels complexes de fractales des lichens.

Desbenoit *et al.* [DGA04] présentent une méthode procédurale pour créer des différents types de lichens et d'algues sur les surfaces. La croissance du lichen est obtenue en employant une simulation « *Diffusion limitée d'Agrégation (DLA)* » [WS81] qui modélise la propagation des lichens et des algues interagissant avec l'environnement. Ces lichens sont en concurrence entre eux pour obtenir des conditions favorables. Ils ont modélisé la complexité des géométries, la texture et la diversité des modèles de lichens par instantiation de leurs formes tridimensionnelles organisées dans un atlas.

Cette méthode est facile à utiliser car les paramètres de contrôles sont flexibles et peu nombreux. Les résultats obtenus sont réalistes et le temps de calcul est raisonnable (par exemple pour une pierre avec 450 triangles, et 505 particules de lichen, le temps de calcul de propagation

2. Modèles de vieillissement

des lichens est 50 secondes). La Figure 2-19 montre la génération de deux scènes complètes obtenues avec cette méthode.



Figure 2-19 : Deux scènes complexes attaquées par les algues vertes sur la statue (image de gauche), et différents types de lichens sur l'arbre, branche de l'arbre tombée au sol, et les pierres. Image tirée de l'article [DGA04].

2.2.3.2. Croissance biologique de la moisissure

Les moisissures sont des champignons microscopiques filamenteux qui se développent sous certaines conditions réunies : d'humidité, de température et de support nutritif favorable, telles que les matériaux de construction, le fromage et le pain.

Becket et Badler [BB90] ont simulé l'effet de moisissure du fromage. Les moisissures ont une distribution gaussienne et sont représentées par des groupes de points.

Cette approche est bien rapide et facile à appliquer sur un objet. Mais on ne peut distribuer les moisissures de façon correcte en considérant la géométrie de l'objet.

Lu et al. [LGG*07] ont proposé une analyse biologique pour obtenir une texture de moisissure, puis ils l'ont appliquée sur les objets de synthèse en utilisant un algorithme de base de texture modifié (les algorithmes modifiés de [Tur01] et [WL01] sont utilisés).

Le temps de rendu est raisonnable, mais cette technique exige également des instruments de mesure coûteux, ainsi qu'une analyse très précise des contextes pour simuler le vieillissement de matériaux.

2.3. Résumé des méthodes

Une grande variété de méthodes de simulation de vieillissement est récapitulée dans le Tableau 2-1 qui inclut l'information sur les paramètres d'effets et le type de processus. Seulement un nombre limité d'effets possibles de vieillissement a été modélisé, indiquant qu'il y a beaucoup de travail encore à faire dans ce secteur. La qualité des méthodes existantes est difficile à évaluer en raison de la limitation de la validité physique des données extraites. Beaucoup de méthodes n'ont pas été validées du tout. Là où la validation a été effectuée, elle n'a pas été généralement appliquée à reproduire le plein aspect provoqué par des effets de vieillissement, mais a été concentrée sur des aspects particuliers du phénomène étudié, comme la période du début pour des fissures, ou la forme générale des modèles formés.

Papier	Effet	Processus, et certains Paramètres
[Bli82]	Poussière	S, paramètres de BRDF
[KMN88]	Érosion	S, surface de drainage, le nombre d'affluents et la pente du sol
[TF88]	Fracture	S, paramètres physiques-basés de visco-élasticité
[MKM89]	Érosion	S, position et altitude de la surface
[BB90]	Rouille, rayure, tache, moisissure	C, S, B, orientation, longueur de rayure, paramètres de distribution gaussiens, probabilité de rouille
[NTB ⁹¹]	Fracture	S, paramètres physiques-basés
[Mil94]	Poussière	S, accessibilité, paramètres de réflexion (BRDF)
[HW95]	Poussière	S, pente de surface, adhérence de surface, exposition de surface, source de poussière
[DH96]	Patines métalliques	C, orientation de surface, accessibilité, angle
[DPH96]	Tache et l'écoulement	S, pluie, lumière du soleil, la masse de particules de l'eau, vitesse, position, rugosité de la surface, taux et capacité d'absorption, le taux d'adhérence de dépôts, le taux de solubilité
[WKT97]	Ride de visage	S, paramètres physiques pour déformation de la peau et vieillissement
[GC97]	Corrosion	C, dissolutions et dépôts
[WNH97]	Patines, écaillures, poussière	C, S, exposition de surface, les sources, accessibilité, courbure
[HTK98]	Fissure	S, constant de ressort, densité de matériau, échelle de temps, moyen et maximum de tension, profondeur de couche de la surface, le taux de compression

Tableau 2-1 : une vue d'ensemble du travail antérieur pour synthétiser les différents effets de vieillissement, qui contient l'information sur le type de processus de vieillissement Structurel (S), Chimique (C), Biologique(B), et leurs différents paramètres.

2. Modèles de vieillissement

Papier	Effet	Processus, et certains Paramètres
[NF99]	Fracture	S, faiblesse initiale et du développement d'arbre de fissures
[BL99]	Rayures	S, position de l'outil et la lumière
[MMA99]	Fracture	S, changement de La pression
[OH99]	Fracture	S, force
[DEJ*99]	Érosion, efflorescence, décoloration	S, C, viscosité, vitesse de liquide, position, taux de solubilité et concentration de minéraux, perméabilité, saturation, densité et pression de l'eau
[CS00]	Patine	C, accessibilité, gravitation, courbure, humidité dans le sol
[MDG00]	Porosité	S, densité de pore, coefficient diffus et spéculaire
[HTK00]	Fissure, fracture 3D	S, constant de ressort, densité de matériau, échelle de temps, moyen et maximum de tension, profondeur de couche de la surface, taux de compression
[SWB00]	Fracture	S, force de fracture
[MDG01a]	Corrosion	C, coefficient d'imperfection microstructurelle, salissures, collision d'objet
[MDG01b]	Rayures	S, réflexion, type de surface
[GC01a]	Écaillage	S, craquelures
[GC01b]	Fissure	S, résistance, stress
[PP01]	Impact	S, forme de l'outil, chemin de l'impact
[Sum01]	Lichen	B, probabilité d'agrégation
[CDM*02]	Lichen, algue	B, C, type de matériau et son épaisseur
[PPD02]	Fissure, écaillage	S, élasticité, force de fracture, force de fissure, déformation, force d'adhérence, longueur de fissure, longueur d'adhérence, distance de relaxation
[ADK* 02]	Fissure	S, taille de cellule, constante de ressort et la tension maximum, quantité d'humidité et la constante de diffusion
[OBH02]	Fracture	S, déformation élastique et plastique
[CS03]	Rouille	C, accessibilité, courbure, orientation, courant, sel
[BPM*04]	Rayures	S, orientation, force, dureté de matériau, forme de l'outil
[DGA04]	Lichen, algue	B, lumière et l'humidité, accessibilité
[LGR*05]	Tache	C, accessibilité, distance de bordure de la partie séchage/mouillage
[CXW*05]	Poussière, patine, rouille, érosion, tache	C, B, S, propriété du matériau, réflexion de γ
[LGG*07]	Patine, moisissure, rouille, poussière, écaillage,	C, B, S, paramètres de contexte comme occlusion, épaisseur, courbure, orientation

Tableau 2-1 (suite) : une vue d'ensemble du travail antérieur pour synthétiser les différents effets de vieillissement, qui contient l'information sur le type de processus de vieillissement Structural (S), Chimique (C), Biologique(B), et leurs différents paramètres.

2.4. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons décrit les différentes méthodes de vieillissement.

Tandis que les résultats de chaque méthode sont souvent réalistes et peuvent couvrir des phénomènes communs d'imperfection, nous sommes convaincus que beaucoup de travail reste à faire. D'autre part, parmi les travaux de vieillissement déjà présentés, il n'y a aucun travail qui aborde le phénomène de vieillissement de briques et mortiers.

Nous allons présenter alors un modèle pour synthétiser l'efflorescence fine sur des briques et mortiers en chapitre 3. Dans le chapitre 4 nous proposerons les différents algorithmes pour simuler les effets tels que l'érosion, l'effritement et l'efflorescence pour tout type de couches de cristallisation.

2. Modèles de vieillissement

3. Efflorescence en couche mince

Les images synthétisées par les méthodes d'infographie, surtout les modèles de constructions humaines, ont l'air d'être souvent trop lisses, trop parfaites et trop propres pour les considérer réalistes. Pour résoudre ce problème, un grand nombre de phénomènes tels que des accumulations de saleté (taches) et de poussière, fissures, et efflorescence, effritement, etc, doit être pris en considération. Ces phénomènes peuvent apparaître avec différentes formes, affectant la géométrie et/ou les propriétés de réflexion de la lumière et/ou des textures. Cette issue est actuellement de plus en plus étudiée en infographie en employant des nouvelles techniques aussi bien dans le domaine de modélisation que du rendu. On peut grouper ces techniques en deux catégories principales (voir aussi le chapitre 2) :

- Techniques globales : essayer de fournir des méthodes génériques pour tenir compte des différents phénomènes de vieillissement [BB90, WNH97, CXW*05, LGG*07].
- Techniques spécialisées : se concentrer sur des processus spécifiques de vieillissement, fournissant des paramètres de contrôle des phénomènes plus précis, mais limités à seulement une classe de défauts tels que les techniques décrites dans le chapitre 2.

Les paramètres de contrôles peuvent être indépendants des caractéristiques physiques des phénomènes modélisés, ou peuvent être empiriques aussi bien que physiquement valides.

Ce chapitre de la thèse traite les techniques du deuxième groupe, où l'on se concentre sur un important défaut spécifique : efflorescence physiquement plausible. Ce phénomène se compose de différentes étapes physiques et chimiques, les processus de mouillage et de séchage par la porosité, la cristallisation, les composants chimiques et leur dissolution entre autres [BN04].

3. Efflorescence en couche mince

Afin de proposer un modèle expliquant ces différents processus sans employer un trop grand nombre de paramètres, rendant sa manipulation difficile, nous proposons d'établir un modèle phénoménologique-empirique [SMG05]. Il nous permet d'obtenir des résultats physiquement plausibles avec seulement quelques paramètres intuitifs.

Les effets du vieillissement de maçonneries incluent les changements de couleur par la pollution, formation des croûtes sales, formation de l'efflorescence, érosion et effritement des surfaces et dommages structuraux tels que les fissures et les fractures. Ce chapitre est consacré spécifiquement à la formation de l'efflorescence en couche mince, à cause de leur grande importance visuelle (Figure 3-1).



Figure 3-1: Les murs affectés par efflorescence fine.

Une texture solide est une fonction qui retourne une valeur de couleur à tous les points donnés dans l'espace 3D [DG01]. Les textures solides sont idéales pour simuler des matériaux tels que le bois ou le marbre mais peuvent également être très efficaces pour traiter des modifications de couleurs d'un volume entier d'objets. Une texture solide peut être utile pour présenter l'efflorescence car la nature de l'efflorescence est volumétrique : l'infiltration de l'eau se fait profondément à l'intérieur-même de la brique [Ahl03]. De plus, une connaissance 3D des objets attaqués par efflorescence sera utile pour expliquer d'autres processus de vieillissement comme la fissure, la fracture, et les taches, en particulier induits par ce défaut spécifique. Donc notre méthode fournit une technique solide de synthèse de texture appropriée pour ce phénomène de vieillissement.

La section suivante présente les différents travaux existants pour construire des scènes comportant les matériaux de construction. La section 2 présente une vue d'ensemble des principes physiques de base menant à l'efflorescence dans les matériaux de construction tels que les briques et les mortiers. Dans la section 3 nous expliquons la technique de synthèse d'efflorescence fine. Puis la section 4 montre des comparaisons entre nos résultats obtenus et la vraie efflorescence. Enfin nous concluons ce travail en section 5.

3.1. Travaux précédents

Notre travail dans ce chapitre se relie aux techniques de texture, de vieillissement et défauts de surface, qui vont compléter les méthodes vues aux chapitres 1 et 2, traitant les différents modèles et les méthodes de texture et de vieillissement.

Lefebvre et Poulin [LP00] ont essayé de synthétiser les modèles structurés tels que les murs de briques en analysant une image d'entrée pour extraire des paramètres spécifiques afin de produire une texture qui ressemble à l'image. Ce travail est l'un des travaux les plus proches au nôtre. Le modèle de mur est constitué de 6 paramètres scalaires (Figure 3-2) : longueur et hauteur des briques, orientation de la brique, épaisseur du mortier, nombre de briques le long d'un mur et décalage relatif entre deux rangées de briques successives.

La hauteur des briques et l'orientation du motif sont calculées en utilisant la transformation de Fourier à partir d'un masque binaire de texture d'entrée. La Figure 3-3 montre un masque extrait d'une texture d'entrée.

La longueur des briques et le décalage relatif sont extraits en utilisant des algorithmes spatiaux, en balayant horizontalement un certain nombre de lignes sur le masque binaire. L'épaisseur du mortier est calculée comme avant, mais avec des lignes de balayage verticales. Le nombre de briques le long d'un mur peut être calculé avec l'algorithme spatial (transformation de Fourier) ou peut être donné par l'utilisateur.

3. Efflorescence en couche mince

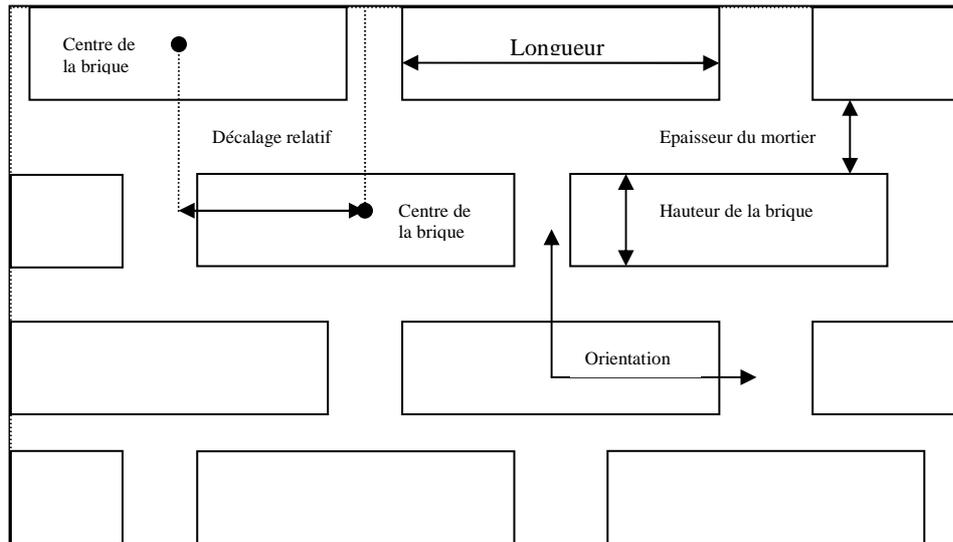


Figure 3-2 : Présentation du modèle de mur. Illustration issue de l'article [LP00].

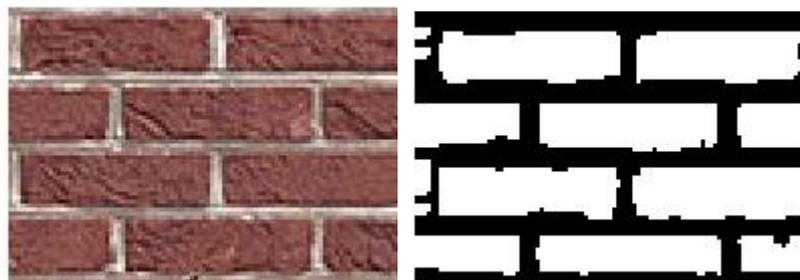


Figure 3-3 : Une texture réelle de mur de briques (gauche) et son masque binaire (droite). Image issue de l'article [LP00].

Leurs résultats obtenus ne le sont pas avec succès. De plus la méthode de synthèse n'est pas en 3D, par conséquent on est obligé d'utiliser les méthodes 2D afin d'apposer la texture générée sur un objet. En outre, les détails de textures, comme la rugosité, sont ajoutés de façon uniforme sur toute la surface du mur en utilisant une carte de relief, ce qui empêche de texturer le mur déformé de façon correcte et réaliste. La Figure 3-4 montre une image de mur obtenue avec cet algorithme présenté par Lefebvre et Poulin [LP00].

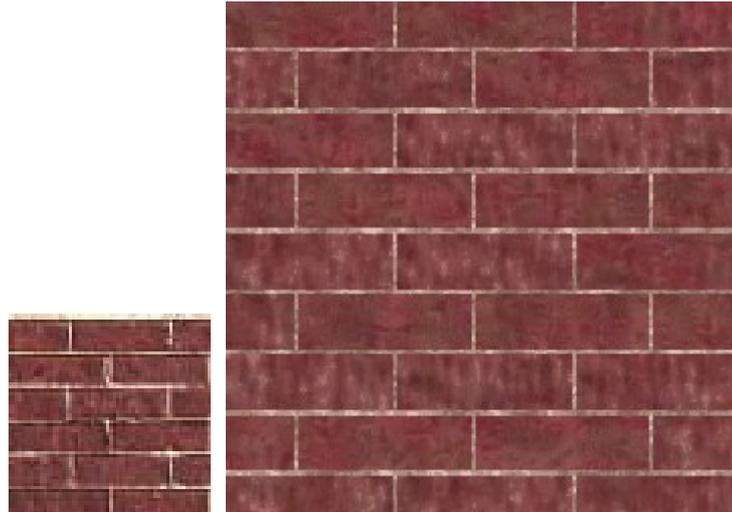


Figure 3-4 : L'image de gauche est la texture d'entrée d'un mur de briques, l'image de droite est le résultat obtenu avec l'algorithme de [LP00].

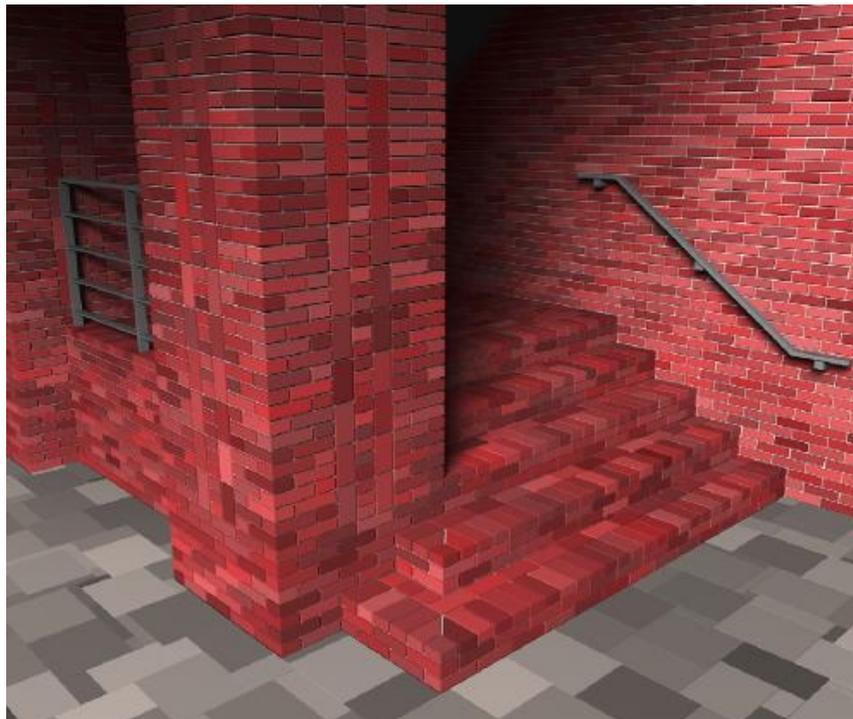


Figure 3-5 : Un escalier synthétisé en utilisant la méthode de [LDG01] avec différents modèles de briques. Image issue de l'article [LDG01].

L'autre travail proche du nôtre est celui de Legakis *et al.* [LDG01] qui emploient la méthode basée sur la création de règle de propriété pour placer les modèles 3D comme brique et

3. Efflorescence en couche mince

pierre sur les modèles architecturaux. Dans leur travail, les éléments de la scène communiquent ensemble, et répondent, tout en travaillant ensemble pour satisfaire des contraintes mutuelles. Ce travail peut être classifié parmi les méthodes de texture 3D, mais pas parmi les méthodes de vieillissement, car les auteurs n'ont pas expliqué le cas où les surfaces sont vieilles.

La Figure 3-5 montre les différents modèles de briques appliqués à une scène simple. On voit bien que les surfaces dans cette scène sont quasi parfaites ce qui est loin du réalisme que l'on recherche.

3.2. Physique des efflorescences

Le problème de l'efflorescence sur les matériaux de construction tels que les murs composés d'éléments de maçonnerie est un vieux problème qui a été étudié depuis plusieurs décennies.

Dans la section suivante, on va regarder l'efflorescence de façon phénoménologique avec les paramètres simples et intuitifs.

3.2.1. Principe phénoménologique d'efflorescence

3.2.1.1. Création

L'efflorescence se produit pendant des cycles mouillage/séchage dus à l'environnement du matériau affecté et est souvent vue comme un dépôt extérieur mince des sels : l'eau chargée de sels (pris de l'environnement pollué, du mortier ou des composants chimiques des solutions des briques eux-mêmes) pénètre à l'intérieur du matériau poreux. Pendant le processus de séchage, l'eau s'évapore et dépose ses sels pendant qu'elle atteint la surface exposée de la maçonnerie. Par conséquent, l'efflorescence peut être vue comme un processus 3D, selon des raccordements entre les pores à l'intérieur du matériau affecté.

La production et la quantité d'efflorescences sont plus ou moins liées à la composition du mortier utilisé [HB04]. Certains types de mortiers peuvent faire apparaître des efflorescences fortes, alors qu'avec d'autres types de mortiers, les efflorescences sont beaucoup plus limitées sur la maçonnerie.

