

UNIVERSITÉ DE LIMOGES
ÉCOLE DOCTORALE 610
FACULTÉ DES SCIENCES ET TECHNIQUES

Année : 2022

Thèse N° X

Thèse

pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE LIMOGES

Discipline : Informatique Graphique

présentée et soutenue par

Théo JONCHIER

le 3 Février 2022

**Simulation de changements d'apparence via
hydrodynamique des particules lissées**

Thèse dirigée par Stéphane Mérillou et Guillaume Gilet

JURY :

Jean-Michel Dischler	Professeur à l'Université de Strasbourg	Rapporteur
Christophe Renaud	Professeur à l'Université du Littoral, Côte d'Opale	Rapporteurs
Jean-Jacques Bourdin	Professeur à l'Université Paris 8	Examineur
Stéphane MERILLOU	Professeur, Université de Limoges	Directeur de thèse
Guillaume Gilet	Professeur, Université de Sherbrook	Co-directeur de thèse

« Le vrai réalisme consiste à montrer les choses surprenantes que l'habitude cache sous une housse et nous empêche de voir. »

Jean COCTEAU

Remerciements

Je remercie Guillaume Gilet et Stéphane Mérillou pour la confiance qu'ils m'ont accordé tout au long de ces travaux et des nombreuses discussions entretenues dans le processus.

Je tiens à remercier Jean-Jacques Bourdin , Jean-Michel Dischler et Christophe Renaud d'avoir acceptés d'être membres de mon Jury.

Je remercie également mes amis et collègues Arthur Cavalier et Thibault Tricard, pour le travail que j'ai eu le plaisir de partager avec vous et pour avoir été présents en toute circonstance.

Je remercie David et Andréa pour votre soutiens, ces merveilleux moments partagés et ceux à venir.

Finalement je tiens à remercier ma famille et plus particulièrement mes parents pour leur support sans faille et leur présence dans toutes les étapes de ma vie.

Table des matières

Table des figures	4
Liste des tableaux	10
Chapitre 1 : Introduction générale	12
1.1 Synthèse d'image	15
1.2 Géométrie	16
1.3 Représentation des matériaux	18
1.4 Paramètre des surfaces	19
1.5 Objectif de la thèse	20
1.6 Organisation du document	21
Chapitre 2 : Etat de l'art	23
2.1 Changement d'apparence	26
2.1.1 Transfert d'apparence	26
2.1.1.1 Variété	26
2.1.1.2 Corrélation géométrique	28
2.1.1.3 Synthèse de texture	28
2.1.2 Approches spécialisées	30
2.1.2.1 Rayures et impacts	30
2.1.2.2 Craquelures et fractures	31
2.1.2.3 Peeling	32
2.1.2.4 Mouillage et séchage	33
2.1.2.5 Erosion	34
2.1.2.6 Poussière	36
2.1.2.7 Tâches et éclaboussures	36
2.1.2.8 Patine	37
2.1.2.9 Corrosion	38
2.1.2.10 Dissolution	39
2.1.2.11 Développement organique	40
2.1.2.12 Conclusion	41
2.1.3 Approches multi-effets	42
2.2 Hydrodynamique des particules lissées	45
2.2.1 Les fonctions de noyau	48
2.2.2 Recherche de voisinage	49
2.2.3 Solveur de pression	51
2.2.4 Gestion des frontières	53
2.2.5 Applications et limitations	53
2.3 Conclusion	55
Chapitre 3 : Simuler le changement d'apparence	56
3.1 Introduction	57
3.2 Modèle physique	62
3.2.1 Modèle SPH basé volume	62
3.2.2 Flux poreux	64
3.2.3 Transport de sédiments	67
3.2.4 Erosion	69
3.2.5 Dissolution	70

3.2.6	Evaporation	71
3.2.7	Dépôt	72
3.3	Détail d'implémentation	74
3.3.1	Gestion des frontières	74
3.3.2	Egouttement du fluide	75
3.3.3	Export et rendu	76
3.4	Résultats	77
Chapitre 4 : Conclusion et perspectives		83
4.1	Conclusion	84
4.2	Perspectives	85
4.2.1	Court terme	85
4.2.2	Moyen et long terme	86
4.2.3	Domaines d'applications	87

Table des figures

1.1	Images issues du jeu Flight Simulator [©] illustrant le survol de la ville de Paris. Le jeu propose un visuel fidèle des bâtiments et de l'environnement à différents niveaux d'échelle et une modélisation des avions avec un niveau de détail élevé.	13
1.2	Images issues du jeu Star Citizen [©] montrant une planète imaginaire intégralement explorable par le joueur et les différents niveaux de détails observables à chaque échelle : planète, ville, bâtiments, terrain, végétation, micro détails des surfaces.	14
1.3	Rendu d'une image par la méthode du path tracing illustrant l'éclairage direct de la surface (en jaune) et l'éclairage indirect après plusieurs réflexions sur les surfaces (en rouge).	15
1.4	Illustration du bruit lors du rendu avec à gauche une image avec 1 échantillon par pixel et à droite avec 1000 échantillons par pixel.	16
1.5	Visualisation du maillage 3D du modèle "Suzanne" dans le logiciel Blender. Les faces sont visibles en gris, les arêtes sont les lignes fines noires et les sommets les points noirs.	17
1.6	A gauche : Diffusion de la lumière par son interaction avec le matériau. A droite : Réflexion de la lumière sur la micro-géométrie.	19
1.7	Illustration des différentes textures appliquées à la surface d'un objet afin de paramétrer localement la BSDF. L'image de gauche montre le maillage de l'objet. Les images centrales illustrent sur la ligne supérieure une texture et sur la ligne inférieure le rendu de l'objet où un unique paramètre de la BSDF est impacté par cette texture. L'image de droite montre le rendu final de l'objet où la BSDF est paramétrée localement par l'ensemble de ces textures.	19
2.1	Illustration de méthode de transfert par variété d'apparence. La ligne supérieure montre la méthode de Wang et al. [WTL ⁺ 06] transférant l'apparence d'une plaque métallique rouillée (image la plus à gauche) sur un modèle virtuel en exagérant plus ou moins son évolution. La ligne du bas est issue des travaux de Bandeira et Walter [BW09], la première image à gauche montre l'image d'exemple utilisée pour le transfert et l'image sur laquelle effectuer le transfert. Les autres images illustrent l'évolution de l'effet.	27
2.2	Illustration du transfert d'apparence par corrélation géométrique par la méthode de Lu et al. [LGG ⁺ 07] A gauche : objet réel capturé. Milieu et droite : apparence transférée sur d'autres géométries.	29
2.3	Deux exemples de synthèse de texture issus de la méthode de [LDR09]. A gauche, la texture d'exemple avec en rouge le masque de texture dominante. Au centre, la synthèse de texture sans tenir compte de la texture dominante. A droite, synthèse de la texture dominante.	30
2.4	De gauche à droite : Photographie d'une male usée, modèle 3D non vieilli, modèle 3D ayant subi des impacts similaires à l'objet photographié via la méthode de Paquette et al. [PPD01].	31
2.5	Illustration de diverses méthodes de fracture. De gauche à droite : Wicke et al. [WRK ⁺ 10], Chen et al. [CZZ ⁺ 17], Tran et al. [TNNB20] et Glonu et al. [GMM ⁺ 12].	33

2.6	A gauche : Vue des groupes de peeling formés via la méthode de Gobron et Chiva [GC01b]. A droite : Apparition de peeling calculés via la méthode de Paquette et al. [PPD02] sur une porte de garage. Les 6 panneaux possèdent des propriétés différentes.	33
2.7	Modèle d'érosion de terrain par carte de hauteurs proposé par Stava et al. [SBBK08]	36
2.8	Illustration des travaux de Guo et Pan [GP14]. De gauche à droite, l'épaisseur de la couche de poussière augmente avec le temps. L'animation du processus est évaluée en temps réel.	37
2.9	Images issues des travaux de Dorsey et al. [DPH96] montrant sur la gauche un objet 3D avant application de leur méthode et à droite le résultat de leur simulation d'écoulement et de dépôt de saleté à la surface.	38
2.10	Séquence d'images illustrant l'évolution du processus d'apparition de patine sur une statue via la méthode de Dorsey et Hanrahan [DH96]. Images issues du livre Digital Modeling of Material Appearance [DRS07].	39
2.11	Dissolution de pilules anti acide dans un verre d'eau simulée par le modèle de Jiang et al. [JSZ15].	40
2.12	Différents effets liés au développement organique. De gauche à droite : Développement de plantes grimpantes, Hadrich et al. [HBDP17]; Formation et développement de lichen, Desbenoit et al. [DGA04]; Détérioration des fruits par apparition de moisissure, Joseph et al. [JRB11].	42
2.13	Haut gauche : Modélisation d'un terrain [CGG ⁺ 17]. Haut droite : Transport et dépôt de pollution [MPBM ⁺ 18]. Bas : Interaction de phénomènes par la méthode des γ -ton [CXW ⁺ 05].	45
2.14	Calcul de densité des particules. Haut à gauche : centre d'une particule en rouge et support du noyau h en bleu. Haut à droite : visualisation de la fonction de densité inversée $1.0 - \rho(\mathbf{x})$. Bas à gauche : centre d'un ensemble de particules en rouge. Bas à droite : visualisation de la fonction de densité inversée de cet ensemble.	47
2.15	L'utilisation d'une grille régulière limite le coût de calcul de la recherche des particules voisines. La recherche des particules (bleue) dans le voisinage d'un point quelconque (rouge) sont comprises dans les cases adjacentes à la case à laquelle appartient ce point.	50
2.16	A chaque case de la grille régulière est attribuée un indice dans une table de hachage via une fonction de hachage. Cette table renvoie vers une liste des index des particules contenue dans la case du tableau correspondante.	50
2.17	Les objets solides peuvent être approximés via des particules disposées dans l'intégralité de leur volume (à gauche) ou bien uniquement à proximité de leur surface (à droite).	53
3.1	Photographies de différents effets de vieillissement liés au dépôt. De gauche à droite : Traces de rouille déposées sur de la pierre, traces de pollutions et de son lavage par la pluie, efflorescence sur un mur de brique liée à la cristallisation de sel à la surface.	58
3.2	Photographies d'effets de vieillissement liés à des processus chimiques. De gauche à droite : Formation de patine sur une fontaine en bronze, corrosion d'une rambarde en fer, coloration de la roche par oxydation du fer qu'elle contient.	58

3.3	Photographies de développements organiques. De gauche à droite : Formation de mousse sur un monument, apparition de mousses et de plantes sur une avancée en pierre, formation d'algues permise par la sudation d'un mur.	59
3.4	Photographies d'effets de fractures et de peeling. De gauche à droite : peeling de la peinture d'un mur, apparition de craquelures autour de la fixation d'un portail, fissures d'un mur conséquence de la déformation du sol.	59
3.5	Photographies d'effets de rayures. De gauche à droite : Rayures sur un véhicule, rayures de la peinture d'un objet en fer entraînant l'oxydation de la couche inférieure.	60
3.6	Schémas illustrant des effets de vieillissement variés dans une scène. A : Dépôt et cristallisation du sel sur la surface d'un bâtiment. B : Dissolution des sels minéraux et transport par l'eau souterraine. C : Erosion du lit et des bordures de rivière. D : Corrosion des tiges métalliques du béton armé et transport par l'humidité de la rouille à la surface. E : Développement organique de plantes favorisé par l'exposition au soleil ainsi que les minéraux contenus dans les sols. F : Les peintures se craquèlent et se fracturent conséquence d'une déformation due à l'interaction avec l'humidité du mur. G : Rayures et fracture du sol par des impacts avec d'autres objets.	60
3.7	Coupe verticale d'un solide poreux saturé en eau en son centre (disque rouge). La carte de température représente la saturation des pores en eau (pores saturés en rouge, et secs en bleu). Première ligne : seule l'advection est calculée; deuxième ligne : seule la diffusion est calculée; troisième ligne : calcul complet du transport d'eau dans le médium.	65
3.8	Le café se dissout dans l'eau qui pénètre ensuite le filtre. Les sédiments issus de la dissolution sont transportés par l'eau dans le matériau poreux. L'eau concentrée s'écoule ensuite hors du filtre se retrouvant dans le verre. De gauche à droite : Rendu de la scène, partie solide mouillée, fluide et sédiments, densité de sédiment.	69
3.9	Erosion, transport et dissolution d'un matériau fragile (en brun) sur une surface immuable (blanc). Chaque colonne décrit un aspect spécifique de la simulation. De gauche à droite : Résultat de la simulation complète, sédiments en vert dans le fluide, partie solide uniquement.	70
3.10	Mouillage et séchage d'un matériau poreux. La ligne supérieure montre le rendu final. La ligne inférieure montre une carte de température représentant la saturation des pores en eau.	72
3.11	Lorsque des sédiments sont déposés à la surface de matériaux solides de nouvelles particules doivent être créées pour prendre en compte la variation de volume de matière. Lorsque sa fraction de volume croît, la particule est déplacée jusqu'à atteindre sa position finale alignée sur une grille régulière. De gauche à droite, la nouvelle particule en vert possède une fraction de volume de 0.0, 0.5 puis 1.0. En bleu, l'iso-surface du champ de volume des particules.	75
3.12	Tâches produites par la saleté sortant d'une évacuation. Cette scène montre la diffusion de l'eau et des sédiments dans l'espace des pores de la matière ainsi que le dépôt résultant après évaporation.	78

3.13	Vue en coupe illustrant la dissolution de café et son passage au travers d'un matériau poreux en suivant le flux d'eau. Ligne du haut : Rendu de l'eau, des solides et des sédiments. Ligne du bas : Seule la surface solide est visible afin d'observer le résultat du processus de dissolution.	79
3.14	Exemple de dissolution et déposition d'un matériau hautement soluble (en blanc) sur un matériau qui ne réagit pas avec l'eau (en marron).	80
3.15	Formation d'efflorescence sur un mur de brique. L'eau souterraine se propage dans le matériau jusqu'à atteindre la surface où elle s'évapore. Elle emporte avec elle les sels minéraux qu'elle contient. Lorsque l'eau s'évapore, les sels se déposent à la surface permettant la formation de gypse. Ligne supérieure : Mur neuf. Ligne inférieure : Mur vieilli. Colonne gauche : Représentation particulière. Colonne de droite : Vision rendue avec reconstruction de surface.	81
3.16	Démonstration de l'effet d'une micro-fracture dans le transport de matériaux. L'arrière du mur (image en haut à droite) est une vasque se remplissant d'eau sale. L'eau et les sédiments sont alors transportés au travers d'une micro fracture (zone claire) dans le mur. Le dépôt résultant peut être observé après évaporation en orange sur l'image du bas.	82

Liste des tableaux

3.1 Table de notations. Les propriétés des particules sont indexées par i et j . Les propriétés des matériaux solides utilisent k comme exposant, celles liées aux sédiments du matériau k utilisent s_k , pour finir, les propriétés liées au fluide utilisent f . Les paramètres de contrôle permettent d'influencer de manière simplifiée le comportement de la simulation. 63

Chapitre 1 :

Introduction générale

L'informatique graphique a, dans les dernières décennies, connu un essor exponentiel. On la retrouve de nos jours dans des domaines variés tels que le cinéma, le jeu vidéo, la visualisation et les simulations scientifiques, l'imagerie médicale ou encore l'intelligence artificielle. L'un des objectifs principaux de l'industrie du divertissement (cinéma et vidéoludique) est la création et l'affichage de mondes virtuels de telle sorte que les images générées semblent réelles pour l'homme. De telles images sont appelées photoréalistes à l'instar du mouvement de peinture du même nom dont l'objectif est de reproduire le plus fidèlement possible une photographie.

L'évolution de la puissance de calcul des machines grand public permet la création et l'affichage de mondes toujours plus vastes et plus détaillés. En l'espace de quelques années, les environnements virtuels que ce soit dans le domaine du jeu vidéo ou du cinéma ont vu leurs superficies passer de quelques dizaines de m² à plusieurs centaines de km² voire pour les projets les plus ambitieux, la modélisation de planètes ou de galaxies entières visualisables à l'échelle humaine. Le niveau de détail de ces environnements a également évolué permettant désormais de visualiser des détails de l'ordre du millimètre comme des graviers, des vis d'un assemblage ou encore des rayures sur une surface.

Historiquement, il était possible pour des artistes de modéliser chaque objet composant un monde virtuel et d'en peindre manuellement les détails de leur apparence. En revanche ces nouveaux environnements soulèvent de nouvelles problématiques puisqu'ils sont devenus si vastes et variés que maintenir un niveau de détail élevé à toutes les échelles est une tâche impossible à effectuer manuellement.

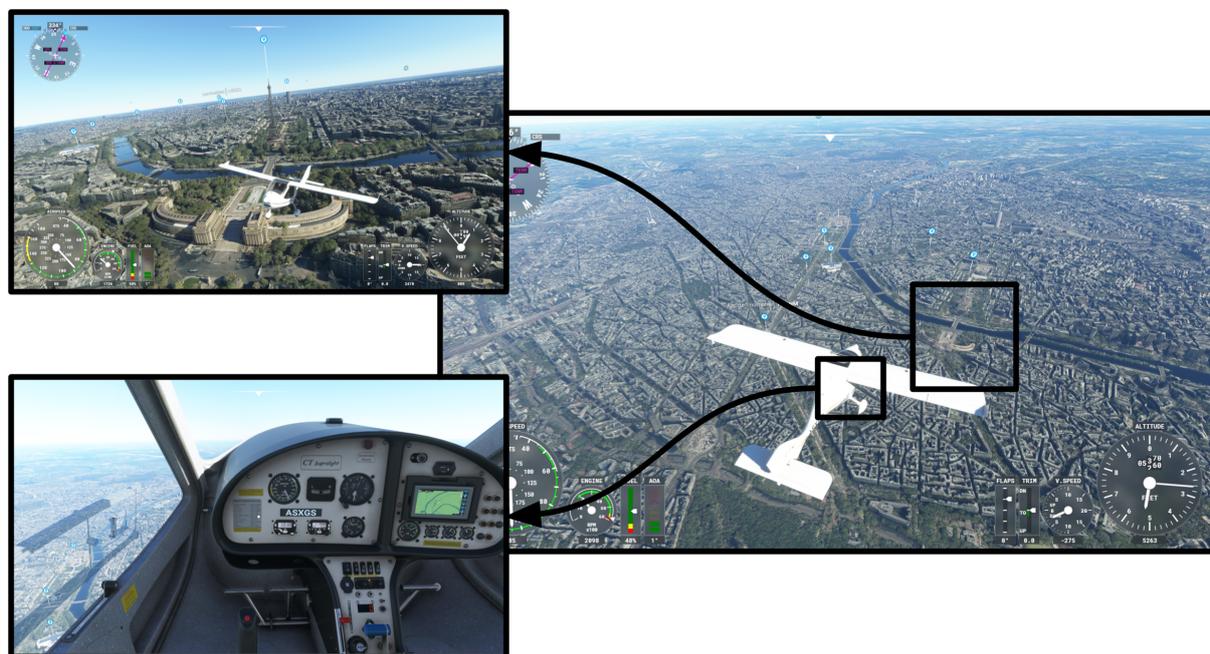


FIGURE 1.1 – Images issues du jeu Flight Simulator[®] illustrant le survol de la ville de Paris. Le jeu propose un visuel fidèle des bâtiments et de l'environnement à différents niveaux d'échelle et une modélisation des avions avec un niveau de détail élevé.

Certains projets, tel que Microsoft Flight simulator (figure 1.1) permettent en effet de survoler la planète Terre dans son intégralité. Recréer de toute pièce un environnement

de cette envergure est une tâche impossible et ce même avec un budget humain illimité. Pour relever ce défi technique, le recours à des méthodes automatisées permettant la reconstruction du monde à partir de données capturées par satellites a été mis en oeuvre.

Toutefois tous les environnements ne peuvent pas être capturés ainsi. Certains projets (ex. Star Citizen, Elite Dangerous ...) offrent la possibilité de visiter des planètes originales inexistantes dans le monde réel (figure 1.2). La contrainte supplémentaire de ce type de projet est de s'assurer de la plausibilité des mondes virtuels générés. Il est en effet difficile de vérifier le réalisme de tels environnements puisqu'aucune référence visuelle réelle n'est disponible. Afin de rendre possible la mise en place de ces mondes virtuels, il est nécessaire de proposer des solutions automatisées offrant un niveau élevé de contrôle artistique tout en garantissant la plausibilité des résultats générés.

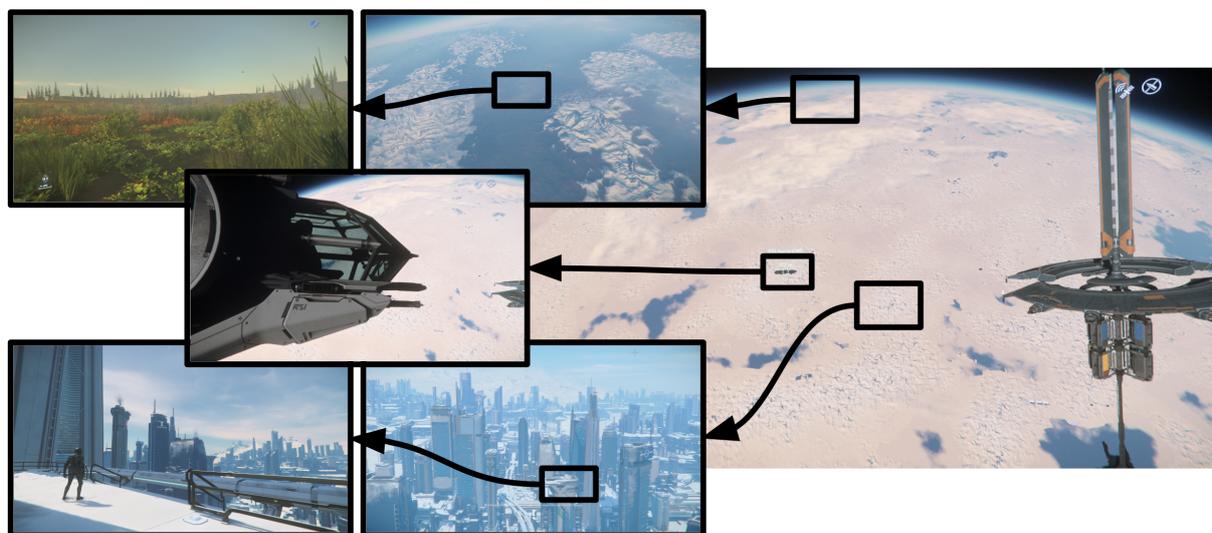


FIGURE 1.2 – Images issues du jeu Star Citizen[©] montrant une planète imaginaire intégralement explorable par le joueur et les différents niveaux de détails observables à chaque échelle : planète, ville, bâtiments, terrain, végétation, micro détails des surfaces.

La synthèse d'image consiste en l'obtention d'une représentation en deux dimensions d'une scène ou d'un monde virtuel à trois dimensions. Cette représentation est obtenue par la simulation des interactions de la lumière avec les objets de la scène.

Le transport de lumière sera abordé dans la section Synthèse d'image 1.1. Les objets présents dans une scène 3D peuvent être modélisés de diverses manières : maillages, fonctions de distance signées, surfaces implicites. Nous aborderons ces différentes représentations dans la section Géométrie 1.2. La représentation des matériaux et leurs interactions avec la lumière seront abordées dans la section 1.3. Le paramétrage local de ces matériaux appliqués aux surfaces des objets dans le but de reproduire des apparences réalistes complexes sera traité dans la section 1.4. Enfin, les objectifs de cette thèse ainsi que l'organisation de ce document seront présentés dans les sections 1.5 et 1.6

1.1 Synthèse d'image

L'obtention d'images photoréalistes requiert de simuler la propagation de la lumière dans une scène ainsi que ses interactions avec les différents objets présents. Dans le monde réel la lumière est émise depuis des sources de différentes natures (soleil, lampes, chaleur ...). Elle se propage ensuite jusqu'à interagir avec de la matière. Cette interaction réfléchit la lumière dans différentes directions et peut en absorber une partie.

Les matériaux fluorescents sont un cas particulier pour lesquels la lumière ultra-violette est réémise dans le spectre visible. Dans ce cas précis, la réflexion s'accompagne d'un changement de longueur d'onde de la lumière et donc de couleur.

La génération d'une image réaliste consiste alors à placer dans une scène des objets, des sources lumineuses et une caméra virtuelle capable de capter la quantité de lumière qui lui parvient de manière analogue aux caméras du monde réel.

Aujourd'hui, si il est techniquement impossible de simuler l'ensemble des photons émis par une source lumineuse et leurs interactions dans une scène avant de les capturer dans l'espace de notre caméra, il est cependant possible de poser le problème inverse : si des photons avaient interagi avec le capteur de la caméra virtuelle, quel chemin auraient-ils parcouru ?

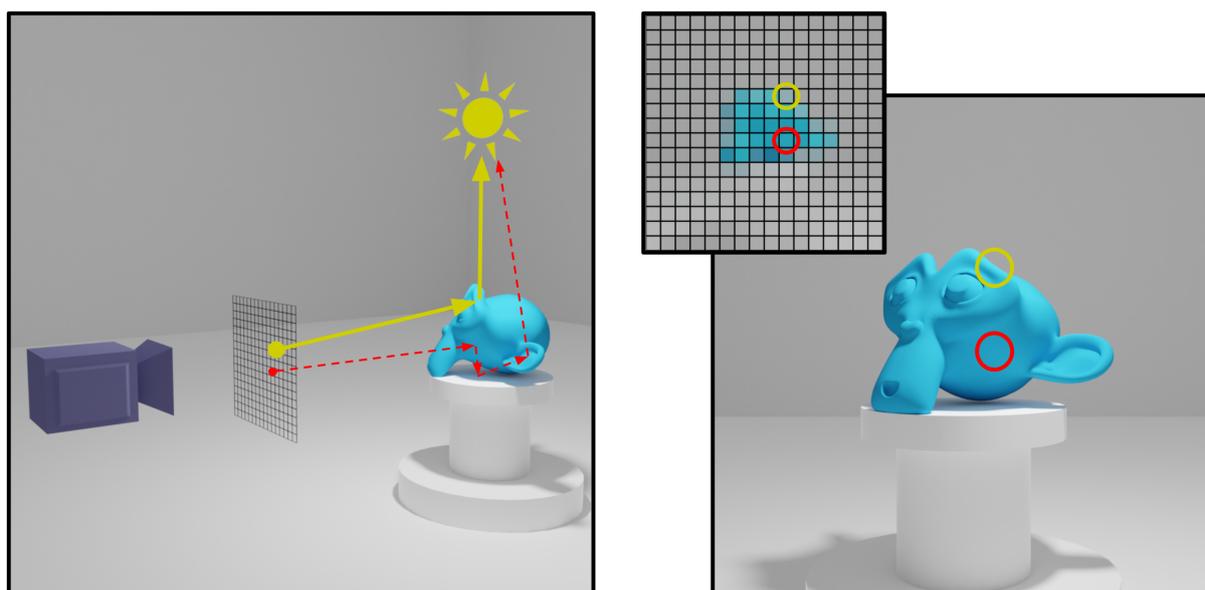


FIGURE 1.3 – Rendu d'une image par la méthode du path tracing illustrant l'éclairage direct de la surface (en jaune) et l'éclairage indirect après plusieurs réflexions sur les surfaces (en rouge).