Alors, le mortier est une source importante de sels, et donc l'efflorescence se produit fréquemment sur des maçonneries de briques adjacentes aux mortiers. Un bon exemple de ce phénomène est la présence d'efflorescence sous les rebords en béton des fenêtres. Ces rebords sont fréquemment mouillés par la pluie et par la neige qui fond sur eux, et les sels solubles du béton sont dissous et peuvent pénétrer dans la maçonnerie de briques.

La Figure 3-6 récapitule des phénomènes de base qui se produisent pendant les cycles du mouillage et de l'évaporation (séchage) :

- Les chemins (a) et (b) représentent le processus de mouillage : l'eau pénètre à l'intérieur de la brique par des pores, apportant des sels d'air et/ou de mortier aussi bien que la dissolution des composants de la brique. Ce phénomène est plus important à l'interface mortier-brique, dû à la porosité élevée (voir la section 3.3.3) du mortier, aussi bien qu'à des concentrations élevées en sels [BN04].
- Les chemins (a') et (b') représentent le processus d'évaporation : des sels sont déposés progressivement à l'intérieur des pores. Ce dépôt augmente avec le taux d'évaporation, ainsi qu'avec la proximité aux interfaces (brique/air et brique/mortier).

De nombreuses publications en sciences des matériaux en rapport avec l'efflorescence traitent l'interaction avec la surface seulement, en raison du problème esthétique important qu'elle pose [BN04]. On a également montré que la nature 3D de l'efflorescence peut avoir une grande influence sur la détérioration du bâtiment : sels déposés sous la surface pouvant se cristalliser et se développer. La pression implicite peut produire des dommages permanents tels que des fissures et des effritements, par exemple [ZA89].

3. Efflorescence en couche mince

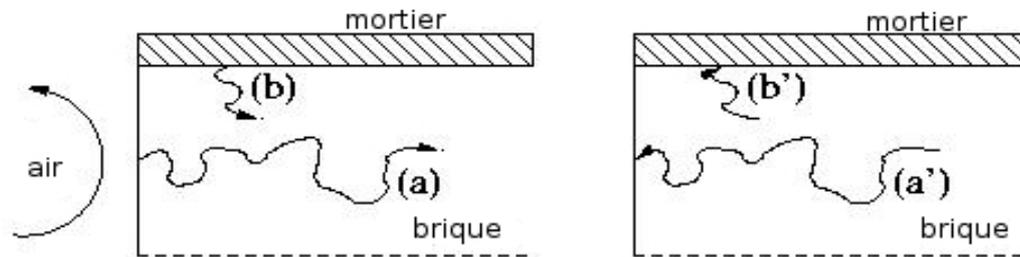


Figure 3-6: Principe de base de migration de sel. Pendant le mouillage (gauche) la solution pénètre par les chemins poreux à l'intérieur du matériau. Pendant l'étape de séchage, des sels sont déposés le long des chemins poreux.

3.2.1.2. Couleur et forme

L'efflorescence est habituellement de couleur blanche (voir la Figure 3-1 et la Figure 3-7). Cependant, quelques composants chimiques peuvent produire des dépôts très variés en couleurs tels que des tons de verts ou de bruns. Pendant le processus de synthèse, les couleurs peuvent être directement prises par de vraies photos afin de tenir compte de la véritable couleur sans présenter divers paramètres des composants chimiques, ou bien on peut choisir la couleur désirée avant l'étape du calcul d'efflorescence.

L'efflorescence peut prendre de nombreux aspects, selon beaucoup de paramètres. En particulier, la cristallisation peut se produire sur la surface de la brique, qui expose des formes de dépôts fins. Dans ce chapitre, nous ne prenons pas en considération les cas où la cristallisation est assez forte pour modifier la géométrie de surface externe des briques (voir la Figure 3-7(b) par exemple), ni le cas où l'efflorescence apparaît à l'intérieur de la surface appelée crypto-efflorescence ou sous-efflorescence. Ce dernier endommage la surface de la construction (la Figure 3-8) et sera présenté au chapitre suivant.

L'efflorescence mince est un phénomène commun [BN04] et nous proposons de manipuler les variations d'épaisseurs en employant simplement la carte de relief quand elle est nécessaire. La Figure 3-7 illustre ces aspects en montrant le zoom sur des briques et des pavés attaqués par l'efflorescence. On peut facilement observer que les zones couvertes par efflorescence mince ne présentent pas un large relief géométrique par rapport à la zone propre de la brique.

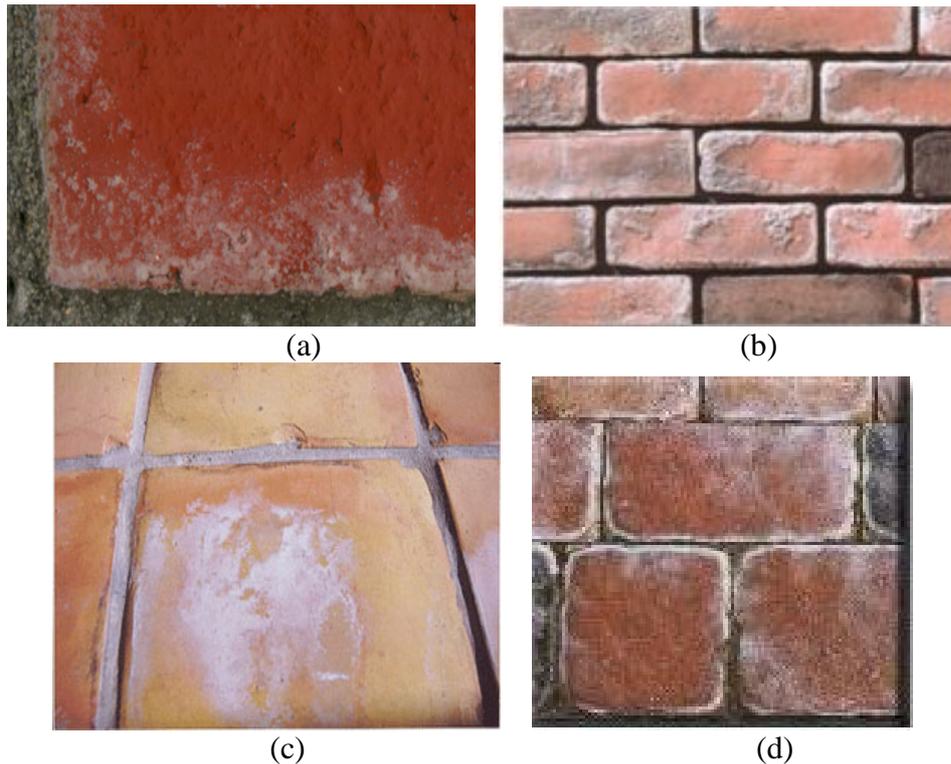


Figure 3-7: (a) et (b) zoom avant sur des briques réelles attaquées par efflorescence. (c) et (d) zoom avant sur des pavés attaqués par efflorescence. On voit bien que la méthode de la carte de relief est suffisante pour manipuler les petites variations géométriques et spécifiques d'efflorescence mince dans les images (a), (c) et (d). Simulation d'efflorescence comme sur l'image (b) qui modifie la géométrie de la surface attaquée est présentée dans le chapitre suivant.



Figure 3-8 : Effet de sous-efflorescence (crypto-efflorescence) sur le mur de briques.

3.3. Synthèse d'efflorescence

La Figure 3-1 montre des murs composés de nombreuses briques affectées par l'efflorescence. Chaque brique se comporte d'une manière spécifique, selon de nombreux paramètres. Cependant, les informations sur le phénomène du transfert du sel dans la matrice poreuse manquent toujours en science des matériaux, comme indiqué récemment par Ahl [Ahl03]. Par conséquent nous devons présenter différentes perturbations empiriques pour chaque brique individuellement. Pour produire des murs virtuels expliquant des processus de perturbation comme l'efflorescence, nous devons :

- individuellement instancier chaque brique. Pour chaque brique nous stockons les informations spécifiques telles que les faces adjacentes du mortier ou les faces exposées à l'air (les faces visibles).
- produire une texture solide qui tient compte du processus de vieillissement selon l'environnement de chaque brique.



Figure 3-9: Un mur affecté par l'efflorescence fine (gauche), et une image de synthèse réalisée avec notre méthode (droite).

Afin d'obtenir les briques propres réalistes (sans efflorescence), nous proposons d'employer une technique classique solide de texture : extrusion d'un échantillon de photographie (image 2D de la taille $N \times N$ pixels) numérique vers un bloc 3D, perturbé sur chaque couche (voir la Figure 3-10). Alors on peut manipuler cette texture solide pour présenter l'efflorescence.

La Figure 3-9 droite montre l'exemple d'un mur de synthèse en utilisant notre algorithme.

3.3.1. Obtention d'une brique propre

Nous produisons un bloc $3D$ discret (texture solide) B , en employant un modèle $2D$ de la taille $N \times N$ pixels comme entrée (image digitalisée), appelé M , représentant une vue de la texture $3D$ désirée (les vues peuvent être XY , YZ , XZ , où X , Y , et Z sont les axes de coordonnées). Le bloc $3D$ discret est défini comme ensemble de N^3 voxels. Employer seulement une seule vue $2D$ implique que l'intérieur du bloc B en $3D$ doit être approximatif. Alors que normalement les briques ne présentent aucun style particulier de détail dans les répartitions de leurs constituants, nous pouvons supposer que la vue $2D$ est suffisamment représentative pour chaque couche de voxels dans n'importe quelle direction (X , Y , et Z) de la texture $3D$ (il y a N couches pour chaque bloc tridimensionnel B).

Nous voulons obtenir un bloc discret tridimensionnel B de la taille N^3 qui ressemble approximativement au modèle $2D$ original. Nous proposons d'extruder la première couche le long de sa direction perpendiculaire afin de synthétiser la texture solide. Puisque l'aspect réel de la brique n'est pas uniforme, afin de donner un aspect plus réaliste à la texture, nous perturbons empiriquement le processus d'extrusion. Pour simplifier, nous employons le bruit Perlin [Per85], appliqué à chaque couche du bloc B .

La Figure 3-10 récapitule ce processus classique. Supposant que la texture d'une brique propre est unique, nous proposons par défaut d'employer $N=128$ pour créer des murs. Utiliser $N=256$ ne montre pas de différents résultats remarquables. D'ailleurs l'utilisateur peut facilement définir la taille désirée de texture en calibrant la taille de l'image de texture et la distance qui sépare la caméra du mur.

3. Efflorescence en couche mince

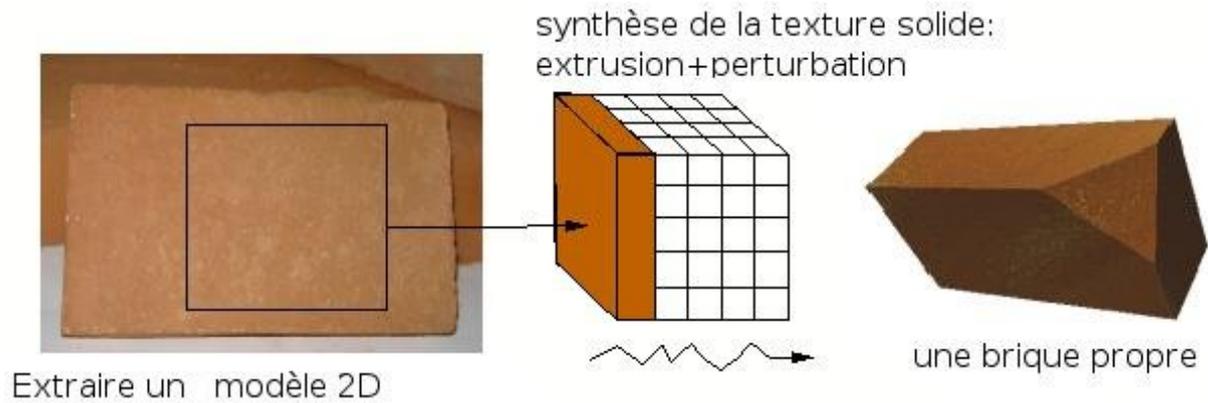


Figure 3-10: Résumé du processus pour l'obtention d'une texture solide classique. Une image digitalisée est employée comme la première couche de la texture solide. Elle est alors extrudée et perturbée pour remplir le bloc complet 3D de couleurs.

3.3.2. Efflorescence : points de départ

L'aspect principal du processus d'efflorescence réside dans la porosité des briques et des mortiers. Les phénomènes de mouillage et séchage sont directement liés avec les chemins de pores à l'intérieur du matériau. Le Tableau 3-1 montre des caractéristiques (la densité et la porosité) d'un type représentatif de brique et de mortier. On voit que le mortier de joint est plus poreux que les autres matériaux de construction (la brique et le mortier de couchage).

	Densité (kg/m ³)	Porosité (volume %)
Brique	1830	32
Mortier de joint	1670	37
Mortier de couchage	2000	24

Tableau 3-1 : Les caractéristiques de brique et mortier. L'illustration est extraite de l'article [HB04].

Nous employons un certain nombre potentiel de points de départ N_p d'efflorescence. Il s'agit d'un paramètre de contrôle de la synthèse de texture. Physiquement, N_p dépend de la porosité p de l'objet, représentant la proportion de pores dans l'objet, à savoir le nombre potentiel de chemins de pores (voir la section 3.3.4). Nous supposons simplement la porosité d'un type représentatif de brique et mortier 35% pour calculer la texture d'efflorescence (d'après les données fournies dans [PKB*95, HB04]). Il est utile de noter que nous pouvons régler cette porosité pour avoir différents aspects de textures.

Par défaut, ces points pour la brique sont choisis dans les zones préférentielles : le voisinage du mortier (la Figure 3-11) de façon aléatoire. Soit L_d l'épaisseur de la zone des points de départ, donc le nombre des points potentiels de départ peut être calculé en multipliant le nombre de voxels présents dans la zone préférentielle ($N \times N \times L_d$) et le paramètre de porosité (p) :

$$N_p = N \times N \times L_d \times p, \quad 0 \leq L_d \leq N-1$$

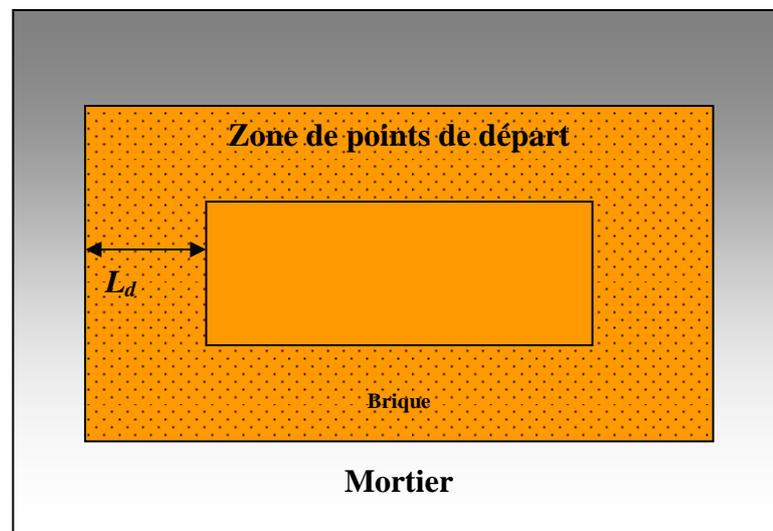


Figure 3-11 : Zone de points de départ sur une brique

Ceci est facilement calculable pendant l'instanciation des briques. L'épaisseur de la zone de points de départ est choisie de manière proportionnelle à la taille de la brique. De plus, l'utilisateur peut régler l'épaisseur de la zone du point de départ L_d pour la brique pour générer

3. Efflorescence en couche mince

différentes textures 3D; cette épaisseur est ajustée par le système pour éviter les erreurs problématiques des limitations et pour avoir la quantité suffisante de la porosité liée à la surface externe de la brique. Ce type de porosité dite « *porosité ouverte* », représente la quantité de la porosité directement liée à la surface, par opposition à « *la porosité fermée* » qui est seulement présente à l'intérieur du matériau sans aucun raccordement à la surface. La Figure 3-12 illustre ces types de porosité (voir aussi [MDG00]).

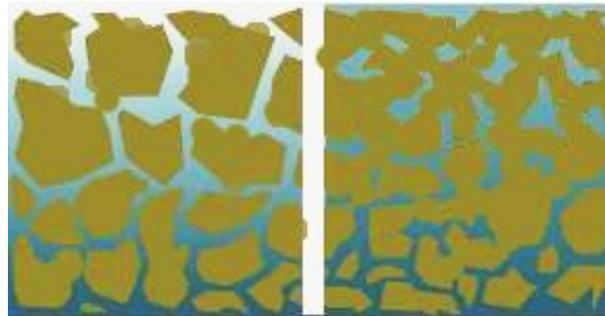


Figure 3-12: Illustration de la porosité ouverte qui autorise le passage de sel (l'image de gauche), et la porosité fermée qui bloque le passage de sel (l'image de droite).

La forme (diamètre moyen) et la profondeur des pores ouverts influencent le taux d'évaporation. Pour tenir compte de ce phénomène, et aussi avoir des résultats visiblement plausibles, par défaut, le paramètre L_d d'épaisseur de la zone des points de départ, est choisi à 5% de la géométrie de la brique (voir Figure 3-13).

Le nombre de points de départ pris en compte N_d est calculé en fonction du nombre de points de départ potentiels N_p comme ci-dessous :

$$N_d = N_p \times k, \quad 0,0 \leq k \leq 1,0$$

Où k est un paramètre de calibrage des nombres de points de départ qui peut représenter aussi la viscosité (concentration en ions) de sel dans la solution par exemple.

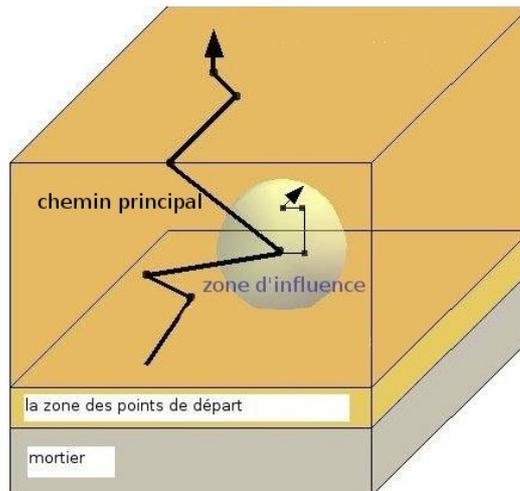


Figure 3-13: Principe de simulation d'efflorescence. Les points de départ qui traversent le chemin principal de porosité sont choisis dans la zone préférentielle. La zone d'influence est employée pour boucher la porosité des interconnexions.

De plus, selon des sels présents dans l'air (dans l'environnement pollué par exemple), quelques points de départ peuvent être choisis sur les faces externes (visibles) des briques ($L_d=0$). Il est facile de trouver les faces de briques qui sont exposées à l'air. Cependant, une quantification complète du phénomène reste très difficile car nous devons connaître la composition exacte de l'air. Par conséquent nous proposons aussi de choisir empiriquement le paramètre k qui représente la concentration de sel.

Les points de départ pour le mortier sont distribués partout dans le volume de mortier de manière aléatoire, en raison de la distribution homogène du sel et de la porosité dans le mortier. L'utilisateur peut choisir le type de maçonnerie (brique ou mortier) et aussi le type de distribution des points de départ en utilisant l'interface de système.

Nous employons ces points de départ réels pour développer la propagation d'efflorescence. Selon l'effet désiré (la Figure 3-1 montre différents comportements réels), on peut ajuster la quantité des points de départ, leur épaisseur et leur distribution pour avoir différents comportements (voir les prochaines sections).

3.3.3. Efflorescence : processus de développement

Notre processus croissant d'efflorescence fine pour la brique est divisé en deux types de chemins. Le premier explique un chemin global de porosité à l'intérieur du matériau. Cependant, en matériaux réels, les pores sont reliés ensemble permettant à l'eau de pénétrer, suivant plusieurs chemins en même temps : à chaque section transversale de pore, l'eau continue son chemin principal dû aux forces de capillarité, mais peut également prendre de nouveaux chemins.

Le processus croissant d'efflorescence pour le mortier n'a qu'une seule étape : différents points de départ placés aléatoirement dans le mortier et qui se propagent en direction aléatoire vers la face extérieure du mortier.

3.3.4. Chemin de porosité

Pendant l'étape de mouillage, la solution pénètre par des pores, apportant des sels. Pendant l'étape de séchage, l'évaporation de la solution dépose des sels sur le chemin vers la face externe de maçonnerie. Nous ne voulons pas effectuer une simulation complète de ce processus car le but principal de notre technique est d'obtenir des images visuellement plausibles. Aussi, il est physiquement trop compliqué/coûteux de simuler l'obturation progressive des pores due à la cristallisation. Donc nous proposons de considérer la quantité de sels déposés à chaque étape (faisant apparaître l'efflorescence) comme constante. Ceci permet d'éviter une quantification sur la quantité initiale de sels dans la solution pénétrante.