C'est la logique de l'algorithme du path tracing qui consiste à modéliser les chemins de la lumière depuis les pixels de la caméra vers les sources lumineuses du monde (figure 1.3). Pour ce faire, des rayons sont émis depuis un pixel de la caméra dans la scène virtuelle. Les rayons sont modélisés dans l'espace comme des demi-droites dont l'origine est définie par les paramètres de la caméra virtuelle (position, orientation, distance focale ... etc) ou par l'interaction avec la surface d'un précédent rayon. Si un rayon projeté intersecte la géométrie de la scène, un nouveau rayon (rebond) est lancé dans une direction aléatoire depuis le point d'intersection. Ce processus est répété jusqu'à ce qu'un rayon rencontre

une source lumineuse.

L'ensemble des rayons ainsi lancés et leurs réflexions représentent un chemin liant un pixel de notre image à une source de lumière.

Ce chemin est alors parcouru dans le sens inverse de sa construction. Pour chaque intersection depuis la source de lumière, la quantité de lumière réfléchiée est calculée en fonction de la quantité de lumière entrante et des propriétés du matériau de l'objet intersecté (voir section 1.3). Une fois l'intégralité du chemin résolu de cette manière, la lumière entrante restante du dernier rayon correspond à la quantité de lumière captée par la caméra virtuelle.

Plusieurs chemins peuvent lier les sources de lumière de la scène et le pixel de la caméra. La quantité de lumière finale perçue par un pixel de notre image est donc obtenue par itération successive de ce processus (échantillonnage) afin de modéliser un nombre de chemins de lumière suffisant pour obtenir l'image désirée. Dans le cas où le nombre d'échantillons est insuffisant on constate l'apparition de bruit dans les images générées (voir figure 1.4).

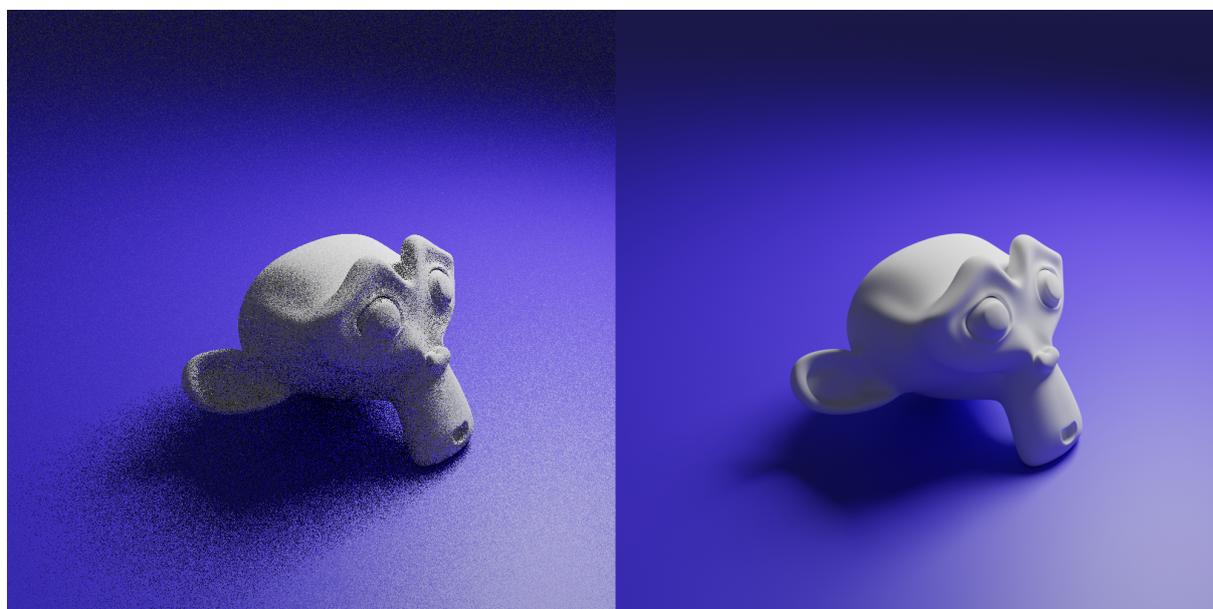


FIGURE 1.4 – Illustration du bruit lors du rendu avec à gauche une image avec 1 échantillon par pixel et à droite avec 1000 échantillons par pixel.

1.2 Géométrie

Si il est théoriquement possible de modéliser tous les détails d'une surface par une modélisation explicite de sa géométrie, cette approche rend la création d'objets bien trop complexe et difficile à stocker dans la mémoire d'un ordinateur. Pour pallier cette limitation technique il est nécessaire de séparer le problème de la géométrie des surfaces en trois niveaux d'échelles distinctes.

La macro-géométrie, souvent représentée par un maillage, sert à modéliser des détails de l'ordre du centimètre et permet de modéliser la forme globale des objets. Il

s'agit d'un graphe composé d'un ensemble de sommets reliés entre eux par des arêtes, elles mêmes connectées par des faces. De manière générale, les faces d'un maillage utilisées en rendu sont de simples triangles définissant chacun un morceau d'une surface plus complexe. La figure 1.5 montre un exemple de maillage simple.

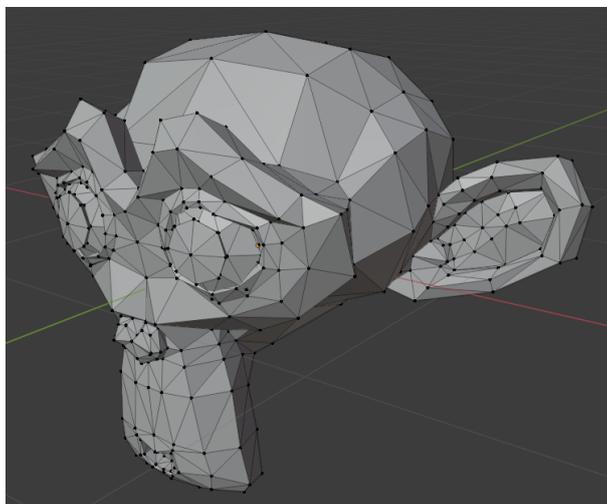


FIGURE 1.5 – Visualisation du maillage 3D du modèle "Suzanne" dans le logiciel Blender. Les faces sont visibles en gris, les arêtes sont les lignes fines noires et les sommets les points noirs.

Il existe une grande variété de représentations possibles de cette macro-géométrie (fonction de distances, surfaces paramétrées, G-carte, etc.) possédant chacune des propriétés propres. Ces représentations alternatives ne seront pas couvertes dans cette thèse.

La méso-géométrie est de manière générale représentée par des cartes de hauteurs ou de normales appliquées à la surface de l'objet. Ces cartes permettent la modélisation de perturbations de la géométrie et d'orientation de la surface pour ajouter des détails de l'ordre du millimètre. Si il est possible de modéliser des maillages à cette échelle, le coût de stockage peut devenir une contrainte limitante et en pratique la qualité des résultats rendus est similaire à l'utilisation de cartes de perturbations.

La micro-géométrie permet de modéliser les imperfections micrométriques influençant les réflexions de la lumière sur les objets. Modéliser ces micro-détails via un maillage n'est pas réalisable, le recours à des distributions de normales est privilégié.

La géométrie des différents objets présents dans une scène peut être créée manuellement par des artistes via des outils de modélisation 3D, être capturée depuis le monde réel (ex. photogrammétrie, scanner 3D, etc.) ou bien être générée par des méthodes procédurales. La capture d'objets réels est une technologie mature qui permet d'obtenir par nature des géométries réalistes avec un bon niveau de détail. Elle est aujourd'hui largement employée en industrie. Les maillages générés par cette famille d'approche nécessitent toutefois certaines retouches manuelles afin de corriger les éventuelles erreurs survenues lors de la capture (bruit du capteur, problème d'éclairage, détail concave mal

capturé, etc.). Par nature, cette approche est limitée à la reproduction d'objets existants et ne peut donc pas être utilisée pour tous les environnements ou désirs artistiques. Les approches procédurales quant à elles aspirent à automatiser au maximum le processus artistique. Elles rendent possible la création d'environnements potentiellement infinis, de terrains détaillés, d'objets uniques, etc. Ces approches offrent souvent une faible garantie quant au réalisme des résultats générés. Pour assister les artistes dans la création de mondes originaux plausibles, des approches hybrides ont vu le jour. Celles-ci permettent d'ajouter du détail de manière contrôlée et automatique à partir de modèles simplifiés créés par les artistes. La modélisation d'environnements complexes peut par exemple se résumer au placement par un artiste de reliefs approximatifs, de zones de végétations et de routes. L'automatisation génère alors des montagnes réalistes, des forêts d'arbres d'essences différentes, ainsi que des villes avec leurs réseaux routiers.

1.3 Représentation des matériaux

Les matériaux sont caractérisés par la micro-géométrie de la surface. L'interaction entre la lumière et la matière est évaluée par une fonction définissant l'intensité de lumière réfléchie dans une direction par rapport à l'intensité et la direction de la lumière incidente. Suivant sa micro-géométrie une surface diffusera plus ou moins la lumière incidente dans l'espace (voir figure 1.6). L'albedo de la matière représente la capacité d'un matériau à réfléchir certaines longueurs d'onde lumineuse définissant ainsi sa couleur apparente.

Les approches perceptuelles cherchant à reproduire de manière empirique l'apparence de chaque type de matériaux ont laissé place à une approche basée physique. Ce nouveau paradigme cherche à garantir la conservation de l'énergie de la lumière pour permettre la modélisation de matériaux réalistes. Pour ce faire il est possible de capturer les propriétés de réflexion de matériaux réels avec un goniorélectomètre par exemple. Il est également possible de modéliser la réflectivité par des fonctions analytiques respectant les lois de la physique.

Les fonctions permettant de modéliser ces aspects de l'interaction entre la lumière et la surface sont appelées fonctions de distribution de réflectivité (BRDF).

Certains matériaux permettent à la lumière de les traverser intégralement ou partiellement. La transmission de cette dernière au travers d'un objet doit alors être considérée et modélisée. De manière analogue aux BRDF, les fonctions de distribution de transmittance bidirectionnelle (BTDF) permettent d'approximer ce type de diffusion lumineuse. La combinaison d'une BRDF et d'une BTDF s'appelle une fonction de distribution de diffusion bidirectionnelle (BSDF). Enfin, les fonctions de distribution de diffusion réfléctive bidirectionnelle (BSSRDF) tiennent compte des interactions de la lumière dans le volume de l'objet et définissent la quantité de lumière transmise entre un rayon entrant et un rayon sortant à la surface d'un objet. Les BSDF et plus largement les BSSRDF permettent de modéliser les interactions de la lumière d'une grande variété de matériaux diffus, métalliques, réfléchissants, transparents, transluminescents, ainsi que la modélisation de milieux participants tels que l'air, l'eau, etc.

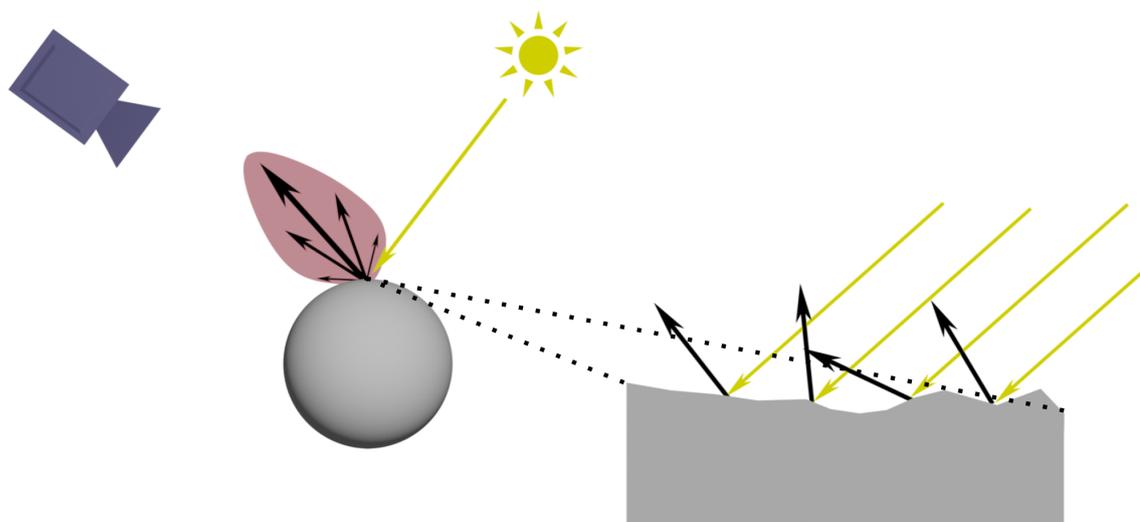


FIGURE 1.6 – **A gauche** : Diffusion de la lumière par son interaction avec le matériau. **A droite** : Réflexion de la lumière sur la micro-géométrie.

1.4 Paramètre des surfaces

Dans les modèles de rendus basés physique actuels, les BSDF appliquées aux surfaces sont contrôlées par un ensemble de paramètres définis. La combinaison d'un modèle de BSDF et de ses paramètres est appelée matériau de l'objet. Les paramètres modélisés par une majorité des BSDF basées physique sont : l'albedo, la rugosité, la spécularité et l'aspect métallique. L'utilisation de cartes de contrôle pour paramétrer localement le matériau d'un objet permet de modéliser les détails aux échelles micro et méso. Ces cartes de contrôles sont des images appelées "textures" dans le cadre du rendu.

La figure 1.7 illustre l'utilisation de textures appliquées à la surface d'un objet pour paramétrer un modèle de BSDF basée physique sur un objet.