Cette hypothèse permet de simplifier le processus à une technique simple : trouver les chemins de porosité à l'intérieur de la brique. Chaque chemin de porosité représente les marches aléatoires à l'intérieur de la brique (voir la Figure 3-13) composé par des T_p étapes. Cela est justifié par les expériences qui ont été effectuées sur le mécanisme de l'efflorescence ([HE02], BN04, PHK*04, PKB*95]) et qui indiquent que le profil de sel pour la brique et le mortier avec la distribution homogène des pores peut être comme la Figure 3-14. Cette figure montre que la

croissance des chemins de sel dans ce type de maçonneries est presque aléatoirement plate après les cycles de séchage/mouillage. Chaque étape de cette marche aléatoire représente une étape de temps dans notre propagation d'efflorescence, et permet de marquer un voxel comme affecté par efflorescence. Nous changeons la couleur de chacun de ces voxels du chemin de la porosité en utilisant une couleur aléatoire choisie d'une zone couverte d'efflorescence sur une photo réelle numérique d'une brique, ou bien c'est à l'utilisateur de choisir une autre couleur désirée par l'interface d'utilisateur. La couleur choisie nommée *COULEUR_EFFLORESCENCE* sera atteinte progressivement. Une valeur initiale *COULEUR_INIT* décrivant la couleur originale de la maçonnerie, est accumulée itérativement à une autre couleur dite *COULEUR_OFFSET* jusqu'à la couleur *COULEUR_MAÇONNERIE*. L'algorithme suivant décrit de manière plus formelle ce processus:

COULEUR_MAÇONNERIE ← *COULEUR_INIT*

Pour chaque étape faire :

Ajouter COULEUR_OFFSET à COULEUR_MAÇONNERIE

Si COULEUR_MAÇONNERIE > COULEUR_EFFLORESCENCE Alors

COULEUR_MAÇONNERIE = COULEUR_EFFLORESCENCE

Fin Si

Fin Pour

Cela, permet de réduire le contraste entre la couleur de la surface de maçonnerie et la couleur d'efflorescence, ce qui correspond à la réalité.

3. Efflorescence en couche mince

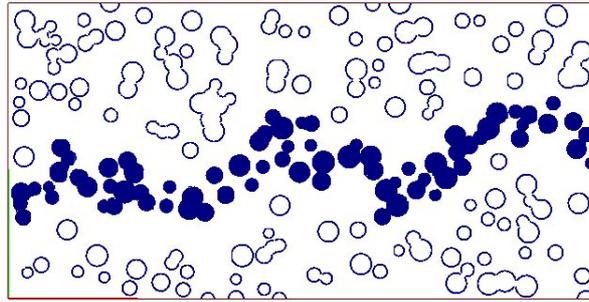


Figure 3-14: Le chemin d'efflorescence à l'intérieur d'une maçonnerie (en couleur foncée).

La quantification de temps est difficile à manipuler concernant la complexité du phénomène d'efflorescence : des exemples de la vitesse de diffusion de sel (pour les briques rouges finlandaises) peuvent être trouvés dans [Ahl03]. Cependant, la cinétique complète du dépôt/cristallisation de sel dépend de beaucoup d'autres paramètres tels que la concentration du sel ou les conditions thermiques. D'une part, après une construction, le mortier est fortement chargé en sels et l'efflorescence peut se produire seulement peu de jours après. Alors la cinétique de ce processus réduit les sels de solution entre mortier/brique. D'autre part, l'humidité continue à apporter de nouveaux sels directement ou par le mortier, augmentant la cinétique d'efflorescence de plusieurs années [BN04]. Tenir compte de tous ces comportements nous mène à un très grand nombre de paramètres non triviaux. Donc nous préférons employer une quantification empirique, conduite pour des résultats graphiques.

Calculer une texture d'efflorescence de la taille 128^3 voxels prend une moitié de seconde pour une primitive (brique/mortier) avec 400 étapes aléatoires de marches (T_p) qui sont appliquées à 4000 points de départ réels (N_d), sur un Athlon 2800, par exemple. La Figure 3-9 montre un mur construit avec ce type de primitive.

3.3.5. Interconnexions des pores : zone d'influence

Les porosités sont également étroitement reliées ensemble à l'intérieur d'un matériau : beaucoup de chemins sont présents et croisés, et donc la solution (l'eau) pénétrante ne suit pas

seulement un seul chemin. Pour tenir compte de ce comportement et pour avoir la continuité de l'effet de cristallisation dans la structure poreuse de maçonnerie, nous choisissons un nombre $N_{b_{ZI}} = p \times T_p$ de zones sphériques d'influence qui sont distribués de façon aléatoire, sur chaque chemin principal de porosité (voir la Figure 3-13). Pour chaque zone sphérique d'influence, nous avons un certain nombre de propagations en directions aléatoires. Pour tenir compte des forces de capillarité qui conduisent la pénétration de l'eau dans une direction préférentielle : l'eau pénètre plus profondément dans les pores ayant les diamètres inférieurs (phénomène du à la loi de Jurin¹), nous choisissons le nombre N_s de nouvelles directions en relation avec la porosité du matériau. Sur chaque zone d'influence, nous avons le nombre N_s de directions aléatoires de propagation sur certaines étapes de marches. La valeur N_s aussi bien comme N_p et N_d dépend de la porosité de la maçonnerie. Sur chaque étape de propagation de voxels, nous avons 26 voisins. Tant que la porosité dans les briques et mortiers est habituellement autour de 35% (voir [PKB*95, HB04]), par défaut nous proposons de choisir aléatoirement 10 nouvelles directions de propagation dans la zone d'influence ($26 \times 0,35 \approx 10$). D'ailleurs, nous pouvons régler la porosité de notre matériau en fonction de la plausibilité de résultats avant le calcul de la texture d'efflorescence.

Cependant, les pores reliés ensemble n'ont pas tous les mêmes diamètres moyens, en raison des forces de capillarité. Un autre mécanisme concerne l'occlusion d'air dans les pores obturés, limitant la pénétration de l'eau. Le diamètre physique-basé de notre zone d'influence doit dépendre de ces règles physiques complexes, couplant des forces de capillarité avec la distribution de la taille du pore. Pour garder notre modèle en tant que phénoménologique, nous proposons de présenter un autre paramètre fournissant le nombre d'étapes de marche de zone d'influence P_s (équivalent au diamètre de zone d'influence). Avec une distribution habituelle de porosité qui varie avec un facteur 100, entre 0,1 et 10 microns (voir [CSE*04]), la valeur P_s doit être aléatoirement entre 1 et 100, mais vu que la taille de notre texture d'entrée est limitée, nous proposons d'employer $P_s =$ entre 1 et 10 pixels.

Le processus de développement d'efflorescence peut être décrit de façon plus formelle en pseudo-code dans l'Encadré 3-1.

¹ JURIN (James) scientifique anglais (1684-1750) a établi cette loi en 1718.

3. Efflorescence en couche mince

Lire (N, p, L_d) ; N : la taille de texture, p : la porosité de maçonnerie, L_d : l'épaisseur de la zone des points de départ.

$N_p \leftarrow N \times N \times L_d \times p$; le nombre potentiel de points de départ

$N_d \leftarrow N_p \times k$; le nombre de points de départ pris en compte

Pour chaque point de départ réel (N_d) faire

$T_p \leftarrow$ aléatoire (entre 0 et N^3) ; définition du chemin de propagation principale

$N_{b_{ZI}} \leftarrow T_p \times p$; le nombre des zones d'influence

Choisir $N_{b_{ZI}}$ points comme la zone d'influence ; Distribuer aléatoirement $N_{b_{ZI}}$ zones d'influences sur le chemin de propagation principale

$N_s \leftarrow 26 \times p$; le nombre de directions aléatoires

$P_s \leftarrow$ aléatoire (entre 1 et 10) ; diamètre de la zone d'influence (en pixels)

Si le point a été choisi comme une zone d'influence Alors

Créer N_s directions aléatoires depuis ce point

Pour chacune des N_s directions aléatoires **faire**

Pour P_s étapes **faire**

TRACER_D_UN_PIXEL():

Fin Pour

Fin Pour

Sinon

TRACER_D_UN_PIXEL():

Fin Si

Fin Pour

TRACER_D_UN_PIXEL():

Traverser un seul pixel sur le chemin de propagation d'efflorescence

Changement progressif de couleur vers la couleur d'efflorescence

Encadré 3-1 : L'algorithme du processus de développement d'efflorescence.

En plus, nous considérons un dernier paramètre N_c afin de manipuler les cycles de mouillage/séchage de la maçonnerie. On peut contrôler la quantité de sels à l'intérieur de la maçonnerie en répétant le chemin principal représenté par le paramètre T_p à N_c fois (cycles).

3.3.6. Résumé des paramètres de modèles

Notre but est d'obtenir une simulation phénoménologique d'efflorescence sur les briques. Nous proposons de récapituler les paramètres de notre modèle, fournissant des liens entre ces paramètres et leur signification phénoménologique dans le Tableau 3-2.

Paramètre	Description	Rang de Valeur		Signification Phénoménologique
		<i>Brique</i>	<i>Mortier</i>	
N	Taille de texture solide	Dimension de l'image d'entrée (pixel)	Dimension de l'image d'entrée (pixel)	-
K	Paramètre de calibrage du nombre de points de départ	Entre 0,0 et 1,0	Entre 0,0 et 1,0	Concentration de sels (ions) dans la solution
p	La porosité de maçonnerie	Typiquement entre 0,24 et 0,4	Typiquement entre 0,24 et 0,4	Porosité du matériau
N_p	Le nombre de points de départ potentiels	Entre 0 et $N^3 \times p$	Entre 0 et $N^3 \times p$	Pénétration de solutions
T_p	La propagation principale des étapes	Les résultats graphiques (entre 0 et N^3)	Les résultats graphiques (entre 0 et N^3)	Le Temps dans un même cycle de séchage/mouillage
N_d	Le nombre réel de points de départ	Entre 0 et $N^3 \times p \times k$	Entre 0 et $N^3 \times p \times k$	Pénétration et viscosité de solutions
N_{bz}	Le nombre des zones d'influence	$T_p \times p$	$T_p \times p$	La quantité de la zone d'influence
N_s	Le nombre de directions aléatoire	$26 \times p$ (par défaut 10)	$26 \times p$ (par défaut 10)	Pour interconnexions des pores
P_s	Les étapes de propagations secondaires	Entre 1 et 10	Entre 1 et 10	Pour interconnexions des pores
N_c	Nombre de cycles	Un entier égal ou supérieur à 1	Un entier égal ou supérieur à 1	Répétition des cycles de séchage/mouillage
L_d	L'épaisseur de zone de points de départ	Par défaut 5% du volume de brique dans la zone préférentielle	-	L'épaisseur d'humidité du mortier

Tableau 3-2 : Résumé des paramètres de simulation d'efflorescence fine.

3.4. Résultats

Les Figure 3-1 et Figure 3-9 gauche montrent des murs vieillissés par l'efflorescence fine. Chacune des briques a sa propre texture solide d'efflorescence. Le côté droit de la Figure 3-15 présente une brique virtuelle affectée par efflorescence : ici nous choisissons : $N = 128$, $p = 0,36$, $N_s = 10$ ($26 * p$), $N_c = 10$, $L_d = 2$, $N_p = (N * N) * p * L_d = 11796$, $k=0,05$, $N_d=589$, $T_p = 300$. Pour pouvoir visualiser l'intérieur de la brique de synthèse nous avons coupé le côté gauche de cette brique. Le mortier est considéré présent sur les faces supérieure et inférieure de cette brique. Le temps de rendu de la scène est moins d'une seconde sur un Athlon 2800 avec 512 Mo de mémoire vive. Sur la même figure, partie gauche, on a une image référence de la brique réelle, employée pour déterminer des couleurs d'efflorescence. En effet, on peut utiliser une autre couleur désirée.



Figure 3-15 : Les briques affectées par efflorescence. A gauche une brique réelle et à droite une brique rendue avec notre algorithme. La brique de droite a été coupée pour visualiser son intérieur.

La Figure 3-16 montre l'évolution du temps (cycles de séchage/mouillage) et la porosité sur une brique.

La Figure 3-17 montre quelques scènes contenant des murs composés des différentes briques affectées. Chaque instance de la brique a des différentes variations de porosité parmi des limites fournies dans le Tableau 3-2. Les propagations primaires sont également différentes pour chaque brique. Ces images montrent le fait que l'utilisateur peut contrôler les différents aspects visuels de vieillissement sur un mur composé de beaucoup de briques, tels que la définition de la

probabilité de présence d'efflorescence en couche mince sur le mur, la densité de la cristallisation et son orientation.

La Figure 3-18 illustre une scène construite avec le mur cassé et attaqué par efflorescence très fine.

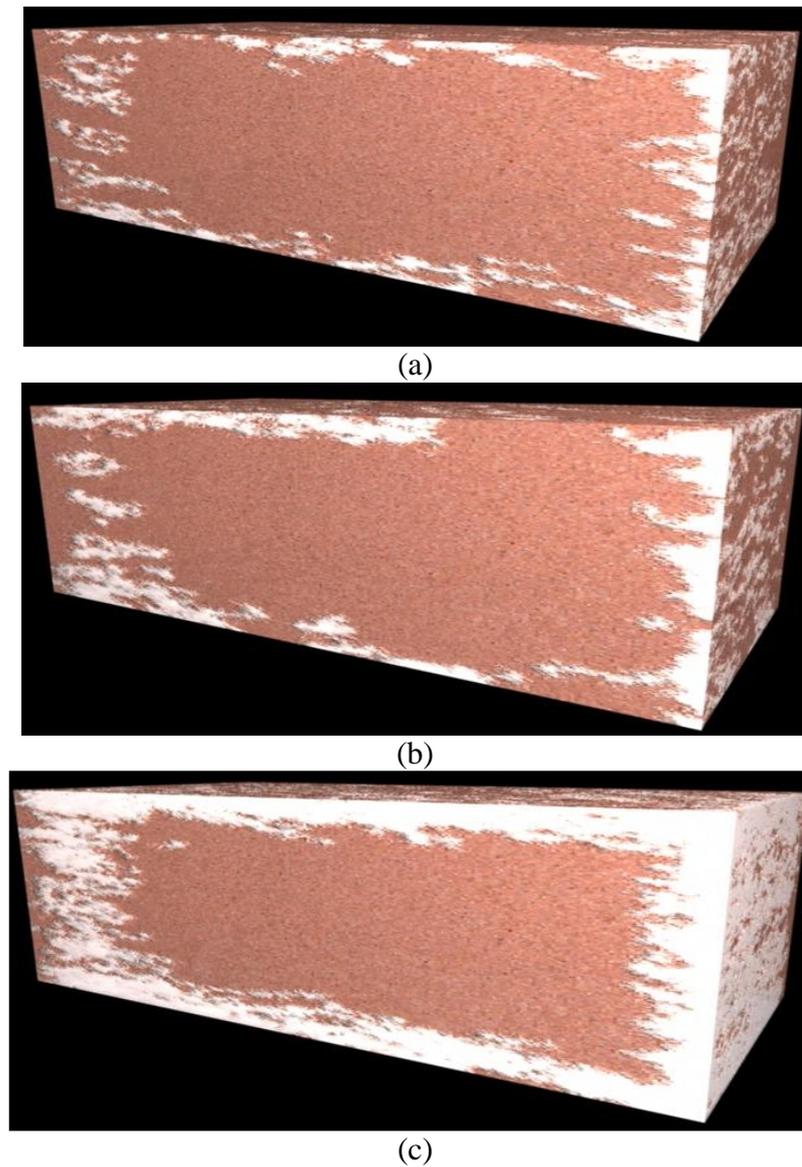
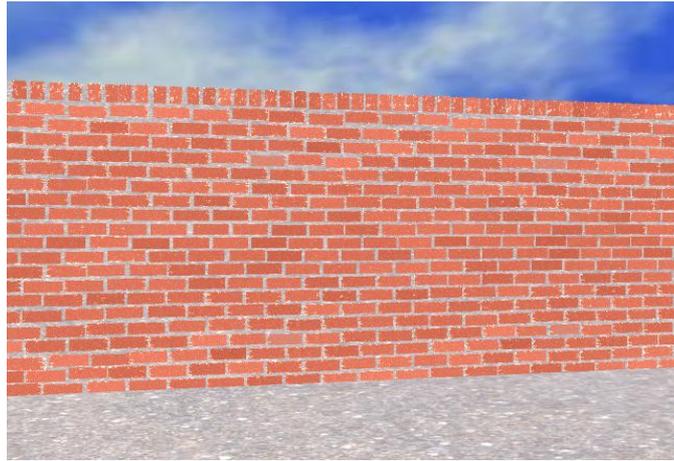
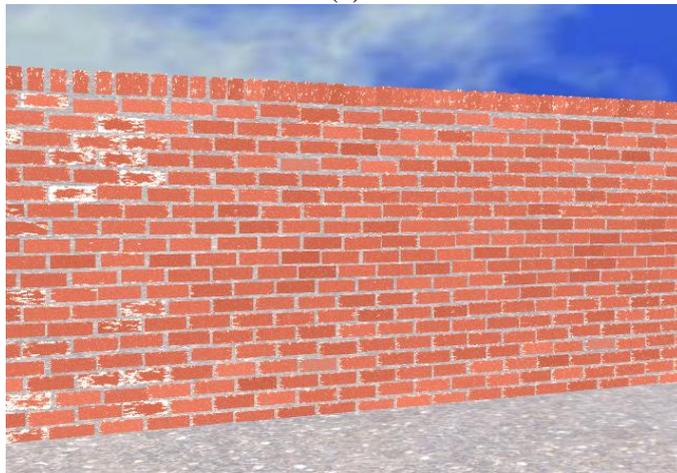


Figure 3-16: L'évolution de l'efflorescence en fonction du temps et la porosité. (a) une image synthétisée avec les paramètres : $N = 256$, $p = 0,30$, $N_s = 9$ ($26 * p$), $N_c = 10$, $L_d = 2$, $N_p = (N * N) * p * L_d = 47185$, $k=0,02$, $N_d=943$, $T_p = 300$. (b) les mêmes paramètres que dans l'image (a) sauf $N_c=15$. (c) les mêmes paramètres que dans l'image (a) sauf $p =0,36$ et $N_c=20$.

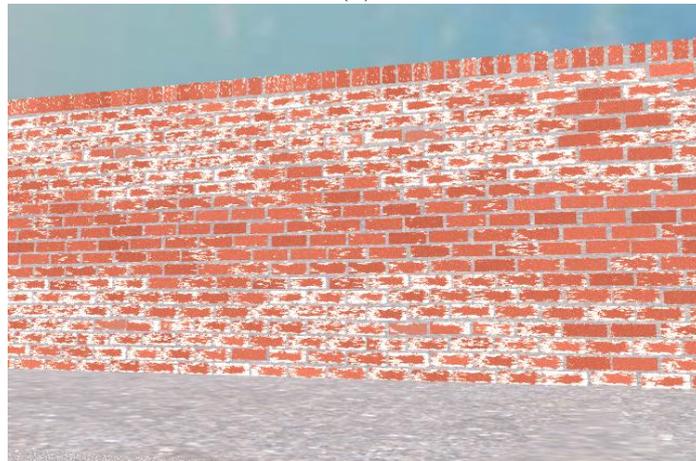
3. Efflorescence en couche mince



(a)



(b)



(c)

Figure 3-17: Différents effets de vieillissement dus à l'efflorescence. Le mur (a) ne présente pas d'attaque visible. Le mur (b) est attaqué sur sa partie gauche. Le mur (c) est attaqué sur les parties hautes et basses.



Figure 3-18: Une scène complète composée de différentes briques et mortier attaquées par efflorescence fine.

3.5. Conclusion

Nous avons présenté un modèle pour synthétiser l'efflorescence fine sur des briques et des mortiers. Ce processus de vieillissement est très courant car il affecte un grand nombre de constructions humaines et il a des effets visuels importants. Notre méthode est phénoménologique car l'efflorescence est un problème physique complexe qui peut être défini selon différents paramètres. Il est difficile de manipuler ces paramètres, de plus il n'est pas toujours évident de trouver l'étude sur ces paramètres, même en littérature de sciences de matériaux.

La mise en œuvre de notre méthode est simple car elle est basée sur la méthode bien connue de la texture solide. En plus, nous n'avons employé que quelques paramètres intuitifs. La vitesse de synthèse de texture permet de contrôler facilement les résultats finals. L'algorithme présenté dans ce chapitre ouvre un grand nombre de travaux futurs. L'efflorescence peut affecter beaucoup d'autres matériaux. La pénétration d'humidité dans les défauts structurels comme les fissures ou les ruptures, mène à l'efflorescence localisée. De plus, la cristallisation peut se produire avec le temps sur la surface des objets affectés, amenant des changements géométriques, aussi bien qu'à l'intérieur de la surface menant aux fissures et aux dommages

3. Efflorescence en couche mince

mécaniques des constructions. Notre représentation 3D des efflorescences calcule aisément ce processus de vieillissement.

Dans le prochain chapitre nous allons proposer les différents algorithmes pour simuler les effets comme l'érosion, l'effritement et l'efflorescence forte ou négligeable.

4. Cristallisation et effritement

Le mortier et la brique sont deux matériaux de construction importants largement utilisés. Leur aspect est souvent considérablement affecté par les phénomènes environnementaux et dépendant du temps tels que le dépôt et la cristallisation de sels, qui mènent à leur détérioration. En raison de l'existence importante des briques et des mortiers dans notre environnement, nous proposons de traiter leurs désagréments par une technique spécialisée, afin d'obtenir des résultats plausibles. En chapitre 3, nous avons présenté un modèle phénoménologique-empirique qui nous a permis d'obtenir des résultats physiquement plausibles d'efflorescence fine. Ce processus de désagrégation est courant car il affecte un grand nombre de constructions humaines. Cependant, la cristallisation peut se produire avec le temps sur la surface amenant des changements géométriques, aussi bien qu'à l'intérieur de la surface menant à l'érosion et l'effritement.

Une galerie d'images présentant le problème de désagrégation par des sels au cours du temps sur les maçonneries est montrée sur la Figure 4-1. Les changements volumétriques sont évidents sur la surface de la maçonnerie ; ainsi, il est très difficile de les représenter par la technique de la carte de relief, tels que nous les avons présentés au chapitre 3.