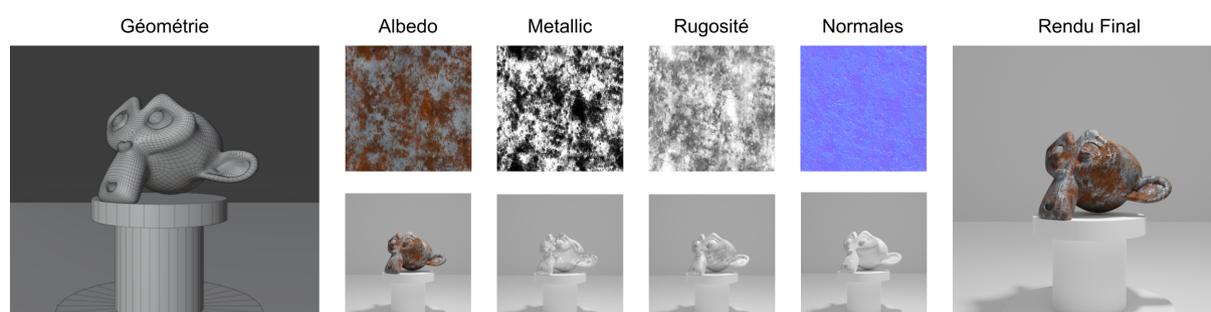


FIGURE 1.7 – Illustration des différentes textures appliquées à la surface d'un objet afin de paramétrer localement la BSDF. L'image de gauche montre le maillage de l'objet. Les images centrales illustrent sur la ligne supérieure une texture et sur la ligne inférieure le rendu de l'objet où un unique paramètre de la BSDF est impacté par cette texture. L'image de droite montre le rendu final de l'objet où la BSDF est paramétrée localement par l'ensemble de ces textures.

1.5 Objectif de la thèse

La modélisation d'une scène avec un niveau de détail élevé à toutes les échelles et son affichage via un moteur de rendu basé physique sont insuffisants pour permettre la génération d'images photoréalistes.

Dès 1990 Becket et Badler [BB90] ont théorisé que le rendu d'une scène virtuelle ne peut pas être réaliste si les objets présents ne semblent pas intégrés à leur environnement et si ils ont une apparence immaculée. Notre perception humaine est construite par observation du monde réel dans lequel il est extrêmement difficile voire impossible d'observer de tels objets. Un objet non-intégré à son environnement nous semble immédiatement factice et les images ainsi créées nous paraissent irréalistes et ce indépendamment de la méthode de rendu employée. L'environnement dans lequel s'inscrit un objet et son historique sont autant de facteurs impactant son apparence. Chaque objet possède des particularités uniques liées à sa formation et aux différentes interactions qu'il a entretenues avec son environnement à travers le temps. Afin de créer des environnements réalistes et leurs visuels associés, il est nécessaire de tenir compte de la composante temporelle et contextuelle de chaque objet.

Pour pallier ce problème, les artistes éditent manuellement les différentes textures appliquées aux objets afin de leur donner l'apparence vieillie voulue. De cette manière il est possible de créer des objets ayant des défauts visuels tel que des zones rouillées sur des objets en fer, des statues ou façades teintées par la pollution atmosphérique, etc. Ce processus chronophage doit être répété pour chaque objet individuellement, rendant inexploitable cette approche pour des mondes de grande échelle composés de plusieurs milliers d'objets uniques. De plus, l'édition manuelle est dépendante de la perception des artistes quant aux phénomènes impactant l'apparence des objets dans le temps. La capture d'objets est une solution qui permet de garantir la vraisemblance des images résultantes. Pour les objets n'existant pas dans le monde réel, une solution largement étudiée et répandue est le transfert d'apparence depuis un objet capturé vers un objet virtuel. Ce procédé permet de retrouver une apparence similaire à celle de l'exemple issu du monde réel sur des objets inédits. Le transfert est toutefois limité aux exemples capturés et ne reflète pas nécessairement le cas spécifique de chaque objet étudié et de l'environnement spécifique dans lequel il s'inscrit.

L'environnement joue un rôle primordial sur le changement d'apparence des objets dans le temps et doit être considéré pour garantir la cohérence du monde virtuel dans son ensemble. En effet, il est évident que les objets ne vieillissent pas de la même manière au fond de l'océan qu'au milieu d'un désert. De nombreux facteurs environnementaux tels que la température et ses variations, l'humidité, la présence de certains gaz ou particules sont autant de facteurs à prendre en compte afin de donner une apparence cohérente et réaliste aux objets d'une scène. Ainsi les dégradations de différentes natures (ex. dégâts chimiques, interactions humaines, contraintes mécaniques, etc.) font évoluer aussi bien la géométrie de l'objet lui-même que les propriétés des matériaux qui le composent et donc leurs interactions avec la lumière.

La simulation de ces différents processus permettrait d'inscrire un objet dans son

environnement et de représenter les conséquences des différentes étapes de son cycle de vie. Les méthodes de simulation existantes se concentrent principalement sur la simulation de phénomènes isolés. Puisque ces approches sont indépendantes les unes des autres, il est de fait complexe, voire impossible de réaliser des objets ayant une apparence impactée par plusieurs phénomènes simultanés.

De nombreuses méthodes ont été proposées pour générer des apparences dites vieillies. Ces approches se concentrent principalement sur l'obtention du résultat visuel qui n'est que la conséquence du processus de vieillissement d'un objet. Si cette approche permet la génération de résultat photo-réaliste d'un processus isolé, elle rend difficile voire impossible la modélisation de vieillissement multi-phénomènes. Afin de permettre la modélisation de ces processus intriqués, il convient de s'intéresser aux causes du vieillissement.

La contribution de cette thèse repose sur une identification des processus physiques élémentaires impliqués dans les différents effets du vieillissement (voir section 3.1). Ces processus sont : Le dépôt de matière sur les surfaces, la dissolution des surfaces dans des solvants, l'érosion du solide par le fluide, les réactions chimiques, le développement organique, les déformations, fractures et craquelures ainsi que les impacts et les rayures.

Les phénomènes de vieillissement étant liés à une évolution des matériaux présents dans la scène ainsi qu'à leur distribution spatiale, nous avons ciblé le transport de la matière et sa conservation comme élément central d'étude. Nous proposons une méthode unifiée reposant sur l'hydrodynamique des particules lissées afin de modéliser les phases solide et fluide ainsi que leurs interactions. Notre méthode est composée d'un modèle de transport de fluide dans les matériaux poreux (section 3.2.2), l'introduction d'un modèle de transport de sédiments par les fluides présents dans les pores (section 3.2.3), la dissolution et l'érosion de la matière solide par le fluide (sections 3.2.5 et 3.2.4), le dépôt de sédiments sur les surfaces (section 3.2.7) ainsi qu'un modèle d'évaporation du fluide basé sur l'humidité relative 3.2.6. Un ensemble de paramètres communs à ces processus est proposé permettant leurs interactions.

Les changements géométriques de la surface liés à ces processus introduisent des problèmes de stabilités aux frontières avec la phase fluide. Un modèle de gestion de cette frontière lors de la création et la suppression de particules est introduit en ce sens (section 3.3.1).

La simulation de ces processus élémentaires permet de les faire évoluer conjointement et par nature de les faire interagir. Notre travail permet de recréer des apparences similaires aux méthodes spécialisées pré-existantes par un modèle unifié basé physique. Il permet également la modélisation d'effets liés à la combinaison de ces processus élémentaires tels que l'efflorescence, les projections de matières, le transport de sédiments au travers de matériaux poreux, etc.

1.6 Organisation du document

Nous couvrirons dans l'état de l'art (chapitre 2) les méthodes reposant sur la capture d'apparence d'objets réels pour synthétiser l'apparence d'objets virtuels vieillies. Nous étudierons ensuite les approches cherchant à modéliser les processus physiques impliqués

dans le changement d'apparence des objets dans le temps. Ces approches souvent spécialisées se limitent à un unique effet du vieillissement, ce qui nous amènera à aborder les approches multi-effets. Nous étudierons alors la simulation de fluide par le modèle de l'hydrodynamique des particules lissées et son utilisation dans le cadre du changement d'apparence.

Dans le chapitre 3 nous proposerons d'identifier les processus élémentaires impliqués dans le changement d'apparence. De cette identification sera présenté un modèle généraliste reposant sur l'hydrodynamique des particules lissées permettant de les simuler et de gérer leurs interactions mutuelles.

Pour conclure, nous discuterons dans le chapitre 4 des limitations et des ouvertures permises par ce travail.

Chapitre 2 : Etat de l'art

Le changement d'apparence des matériaux ou plutôt leur détérioration est largement étudié dans le domaine de la conservation du patrimoine culturel. La compréhension des processus en œuvre et de leurs causes permettent de mettre en place des solutions afin de protéger les œuvres passées et futures.

L'évolution de la roche par l'interaction avec son environnement a été étudiée par Camuffo [Cam95]. Il dresse dans ce travail le lien entre la détérioration de la roche, sa porosité, la structure des pores de la matière, la température, l'humidité et les intempéries. L'eau joue un effet central dans les processus de vieillissement puisqu'elle est responsable de la dissolution de certaines matières, du transport des sédiments, des particules sur les surfaces et sert également de solvant permettant certaines réactions chimiques. L'impact du vent est lui aussi étudié puisqu'il joue un rôle dans le transport de matière dans l'environnement. Le soulèvement et les mouvements de particules abrasives par l'air peuvent, lors d'interaction avec la surface, modifier la géométrie des roches. Le transport de particules polluantes et leurs dépôts sur les surfaces influent directement sur l'apparence des objets. Les particules ainsi déposées ne provoquent pas nécessairement de détérioration de la roche sous-jacente mais peuvent, par dissolution dans l'eau, variations de chaleur ou interactions avec d'autres produits polluants, provoquer des réactions chimiques ayant un impact sur les roches.

L'humidité présente dans l'air ambiant participe aussi au processus de détérioration par des cycles d'humidification et de séchage liés aux variations de l'humidité relative. Ces variations sont responsables du remplissage ou du séchage des pores de la matière provoquant ainsi entre autre la dissolution et la cristallisation des sels minéraux. Pour des effets sur une plus petite échelle de temps, le processus de séchage de la matière est directement lié à l'humidité relative. Une étude de l'impact de l'humidité relative (RH) sur la dégradation des matériaux a en ce sens été proposée par Camuffo et Pagan [CP06]. Nous aborderons une méthode de simulation de l'interaction entre le fluide et cette grandeur dans la partie 3.2.6.

Les sels minéraux jouent un rôle important dans la détérioration des matières inorganiques. On peut par exemple citer l'efflorescence, un phénomène commun dû à la cristallisation de sels initialement présents au coeur de la roche, contenus dans les eaux souterraines ou encore rapportés par l'eau de pluie à la surface causant l'apparition d'un dépôt blanc solide sur la surface. La cristallisation de ces sels à l'intérieur des pores de la matière peut provoquer un gonflement et une contrainte mécanique interne à l'objet menant à sa potentielle fracture. Charola [Cha00] propose ainsi un état des connaissances sur l'impact des sels sur la dégradation des monuments et le lien entre leur présence et les mouvements de l'eau dans les matériaux poreux.

Les monuments historiques sont souvent composés de roches calcaires poreuses et sont donc soumis à ces processus de dégradation. Une revue des modèles mathématiques utilisés afin d'estimer la dégradation de ces monuments a été publiée par Sabat et al. [SQBB18].

Les matières organiques et leur développement jouent également un rôle important dans les processus de détérioration et plus généralement sur le changement d'apparence d'une scène. Le développement de plantes grimpantes sur les surfaces, la déformation des sols par des racines, la formation de champignons sont autant d'exemples d'impacts facilement observables liés à ces organismes.

Ils peuvent être observés sur tous types de matériaux tels que les roches, les peintures, les textiles, les papiers, les colles etc.

Sterflinger [Ste10] propose une vue d'ensemble de l'impact du développement de

champignons sur le patrimoine culturel ainsi qu'une liste des variétés de champignons pouvant se développer sur différentes catégories de matériaux supports. La formation de ces organismes sur les surfaces induisent un changement de couleurs, de géométrie et de mode d'interaction avec la lumière. Leurs interactions avec la matière non organique peuvent mener à une destruction de l'objet sur laquelle ils se développent.

En informatique graphique de nombreuses méthodes ont été proposées afin de modéliser les changements d'apparences liés à ces processus.

Dans une première partie nous discuterons des approches visant à modéliser les changements d'apparences 2.1.

Le vieillissement d'un objet est grandement impacté par la présence et les interactions qu'il entretient avec les fluides. L'eau en particulier joue un rôle majeur puisqu'elle est omniprésente dans la nature que ce soit dans les cours d'eau, la pluie ou sous forme de micro particules en suspension dans l'air. Une méthode de calcul largement utilisée en informatique graphique pour simuler la dynamique des fluides est l'hydrodynamique des particules lissées (Smooth Particle Hydrodynamics ou SPH). Le fonctionnement de ce modèle sera détaillé dans la section 2.2.

2.1 Changement d'apparence

Plusieurs approches ont été étudiées afin de modéliser le changement d'apparence des objets. Les approches reposant sur le transfert d'apparence sont étudiées dans la sous-section 2.1.1). Cette famille de méthodes repose sur la capture d'objets ou de morceaux d'objets exhibant des effets liés au vieillissement depuis le monde réel via des scanners ou des photographies. De cet exemple capturé les informations clés sur l'apparence sont extraites. Elles sont ensuite utilisées via des méthodes de synthèses d'image pour donner à des objets virtuels des apparences similaires à celles des exemples capturés. Certaines de ces méthodes proposent même d'analyser et de synthétiser l'évolution d'un processus à partir d'un exemple unique.