Dans ce chapitre, nous allons présenter une méthode pour produire la texture de la maçonnerie affectée et déformée par l'efflorescence, ainsi que la maçonnerie effritée et érodée.

4. Cristallisation et effritement

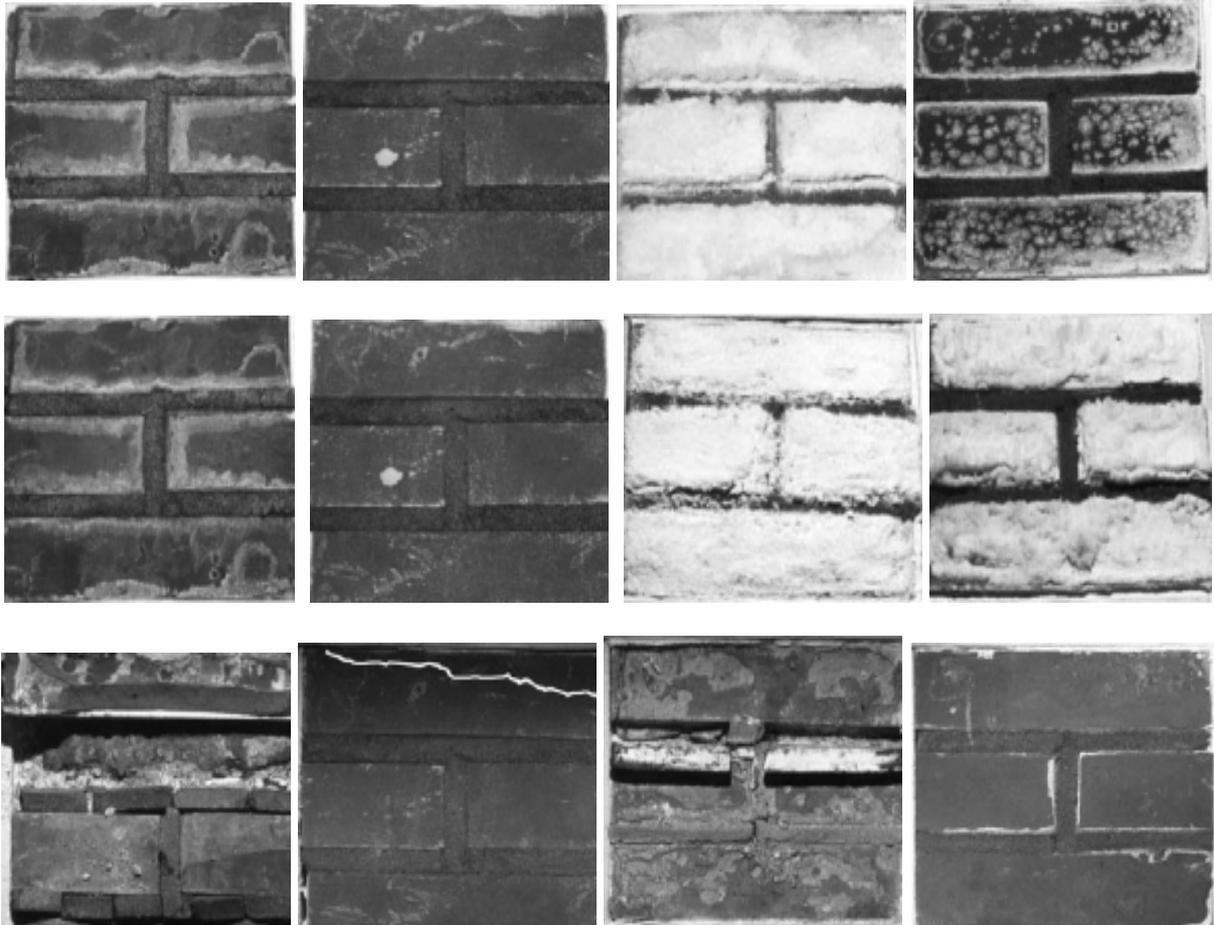


Figure 4-1 : Des exemples des effets de vieillissement par cristallisation, qui ont été obtenus avec des traitements spéciaux (environnement) au cours du temps par Hees et Brocken [HB04]. De haut en bas : après 4 jours, 3 mois, et 48 mois. Sur les colonnes 1 et 3, les briques sont contaminées par le Na_2SO_4 (sulfate de sodium). Sur les colonnes 2 et 4, les briques sont contaminées par $NaCl$ (chlorure de sodium). Après 4 jours, le mur attaqué par solution de Na_2SO_4 montre l'apparition de l'efflorescence sur les joints de mortier et sur les bords des briques. Après 3 mois, le modèle de l'efflorescence est le même, mais les parties des joints de mortier ont des effets de grains (effritement fin). Après 48 mois les effets de l'effritement et l'érosion apparaissent. On peut observer l'apparition de craquelures sur la brique contaminée par le $NaCl$ (l'image en bas de la 2^{ème} colonne). Les images sont tirées de l'article [HB04].

Pour éviter les formulations complexes et non intuitives tout en gardant des résultats plausibles, notre modèle, comme le modèle d'efflorescence fine (chapitre 3), est inspiré de la physique. En plus, afin de garder un contrôle artistique important, il est possible que l'utilisateur crée des textures dans des zones préférentielles de brique/mortier, menant à une grande variété de différents aspects. En premier, nous synthétisons une texture solide de maçonnerie (brique ou mortier). Par la suite, nous ajoutons les effets de l'efflorescence et sous-efflorescence en utilisant

un algorithme spécifique qui explique la cristallisation et l'effritement sur les matériaux de construction. Pour modéliser les effets de la désagrégation épaisse sur le mur de briques, nous appliquons en plus une méthode de modification géométrique simple pour altérer la surface avant l'étape du rendu.

La conception globale de notre système est organisée selon le schéma représenté sur la Figure 4-2. Comme pour le cas d'efflorescence fine, la première tâche est l'extrusion d'un échantillon de photographie (image 2D) pour obtenir un bloc 3D discret B de taille N^3 . Afin de maintenir la texture réaliste, nous perturbons simplement le processus d'extrusion par le bruit Perlin [Per85]. Le texturage d'un maillage de forme de brique par la texture solide B , a pour conséquence une formation d'une brique propre sans effets de désagrégation. En ajoutant différentes formes et intégrités de couleur de sels, sur une brique propre, puis en utilisant une méthode spécifique de dégradation de surface, nous pouvons produire différentes textures d'efflorescence et d'effritement sur la maçonnerie.

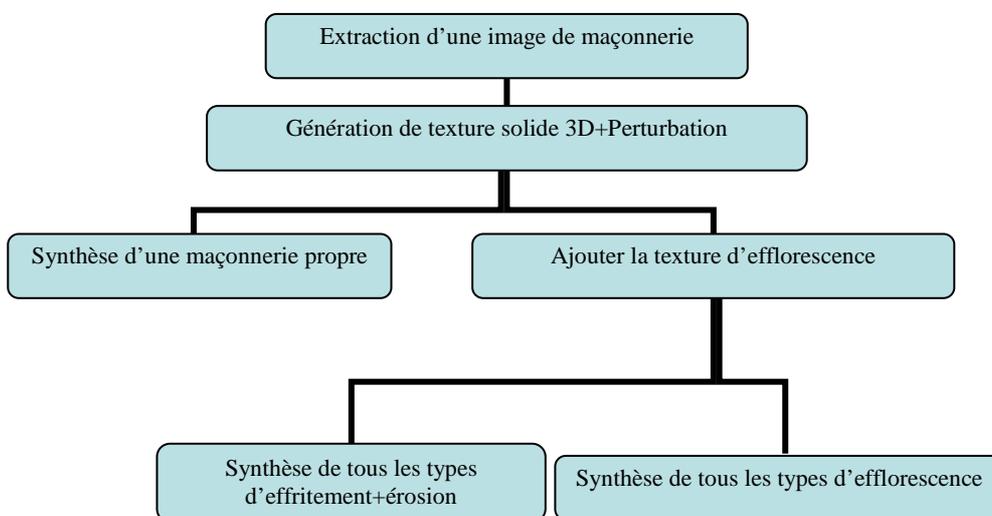


Figure 4-2 : Le schéma du système. Nous adoptons la méthode solide 3D de texture pour synthétiser une maçonnerie propre. Nous faisons un bloc de couleurs discret tridimensionnel B de la taille N^3 . Le bloc B est produit avec extrusion d'un échantillon de photographie en la perturbant, qui représente une vue de la texture 3D désirée. Pour synthétiser la maçonnerie, on peut appliquer le bloc de couleurs B à une silhouette (maillage) de maçonnerie.

4. Cristallisation et effritement

La section suivante présente les travaux proches ou reliés au nôtre dans le cadre de ce chapitre. La physique de cristallisation et sous-efflorescence sera étudiée dans la section 4.2. Dans la section 4.3 on va voir la simulation des effets de vieillissement de maçonnerie comme la surface déformée par cristallisation, effritement et érosion. On va voir aussi comment on peut réaliser le problème de surfaces très altérées et déformées. La section 4.4 aborde une extension de notre travail vers le sujet de fissure et de pollution de manière très succincte. La section 4.5 illustre des résultats obtenus avec les algorithmes présentés dans ce chapitre. Enfin dans la section 4.6 la conclusion et les perspectives sont données.

4.1. Travaux précédents

Les différentes techniques de vieillissement et défauts de surface et la grande variété des modèles de vieillissement sont récapitulés dans le chapitre 2, et peuvent être considérés comme les travaux antérieurs. Parmi ceux-ci, les travaux de Dorsey *et al.* [DPH96, DEJ*99] sont les travaux dont l'objectif est le plus proche du nôtre.

Dorsey *et al.* [DPH96] ont proposé un modèle phénoménologique pour simuler des taches sur la surface, dues à l'écoulement d'un liquide, représenté à l'aide d'un système de particules distribuées à la surface de l'objet et imitant la pluie, ce qui permet au liquide de couler sur la surface en déposant ou en enlevant des sédiments. Le mouvement des particules est contrôlé par quelques paramètres intuitifs au sein des forces habituelles comme la gravité ; les forces intrinsèques de la surface comme la friction, la rugosité, l'absorption ; et les forces extérieures comme le vent. Aussi, des réactions chimiques entre l'eau et les matériaux sont manipulées par un jeu d'équations différentielles pour rendre compte des taux d'absorption et de sédimentation. Cet effet de sédimentation est très important dans l'aspect final des surfaces affectées car il permet de déposer la saleté. La géométrie de la surface considérée (affecté) est changée par un ensemble de textures représentant la saturation du liquide en dépôt, la concentration de dépôts lâchés et la couleur des dépôts. La Figure 4-3 récapitule les processus de l'écoulement, l'absorption et la concentration de dépôt.

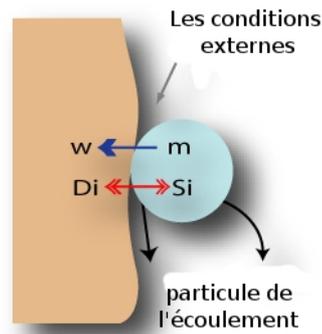


Figure 4-3 : Une particule d'eau contient la concentration du matériau Si . Cette particule peut rouler ou tomber de la surface. À chaque étape, les échanges se produisent entre la particule et l'objet. Di est la concentration du matériau déposée sur la surface. Image issue de l'article Dorsey *et al.* [DPH96].

La Figure 4-4 illustre un exemple de mur propre et sale d'après leur travail [DPH96].

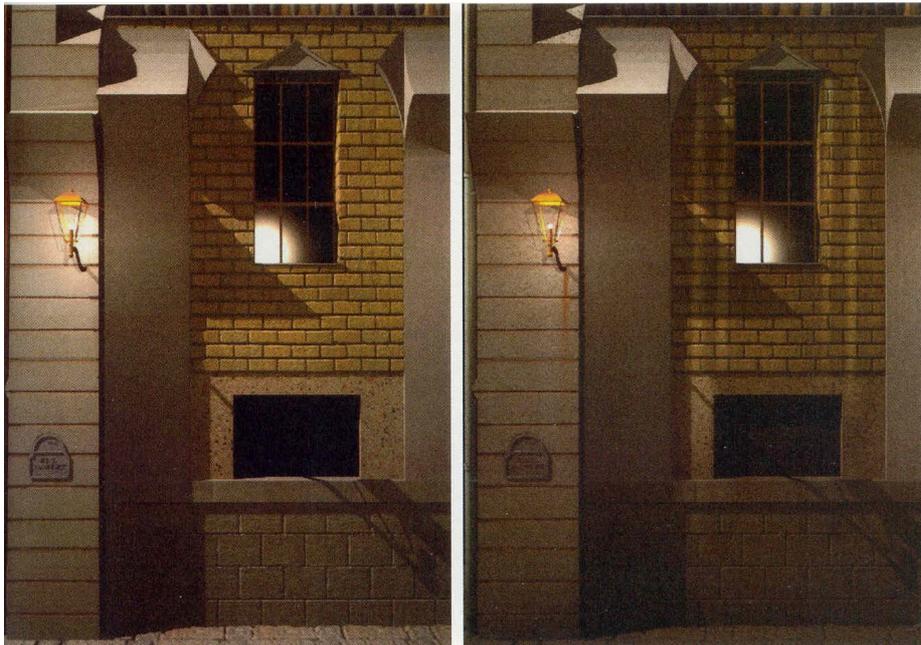


Figure 4-4 : Le mur original (gauche) et le mur après la simulation d'écoulement. Image issue de l'article de Dorsey *et al.* [DPH96].

Plus tard, Dorsey *et al.* [DEJ*99] ont développé une méthode pour modéliser et rendre les changements de la forme et de l'aspect de réflexion de la pierre, dus au processus de

4. Cristallisation et effritement

vieillissement avec le temps. La pierre est couramment utilisée comme matériau de construction et de support artistique. Une de ses qualités les plus remarquables est qu'elle change d'aspect quand elle est en interaction avec l'environnement. Ces changements sont principalement visibles sur les propriétés de réflexions de la surface mais impliquent des effets volumétriques complexes tels que l'effritement et la dissolution de minéraux.

Le processus de vieillissement de la pierre, est simplifié et représenté par le transport de l'humidité, dissolution et recristallisation des minéraux, transformation chimique des minéraux, et dépôt des polluants atmosphériques (la Figure 4-5).

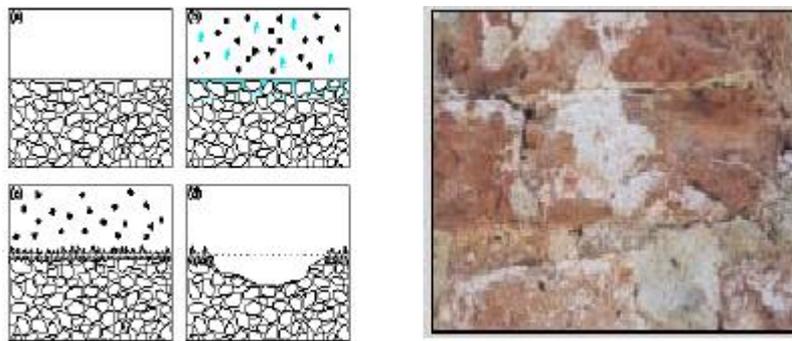


Figure 4-5 : L'image de gauche présente le passage de l'humidité qui contient différents composants chimiques. L'image de droite présente le vieillissement sur les pierres réelles. L'image est tirée directement de l'article [DEJ*99].

Leur algorithme est basé sur le concept de modélisation volumétrique [GH91] de la surface. Les modèles volumétriques considèrent un modèle plein d'objets dans l'espace, qui facilitent la modélisation des objets déformés, comme les objets sculptés. Dorsey *et al.* [DEJ*99] ont présenté le concept de la surface volumétrique, pour simuler des effets de vieillissement sur la pierre (effritement, efflorescence, décoloration). Ils ont présenté une structure de données de « slab », qui est une entité volumétrique quadrilatérale alignée avec les bordures de la surface. Chaque « slab » est voxelisé et contiendra les concentrations de minéraux dans l'objet. Ceci permet de représenter seulement la couche externe de la pierre qu'on peut considérer comme la partie qui sera attaquée. Ce modèle de vieillissement simule l'écoulement de l'humidité et du transport de sel. En outre, l'effritement chimique d'une surface en pierre par hydrosolubilité peut être manipulé.

L'utilisation des « *slab* » peut réduire considérablement la quantité de mémoire par rapport à une voxelisation complète de l'objet, mais on a tout de même besoin d'utiliser un grand nombre de voxels afin de représenter un objet, ce qui donne des temps de calcul considérables. De plus, la méthode exige l'intervention de l'artiste pour la construction de l'objet par les *slabs* et les voxels.

La Figure 4-6 montre le vieillissement d'une statue de Sphinx en granit rouge.



Figure 4-6 : La statue du Sphinx originale (a) et vieillie (b). Image tirée de l'article [DEJ*99].

La Figure 4-6(a) représente la statue originale avant la simulation de vieillissement. C'est un rendu direct du maillage original en utilisant la pierre produite par la quarry. Le temps du rendu est de 31 minutes (d'après l'article [DEJ*99]). La Figure 4-6(b) montre le corestone et les effets de jaunissement. Noter la perte de détails géométriques à haute fréquence et une rugosité générale de la surface.

La Figure 4-7(a) montre l'effritement et l'efflorescence sur la statue. Des sels ont été appliqués à la surface avec une carte d'exposition pendant le processus de simulation. Noter que l'altération de la surface est due à la désintégration des minéraux et à la recristallisation des sels. La Figure 4-7(b) montre une simulation plus raffinée avec les deux effets de jaunissement et l'efflorescence.

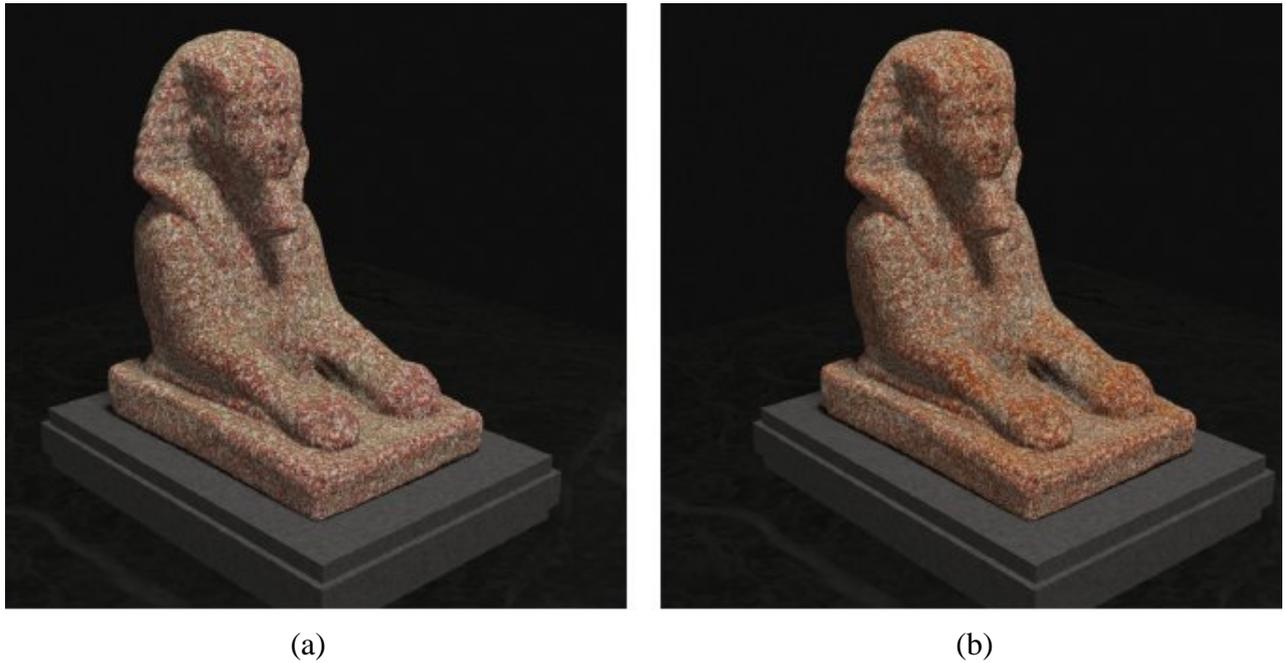


Figure 4-7 : Les statues attaquées par différentes sources de vieillissement. L'image est tirée de l'article [DEJ*99].

La méthode de vieillissement de la pierre emploie une technique de texture procédurale standard pour produire les aspects complexes. Ce système est proche à notre travail, mais avec une différence significative : la structure de « *slab* » n'a pas été employée dans notre technique. Nous employons une fonction simple pour calculer l'information intérieure une fois nécessaire. Cette fonction renvoie l'information très rapide par rapport au système de la géométrie basée sur « *slab* ».

4.2. Cristallisation et sous-efflorescence

Nous limitons notre modèle à une détérioration physique dans laquelle des effets de vieillissement sont liés aux cycles de mouillage et de séchage à la surface de maçonnerie. Nous ne tenons pas compte de la détérioration chimique où les dommages sont provoqués par la réaction entre les sels et le matériau de maçonnerie.

Les cycles de séchage/mouillage sont la cause principale de la cristallisation qui mène à la

détérioration de maçonnerie [HPM02, BK05, NH05]. Pendant que le séchage et l'évaporation se produisent sur la surface de maçonnerie, les sels se cristallisent à partir de la solution produisant les cristaux blancs connus sous le nom d'efflorescence. Ces cristaux blancs peuvent changer la couleur, les propriétés de réflexion et la géométrie de la surface. La cristallisation cachée de sels qui se produit au-dessous de la surface de maçonnerie dans les pores s'appelle sous-efflorescence, menant à la détérioration souvent forte de la maçonnerie. Ceci peut être visuellement observé par l'apparition de fissures, d'effritement et d'érosion de surface.