Dans la sous-section 2.1.2, nous étudierons les travaux ayant pour objectif la reproduction d'apparences liées à un phénomène spécifique. Cette partie est séparée en sous catégories présentant chacune un phénomène particulier et les méthodes cherchant à les modéliser. Certaines de ces approches proposent de modéliser les processus qui sont communs à plusieurs effets du vieillissement.

Les méthodes capables de représenter plusieurs effets du vieillissement par la modélisation de processus conjoints seront discutées par la suite (Section 2.1.3). Cette catégorie d'approches nous intéresse particulièrement puisqu'elles permettent l'interaction de plusieurs phénomènes physiques.

2.1.1 Transfert d'apparence

Le transfert d'apparence a pour objectif de reproduire des apparences d'objets réalistes en utilisant des données capturées dans le monde réel (photos ou scans 3D). Il ne s'agit pas ici de modéliser les processus physiques mais de proposer des modèles permettant de créer des images perceptuellement similaires à l'exemple fourni.

2.1.1.1 Variété

Une variété est un espace topologique localement euclidien permettant la modélisation d'un espace de solution à un système d'équation. Ces structures peuvent être obtenues par la construction d'un graphe à partir d'un ensemble de points, solutions de l'équation étudiée.

La non uniformité de l'apparence des surfaces telle qu'observée dans le monde réel peut être exploitée pour détecter le degré de vieillissement de la surface. Wang et al. [WTL⁺06] proposent une méthode de détection automatique du degré d'altération d'une surface afin d'extraire depuis une image donnée une carte de vieillissement. Depuis cette carte, ils proposent la construction d'une variété, utilisée pour corrélérer l'apparence au degré de vieillissement. Il est alors possible d'exagérer ou de réduire le vieillissement présent sur l'exemple donné en projetant les pixels d'origine sur la topologie de la variété précédemment construite, puis, en parcourant un chemin en direction des zones correspondant à l'apparence vieillie ou non de cette topologie. Cette approche est limitée par la qualité de l'image fournie en paramètre. En effet, elle est incapable de dissocier un changement de couleur lié à l'impact du temps d'un changement de couleur lié à l'éclairage.

Pour pallier cette limitation Xue et al. [XWT⁺08] ont proposé de séparer les

composantes de teinte et de luminosité des pixels en utilisant l'espace de couleur *Lab* lors de la construction de la variété géométrique. En plus de permettre une flexibilité accrue quant aux conditions d'éclairage de l'image d'exemple, cette nouvelle technique permet le transfert d'apparence entre deux exemples. Le transfert d'une apparence liée à au développement organique sur une photo où de la corrosion était initialement présente est alors possible tout en respectant les conditions d'éclairage de l'image cible.

Bandeira et Walter [BW09] ont proposé une simplification de cette approche en se séparant de la construction d'une variété et en le remplaçant par la construction d'une carte utilisant les composantes *ab* de l'espace de couleur *Lab*. Des exemples d'utilisation des méthodes de [WTL+06] et de [BW09] sont visibles sur la figure 2.1.



FIGURE 2.1 – Illustration de méthode de transfert par variété d'apparence. La ligne supérieure montre la méthode de Wang et al. [WTL+06] transférant l'apparence d'une plaque métallique rouillée (image la plus à gauche) sur un modèle virtuel en exagérant plus ou moins son évolution. La ligne du bas est issue des travaux de Bandeira et Walter [BW09], la première image à gauche montre l'image d'exemple utilisée pour le transfert et l'image sur laquelle effectuer le transfert. Les autres images illustrent l'évolution de l'effet.

Bosch et al. [BLR+11] extraient depuis des images d'objets exposant des coulures de matière une variété représentant l'évolution de la couleur le long de l'écoulement visible sur l'exemple. Une paramétrisation d'un système de simulation particulière est extraite de cette image d'exemple. Après avoir simulé le système particulaire, l'apparence de la coulure est générée en utilisant la variété pré-calculée. Cette approche permet de générer des apparences de coulures plausibles adaptées à la géométrie de la scène.

Afin de simplifier le contrôle artistique, Clément et Paquette [CP10] se séparent des variétés pour une méthode indépendante de la couleur de la texture d'exemple. Une méthode de génération de la carte de vieillissement par érosion et dilatation aléatoire successive d'un masque binaire est utilisée pour spécifier la couleur de la surface. Une carte de hauteurs basée sur ce masque est générée afin de modéliser des variations géométriques légères (rayures, impacts).

2.1.1.2 Corrélation géométrique

On peut observer que les variations d'apparence d'un objet, que ce soit sa couleur ou ses propriétés matérielles locales sont dépendantes de la géométrie de locale de l'objet. Ainsi les objets manipulés par les humains ou subissant des contraintes environnementales n'auront pas la même apparence dans les zones exposées à l'environnement extérieur que dans les replis de la surface. Suivant ce constat, Miller [Mil94] lie le ternissement d'une surface à son accessibilité à l'air. Le ternissement est le produit de la réaction chimique entre un métal et un autre élément (généralement l'oxygène ou le dioxyde de soufre). Cet effet produit une oxydation du métal qui a pour effet de changer ses propriétés optiques et matérielles. Ainsi Miller propose de calculer pour chaque point de la surface son "accessibilité globale", une version modifiée de la courbure définie comme étant le rayon maximal qu'une sphère placée en contact de la surface pourrait atteindre sans qu'elle n'intersecte un autre point de la surface de l'objet. En modifiant la couleur ou le matériau de la surface en fonction de l'accessibilité globale il est possible de créer une apparence ternie dépendante de la géométrie de l'objet.

Lu et al. [LGR⁺05] proposent une méthode d'analyse d'image permettant d'extraire des informations sur l'historique d'un cycle de mouillage séchage d'un objet. Une corrélation entre l'évolution de l'humidité de la surface, son accessibilité et la distance avec les zones initialement mouillées est construite à partir d'une série de photos. Ces corrélations sont alors pré-calculées dans une carte 2D qui peut être transférée sur de nouveaux objets. La synthèse de cet historique capturé sur une nouvelle géométrie requiert une carte de mouillage initiale fournie par l'utilisateur et propre à cette nouvelle géométrie. Les informations sur la saturation en eau de la surface sont alors obtenues au moment du rendu par l'utilisation de la carte 2D des corrélations liant les paramètres d'accessibilité et de distance à la zone initialement mouillée de la nouvelle géométrie.

Des approches visant à généraliser ce processus par l'utilisation de corrélations entre d'autres propriétés géométriques que la courbure de la surface ont été proposées par Mertens et al. [MKC⁺06] ainsi que Lu et al. [LGG⁺07]. Sur un maillage d'exemple capturé via des scanners ou de la photogrammétrie, une analyse canonique des corrélations (CCA) est menée pour lier la géométrie locale d'un objet et ses propriétés optiques. Les modèles ainsi proposés permettent l'extraction depuis un exemple des propriétés visuelles de l'objet et fonction de plusieurs propriétés géométriques : courbure locale, orientation de la normale à la surface, occlusion ambiante, direction principale de l'occlusion ainsi que de la hauteur de l'échantillon de surface. Depuis ces données extraites, l'apparence peut être synthétisée sur des objets inédits en tenant compte de leur géométrie locale. Un exemple de transfert par corrélation géométrique peut être observé figure 2.2. Cette catégorie d'approche bien que limitée par l'exemple permet de reproduire des objets offrant des apparences réalistes avec des variations locales plausibles, dépendantes de la géométrie.

2.1.1.3 Synthèse de texture

Une première approche multi-effets basée sur la synthèse de texture a été introduite par Becket et al. [BB90]. Ces auteurs définissent un ensemble de règles et de distributions simples et utilisent la subdivision fractale pour générer des textures d'apparence vieillie. Cette approche permet de modéliser des apparences variées (rouille, saletés, rayures, tâches ... etc) mais repose exclusivement sur un contrôle artistique utilisateur via une description de l'apparence souhaitée en langage naturel. Les modifications géométriques



FIGURE 2.2 – Illustration du transfert d'apparence par corrélation géométrique par la méthode de Lu et al. [LGG⁺07] A gauche : objet réel capturé. Milieu et droite : apparence transférée sur d'autres géométries.

liées aux différents processus ne sont pas modélisées. En outre, cette approche ne tient pas compte de la physique réelle des processus représentés.

Bellini et al. [BKCO16] proposent une méthode de génération de texture par patch utilisant l'extraction depuis une texture/photo fournie en exemple afin d'extraire une carte de vieillissement (à la manière des approches basées variétés géométriques). De cette carte, des patches sont extraits puis, par une reconstruction de texture par patch, de nouvelles textures avec un contrôle cohérent du degré de vieillissement peuvent être recrées. Une texture générée par cette méthode conserve la structure présente dans l'exemple tout en ayant un niveau de détail élevé dans les zones impactées.

Autrement que par la structure il est possible de segmenter une image en partant du principe qu'elle comporte une texture dominante. Lu, Dorsey et Rushmeier [LDR09] proposent ainsi de classifier chaque texels d'une image sous 4 types représentant respectivement : la texture principale, les sous-groupes de texels texturés, les texels reliant les 2 premiers types ainsi que les texels représentant du bruit dans l'image. Grâce à cette approche il est possible de re-synthétiser des textures correspondant à la texture principale sans les artefacts dus à la présence des 3 autres catégories. Cette approche est illustrée dans la figure 2.3.

Les effets de vieillissement impliquant l'apparition de coulures sur les surfaces sont complexes à transférer de manière réaliste puisqu'ils sont dépendants de la géométrie de la surface des objets impactés. Bosch et Patow [BP18] proposent une méthode d'extraction et de synthèse des coulures issue d'une image capturée adaptant son contenu au matériau de l'image cible. Afin de prendre en compte la géométrie de l'image cible, une carte de profondeur fournie par l'utilisateur est utilisée afin de déformer les coulures générées.

Récemment, Meister et al. [MPSB21] ont exploité une base de données de BRDF mesurées pour proposer une méthode de synthèse de BRDF tenant compte de la temporalité pour représenter des apparences vieilles.

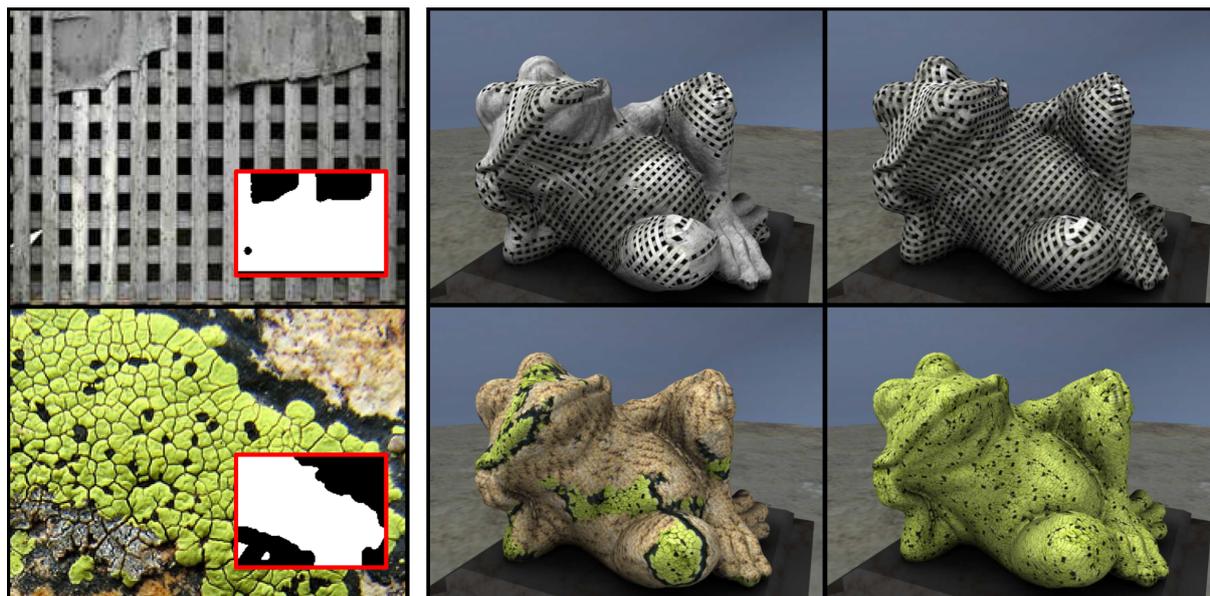


FIGURE 2.3 – Deux exemples de synthèse de texture issus de la méthode de [LDR09]. A gauche, la texture d'exemple avec en rouge le masque de texture dominante. Au centre, la synthèse de texture sans tenir compte de la texture dominante. A droite, synthèse de la texture dominante.

2.1.2 Approches spécialisées

2.1.2.1 Rayures et impacts

Force d'interactions avec d'autres objets ou par l'activité humaine et animale, les objets s'usent. Ainsi la surface de certains objets peut se retrouver rayée, voire creusée par des impacts avec d'autres objets.

Afin de simuler des impacts répétés sur de longues périodes de temps, Paquette et al. [PPD01] ont proposé une méthode permettant de définir des zones d'impacts à la surface des objets. La déformation de la surface par différents impacts est alors obtenue en déplaçant les vertices de la surface et en subdivisant le maillage localement. La simulation d'un impact est suffisamment rapide pour permettre d'en calculer plusieurs en un temps limité et ainsi augmenter le réalisme de la surface finale obtenue. La figure 2.4 illustre cette méthode.

Plus récemment Schäfer et al. [SKS13] ont exploité la tessellation matérielle disponible sur les GPU pour modifier à la volée la géométrie des maillages rendus. Leur approche gère des déformations à plusieurs échelles et permet un déplacement contrôlé localement de la géométrie, y compris dans de larges scènes. Leur méthode permet de sculpter la surface d'un objet, de faire apparaître des traces de pas sur un sol ou encore le positionnement de rayures ou d'imperfections sur des objets dans de grandes scènes.