Le Tableau 4-1 montre une observation de ces attaques par différents sels (normalement sulfate de sodium et chlorure de sodium) dans des conditions de laboratoire après 3 et 48 mois, qui représentent la situation réelle sur de longues périodes [HB04].

	Sulfate de Sodium	Chlorure de Sodium
Après 3 mois	Efflorescence, délaminage, effritement	Efflorescence
Après 48 mois	Efflorescence, surface bosselée (push out), délaminage, effritement	Efflorescence, effritement, fissure

Tableau 4-1 : Vue d'ensemble des dommages causés par la cristallisation après 3 mois et 48 mois (examinés par Hees et Brocken [HB04]).

La cristallisation est un phénomène environnemental et variable dans le temps. La cristallisation sur le mur de briques s'accumule avec la répétition des cycles de mouillage/séchage [PHK03, MT04, BGG*04]. Ce cycle de mouillage/séchage dépend de l'environnement de la brique. Pendant le mouillage, les solubles de sel se diffusent à l'intérieur des pores du matériau. Pendant le séchage, l'évaporation de l'eau mène au dépôt des sels dans les pores, qui sont observés comme la cristallisation. La Figure 4-8 montre le ratio de la zone couverte par du sel par rapport à la surface totale de la brique [MT04] au cours du temps (nombre de cycles).

Différents sels sont localisés en différentes parties du matériau [HB04, BGG*04]. Par exemple la croissance du cristal de chlorure de sodium ($NaCl$) est plutôt sur la surface de l'objet qui produit l'efflorescence, tandis que les sulfates de sodium (Na_2SO_4) se développent à

4. Cristallisation et effritement

l'intérieur du matériau, produisant la sous-efflorescence. La Figure 4-9 récapitule la différence entre le phénomène d'efflorescence et de sous-efflorescence.

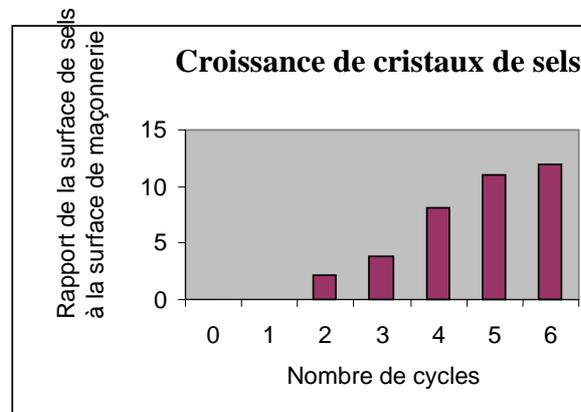


Figure 4-8 : La croissance de cristaux

Le dépôt de sels peut prendre de nombreux aspects sur la maçonnerie, selon beaucoup de paramètres. Dans le chapitre précédent nous avons pris en considération le cas où la cristallisation sur la surface est fine ou négligeable ce qui ne change pas la géométrie de la surface. Dans ce chapitre nous allons simuler le cas où la cristallisation est assez significative pour changer la géométrie de la surface de la maçonnerie.

La sous-efflorescence peut produire des dommages structuraux des surfaces de maçonnerie tels que l'effritement, l'érosion et les fissures. La pression de la croissance de développement des cristaux de sels est suffisamment forte pour perturber le matériau de maçonnerie le plus dur. La sous-efflorescence qui n'est pas visible sur la surface peut présenter la voie la plus importante d'érosion et d'effritement. La pression de cristallisation (sous-efflorescence) a été formulée pour la première fois par Correns [Cor49] comme suit :

$$P = \frac{RT}{V_s} \times \ln \frac{C}{C_s}$$

Dans cette équation, P est la pression exercée par la croissance des cristaux en atmosphère, R est la constante de gaz, T est la température en Kelvin, V_s est le volume molaire du sel solide, et C/C_s est le degré de saturation de sel. La Figure 4-10 montre l'effet de pression de cristallisation sur l'objet. Comme notre modèle est limité à des détériorations physiques (pas chimiques), pour

chaque point de la maçonnerie, nous proposons de calculer le paramètre de pression P en fonction de la densité de cristallisation autour de ce point (voir la section 4.3.2).

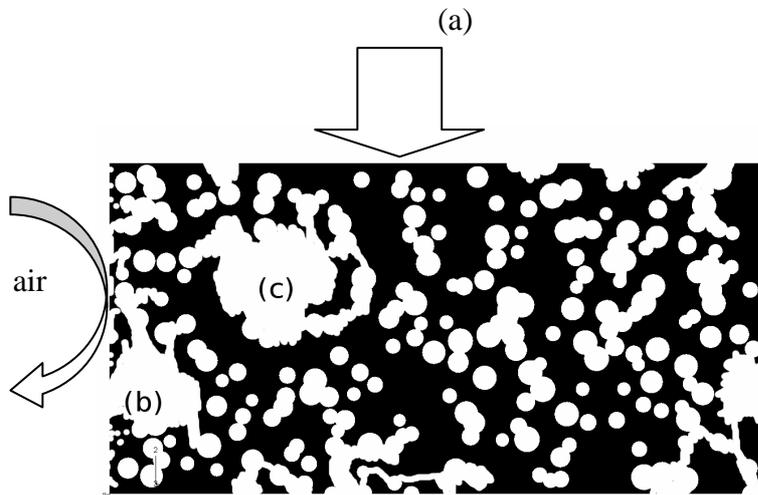


Figure 4-9 : Principe de transfert de sels. (a) Les sels dans la solution pénètrent dans la maçonnerie. (b) La solution se déplace par la force de capillarité à la surface. L'eau sur la surface s'évapore et dépose «*efflorescence*». (c) La solution se déplace par la force de capillarité à l'intérieur de la maçonnerie et s'approche de la surface. L'eau interne s'évapore en déposant les cristaux appelés «*sous-efflorescence*».

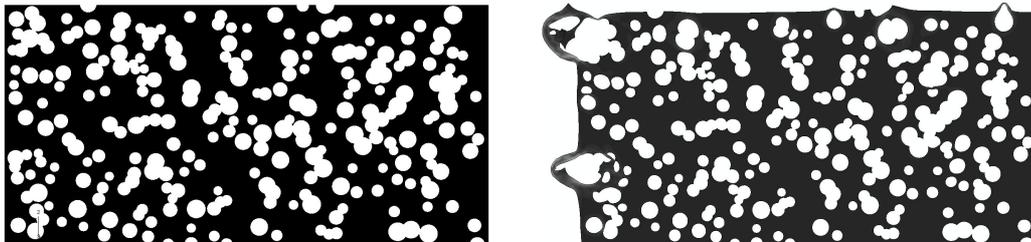


Figure 4-10 : Représentation de l'effet de la pression de cristaux de sels. Les zones blanches sont les grains en cristal (l'image de gauche) menant à la déformation extérieure (l'image de droite).

La croissance de cristal dans les maçonneries mène à la perturbation de la surface de façon grain par grain, qui produit l'effritement sur la surface, ou l'élimination complète d'un morceau de la couche extérieure qui peut altérer très profondément la surface. Sur la Figure 4-11 nous pouvons voir les vrais exemples de ces différents types de changements extérieurs.

4. Cristallisation et effritement



Figure 4-11 : Trois images réelles des dommages structuraux. Dans la rangée supérieure, nous pouvons voir l'érosion et l'effritement (à gauche), et l'élimination de la couche extérieure (à droite). Dans l'image du bas tous les problèmes d'efflorescence, d'effritement et l'élimination de la couche extérieure sont réunis.

4.3. Simulation des effets de cristallisation de sels

4.3.1. Efflorescence

Afin d'obtenir le vieillissement causé par efflorescence, nous utilisons dans un premier temps, la méthode de synthèse d'efflorescence en couche mince sans ajouter l'effet d'altération géométrique de surface, décrite dans le chapitre précédent.

Pour capturer une image de maçonnerie vieillie et ajouter des détails, nous pouvons employer une des techniques de déformation qui dépend du niveau de dégât sur la surface. La carte de relief [Bli78] peut être suffisante pour manipuler l'efflorescence en couche mince qui n'est pas assez significative pour modifier la géométrie de surface des briques (voir chapitre 3). La méthode de la carte de déplacement est préférable afin de manipuler les changements importants sur la surface. Dans cette méthode, chaque point sur la surface est déplacé le long de sa normale. Les déplacements de la surface sont produits par une fonction, où ils sont interpolés d'après une texture.

Pour atteindre la simulation de vieillissement de surface de qualité supérieure, nous employons une méthode adaptative de *tessellation*² de carte de déplacements [DH00, WWT*03, HEG*04]. Dans cette méthode, des propriétés de déplacement correspondent à la texture utilisée comme carte de déplacements. Ces propriétés de déplacements sont employées pour adéquation de subdivision de la surface de base. Par conséquent, la *tessellation* adaptative produit moins de triangles que la méthode de subdivision uniforme de la surface de base. Nous définissons un déplacement positif comme élévation et le déplacement négatif comme dépression. Le décalage correspond aux couleurs de niveaux de gris du noir au blanc (la couleur grise neutre ne signifie aucun déplacement).

Pour avoir une élévation par des cristaux de sel, nous employons une « *carte de déplacements positifs* » sur la surface, en adoptant l'image de niveaux de gris de chaque vue de maçonnerie en tant que « *carte de hauteurs* ». En outre, pour contrôler la profondeur du déplacement, nous définissons un paramètre H_d d'échelle valide dans l'intervalle [0, 1]. La Figure 4-12 compare une vraie brique âgée et des briques synthétisées par les deux méthodes de la carte de relief et la carte de déplacements. On voit bien que la silhouette de la brique synthétisée, en utilisant la carte de relief comme perturbant, est totalement lisse, ce qui est peu réaliste.

² La subdivision en micropolygones

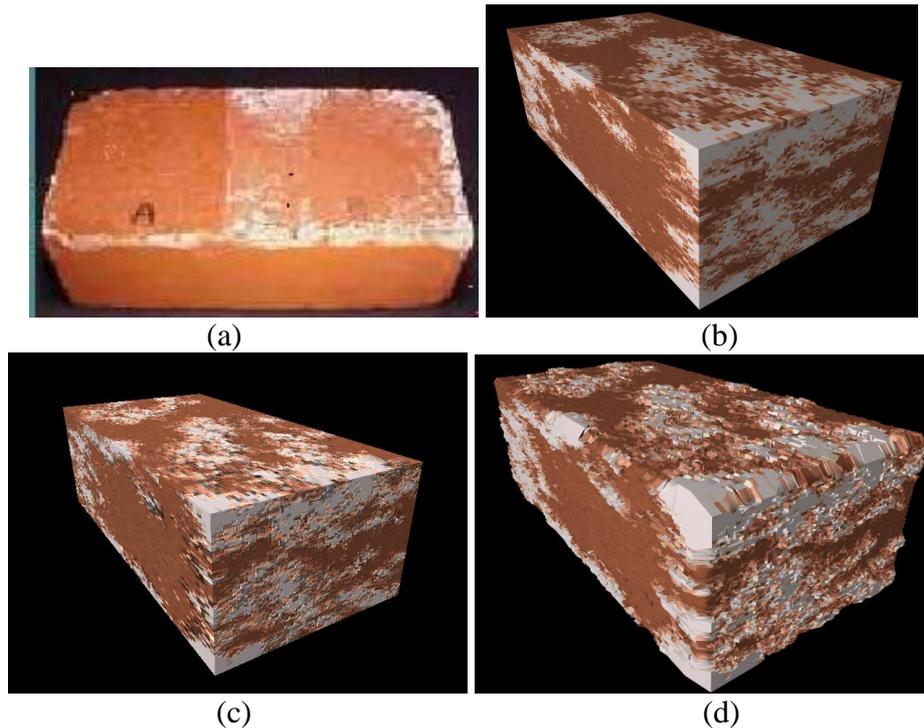


Figure 4-12 : (a) Une image réelle de briques attaquées par efflorescence. (b) Brique affectée par efflorescence sans modification de sa géométrie. (c) Utilisation de la méthode de carte de relief pour altérer la surface (la méthode utilisée dans le chapitre précédent). (d) Utilisation de la méthode de carte de déplacements pour altérer la surface. Pour synthétiser l'image (d), nous avons les paramètres suivants : $N = 128$, $p = 0,3$, $N_s = 8$ ($26 * p$), $N_c = 10$, $L_d = 2$, $N_p = (N * N) * p * L_d = 9830$, $k = 0,03$, $N_d = 294$, $T_p = 300$, $H_d = 0,2$.

4.3.2. Vieillissement de la surface de maçonnerie avec effritement (érosion)

La croissance de cristaux de sels à l'intérieur de la maçonnerie peut exercer assez de pression qui peut présenter la majeure voie d'effritement sur la surface de maçonnerie (voir la section 4.2). La profondeur des dégâts dépend généralement de la qualité de la brique; de la cristallisation, des cycles de séchage/mouillage, du degré de porosité de maçonnerie et de l'écoulement de l'eau. Tant que nous savons que l'efflorescence peut être une sous-efflorescence avancée, déplacée vers la surface par la porosité ouverte (la Figure 4-9), nous pouvons définir une fonction f pour calculer la quantité (profondeur) de dégâts au-dessus des parties de la maçonnerie qui ont été attaquées par l'efflorescence :

$$D = f(P, H)$$

Ici P est la pression exercée avec la croissance des cristaux ; H (entre 0,0 et 1,0) est la distance du point sur la face visible de maçonnerie et son image sur le cristal en-dessous de la maçonnerie (Figure 4-13).

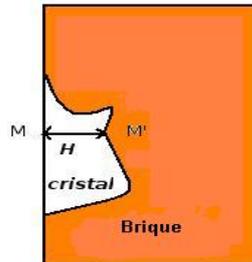


Figure 4-13 : La distance H pour le point M sur la face visible de la brique et son image M' sur le cristal.

Nous supposons qu'une densité de cristal assez élevée peut produire assez de pression pour altérer l'image (plaquage) du point le long de la normale de surface. Cette hypothèse est valide pour la maçonnerie âgée [BK05, Lar04, NH05]. Donc pour chaque point de maçonnerie on peut imaginer le volume de cristallisation de sel comme sa pression exercée. Alors, pour calculer le paramètre P pour chaque point, on peut calculer la densité de cristallisation autour de ce point. La profondeur de dégât est aussi liée au paramètre H . Une valeur plus élevée de H peut endommager profondément la surface en fonction du temps. Noter que nous considérons tout grain de cristallisation, en-dessous de la face extérieure de façon assez proche de la face extérieure, pour avoir une perturbation régulière. Pour un H très grand ($H \approx 1,0$) on peut avoir l'altération sur la face non-visible de la maçonnerie (la face opposée).

La fonction f peut être définie comme une fonction qui a une relation directe avec les deux paramètres P et H : $D = (P \times H) / c$ par exemple, où c est un paramètre de calibrage de dégât.

Maintenant que nous avons trouvé la profondeur de dégât (D), pour synthétiser une surface émiettée, nous appliquons la méthode présentée pour simulation d'efflorescence (la section 4.3.1) mais avec quelques différences. Ici, nous employons une méthode de « *la carte de déplacements négatifs* » pour pousser la surface de maçonnerie en profondeur D .

Notons que la texture d'efflorescence qui a été utilisée comme la carte de hauteurs, est éliminée après perturbation de la surface. En effet, une autre texture d'efflorescence peut être choisie par l'utilisateur pour l'apposer sur la maçonnerie, car sur une surface de maçonnerie

4. Cristallisation et effritement

réelle, l'efflorescence peut être absente ou différente de la voie effritée. La Figure 4-14 représente une brique réelle effritée et celle de synthèse.

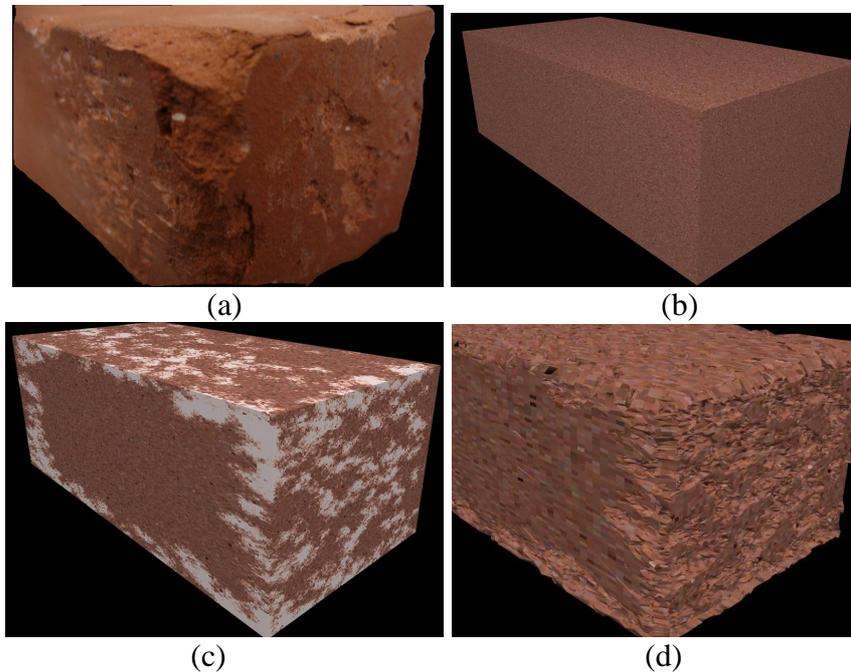


Figure 4-14 : Représentation d'érosion sur les images réelles et synthétisées, (a) une image réelle de brique effritée, (b) une brique synthétisée propre, (c) une brique synthétisée avec efflorescence mais sans changement géométrique (d) une brique synthétisée et effritée ; pour obtenir une brique effritée, nous avons employé une carte de déplacements négatifs en éliminant la couleur d'efflorescence. Les paramètres de vieillissements pour l'image (d) sont les mêmes que dans la Figure 4-12(d), mais avec $T_p = 100$, au lieu de $T_p = 300$.

4.3.2.1. Problème d'effritement très fort

Pour traiter l'altération très dure sur la façade de maçonnerie (la Figure 4-15), nous proposons de modifier le maillage de maçonnerie avant qu'elle soit rendue.

D'abord, on subdivise le modèle original de maillage juste assez fin aux quelques morceaux cubiques (par exemple $15 \times 15 \times 15$ cubes pour chaque brique donne un résultat satisfaisant). Alors, afin d'obtenir l'effet de déformation, nous employons simplement une texture d'efflorescence comme une carte de déformation de la surface, correspondant à l'échelle de déplacement désirée (la Figure 4-16). Après ces processus nous avons la maçonnerie déformée à laquelle on peut appliquer la méthode présentée dans la section précédente (section

4.3.2) à son maillage, pour réaliser l'effritement très fort. Ici, la texture utilisée comme la carte de hauteur est la même que la texture utilisée comme la carte de déformation.



Figure 4-15 : Un exemple réel d'altération très forte sur un mur.

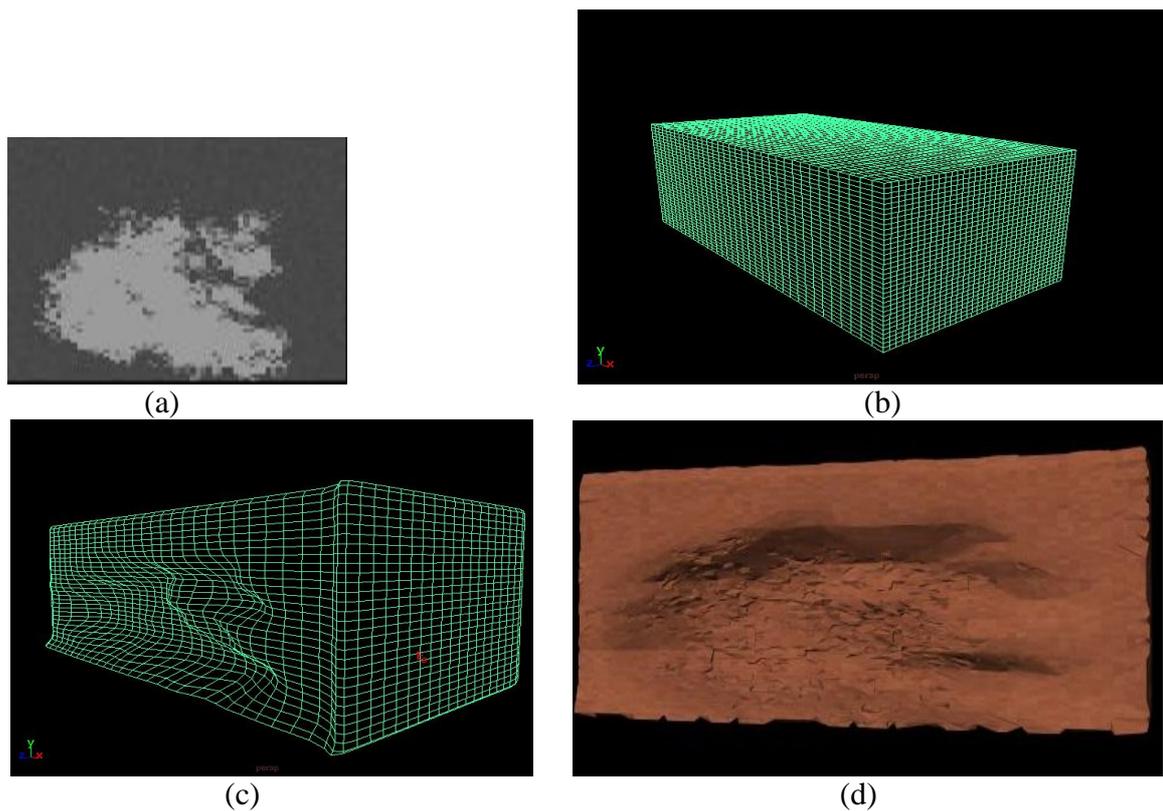


Figure 4-16 : Processus de modification du maillage. (a) : un modèle de texture, (b) un maillage de brique subdivisée, (c) une brique déformée avec la texture (a). Ici pour plus de visibilité le maillage de brique est trop fin, dans la pratique la subdivision $15 * 15 * 15$ est suffisante. De plus, la texture a été appliquée seulement sur la face visible avant du maillage, mais dans la pratique, la texture est appliquée sur toutes les faces visibles. (d) Rendu du résultat. Noter que la texture (a) est en plus utilisée comme une carte de hauteur.