L'éclairage d'objets rayés à leur surface est complexe à calculer. En effet si une majorité des BRDF peut se contenter de modéliser la distribution de normales par un lobe gaussien, la présence de rayures introduit des discontinuités dans cette distribution. Yan et al. [YHJ⁺14] [YHMR16] puis Chermain et al. [CCM18] ont proposé des modèles de BRDF filtrées tenant compte de ces variations micro-géométriques. La micro-géométrie est modélisée par une carte de normale afin de définir la forme et l'orientation des rayures et

garantir la cohérence spatio-temporelle de celles-ci. Grâce à un pré-calcul des distributions à différentes échelles, le filtrage de la carte de normale peut être assuré lors du rendu permettant la visualisation des micro-reflets induit par ces variations de surface en un temps raisonnable. Plus récemment Chermain et al. [CLS⁺21] ont introduit le premier modèle basé physique de rendu de micro reflets gaussien temps réel en tirant profit des capacités de filtrage de texture des GPU sur un dictionnaire de distributions 1D pré-calculé contenant les informations de la distribution de la carte de normales à différentes échelles.

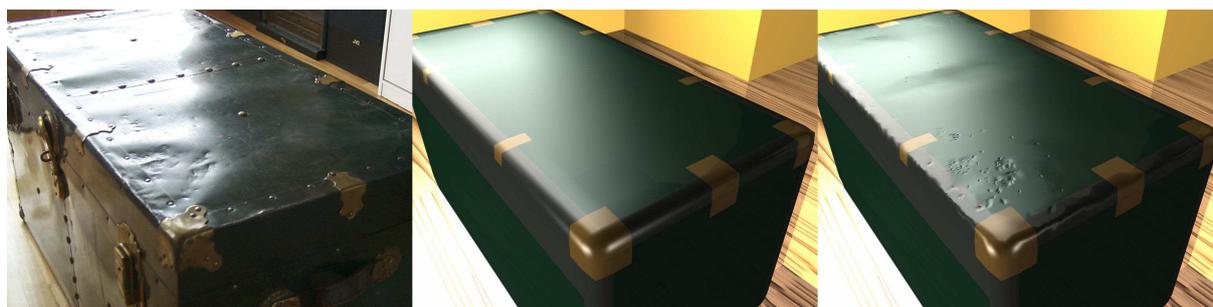


FIGURE 2.4 – De gauche à droite : Photographie d'une male usée, modèle 3D non vieilli, modèle 3D ayant subi des impacts similaires à l'objet photographié via la méthode de Paquette et al. [PPD01].

2.1.2.2 Craquelures et fractures

Lorsqu'un objet subit des forces trop importantes, il peut être amené à se fragiliser, se craqueler et à terme se fracturer. Nous appelons craquelure l'apparition souvent brutale d'une discontinuité à la surface d'un objet. La fracture quant-à elle sera caractérisée par une séparation de l'objet en plusieurs sous-parties disjointes.

Pour compenser l'évaporation de l'eau présente dans la terre, la matière tend à se contracter. Hirota et al. [HTK98] ont proposé un modèle se basant sur un système masse-ressort permettant la simulation de cette contraction ou de l'expansion laissant apparaître des craquelures lorsque les ressorts dépassent un certain niveau d'étirement.

O'Brien et Hodgins [OH99] proposent une méthode d'évaluation de l'apparition et de la propagation de craquelures reposant sur l'analyse des tenseurs de stress par une méthode à éléments finis appliquée sur des maillages tétraédriques. L'emploi d'une approche volumique permet de modéliser jusqu'à la fracture des objets étudiés.

Gobron et Chiba [GC01a] utilisent un automate cellulaire afin de proposer une approche physiquement plausible pour la création de craquelures sur un maillage. Leur approche permet de garder un contrôle sur la capacité du matériau à résister au stress.

Iben et O'Brien [IO06] proposent par un processus basé physique de simuler la propagation du stress dans le maillage d'un objet. Par un processus de remaillage local de la surface dans les zones de fort stress, leur méthode permet de générer des craquelures ressemblant à ce qui peut être observé sur la terre sèche, les vernis de céramiques, ou la peinture.

Les méthodes de simulation de fracture ayant un coût de calcul élevé, Desbenoit et al. [DGA05] proposent de stocker dans un atlas les motifs de fractures et leurs profils pour différents matériaux. Ces motifs pré-calculés sont ensuite évalués sur la surface de maillage

3D permettant une modélisation des fractures et leur propagation avec un niveau de détail élevé.

La contraction de la matière lors de son séchage est également une cause d'apparition et de propagation de fractures. Valette, Prévost et Lucas [VPL06] modélisent l'élargissement des craquelures sous l'action de la contraction de la matière lors de son séchage. La méthode repose sur le découpage de l'objet en îlots par une carte de craquelure 2D pré-calculée. La contraction des différents îlots est alors simulée dans une grille régulière. L'épaisseur des craquelures est déduite de la compression aux bordures des zones fracturées.

Une simulation par éléments finis de la déformation élastique d'objets, leur fracture et la propagation de celles-ci sur des maillages tétraédrique a été proposée par Wicke et al. [WRK⁺10]. La qualité de la simulation lors des déformations est maintenue par une méthode de remaillage minimisant le nombre de tétraèdres modifiés. Ce choix permet également de limiter les artefacts visuels visibles lors des animations.

Afin de reproduire des craquelures réalistes, Glondu et al. [GMM⁺12] extraient de photographies un ensemble de paramètres permettant par la suite la génération de fracture ayant les mêmes propriétés statistiques.

Un modèle de simulation physique surfacique proposé par Pfaff et al. [PNdJO14] permet la déformation et la fracture de fine couche d'une grande variété de matériaux s'étalant des matériaux élastiques, plastiques, métalliques, etc ...

Une étude générale des craquelures et fractures en informatique graphique a été proposée par Muguercia et al. [MBP14].

Des approches physiques reposant sur le modèle d'hydrodynamique des particules lissées sont également étudiées pour évaluer le stress et l'apparition de craquelures lors du séchage de la matière tels que proposés par [BNKS15] ou [TNNB20].

En mécanique des milieux continus, la dynamique des systèmes repose sur la résolution d'équations aux dérivées partielles. Dans le cas des craquelures ou des fractures, ces dérivées partielles n'existent pas puisque des singularités apparaissent. La périodynamique est une théorie orientée sur l'étude des déformations et des fractures proposant une formulation alternative de cette mécanique basée sur la résolution intégrale. Chen et al. [CZZ⁺17] proposent une méthode exploitant la capacité de ce modèle à évaluer les discontinuités des matériaux permettant ainsi une évaluation des déformations élastoplastiques d'objets et de leur fracture avec un haut niveau de réalisme.

La communauté graphique montre un intérêt croissant pour la méthode des points matériels (MPM). Cette approche hybride représente le champ de densité par des particules et sa dérivation dans une grille régulière. Du fait de sa méthode d'interpolation des champs dans une grille régulière, il est difficile de représenter des fractures car elles introduisent des discontinuités brutales. Une intégration de la fracture de champ de phase a été proposée par Wolper et al. [WFL⁺19] pour modéliser des fractures réalistes.

La figure 2.5 illustre plusieurs de ces méthodes.

2.1.2.3 Peeling

Le peeling est un effet qui se caractérise par le détachement d'une fine couche appliquée à une surface, son replis sur elle-même et finalement son détachement. Il peut être observé sur la peinture des murs ou le vernis d'un bois ancien. Cet effet est causé par de longues

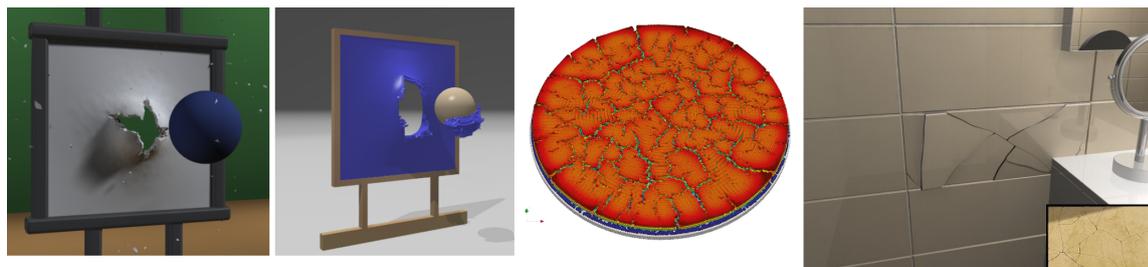


FIGURE 2.5 – Illustration de diverses méthodes de fracture. De gauche à droite : Wicke et al. [WRK⁺10], Chen et al. [CZZ⁺17], Tran et al. [TNNB20] et Glonu et al. [GMM⁺12].

expositions à de multiples facteurs : humidité, lumière, travail de la surface sous-jacente, etc.

Gobron et Chiva [GC01b] ont proposé d'utiliser une version pré-calculée de leur modèle de craquelures [GC01a] afin d'estimer les zones où le peeling apparaît et où la peinture se détache sur des objets complexes. Ce modèle ne prend toutefois pas en compte les caractéristiques physiques des matériaux. Pour pallier cette limitation, Paquette et al. [PPD02] ont proposé de simuler sur une grille 2D le détachement et le recourbement de couches de peintures sur un matériau. Leur modèle tient compte de l'adhésivité du matériau sous-jacent, de l'élasticité de la peinture et de sa résistance au stress. Le résultat de la simulation est alors projeté sur la surface originale de l'objet 3D pour générer des images de peintures vieillies réalistes.

Ces modèles sont illustrés dans la figure 2.6.

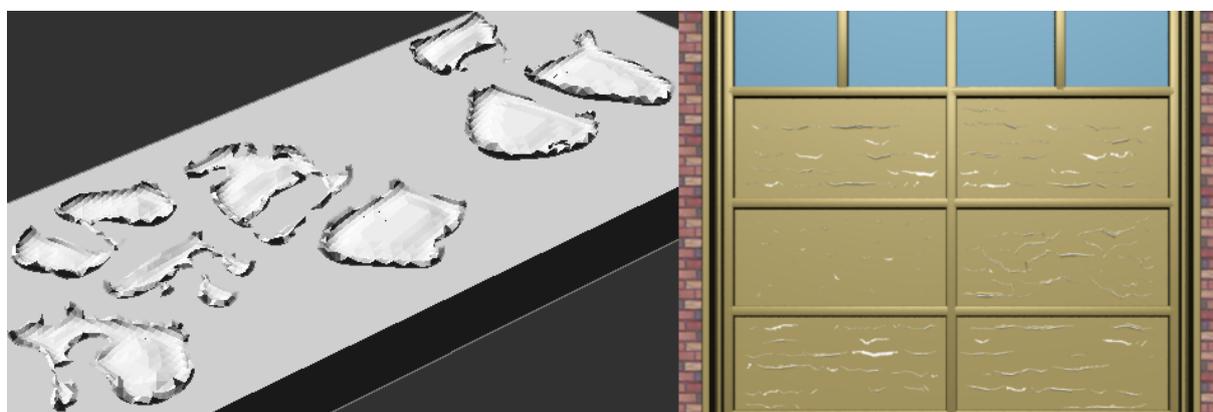


FIGURE 2.6 – **A gauche** : Vue des groupes de peeling formés via la méthode de Gobron et Chiva [GC01b]. **A droite** : Apparition de peeling calculés via la méthode de Paquette et al. [PPD02] sur une porte de garage. Les 6 panneaux possèdent des propriétés différentes.

2.1.2.4 Mouillage et séchage

Le mouillage et le séchage d'une surface sont des phénomènes de changement d'apparence cyclique. Ces cycles seuls ne provoquent pas de modifications visuelles durables ou irréversibles. Le mouillage est le résultat de l'absorption par les pores du

matériau d'un fluide par un contact ou bien par condensation de l'humidité présente dans l'air ambiant. Le séchage quant à lui est un processus lié à l'évaporation de l'eau contenue dans les pores de la matière.

Nous avons déjà couvert un modèle de mouillage et séchage par transfert d'apparence, celui de Lu et al. [LGR⁺05] dans la partie 2.1.1.1.

Afin de rendre de manière réaliste l'apparence des matériaux mouillés, Mérillou et al. [HPMG06] ont proposé une extension du modèle de BRDF de Blinn/Phong [Bli77] pour tenir compte de la porosité de la matière représentée par des cylindres sous-surfaciques et le remplissage des pores dans les interactions entre la surface et la lumière de la scène. Si cette méthode permet une visualisation en temps réel d'objets mouillés ou humides physiquement plausibles, elle ne modélise ni le fluide ni la manière dont la matière absorbe ce dernier.

Le mouillage de matériaux granulaires ajoute une difficulté supplémentaire puisqu'ils changent de forme et de comportement lorsqu'ils sont humides. Pour répondre à ce problème, Rungjiratananon et al. [RSKN08] ont développé un modèle hybride de simulation de fluide reposant sur l'utilisation de SPH couplé à un autre modèle particulaire reposant sur la méthode par élément discret (DEM ou Discrete Element Method). En résulte un modèle empirique de mouillage des particules solides impliquant une réduction du rayon des particules humides et une augmentation de leur cohésion.

Une approche hybride liant une simulation de fluide via SPH et la modélisation du flux poreux dans un maillage tétraédrique a été proposé par Paktar et Chaudhuri [PC13]. L'absorption de fluide par la surface solide, la diffusion de fluide dans les pores, les égouttements à la frontière ainsi que la déformation des solides sont étudiés. La conservation de la masse de fluide et du volume de solide sont assurés par l'utilisation et la déformation du maillage pour le calcul de ces processus.