4.4. Extension

Les matériaux de construction sont soumis à d'autres imperfections telles que les fissures et les pollutions. Nous croyons que nous pouvons aborder l'apparition des fissures en introduisant certains éléments importants mis en jeu pour leur apparition tels que la contrainte sur chaque point de la maçonnerie. Aussi, notre modèle peut être modifié facilement pour générer des textures dues à la pollution.

4.4.1. Fissures : 1^{ère} approche

Une fissure est la désintégration systématique des liaisons de matériaux (raccordements). Sa forme change selon le matériau, la géométrie de l'objet et les contraintes extérieures. Une craquelure apparaît quand les contraintes internes (les tensions) d'un matériau sont plus grands que la résistance du matériau : une liaison solide se casse sous tension, puis ses voisins, etc.

Les fissures survenant dans un objet sont dues à l'action de forces internes à l'objet, apparaissant quand celui-ci se déforme sous l'effet de forces extérieures. Il est important que le modèle de déformation choisi fournisse un certain nombre d'informations telles que la magnitude et l'orientation des forces provenant des déformations, qui seront à l'origine des fissures. De la même manière, le modèle choisi pour représenter l'objet à déformer devra être en mesure de permettre le calcul des déformations (discrétisation).

Les fissures sont d'autres effets du vieillissement et des dommages structuraux importants sur les matériaux de construction. Bien que la maçonnerie puisse se déformer sur de longues périodes de façon élastique et puisse s'adapter à de petits mouvements, les grands mouvements causent normalement la fissure. Les fissures peuvent apparaître le long des joints de mortier ou sur les unités de maçonnerie (brique par exemple). La fissure peut résulter d'une variété de phénomènes : l'écart d'alignement des bases du bâtiment, la contraction due au séchage (en particulier dans le bloc concret), l'expansion et la contraction dues aux variations ambiantes de la température et de l'humidité, les effets des cycles de gel-dégel de l'eau, la

corrosion du fer et l'acier du renfort de mur, la différence de mouvement entre les matériaux de construction, l'expansion des sels et la cristallisation, et le gonflement ou l'inclinaison des murs.

Cette section consacrée spécifiquement à la formation de fissures bidimensionnelles, à cause de leur grande importance visuelle. La Figure 4-17 montre certains effets de vieillissement dû à la fissure.

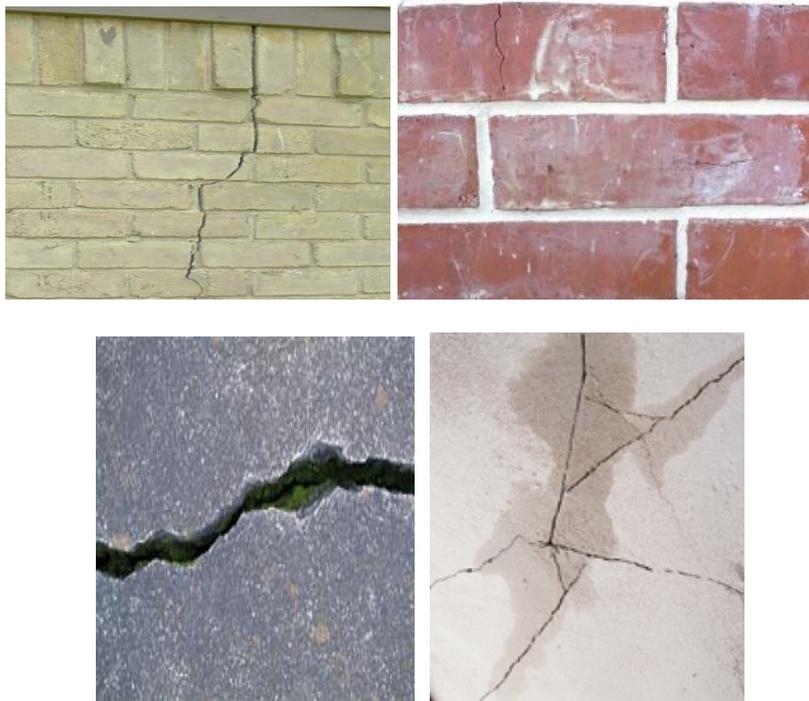


Figure 4-17: Une galerie de fissures sur les maçonneries

Après l'état de l'art que nous avons abordé en chapitre 2 concernant les fissures et les fractures, on peut classifier les techniques existantes pour les modéliser dans la prochaine section.

4.4.1.1. Méthodes de fissures

Dans le cadre de cette thèse nous allons aborder la modélisation du phénomène de fissure et de fracture de manière très succincte. D'abord nous allons voir les méthodes pour le faire.

Nous récapitulons les méthodes existantes avec leurs avantages et désavantages, puis nous verrons la propagation simple de fissure sur les surfaces 2D.

• **Techniques basées sur le maillage**

• **Système masse ressort**

- L'objet est représenté par un réseau de masses reliées entre elles par des ressorts.
- Les masses sont généralement attribuées aux nœuds du maillage.
- Les ressorts sont en fait des liens élastiques modélisant les interactions entre des nœuds voisins.
- Il ne s'agit pas d'un véritable modèle physique 3D car il ne représente pas la matière sous forme continue, mais plutôt d'une extension en 3D d'un modèle physique unidimensionnel.

• **Méthode éléments finis (FEM)**

- Le système est découpé en un maillage d'éléments volumiques et à l'intérieur de chaque élément les champs de forces et de déplacements sont estimés par des fonctions d'interpolation continues.
- Système beaucoup plus conforme à la réalité physique.
- Un autre avantage de cette méthode est qu'il n'est pas obligatoire de raffiner le maillage pour augmenter la précision. On peut augmenter la précision en changeant les fonctions d'interpolation.

• **Méthode éléments de frontière**

- Méthode très semblable à la méthode des éléments finis.
- Moins de calculs sont l'avantage de cette méthode.
- Néanmoins avec cette méthode on ne s'intéresse qu'à la surface de l'objet. Ainsi cette méthode n'est pas adaptée aux fractures.

• **Méthode différences finies**

- Une seconde alternative à la méthode des éléments finis.

- Plus facile à implémenter.
- Mais nécessite un maillage uniforme. Donc difficile à appliquer aux bords des objets ainsi que pour les éventuelles fractures.

• Techniques sans maillage

Ces méthodes basées sur la modification de la géométrie, dans le contexte de la modélisation, représentent une issue spécifique aux problèmes de déformation et fissures. Le principe consiste à discrétiser le système à l'aide de points. Au départ ces points possèdent une masse et un rayon d'action comme un nuage de points. La plus ancienne de ces méthodes en mécanique des solides est la méthode des éléments diffus (1992) et la plus répandue porte le nom anglais « *Element free Galerkin method* » (1994). Lorsque la géométrie du domaine étudié varie, ces méthodes de simulation présentent un avantage déterminant par rapport à la méthode basée sur le maillage comme la méthode des éléments finis : il n'est pas nécessaire d'effectuer un remaillage du domaine. C'est en particulier le cas en mécanique de la rupture où la fissure peut croître, ce qui nécessite un effort de calcul important lors du remaillage du front de fissure par la méthode des éléments finis.

4.4.1.2. Propagation de fissure

Pour plus de réalisme nous nous sommes intéressé à la propagation de fissure de façon physiquement correcte. Comme nous sommes au début de cette étude, nous commençons par simuler la propagation par un logiciel de physique afin d'évaluer le processus physique de la fissure et de la fracture.

La propagation de fissure le long d'une surface prédéfinie est simulée en utilisant le logiciel commercial de physique ABAQUS qui utilise la méthode éléments finis (FEM) qui est une méthode basée physique. L'étude de la propagation de fissure s'applique pour des modèles en 2D. Cette méthode exige que l'utilisateur définisse deux surfaces de contact distinctes, initialement contactées par les bords, entre lesquels la fissure se propagera. Ces surfaces sont

4. Cristallisation et effritement

présentées en maillage d'éléments.

L'analyse de propagation de fissure est effectuée sur des éléments de surface. Une fissure a lieu lorsque le critère de rupture d'éléments f atteint la valeur de 1,0 avec la tolérance associée :

$$1 - f_{tol} \leq f \leq 1 + f_{tol}$$

Où la tolérance f_{tol} est définie par l'utilisateur. Par défaut la valeur de f_{tol} est de 0,1.

La Figure 4-18 illustre un exemple d'évolution et de propagation de fissures. Le modèle initial est constitué de deux pièces de même matériau que la brique. Une pré-fissure est définie à l'interface des deux briques. Notons que chaque ensemble en plus de la fissure est aussi soumis à une déformation.

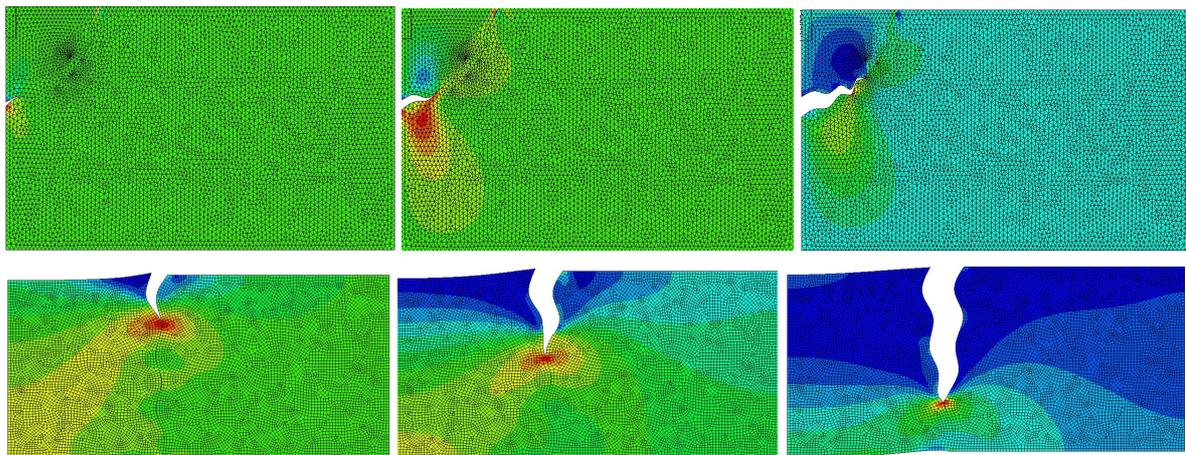


Figure 4-18 : Propagation de fissure. Chaque rangée montre un aspect de fissure. De la colonne de gauche vers la colonne de droite on voit bien la fissuration de surface. Chaque ensemble en plus de la fissure est aussi soumis à une déformation. Cet effet est plus visible sur la deuxième rangée.

A partir de cette étude, on peut imaginer de créer des images fissurées et fracturées de maçonnerie. Nous pouvons observer que la propagation de fissures sur une surface 2D est bien satisfaisante. De plus nous savons (d'après le document du logiciel) que cet algorithme est adaptable facilement sur une surface 3D. Mais, malheureusement le temps de calcul avec le logiciel que nous avons utilisé pour notre étude, est trop long et coûteux, et donc nous envisageons d'intégrer cet algorithme qui donne la réponse satisfaisante à notre système.

4.4.2. Pollutions

Les pollutions constituent une catégorie importante des phénomènes de détérioration. Elles sont présentes habituellement dans la majorité des environnements, particulièrement sur les matériaux de construction. La pollution peut être un cas particulier de l'accumulation de poussières. Les poussières peuvent être des produits gazeux et solides rejetés dans l'air par différentes sources, telles que les véhicules à moteur, les installations de chauffage ou encore les installations industrielles. Ce phénomène se traduit par l'apparition de taches sur la surface aussi bien en contact avec l'air qu'avec certains liquides.

La Figure 4-19 montre quelques images réelles du vieillissement du mur et des pavés, dû à la pollution.



Figure 4-19 : L'effet de pollution sur les matériaux de construction.

4. Cristallisation et effritement

La pollution sur les matériaux de construction est habituellement de couleur noire. Cependant, quelques composants chimiques peuvent produire des dépôts très variés en couleur (voir la Figure 4-19).

Dans notre système, pendant le processus de synthèse, les couleurs peuvent être directement définies à partir de vraies photos afin de tenir compte de la véritable couleur sans présenter divers paramètres des composants chimiques, ou bien on peut choisir la couleur désirée avant l'étape du calcul de pollution.

La pollution comme les autres dégâts de matériaux de construction peut prendre de nombreux aspects. En particulier, la pollution peut se produire sur la surface de maçonnerie, qui expose des formes aléatoires de taches. Dans cette section, nous prenons en considération tous les cas de pollutions dues à l'accumulation des particules de saleté. Ces types de pollution peuvent être assez forts pour modifier la géométrie de surface externe des maçonneries, ou peuvent laisser apparaître une couche mince de tache sur la surface.

Nous proposons de manipuler la pollution en utilisant le même algorithme de synthèse que nous avons proposé pour l'efflorescence, mais avec tout de même quelques petites différences. Pour les variations d'épaisseurs on peut employer simplement la carte de relief ou la carte de déplacements, en fonction de la forme de pollution. Nous employons la méthode de « *la carte de déplacements négatifs* » ou « *la carte de déplacements positifs* » en fonction de la couleur de pollution sur la surface. C'est-à-dire si la couleur des taches dues à la pollution est plutôt claire par rapport à la couleur de maçonnerie, on utilise les déplacements positifs, sinon on utilise les déplacements négatifs. Cela donne une surélévation de surface attaquée par la pollution ce qui correspond à la réalité.

Bien que certains paramètres d'efflorescence et d'érosion que nous avons déjà utilisés n'aient pas de signification physique pour simuler la pollution, on peut les utiliser pour générer différents aspects de pollutions. La Figure 4-20 montre des exemples de pollutions de différentes couleurs et paramètres sur la brique. La Figure 4-21 illustre cet effet sur un mur.

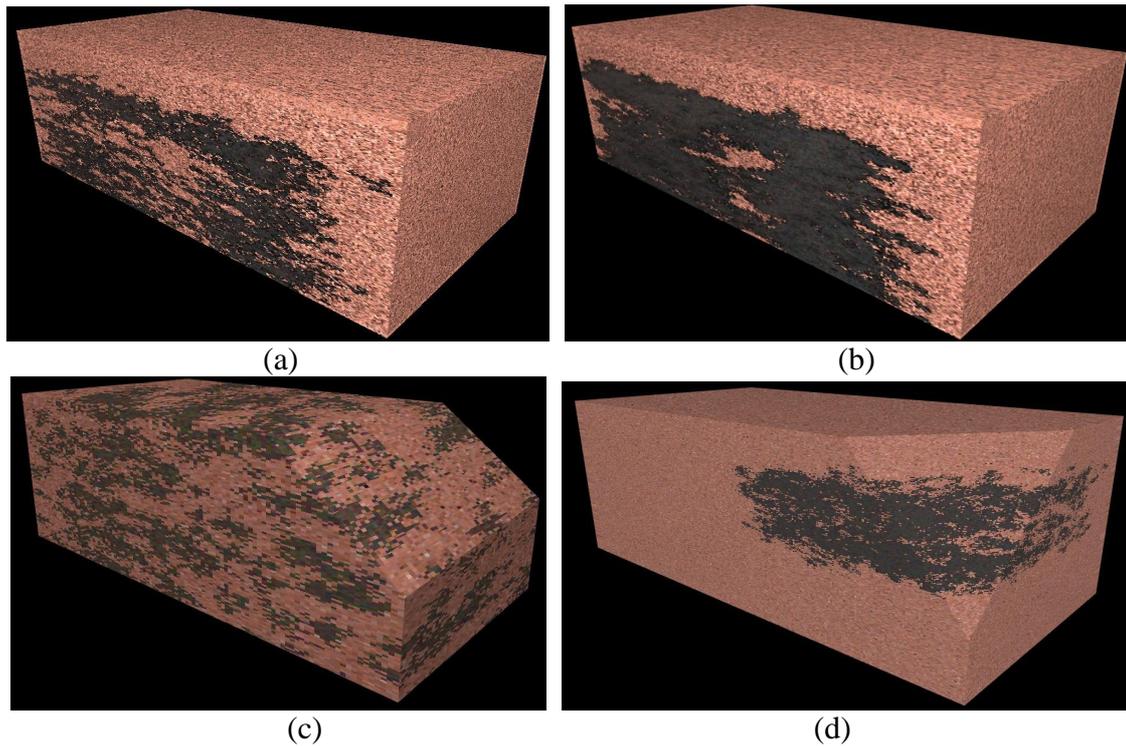


Figure 4-20 : Différents aspects de taches dues à la pollution. La méthode de carte de relief avec « déplacements négatifs » pour altérer la surface a été utilisée. La taille de texture pour les images (a) et (b) : $N = 128$, et pour les images (c) et (d) : $N = 256$. Les autres paramètres sont : $p = 0,3$, $N_d = 5000$, $T_p = 300$, $H_d = 0,1$. Nous utilisons le paramètre $N_c = 3$ pour l'image (a), et $N_c = 10$ pour les images (b), (c) et (d). Ce paramètre est utilisé pour diversifier les degrés de pollution, par exemple. Les images (c) et (d) montrent l'aspect de pollution à l'intérieur des briques.



Figure 4-21 : Un mur pollué.

4.5. Résultats

Nous étions intéressés par l'amélioration de la qualité d'image de notre ancien travail présenté dans le chapitre précédent et de produire une grande variété de textures. Pour ceci, nous

4. Cristallisation et effritement

avons amélioré notre ancien système de vieillissement et aussi nous avons ajouté la méthode d'antialiasage afin de réduire la distorsion d'image. Il existe généralement deux méthodes pour faire l'antialiasage : le super-échantillonnage et l'antialiasage de bord. La méthode d'antialiasage de super-échantillonnage premièrement rend la scène dans une résolution énorme, et la réduit alors à l'échelle d'origine. Avec cette méthode, la scène sera approchée et les marches d'escalier disparaîtront. Cette méthode est simple mais exige un accélérateur très élevé pour la fréquence de rafraîchissement.

L'antialiasage de bord est une des méthodes inventées afin d'accélérer la manipulation d'aliasage. Dans cette méthode, on calcule la couleur de chaque pixel à partir des bords de polygones au lieu des polygones tout entiers. Mais ce calcul est fortement coûteux en mémoire et est rarement intégré dans les accélérateurs 3D.

Puisque notre algorithme de synthèse ne prend pas beaucoup de temps : Le temps de calcul de synthèse d'une texture de la taille 128×128 est inférieur à une seconde et le temps de rendu pour une construction avec 240 maçonneries en utilisant un *Athlon de 2,8 gigahertz* est d'environ 30 minutes (voir Tableau 4-2). Ceci donne une liberté d'utilisation de la méthode d'antialiasage de bord.

La Figure 4-22 illustre une comparaison d'une image réelle de pavés et celle synthétisée. Chaque primitive (mortier, brique) se comporte indépendamment, selon de nombreux paramètres.



Figure 4-22 : Une image réelle de pavé (à gauche) et celle de synthèse (à droite).

La Figure 4-23 illustre 2 paysages synthétisés par différents degrés d'efflorescence et d'érosion. Pour produire cette construction de synthèse, l'utilisateur peut instancier chaque brique et définir sa position, il pourra alors lui donner une grande variété de textures.