Plus récemment Bajo et al. [BDP21] ont proposé une approche de simulation du cycle de mouillage et séchage d'objet poreux hautement parallélisable sur GPU. Par un pré-calcul dans des textures de la position et de la taille des texels projetés dans le monde, un modèle d'absorption basé sur la loi de Darcy est proposé. Les zones de contact entre le fluide et la surface peuvent être déterminées par une simulation de fluide externe ou bien des cartes de contrôle fournies par l'utilisateur. La diffusion dans le matériau poreux est assurée par la loi de diffusion de Fick [Fic55]. Le modèle d'évaporation proposé est basé sur les travaux de Hall et Hoff [HH02]. Leur modèle dans son ensemble permet de simuler de manière plausible et de visualiser l'animation de l'humidification des surfaces d'objets et de leur séchage.

2.1.2.5 Erosion

L'érosion est un processus de dégradation causant la perte de matière des sols et roches causée par diverses interactions avec l'eau et l'atmosphère. Il peut-être le résultat de causes variées telles que le climat (pluies et vents), d'interactions chimiques (dissolution), tectonique (fracturation), de l'activité humaine (déforestation, labours), etc.

La génération de carte de hauteurs pour la création de terrain à l'aide de fonctions procédurales reposant le mouvement brownien fractionnaire offre un contrôle global pour leur paramétrisation mais ne tient pas compte des caractéristiques locales du terrain généré. Musgrave et al. [MKM89] ont proposé d'employer un modèle d'érosion simple basé sur le maillage d'un terrain généré procéduralement. Les sommets de ce maillage

contiennent des informations sur la quantité d'eau présente ainsi qu'un volume de sédiments en suspension dans celle-ci. A chaque pas de temps de simulation, une quantité d'eau est transférée ou reçue des sommets voisins et une quantité de sédiments est déposée ou retirée de la surface. En supplément un modèle simplifié d'érosion thermique est proposé permettant un "lissage" des sommets aigus. Le modèle de simulation proposé est empirique mais permet la création de terrains plausibles exhibant la formation de réseaux hydrauliques, de vallées et de talus.

Un modèle d'érosion basé physique proposé par Nagashima [Nag98] permet la génération de terrains plus réalistes par la prise en compte de l'intensité de l'érosion hydrique, thermique et des précipitations locales.

Pour générer des scènes rocheuses réalistes, Ito et al. [IFMC03] proposent de simuler l'apparition de diaclase (fissure ne provoquant pas de déplacement de roche) ainsi que le mouvement des blocs de roche ainsi formés par une méthode volumique utilisant des voxels. Le processus comprend la modélisation de l'érosion par la suppression de voxels et de la chute de la roche par le déplacement des voxels restants.

L'utilisation de voxel a également été étudiée dans la simulation d'érosion hydrique. Ainsi Benes et al. [BTHB06] ont proposé de résoudre les équations de Navier-Stokes dans un champ de voxels afin de définir le mouvement du fluide dans le volume de la scène. Leur modèle définit également la manière dont le fluide interagit avec les voxels représentant la solide de la scène afin de modéliser l'érosion, le transport et la déposition des sédiments.

Une méthode basée physique de l'érosion de terrain modélisée par une carte de hauteurs à été introduite par Stava et al. [SBBK08]. Par une approche de type "diviser pour régner", ils découpent le terrain en tuiles pour lesquelles les mouvements d'eau et de sédiments sont calculés de manière indépendante les unes des autres. Cette approche est compatible avec les GPU modernes et rend possible l'édition de terrain de grande taille. La figure 2.7 illustre cette méthode.

Afin de limiter le lissage lié à la simulation sur une grille régulière, Krištof et al. [KBKS09] proposent un modèle fondé sur l'hydrodynamique des particules lissées (SPH) pour simuler le mouvement de l'eau sur une carte de hauteurs ainsi que le comportement des sédiments dans le fluide.

Jones et al. [JFBB10] proposent une approche empirique pour modéliser la désagrégation et l'érosion de la roche en fonction de la courbure et de l'accessibilité de la surface. L'utilisation de voxels pour estimer ces deux facteurs permet la création de caves et le lissage des parties saillantes de la roche.

Une variation de cette méthode remplaçant l'emploi d'une carte de hauteurs par une carte généralisée (G-Map) a été proposée par Bézin et al. [BCS⁺14]. L'utilisation de cette formulation géométrique permet de modéliser l'érosion de modèles volumiques complexes (caves, arches, etc.).

Un modèle hybride combinant érosion hydrique et formation de relief par soulèvement des plaques tectoniques a été proposé par [CBC⁺16]. Le terrain est représenté par un graphe grossier sur lequel est simulé l'élévation par action tectonique des plaques (via une carte fournie par l'utilisateur) ainsi que l'action de l'érosion hydraulique. Une représentation haute définition du terrain peut alors être obtenue en utilisant les données de ce graphe comme paramètre d'entrée de méthode de génération de terrain ([GGP⁺15] et [GDGP16]).

Un état de l'art des méthodes de modélisation de terrain (non limité aux seuls processus d'érosion) a été proposé par Galin et al. [GGP⁺19].

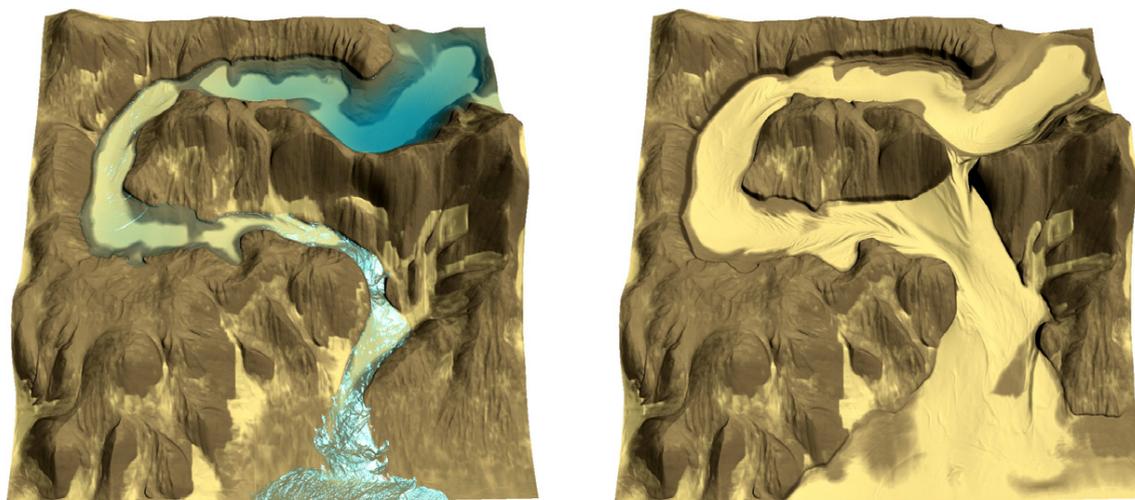


FIGURE 2.7 – Modèle d'érosion de terrain par carte de hauteurs proposé par Stava et al. [SBBK08]

2.1.2.6 Poussière

L'accumulation de poussière à la surface des objets est un phénomène du vieillissement observable aisément au quotidien. Elle est due au dépôt de micro-particules sur la surface impactant la manière dont cette dernière interagit avec la lumière. D'autres effets liés à l'accumulation de poussière telle que la modification de l'adhésion de la surface poussiéreuse peuvent être observés.

En 1982 Blinn [Bli82] a proposé un modèle statistique d'interaction entre la lumière et la poussière reposant sur une estimation de la lumière dispersée après un rebond dans un nuage de particules. Cette méthode permet la création d'images contenant des nuages de poussière ainsi que de la poussière déposée sur une surface solide. Néanmoins cette approche ne modélise pas la manière dont les nuages de particules se forment ou la manière dont la poussière se dépose.

Hsu et Wong [HW95] ont développé une méthode empirique analogue au transport de lumière en utilisant des sources d'émission de poussières afin d'estimer les zones de la surface accessibles par les micro-particules. La quantité déposée dépend du cosinus de l'angle entre l'orientation de la normale à la surface et de la direction des sources de poussière. Ce modèle permet de créer une distribution plausible de la poussière sur un objet en tenant compte de l'exposition au vent et des interactions avec d'autres objets.

Plus récemment Guo et Pan [GP14] ont proposé un modèle de calcul de la distribution de poussière en prenant en compte la capacité des particules à adhérer à la surface. Leur méthode de rendu utilise une variation du modèle de Kubelka–Munk [Kub48] afin de prendre en compte la variation de l'épaisseur de poussière sur la surface ainsi que les réflexions de la lumière dans la couche de poussière. Cette approche est illustrée dans la figure 2.8.

2.1.2.7 Tâches et éclaboussures

Dans certaines configurations, de la matière peut se retrouver déposée sur des surfaces après avoir été projetée. Cet effet peut être dû à un écoulement depuis un toit, à un



FIGURE 2.8 – Illustration des travaux de Guo et Pan [GP14]. De gauche à droite, l'épaisseur de la couche de poussière augmente avec le temps. L'animation du processus est évaluée en temps réel.

véhicule traversant une flaque d'eau ou à tout autre phénomène analogue. Si la matière ainsi projetée ou étalée sur une surface est concentrée en particules, celles-ci peuvent adhérer à la surface une fois le liquide évaporé laissant alors place à des tâches. Ces tâches ne se nettoient pas nécessairement lors d'un mouillage ultérieur de la surface.

Pour modéliser cet effet, Dorsey et al. [DPH96] ont établi un modèle phénoménologique d'écoulement de fluide sur une surface. Le fluide est représenté sous forme de particules se déplaçant à la surface des objets en tenant compte de sa rugosité et de son orientation. Chaque particule peut absorber la matière soluble de la surface sur laquelle elle se trouve ou déposer la matière qu'elle contient. Ce modèle tient compte de la présence de sources d'eau responsables de l'apparition des particules, de la direction du vent dans la scène ainsi que de l'accessibilité au soleil pour évaluer l'évaporation. Ce modèle permet de générer des traînées plausibles à la surface d'objets et également de scènes complexes (voir figure 2.9).

Le dépôt de pollution contenu dans l'eau de pluie a été étudié par Mérillou et al. [MMG⁺10]. Une analyse géométrique de la surface est menée afin de calculer l'accessibilité à la pluie, la détection de zones géométriques où les écoulements d'eau seraient élevés ainsi que des zones concaves où l'eau s'écoule plus facilement. Un modèle analytique utilisant ces données est proposé pour calculer la quantité de pollution déposée à la surface à partir de ces données et de l'information sur la porosité locale de la surface.

2.1.2.8 Patine

La patine est un effet associé à certains métaux (cuivre, bronze) qui par interaction entre la surface et l'environnement change les propriétés de la dite surface pour former une couche protectrice du métal sous-jacent. Cet effet a été introduit en informatique graphique par Dorsey et Hanrahan [DH96] par une représentation de la surface comme une succession de couches sur laquelle différents opérateurs sont appliqués de manière séquentielle. Ces opérateurs peuvent définir la protection de la surface par dépôt d'impuretés, l'érosion de la surface par interaction chimique ou bien son polissage. Une grande variété de phénomènes liés à la formation de patine dans différents environnements peut être obtenue en fonction du séquençage de ces opérations. La visualisation du résultat est alors assurée via une BRDF issue du modèle de Kubelka–Munk [Kub48]. Un résultat de formation de patine par cette approche est visible figure 2.10.

Afin de simuler la patine d'objets enfouis sous le sol, Chang et Shih [CS00] ont proposé



FIGURE 2.9 – Images issues des travaux de Dorsey et al. [DPH96] montrant sur la gauche un objet 3D avant application de leur méthode et à droite le résultat de leur simulation d'écoulement et de dépôt de saleté à la surface.

l'utilisation d'un L-système pour modéliser les interactions entre la surface et le sol. Leur méthode utilise une carte de contrôle appelée "carte de tendance" permettant de modéliser différents type de sols / métaux et leurs interactions.

2.1.2.9 Corrosion

La corrosion d'un matériau est une altération de ses propriétés par réaction chimique avec un oxydant (Oxygène ou ions H^+). Cet effet provoque un changement de couleur du matériau, de ses propriétés mécaniques et provoque une perte de sa masse allant jusqu'à la disparition complète de l'objet attaqué.

Une explication du phénomène physique et un modèle simplifié sur une carte 2D permettant la simulation de l'apparition et l'évolution de la corrosion sur les métaux dans différentes atmosphères a été proposé par Merillou et al. [MDG01].

La modélisation de la corrosion dans l'eau de mer a été proposée par Chang et Shih [CS03] utilisant un L-système similaire à leur travail précédent [CS00] sur la formation de patine sous le sol. Un ensemble de règles régissant les interactions entre le métal et l'eau de mer tenant compte des courants marins permet la formation de rouille plausible.



FIGURE 2.10 – Séquence d’images illustrant l’évolution du processus d’apparition de patine sur une statue via la méthode de Dorsey et Hanrahan [DH96]. Images issues du livre Digital Modeling of Material Appearance [DRS07].

2.1.2.10 Dissolution

La dissolution est un processus permettant à la matière solide de changer de phase pour se lier à un solvant liquide. Le solvant naturel le plus courant est l’eau qui est responsable de la dissolution de sels minéraux contenus dans la roche ou du transport par les eaux pluviales de produits chimiques sur les surfaces par exemple.

Dorsey et al. [DEJ+99] ont modélisé les phénomènes de dissolution se produisant à l’intérieur des pores d’un objet par la simulation du transport de fluide dans les matériaux poreux. Le calcul de ce transport de fluide dans les matière poreuses permet la simulation du transport des sédiments à la surface et la modélisation du phénomène d’efflorescence. Cette méthode repose sur une simulation eulérienne des mouvements de l’eau dans des grilles 3D alignées avec la surface. Cette représentation de la surface et du volume sous-jacent permet en outre la modélisation des interactions sous-surfaciques de la lumière dans les roches.