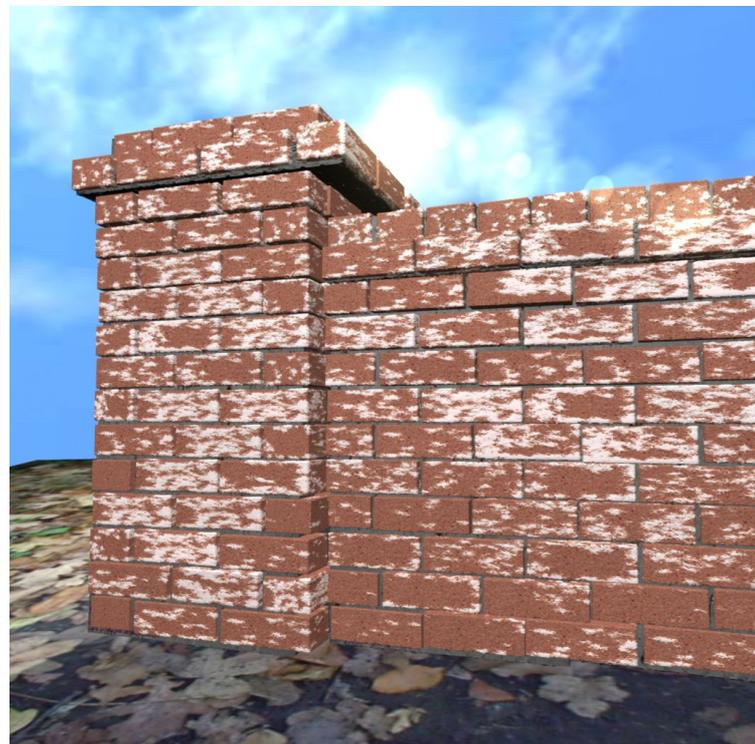
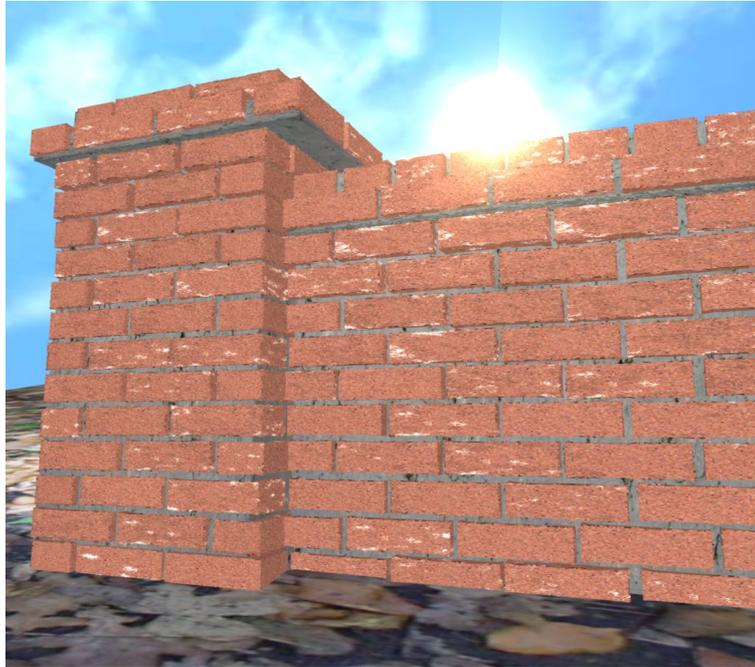


Figure 4-23 : Deux paysages de synthèse.

4. Cristallisation et effritement

Dans la Figure 4-24 on peut voir une comparaison entre un mur de synthèse et un mur réel.



Figure 4-24 : L'image de gauche présente un mur réel effrité. L'image de droite présente un mur de synthèse.

Dans la Figure 4-25 on peut voir un zoom avant sur deux murs qui représentent bien le changement géométrique de surface.

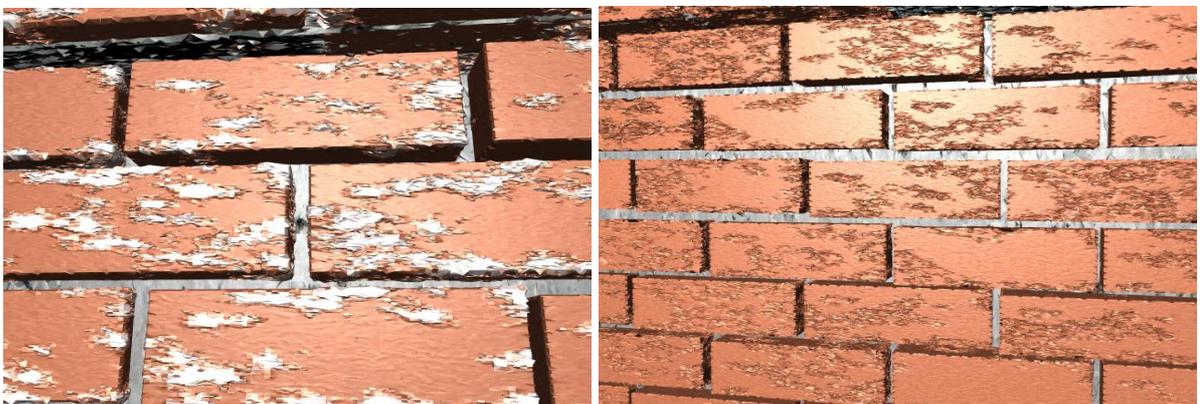


Figure 4-25 : Le détail de changement géométrique causé par efflorescence (l'image de gauche) et effratement (l'image de droite) sur la surface.

Une galerie d'images fortement déformées, qui représentent le problème d'altération très dure sur la surface de mur, est présentée dans la Figure 4-26.

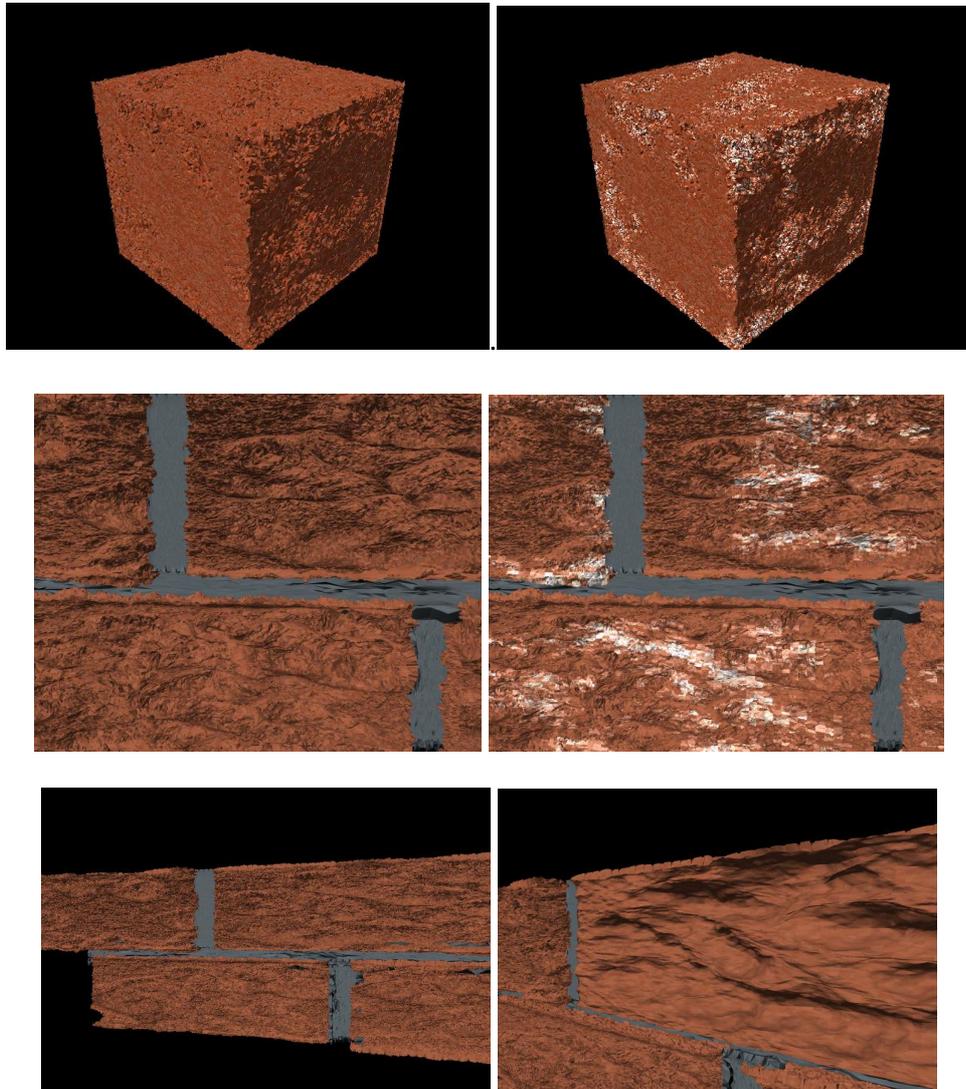


Figure 4-26 : Une galerie représentative d'altération très dure de surface.

4. Cristallisation et effritement

La Figure 4-27 illustre deux constructions et leur agrandissement, attaqués par différents types de pollutions.

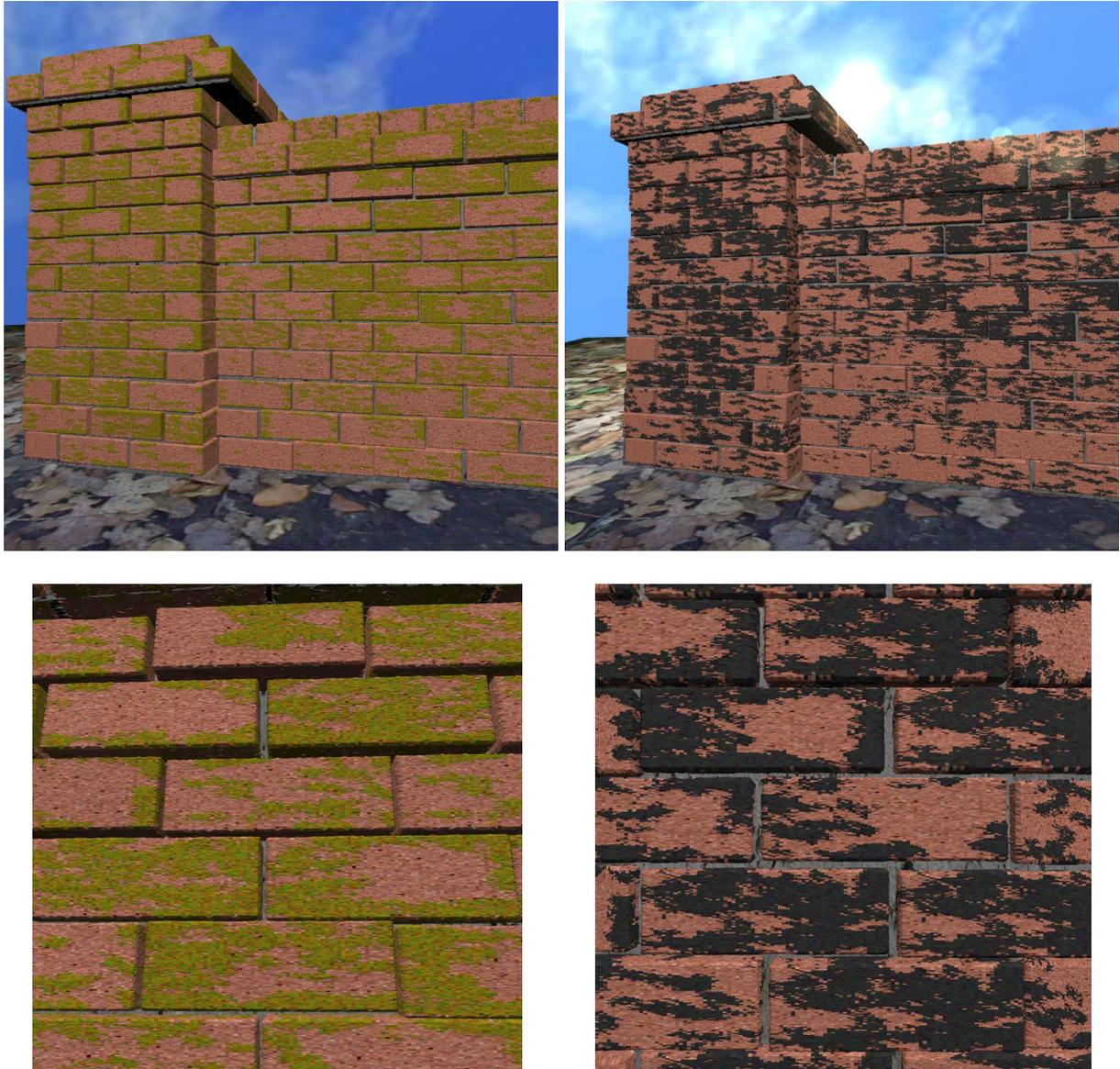


Figure 4-27 : La construction polluée par différents matériaux. La deuxième rangée de l'image présente des agrandissements de la première rangée.

4.6. Conclusion et perspectives

Ce chapitre présente des améliorations et des solutions aux questions non résolues dans notre travail précédent (voir le chapitre 3). Nous avons employé le même modèle de la texture 3D afin de synthétiser l'efflorescence sur la maçonnerie, en ajoutant différents aspects visuels

comme la modification de la géométrie et certains dégâts structurels. Cette méthode est phénoménologique et simple car elle est basée sur les méthodes bien connues de la texture solide et la carte de déplacements. Le modèle et la méthode employés sont très utiles car ils ne consomment pas beaucoup de mémoire et ne nécessitent pas non plus de longs temps de calculs, sauf dans les cas d'effritement très fort (Tableau 4-2).

Nous avons abordé en plus, de façon très succincte les phénomènes de pollution et de fissure qui sont d'autres aspects importants parmi les phénomènes de vieillissement, comme une extension de notre algorithme. Nous avons aussi montré des résultats satisfaisants de la pollution due à l'accumulation de la saleté sur les maçonneries.

	La taille de texture pour chaque primitive (brique/mortier)	Nombre de primitives	Le temps de calcul
Figure 4-22 (l'image de droite)	128 pixels	237	31
Figure 4-23 (l'image du bas)	128 pixels	226	30
Figure 4-24 (l'image de droite)	64 pixels	52	4
Figure 4-26 (sauf les images de la première rangée)	128 pixels	8	15

Tableau 4-2 : Un tableau représentatif des temps (en minute) pour rendre quelques résultats. Noter que pour toutes les primitives dans ces figures (sauf la Figure 4-26) nous prenons le maillage initial unique (nombre égal de triangles).

Tandis que les algorithmes présentés donnent des résultats plausibles pour les phénomènes spécifiques de vieillissement de maçonnerie, plusieurs possibilités pour les travaux futurs restent à explorer. Le premier est de sculpter la façade de la construction. Nous l'avons manipulé par le modèle basé sur le maillage avant l'étape de rendu de l'objet. Cependant, nous croyons qu'utiliser une méthode volumétrique est préférable, car elle peut directement altérer la surface, sans avoir besoin en plus d'utiliser le procédé d'application des textures pour déformer le maillage. En outre, à part le modèle volumétrique, un autre type de phénomène, comme les sels, très denses sur la surface, et qui peuvent aussi causer une modification sérieuse de la géométrie, est facile à manipuler. Par conséquent, à l'avenir nous envisagerons de travailler dans cette direction.

4. Cristallisation et effritement

Notre mise en œuvre actuelle permet à l'utilisateur de placer manuellement chaque brique et de donner séparément la texture désirée. Nous allons améliorer ce système vers le positionnement automatique et ajouter l'aspect de vieillissement selon l'environnement du mur et de ses primitives (brique, mortier). Pour ceci, on peut employer les paramètres d'environnement comme l'humidité, degré de sels, plus de détails de porosité de maçonnerie, etc.

Nous avons considéré que la maçonnerie a une structure homogène, ce qui n'est pas courant, et qu'une structure non homogène à l'intérieur peut complètement changer l'aspect visuel du vieillissement. Nous envisageons d'améliorer notre algorithme pour qu'il puisse tenir compte des aspects de non-homogénéité de maçonneries.

5. Conclusion et perspectives

On peut facilement créer des images d'objets parfaitement propres en utilisant les différentes techniques d'infographie disponibles dans les logiciels classiques. Cependant, dans le monde réel, les objets sont rarement sans défaut. Les surfaces réelles sont habituellement affectées par de nombreuses imperfections. Le besoin de créer des images proches aux images du monde réel fait qu'un objectif important des techniques de synthèse d'images est de reproduire l'aspect des objets réels.

Pour évaluer le réalisme dans le cadre de cette thèse, le concept du photo-réalisme dans lequel l'image produit la même réponse visuelle que la photographie de scène, a été choisi comme la meilleure définition.

Pour réaliser du photo-réalisme, la modélisation de vieillissement doit être prise en compte. Dans cet esprit, la méthode basée sur les textures, que nous avons proposée dans nos travaux est souvent bien adaptée pour atteindre un niveau satisfaisant de réalisme. Cette méthode est aussi le moyen le plus simple pour ajouter des détails de vieillissement sur les objets.

On peut définir les critères ci-dessous pour un système de synthèse d'image réaliste :

- Le système doit simuler le phénomène à réaliser de façon réaliste.
- Le contrôle du système pour l'utilisateur doit être facile et sans difficulté avec les paramètres intuitifs.
- Le système doit s'occuper lui-même des petits détails, ce qui permet au designer de se concentrer sur la conception principale et majeure.
- Les techniques et algorithmes dans le système doivent être suffisamment efficaces et le processus de rendu doit être plutôt en temps réel (surtout dans le domaine du cinéma et du jeu vidéo).

5. Conclusion et perspectives

Malheureusement, comme on l'a vu dans le chapitre 2, beaucoup de systèmes abordant le vieillissement ne peuvent pas satisfaire tous les critères présentés ci-dessus.

Dans le cadre de cette thèse, nous avons développé un système avec les techniques empiriques et basées sur la physique pour simuler l'aspect des imperfections sur les matériaux de construction, particulièrement les briques et les mortiers. Nous avons appliqué les effets comme l'efflorescence en couche mince et épaisse, l'érosion, et l'effritement fort ou négligeable. Nous avons prouvé dans les chapitres 3 et 4 de ce manuscrit que notre technique a pu satisfaire tous les critères indiqués ci-dessus. De plus le développement sous forme d'un plug-in AUTODESK MAYA est aisément reproductible.

Bien que nous ayons pu réaliser seulement ces modèles de vieillissement, nous croyons que les méthodes présentées peuvent être prolongées pour simuler d'autres types de détérioration comme les fissures, les fractures, et les pollutions. Les fissures et fractures sont d'autres effets du vieillissement et dommages structuraux importants sur les matériaux de construction. La maçonnerie se déforme sur de longues périodes de façon élastique et peut aussi subir de grands mouvements causant normalement des fissures et des fractures. Les pollutions constituent également une catégorie importante de phénomènes de détérioration qui est présente sur la majorité des matériaux de construction. Nous avons abordé ces nouveaux défauts dans le chapitre 4, de façon très succincte comme une extension de notre algorithme. Nous avons pu également obtenir des ébauches de résultats sur la pollution des maçonneries, due à l'accumulation de la saleté.

Bibliographie

- [ACF*99] Adzhiev V, Cartwright R, Fausett E, Ossipov A, Pasko A, et Savchenko V. *HyperFun Project: A framework for collaborative multidimensional F-rep modeling*. Proceedings of Implicit Surfaces '99, (1999) pp. 59-69.
- [ADK*02] Aoki K, Dong NH, Kaneko T, et Kuriyama S. *Physically-based simulation of cracks on drying 3d solid*. In 10th Pacific Graphics Conference on Computer Graphics and Applications. IEEE, Beijing China, (2002), pp. 467-468.
- [Ahl03] Ahl J. *Salt diffusion in brick structures*. Journal of Materials Science 38, 9, (2003), pp. 2055 - 2061.
- [Bae98] Baerentzen A. *Octree-based volume sculpting*. In Proceedings of Late Breaking Hot Topics, IEEE Visualization'98, (1998), pp. 9-12.
- [BB90] Becket W, et Badler NI. *Imperfection for realistic image synthesis*. Journal of Visualization and Computer Animation, 1(1), (August 1990), pp. 26-32.
- [BBF95] Barghiel C, Bartels R, et Forsey D. *Pasting Spline Surfaces*. L. Schumaker, M. Daehlen et T. Lyche, editeurs. Mathematical Methods for Curves and Surfaces, Vanderbilt University Press (1995), pp. 31-40.
- [BGG*04] Benavente D, Garcia del Cura MAG, Garcia-Guinea J, Sanchez-Moral S, et Ordonez S. *Role of pore structure in salt crystallization in unsaturated porous stone*, Journal of Crystal Growth, Volume 260, Number 3, 9 (January 2004), pp. 532-544(13).

Bibliographie

- [BK05] Bucea L, Khatri R, et Sirivivatnanon V. *Chemical and physical attack of salts on concrete*, Proceedings Urban Salt 2005 Conference, Parramatta, Australia, (8-9 February 2005).
- [BL99] Buchanan JW, Lalonde P. *An observational model for illuminating isolated scratches*. In Proceedings Western Computer Graphics Symposium 1999 (SKIGRAPH'99), (March 1999).
- [Bli78] Blinn JF. *Simulation of wrinkled surfaces*. Computer Graphics (ACM Siggraph Annual Conference Series), 11, (1978), pp. 286-292.
- [Bli82] Blinn JF. *Light Reflection Functions for Simulation of Clouds and Dusty Surfaces*. Computer Graphics (Proceedings of Siggraph 82), volume 16, (July 1982), pp. 21-29.
- [BMG99] Bielser D, Maiwald VA, et Gross MH. *Interactive cuts through 3-dimensional soft tissue*. Computer Graphics Forum, 18(3), (1999), pp. 31-38.
- [BN04] Brocken H, Nijland TG. *White efflorescence on brick masonry and concrete masonry blocks, with special emphasis on sulfate efflorescence on concrete blocks*. Construction and Building Materials 18 (2004), pp. 315 - 323.
- [BN76] Blinn JF, et Newell ME. *Texture and reflection in computer generated images*. Communications of the ACM Vol. 19, No. 10 (October 1976), 542-547.
- [BPM*04] Bosch C, Pueyo X, Mérillou S, et Ghazanfarpour D. *A Physically-Based Model for Rendering Realistic Scratches*. Computer Graphics Forum, volume 23(3), (2004), pp. 361-370.
- [Buc98] Buchanan JW. *Simulating wood using a voxel approach*. Computer Graphics Forum (Eurographics 98), 17(3), (1998), pp. 103-112.
- [Cal93] Callet P. *Contribution à l'étude de l'interaction lumière/matière pour la visualisation réaliste en synthèse d'image*. Thèse de doctorat, Ecole Centrale Paris, (1993).
- [Cal96] Callet P. *Pertinent data for modelling materials in realistic rendering*. Computer Graphics Forum, 15(2), (1996), pp. 119-127.

- [Cat74] Catmull EE. *A subdivision Algorithm for Computer Display of Curved Surfaces*. PHD thesis. Department of Computer Science, University of Utah, (December 1974).
- [CDM*02] Cutler B, Dorsey J, McMillan L, Müller M, et Jagnow R. *A Procedural approach to authoring solid models*. ACM Transactions on Graphics (TOG), Volume 21, Issue 3, (July 2002), pp. 302-311.
- [CEO93] Cover SA, Ezquerro NF, et O'Brien JF. *Interactively deformable models for surgery simulation*. IEEE Computer Graphics and Applications, 13(6), (November 1993), pp. 68-75.
- [CMB97] Chan KKY, Mann S, et Bartels R. *World Space Surface Pasting*. Wayne A. Davis, Marilyn Mantei AND R. Victor Klassen, éditeurs. Graphics Interface'97, Canadian Human-Computer Communications Society, (May 1997), pp. 146-154.
- [Coo84] Cook R. *Shade trees*. Proceedings of ACM SIGGRAPH 84, (1984), pp. 223-231.
- [Coq90] Coquillart S. *Extended Free-Form Deformation: A Sculpturing Tool for 3D Geometric Modeling*. In Computer Graphics (SIGGRAPH'90 Proceedings), volume 24, (1990), pp. 187-196.
- [Cor49] Correns C. W. *Growth and dissolution of crystals under linear pressure*. Discussions of the Faraday Society 5, (1949), pp. 267-71.
- [CS00] Chang YX, Shih ZC. *Physically-based patination for underground objects*. Computer Graphics Forum 19, 3 (2000), pp. 109-117.
- [CS03] Chang YX, Shih ZC. *The synthesis of rust in seawater*. The Visual Computer. Volume 19(1), (March 2003), pp. 50-66.
- [CSE*04] Cultrone G, Sebastian E, Elert K, Torre M, Cazalla O, et Rodriguez C. *Influence of mineralogy and firing temperature on the porosity of bricks*. Journal of European Ceramic Society 24 (2004), pp. 547-564.
- [CT81] Cook RL, et Torrance KE. *A Reflectance Model for Computer Graphics*. Computer Graphics, Proceedings annual conference series, ACM Siggraph, 15(3), (June 1981), pp. 307-316.

Bibliographie

- [CXW*05] Chen Y, Xia L, Wong TT, Tong X, Bao H, Guo B, et Shum HY. *Visual Simulation of Weathering By γ -ton Tracing*. Proceedings of ACM Siggraph 2005, volume 24(3), (July 2005), pp. 1127-1133.
- [De97] De Bonet S. *Multiresolution sampling procedure for analysis and synthesis of texture images*. SIGGRAPH 1997 Conference Proceedings, Annual Conference Series, (August 1997), pp. 361-368.
- [DEJ*99] Dorsey J., Edelman A., Jensen HW, Legakis J, et Pederson HK. *Modeling and rendering of weathered stone*. Proceedings of Siggraph 99, (August 1999) pp. 225-234.
- [Dem01] Demers O. *Digital Texturing and Painting*. New Riders Publishing, Indianapolis, (August 2001).
- [DG01] Dischler JM, et Ghazanfarpour D. *A survey of 3D texturing*. Computers and Graphics 25, 1, (2001), pp. 135-151.
- [DGA04] Desbenoit B, Galin E, et Akkouche S. *Simulating and modelling lichen growth*. Eurographics'04 Conference, 23(3), (2004), pp. 341-350, Grenoble, France.
- [DGA05] Desbenoit B, Galin E, et Akkouche S. *Modeling cracks and fractures*. The Visual Computer 21(No. 8-10), (2005), pp. 717-726.
- [DGF98] Dischler JM, Ghazanfarpour D, et Freydier R. *Anisotropic solid texture synthesis using orthogonal 2D views*. Computer Graphics Forum, Proceedings of Eurographics 17, 3, (1998).
- [DH00] Doggett M, et Hirche J. *Adaptive view dependent tessellation of displacement maps*. Proceedings EG/SIGGRAPH Workshop on Graphics Hardware (Interlaken, Switzerland, 2000), pp. 59-66.
- [DH96] Dorsey J, Hanrahan P. *Modeling and rendering of metallic patinas*. Proceedings of Siggraph 96, (1996), pp. 387-396.
- [Dis98] Dischler JM. *Efficiently rendering macro-geometric surface structures using bidirectional texture functions*. Rendering Techniques98 (proceedings of EGRW), (1998), pp. 169-180.
- [DPH96] Dorsey J, Pederson HK, et Hanrahan P. *Flow and changes in appearance*. Proceedings of Siggraph 96, (August 1996), pp. 411-420.

- [DQ00] Du H, et Qin H. *Direct Manipulation and Interactive Sculpting of PDE Surfaces*. In Computer Graphics Forum (Proceedings of Eurographics), volume 19, (August 2000), pp. 261-270.
- [EMP*03] Ebert DS, Musgrave FK, Peachey D, Perlin K, et Worley S. *Texturing and Modeling: A Procedural Approach*, Third Edition, Morgan Kaufmann Publishers Inc,US; (2003).
- [EMP*94] Ebert DS, Musgrave FK, Peachey D, Perlin K, et Worley S. *Texturing and modeling: a procedural approach*. Academic Press Professional, Inc (1994).
- [Fer03] Ferwerda JA. *Three varieties of realism in computer graphics*. Proceedings SPIE Human Vision and Electronic Imaging '03, (2003), pp. 290-297.
- [FLC*95] Fleischer KW, Laidlaw DH, Currin BL, et Barr AH. *Cellular Texture Generation*, Computer Graphics (ACM SIGGRAPH Annual Conference Series, 29, (1995), pp. 239-248.
- [Gar84] Gardner GY. *Simulation of natural scenes using textured quadric surfaces*. Computer Graphics (Proceedings of ACM SIGGRAPH 84), ACM, (1984), pp. 11-20.
- [Gar85] Gardner GY. *Visual simulation of clouds*. ACM SIGGRAPH Computer Graphics, Volume 19, Issue 3 (July 1985).
- [GC01a] Gobron S, Chiba N. *Simulation of Peeling using 3d-surface cellular automata*. Proceedings of the 9th Pacific Conference on Computer Graphics and Applications (2001), pp. 338-347.
- [GC01b] Gobron S. et Chiba N. *Crack Pattern Simulation Based on 3D Surface Cellular Automaton*, The Visual Computer, Vol. 17, (June 2001), pp. 287-309.
- [GC97] Gobron S, et Chiba N. *Visual Simulation of Corrosion*. In Proceedings of Tohoku IPSJ National Workshop, (1997).
- [GD95] Ghazanfarpour D, et Dischler JM. *Spectral analysis for automatic 3D texture generation*. Computers and Graphics 19(3), (1995), pp. 413-422.
- [GD96] Ghazanfarpour D, et Dischler JM. *Generation of 3D texture using multiple 2D models analysis*. Computers Graphics Forum (Eurographics 96),15(3), (1996), pp. 311-323.

Bibliographie

- [GH91] Galyean TA, et Hughes JF. *Sculpting: An interactive volumetric modeling technique*. In Computer Graphics (Proceedings of Siggraph 91), volume 25, (July 1991), pp. 267-274.
- [HAC*01] Hennetier L, Almeida JV, Correia AMS, Ferreira VM. *Efflorescence and its quantification in ceramic building materials*. Br. Ceram. Trans. 100, 2, (2001), pp. 72-76.
- [Hag86] Hagen M. *Varieties of realism: Geometries of representational art*. Cambridge University Press (1986).
- [Han92] Hanan JS. *Parametric L-systems and their application to the modeling and visualization of plants*. PhD thesis, University of Regina, (1992).
- [HB04] Hees RPJ van, et Brocken HJP. *Damage development to treated brick masonry in a long-term salt crystallization test*. Construction and Building Materials, 18 (2004), pp. 331-338.
- [HB95] Heeger DJ, et Bergen JR. *Pyramid-based texture analysis/synthesis*. Proceedings of ACM SIGGRAPH 1995, Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, ACM, (1995), pp. 229-238.
- [HE02] Hu Q, Ewing RP. *Pore connectivity effects on solute transport in rocks*. Proceedings of the symposium Bridging the Gap between Measurement and Modeling (March 2002), pp. 25-28.
- [HEG*04] Hirche J, Ehlert A, Guthe S, et Doggett M. *Hardware accelerated per-pixel displacement mapping*. Proceedings of the 2004 conference on Graphics interface, (2004), pp. 153-158.
- [HPM02] Huinink HP, Pel L, Michels MAJ. *How ions distribute in a drying porous medium-a simple model*. Phys Fluids,14, (2002), pp. 1389 -1395.
- [HTK00] Hirota K, Tanoue Y, Kaneko T. *Simulation of three dimensional cracks*. The Visual Computer 2000, 16(7), (Nov. 2000).
- [HTK98] Hirota K, Tanoue Y, Kaneko T. *Generation of crack patterns with a physical model*. The Visual Computer 1998, 14(3), (1998), pp. 126 - 137.

- [HTS*91] He XD, Torrance KE, Sillion FX, et Greenberg DP. *A Comprehensive Physical Model for Light Reflection*. Computer Graphics, Proceedings of Annual conference Series ACM Siggraph 1991. 25(4), (1991), pp. 175-186.
- [HW95] Hsu SC, et Wong TT. *Simulating dust accumulation*. IEEE Computer Graphics and Applications, 15(1), (January 1995), pp.18-25.
- [Jen96] Jensen HW. *Global illumination using Photon Maps*. in Eurographics Workshop on Rendering, (1996), pp. 21-30.
- [Kaj85] Kajiya J. *Anisotropic reflectance models*. Computer Graphics, Proceedings of Annual Conference Series, ACM Siggraph , 20(4), (1985), pp. 15-21.
- [KK89] Kajiya J, et Kay T. *Rendering Fur with three dimensional textures*. Computer Graphics (ACM Siggraph annual Conference Series), 23(3), (1989), pp. 271-298.
- [KMN88] Kelley AD, Malin MC, et Nielson GM. *Terrain Simulation Using a Model of Stream Erosion*. In Computer Graphics (SIGGRAPH'88 Proceedings). volume 22, (1988), pp. 263-268.
- [Lar04] Larbi JA. *Microscopy applied to the diagnosis of the deterioration of brick masonry*, Construction and Building Materials, Volume 18, Issue 5, (June 2004), pp. 299-307.
- [LDG01] Legakis J, Dorsey J, et Gortler S. *Feature-Based Cellular Texturing for Architectural Models*. Proceedings of Siggraph 2001, (August 2001), pp. 309-316.
- [LFT*97] Lafortune E, Foo SC, Torrane KE, et Greenberg DP. *Non Linear Approximation of Reflectance Functions*. Computer Graphics, Proceedings of Annual conference Series, (ACM Siggraph 1997), pp. 117-126.
- [LGG*07] Lu J, Georghiadis AS, Glaser A, Wu H, Li-Yi Wei, Baining Guo, Dorsey J, et Rushmeier HE. *Context-aware textures*. ACM Trans. Graph. 26(1), (2007).
- [LGR*05] Lu J, Georghiadis AS, Rushmeier H, Dorsey J, et Xu C. *Synthesis of material drying history: phenonmenon modeling, transferring and rendering*. Eurographics Workshop on Natural Phenomena, (August 2005).
- [Lin68] Lindenmayer A. *Mathematical models for cellular interactions in development, Parts I and II*. Theoret Biol 18, (1968), pp. 280-315.

Bibliographie

- [LP00] Lefebvre L, et Poulin P. *Analysis and synthesis of structural textures*. Graphics Interface 2000, (2000), pp. 77-86.
- [Max88] Max N. *Horizon mapping: shadows for bump-mapped surfaces*. The Visual Computer, 4, (1988), pp. 109-117.
- [MDG00] Mérillou S, Dischler JM, et Ghazanfarpour D. *A BRDF Post-Process to Integrate Porosity on Rendered Surfaces*. IEEE Transactions on Visualisation and Computer Graphics, volume 6, number 4, (2000).
- [MDG01a] Mérillou S, Dischler JM, Ghazanfarpour D. *Corrosion: Simulating and Rendering*. Proceedings of Graphics Interface 2001, (2001), pp. 167-174.
- [MDG01b] Mérillou S, Dischler JM., et Ghazanfarpour D. *Surface scratches: measuring, modelling and rendering*. The Visual Computer 17(1), (2001), pp. 30-45.
- [Mil94] Miller G. *Efficient algorithms for local and global accessibility shading*. Proceedings of SIGGRAPH 94, (July 1994), pp. 319-326.
- [MKM89] Musgrave FK, Kolb EC, et Mace RS. *The Synthesis and Rendering of Eroded Fractal Terrains*. In Computer Graphics (SIGGRAPH'89 Proceedings), volume 23, (July 1989), pp. 41-50.
- [MMA99] Mazarak O, Martins C, et Amanatides J. *Animating Exploding Objects*. Graphics Interface 99, (1999), pp. 211-218.
- [MOT99] Mizuno S, Okada M, et Toriwaki J. *An interactive designing system with virtual sculpting and virtual wood-cut printing*. In Computer Graphics Forum, 18(3), (1999), pp. 183-193.
- [MT04] Matsuo T, et Tanaka K. *Mechanism of Efflorescence on Historical Brick Masonry Buildings Reinforced with Concrete*, Proceedings of 10th International Conference on Durability of Building Materials and Components, TT7-97, (2004), pp. 1-8.
- [Nay90] Naylor B. *SCULPT an interactive solid modeling tool*. In Proceedings of Graphics Interface'90, (May 1990), pp. 138-148.
- [NF99] Neff M, et Fiume E. *A Visual Model for Blast Waves and Fracture*. Graphics Interface 99, (1999), pp. 193-202.

- [NH05] M. Nehdi et M. Hayek. *Behavior of blended cement mortars exposed to sulfate solutions cycling in relative humidity*, Cement and Concrete Research, Volume 35, Issue 4, (2005), pp. 731-742
- [NTB*91] Norton A, Turk G, Bacon B, Gerth J, et Sweeney P. *Animation of Fracture by Physical Modeling*. The Visual Computer, volume 7, (1991), pp 210-219.
- [OBH02] O'Brien JF, Bargteil A, Hodgins J. *Graphical modeling and animation of ductile fracture*. In Proceedings of ACM Siggraph 2002, (2002), pp. 291-294.
- [OH99] O'Brien JF, et Hodgins JK. *Graphical modeling and animation of brittle fracture*. In Proceedings of SIGGRAPH 99, (August 1999), pp. 137-146.
- [ON94] Oren M, Nayar SK. *Generalization of Lambert's reflectance model*. Proceedings of the 21st annual conference on Computer graphics and interactive techniques, (1994), pp. 239-246.
- [Pea85] Peachey DR. *Solid texturing of complex surfaces*. Computer Graphics (Proceedings of ACM SIGGRAPH 85), ACM, (1985), pp. 279–286.
- [Per85] Perlin K. *An image synthesizer*. Computer Graphics (Proceedings of ACM SIGGRAPH 85), ACM, (1985), pp. 287–296.
- [PF90] Poulin P, et Fournier A. *A Model for Anisotropic Reflection*. Computer Graphics, Proceedings of annual conference Series, ACM Siggraph, (1990), pp. 273-282.
- [PHK*04] Pel L, Huinink H, Kopinga K, RPJ van Hees, et OCG Adan. *Efflorescence pathway diagram: understanding salt weathering*, Construction and Building Materials 18 (2004), pp. 309-313.
- [PHK03] Pel L, Huinink H, et Kopinga K, *Salt transport and crystallization in porous building materials*, Magnetic Resonance Imaging 21, (2003), pp. 317-320.
- [Pho75] Phong BT. *Illumination for Computer Generated Pictures*. Communication of the ACM, 18(6), (June 1975), pp. 311-317.
- [PKB*95] Pel L, Kopinga K, Bertram G, et Lang G. *Water absorption in a fired-clay brick observed by NMR scanning*. J. Phys. D: Appl. Phys. 28 (1995), pp. 675 - 680.
- [PL90] Prusinkiewicz P, et Lindenmayer A. *The Algorithmic Beauty of Plants*. Springer-Verlag, New York, (1990).

Bibliographie

- [PPD01] Paquette E, Poulin P, et Drettakis G. *Surface Aging by Impacts*. Graphics Interface 2001, (June 2001), pp. 175-182.
- [PPD02] Paquette E, Poulin P, et Drettakis G. *The Simulation of Paint Cracking and Peeling*. Graphics Interface 2002 Conference Proceedings, (2002), pp. 59-68.
- [PT92] Payne BA, et Toga AW. *Distance field manipulation of surface models*. IEEE Computer Graphics & Applications, 12(1), (1992), pp. 65-71.
- [SA79] Schachter B, et Ahuja N. *Random Pattern Generation Processes*, Computer Graphics and Image Processing 1979, CGIP (10), No. 2, (June 1979), pp. 95-114.
- [SFA*92] Simoncelli EP, Freeman WT, Adelson EH, et Heeger DJ. *Shiftable Multi-Scale Transforms*. IEEE Transaction on Information Theory, Special Issue on Wavelets. Vol. 38, No. 2, (March 1992), pp. 587-607.
- [SMG05] Shahidi S, Mérillou S, et Ghazanfarpour D. *Phenomenological Simulation of Efflorescence in Brick Constructions*, Eurographics Workshop on Natural Phenomena, (August 2005), pp. 17-23.
- [SP86] Sederberg TW, et Parry SR. *Free-Form Deformation of Solid Geometric Models*. In Computer Graphics (Proceedings of SIGGRAPH 86), volume 20, (August 1986), pp. 151-160.
- [SP94] Sillion FX, et Puech C. *Radiosity & Global Illumination*. Morgan Kaufmann Publishers INC., San Fransisco, USA, (1994).
- [SP98] Simoncelli EP, et Portilla J. *Texture Characterization via Joint Statistics of Wavelet Coefficient Magnitudes*. In 5th IEEE Int'l Conference on Image Processing. Chicago, Vol. 1, (1998), pp. 62-66.
- [Sum01] Summer RW. *Pattern formation in lichen*. Ph.D. thesis, Departments of Electrical Engineering and Computer Science, Massachusetts institute of technology, (2001).
- [SWB00] Smith J, Witkin A, et Baraff D. *Fast and Controllable Simulation of the Shattering of Brittle Objects*. In Graphics Interface 2000, (2000), pp. 27-34.
- [TF88] Terzopoulos D, et Fleischer K. *Modeling Inelastic Deformation : Viscoelasticity, Plasticity, Fracture*. Computer Graphics (SIGGRAPH '88 Proceedings), volume 22, (1988), pp. 269-278.

- [Tur01] Turk G. *Texture synthesis on surfaces*. Proceedings of ACM SIGGRAPH 2001, Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, ACM, (2001), pp. 347–354.
- [Tur91] Turk G. *Generating textures on arbitrary surfaces using reaction-diffusion*. Computer Graphics (ACM SIGGRAPH Annual Conference Series) 1991, 25(4), (1991), pp. 289-298.
- [War98] Warniers R. *Dirty pictures*. Computer Graphics World, (June 1998), pp. 50-60.
- [Ward92] Ward G. *Measuring and modeling anisotropic reflection*. Computer Graphics Proceedings of ACM SIGGRAPH 92, 26(2), (1992), pp. 265-273.
- [WAT92] Westin SH, Arvo JR, et Torrance KE. *Predicting Reflectance Functions From Complex Surfaces*. Computer Graphics (SIGGRAPH '92 Proceedings), volume 26, (July 1992), pp. 255-264.
- [WGG99] Wyvill B, Guy A, et Galin E. *Extending the CSG tree. Warping, blending and boolean operations in an implicit surface modeling system*. Computer Graphics Forum, 18(2), (1999), pp. 149-158.
- [WK91] Witkin A, et Kass M. *Reaction-diffusion textures*. Computer Graphics (ACM SIGGRAPH Annual Conference Series) 91, 25(4), (1991), pp. 299-308.
- [WK95] Wang SW, et Kaufman AE. *Volume sculpting*. Symposium on Interactive 3D Graphics'95, (April 1995), pp. 151-156.
- [WKT97] Wu Y, Kalra P, et Thalmann NM. *Physically-based wrinkle simulation and skin rendering*. Eurographics Workshop on Computer Animation and Simulation, (1997).
- [WL01] Wei L, et Levoy M. *Texture synthesis over arbitrary manifold surfaces*. Proceedings of ACM SIGGRAPH 2001, Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, ACM, (2001), pp. 355–360.
- [WNH97] Wong TT, Ng WY, et Heng PA. *A Geometry Dependent Texture Generation Framework for Simulating Surface Imperfections*. Eurographics Workshop on Rendering (June 1997), pp. 139-150.
- [Wor96] Worley SP. *A cellular texture basis function*. H. Rushmeier, editor, Siggraph 96 Conference Proceedings, Annual Conference Series, (1996), pp. 291-294.

Bibliographie

- [WS81] Witten T, et Sander L. *Diffusion-limited aggregation, a kinetic critical phenomenon*. Physical Review Letters 47, (1981), pp. 1400-1403.
- [WTL*04] Wang L, Tong X, Lin S, Hu S, Guo B, et Shum HY. *Generalized displacement maps*. In Proc. Eurographics Symposium on Rendering (2004).
- [WWT*03] Wang L, Wang X, Tong X, Lin S, Hu S, Guo B, et Shum HY. *View-dependent displacement mapping*. ACM Transactions on Graphics (Proceedings SIGGRAPH 2003) 22, 3 (2003), pp. 334-339.
- [ZA89] Zehnder K, et Arnold A. *Crystal growth in salt efflorescence*. J. Cryst. Growth 97 (1989), pp. 513 - 521.
- [ZZS*06] Zhang N, Zhou X, Sha D, Yuan X, Tamma K, et Chen B. *Integrating Mesh and Meshfree Methods for Physics-Based Fracture and Debris Cloud Simulation*. Eurographics Symposium on Point-Based Graphics (2006).