Merillou et al. [MMGG12] ont proposé un modèle analytique ad hoc du transport de sels vers la surface de façades constituées de matière poreuse pour modéliser les vieillissement associés.

Le modèle de dissolution utilisant l’hydrodynamique des particules lissées de Jiang et al. [JSTZ13] tient compte de l’énergie issue du contact entre les particules de l’objet soluble et celles du solvant. Cette énergie est employée comme énergie d’activation de la réaction chimique de dissolution. Ils ont plus tard étendu leur modèle [JSZ15] pour

simuler l'érosion de matière. De plus une méthode d'échantillonnage de particules permet d'assurer un comportement réaliste de ces processus. Un exemple de dissolution utilisant leur approche peut être observé figure 2.11. Toutefois la masse de matière solide dissoute ou érodée n'est pas conservée. Le résultat de l'érosion notamment n'est pas réaliste sans cet aspect.

Une amélioration de l'échantillonnage des particules représentant le solide a ensuite été introduite à ce modèle [JSZ18]. Par l'ajout de la gestion de la température dans le processus de dissolution, la liquéfaction d'un objet sous son action a pu être simulée.



FIGURE 2.11 – Dissolution de pilules anti acide dans un verre d'eau simulée par le modèle de Jiang et al. [JSZ15].

2.1.2.11 Développement organique

Que ce soit par l'apparition de forêts, la croissance d'un champ d'herbe ou d'une plante ou encore le développement de lichens ou de champignons sur les surfaces, le développement organique est un phénomène omniprésent dans la nature.

Afin de générer de manière réaliste des environnements mettant en scène des plantes, la distribution de celles-ci dans l'espace doit être considérée. En effet dans la nature les variétés de plantes et d'arbres sont en concurrence et nécessitent d'avoir accès à plus ou moins de ressources (soleil, eau, etc.). De plus, il faut être capable de générer la géométrie propre à chacun des organismes.

Deussen et al. [DHL⁺98] ont proposé une suite d'outils pour permettre la modélisation de telles scènes. Leur méthode inclut la génération d'un terrain par bruit fractal, la génération d'une distribution d'espèces dans l'espace par des méthodes d'échantillonnage imitant la concurrence inter-espèces tout en prenant en compte l'humidité du terrain ainsi que la modélisation de la géométrie des plantes par L-System via les travaux de Prusinkiewicz [Pru98]. Une méthode d'instanciation approximée est également proposée

pour maintenir la diversité des modèles de plantes proposés tout en minimisant l'impact mémoire rendant possible le rendu de scènes contenant plus de 100000 modèles de plantes détaillées.

Lane et Prusinkiewicz [LP02] proposent une extension du modèle d'échantillonnage afin de considérer l'existence de groupes ou de communautés d'une même espèce. La combinaison de ces modèles permet la génération de forêts ou de champs plausibles.

Le développement de plantes sur les surfaces est également un phénomène courant. Hadrich et al. [HBDP17] ont proposé une méthode interactive de simulation du développement de plantes grimpanes. Leur approche représente les plantes comme un ensemble de particules anisotropes connectées entre elles qui tient compte de leur environnement (humidité, luminosité, vent). Une série d'opérations est rendue disponible à l'utilisateur afin de permettre le contrôle de l'évolution du système tels que le dépôt de graines, déplacement des branches, suppression et gestion de point d'accroche sur la surface de support. Cette méthode permet en outre d'animer le modèle et propose des résultats physiquement plausibles.

Les plantes ne sont pas les seuls organismes observables se développant dans la nature. Les champignons et les lichens possèdent une grande variété d'apparence et peuvent apparaître sur une large palette d'objets support (arbres, façades, aliments ...).

Desbenoit et al. [DGA04] proposent de simuler le vent et le flux d'eau à la surface des objets afin de modéliser l'apparition, la dispersion ou la disparition des spores du lichen. Le développement du lichen est alors simulé par une méthode appelée Open-DLA (Open Diffusion Limited Aggregation) en prenant en compte l'environnement (humidité, accessibilité au soleil) ainsi que la compétition de ressources. Le rendu est obtenu par instantiation des modèles de lichen.

La moisissure est également un phénomène impactant l'apparence des objets. Joseph et al. [JRB11] ont proposé une méthode afin de simuler le développement de moisissure des fruits par un algorithme de réaction-diffusion considérant la température ambiante, l'humidité, l'épaisseur de la peau du fruit et sa porosité. Cette simulation produit des résultats comparables aux résultats expérimentaux.

Des résultats issus de divers modèles sont illustrés dans la figure 2.12.

2.1.2.12 Conclusion

Les approches spécialisées proposent la simulation ou le calcul d'apparences propres à un phénomène particulier. Si certaines sont simples à paramétrer afin d'obtenir des résultats réalistes, elles possèdent de manière générale des paramètres empiriques non intuitifs. L'unité des paramètres non empiriques n'est pas toujours spécifiée ajoutant ainsi une autre couche de complexité. De plus, pour modéliser un même effet du vieillissement, un ensemble de paramètres différents est parfois employé.

Cette variété de paramètres rend difficile voire impossible l'interfaçage entre ces approches limitant les représentations d'effets du vieillissement à un unique phénomène. Les approches basées physique ont pour avantage de rendre quantifiables les processus impactant le changement d'apparence. Le résultat visuel est de fait également quantifiable.



FIGURE 2.12 – Différents effets liés au développement organique. De gauche à droite : Développement de plantes grimpantes, Hadrich et al. [HBDP17]; Formation et développement de lichen, Desbenoit et al. [DGA04]; Détérioration des fruits par apparition de moisissure, Joseph et al. [JRB11].

2.1.3 Approches multi-effets

Contrairement aux approches spécialisées qui cherchent à modéliser un processus particulier, les approches multi-effets reposent sur la simulation des processus communs à plusieurs effets de vieillissement. Cette catégorie d'approche plus coûteuse en temps de calcul permet néanmoins une évolutivité des processus générés et de leurs interactions.

Le vieillissement de la pierre est étroitement lié au comportement de l'eau autour et dans les pores de celle-ci, ainsi Dorsey et al. [DEJ+99] ont proposé une simulation des transports de matière par l'eau afin de représenter des effets très variés tels que l'efflorescence, le dépôt de pollution ainsi que le transport de rouille dans une roche ferrique. Pour se faire, des "dalles" (cube composé de voxels) sont disposées autour du maillage original de l'objet de sorte à englober ce dernier. Ces dalles doivent être connectées par leurs faces, la méthode requiert la création d'un quad-mesh de bonne qualité par l'utilisateur afin d'assurer son bon fonctionnement. Une fois ces dalles créées, les auteurs proposent d'utiliser la loi de Darcy [Dar56] pour simuler la pénétration de l'eau dans le médium. Une carte de mouillage modélisant la saturation en eau de la surface est utilisée pour représenter les interactions avec le monde extérieur. Les sédiments initialement présents dans la roche sont alors dissous puis transportés jusqu'à la surface. Cette méthode en plus de proposer un principe de fonctionnement basé physique est aussi l'une des premières à prendre en compte l'interaction de plusieurs phénomènes. En effet, le mouillage de la surface influence les mouvements d'eau dans le solide et de fait les sédiments transportés vers la surface. La représentation du modèle par des dalles volumiques et non par sa surface seule permet en outre de proposer un rendu réaliste tenant compte des interactions sous-surfaciques de la lumière.

Liu et al. [LZLW05] proposent de simuler le déplacement du fluide et de sédiments à la surface de l'objet en résolvant les équations de Navier-Stokes en 2D. Le volume de fluide absorbé par le matériau est alors calculé de manière analogue à Dorsey et al. [DEJ+99]. Leur méthode permet la visualisation temps-réel d'effets variés tels que la dissolution de sédiments, l'érosion ainsi que l'absorption de l'eau par des surfaces poreuses. Le modèle ne prend toutefois pas en compte le transport des sédiments à l'intérieur des pores et se

limite aux interactions surfaciques.

Une généralisation de la méthode de Dorsey et al. [DPH96] a été proposée par Chen et al. [CXW+05]. De manière analogue au photon-tracing [Jen96], cette méthode simule le déplacement de particules appelées γ -tons dans l'espace, leurs interactions avec la surface γ -réflectance et leur transport dans la scène γ -ton-tracing. Les différentes interactions entre les γ -tons initialement émis depuis diverses sources spécifiées par l'utilisateur et la surface des objets permettent de générer l'apparence visuelle finale d'une scène. Par le transport de matière il est ainsi possible de modéliser des coulées ou des projections de matières. Outre le transport des différents effets, leurs interactions sont également permises par ce modèle. Ainsi la présence d'humidité dans les γ -tons peut interagir avec le fer d'un matériau formant de la rouille ou bien encore le développement organique sur de la terre. Les phénomènes représentés, leurs interactions et leurs γ -réflectances sont définies par l'utilisateur et reposent sur la perception des différents effets recherchés par celui-ci. Si cette approche n'est pas basée physique, elle est largement utilisée pour le niveau de contrôle artistique qu'elle offre. Gunter et al. [GRG12] ont tiré profit des capacités de calculs des GPU récents pour permettre un γ -ton-tracing en temps interactif. Un modèle alternatif de diffusion gaussien des particules et de détérioration basé sur une fonction cardioïde améliorant le réalisme des processus impliquant des traînées de matières a été introduit par Taka et al. [TPD+17].

En effet, que ce soit pour modéliser les processus chimiques dans les matériaux poreux, ou le résultat de l'érosion d'une surface ou encore les contraintes mécaniques sur un objet menant à sa fracture, les matériaux présents sous la surface jouent un rôle majeur. Cutler et al. [CDM+02] proposent un langage de description afin de générer la structure interne des objets comme une succession de couches. Un maillage ainsi qu'une description des différentes couches externes et internes de l'objet sont fournis par l'utilisateur. Un maillage tétraédrique de l'objet est généré à partir de ces informations. Une méthode de subdivision de ce maillage à l'interface entre les différentes couches est proposée afin de préserver un niveau de détail élevé. Par la nature du maillage généré, il est possible d'exécuter des simulations physiques complexes basées sur les éléments finis ou via des modèles particuliers. Des phénomènes complexes peuvent alors être modélisés tels que les déformations, les fractures, le développement de matière organique à la surface mais également de l'édition manuelle.

Munoz et al. [MPBM+18] ont proposé une méthode permettant d'estimer le dépôt de particules polluantes à la surface des bâtiments d'une ville en tenant en compte des mouvements du vent, de l'insolation et du lavage des surfaces par l'eau de pluie. Le vent est pré-calculé par la méthode de Lattice-Boltzmann afin de connaître la distribution des particules polluantes dans la ville. L'insolation annuelle est pré-calculée via le modèle de Munoz et al [MPBM+17]. Le rendu des façades et leur apparence polluée peut alors s'effectuer par un calcul dans l'espace écran en temps réel, tirant profit du pré-calcul de la distribution des particules, de l'insolation ainsi que de l'accessibilité de la surface à la pluie obtenue par le calcul de l'occlusion ambiante. Par nature cette méthode permet, outre le rendu de villes polluées, de visualiser des façades mouillées par l'eau de pluie.

L'interaction entre l'érosion et la formation de végétation a été étudiée par Cordonnier et al. [CGG+17]. Le terrain est représenté par une carte de hauteur des couches représentant la végétation, les sédiments et la roche brute. Un modèle stochastique du transport d'eau, de sédiments ainsi que de la formation, du développement et de l'extinction de la végétation est évalué sur la carte de hauteur. Ce modèle

phénoménologique permet le transport de sédiments issus de l'érosion ainsi que la transformation de ces sédiments en matière exploitable par la végétation pour prendre racine. La végétation à son tour permet de réduire les effets de l'érosion. Cette représentation simplifiée des phénomènes physiques permet la visualisation de l'évolution d'un terrain sur plusieurs siècles et génère des résultats plausibles en quelques secondes.

Wojtang et al. [WCMT07] ont proposé un modèle d'érosion de dissolution et de corrosion acide d'objets solides sous l'action d'un fluide. Dans cette méthode, le fluide est simulé en utilisant l'hydrodynamique des particules lissées. Les interactions entre le solide et le fluide permettent l'échange de matières via la simulation des processus d'érosion, de transport et de dépôt. La phase solide est représentée par une grille régulière pour chaque objet dont la surface est obtenue via la méthode des surfaces de niveau. La perte ou le gain de masse du solide est repercuté par advection de cette surface.

La méthode de calcul numérique "Material Point Method" ou MPM connaît un intérêt croissant dans le domaine de la simulation. Cette approche repose sur une modélisation du continuum de la matière en particules lagrangiennes discrètes. Le calcul des termes des équations aux dérivées partielles que l'on cherche à résoudre est effectué sur un maillage sous-jacent (grille régulière). Gao et al. [GPH⁺18] ont proposé une simulation basée sur cette méthode afin de modéliser l'interaction entre des matériaux granulaires et les fluides (eau ou air). Le transport de ces matériaux granulaires et leurs interactions complexes avec le fluide sont rendus possible par cette méthode.

plusieurs de ces approches sont illustrées dans la figure 2.13.

Les approches généralistes tendent à simuler des processus élémentaires ayant pour conséquence le changement d'apparence des objets. Certains de ces changements d'apparence ayant des causes communes, la simulation des processus élémentaires permet la simulation conjointe de plusieurs effets du vieillissement.

La présence ainsi que les mouvements de l'eau dans l'environnement sont les processus impactant la plus grande variété d'effets du vieillissement. Il convient donc de les étudier afin de modéliser les effets qui en découlent.

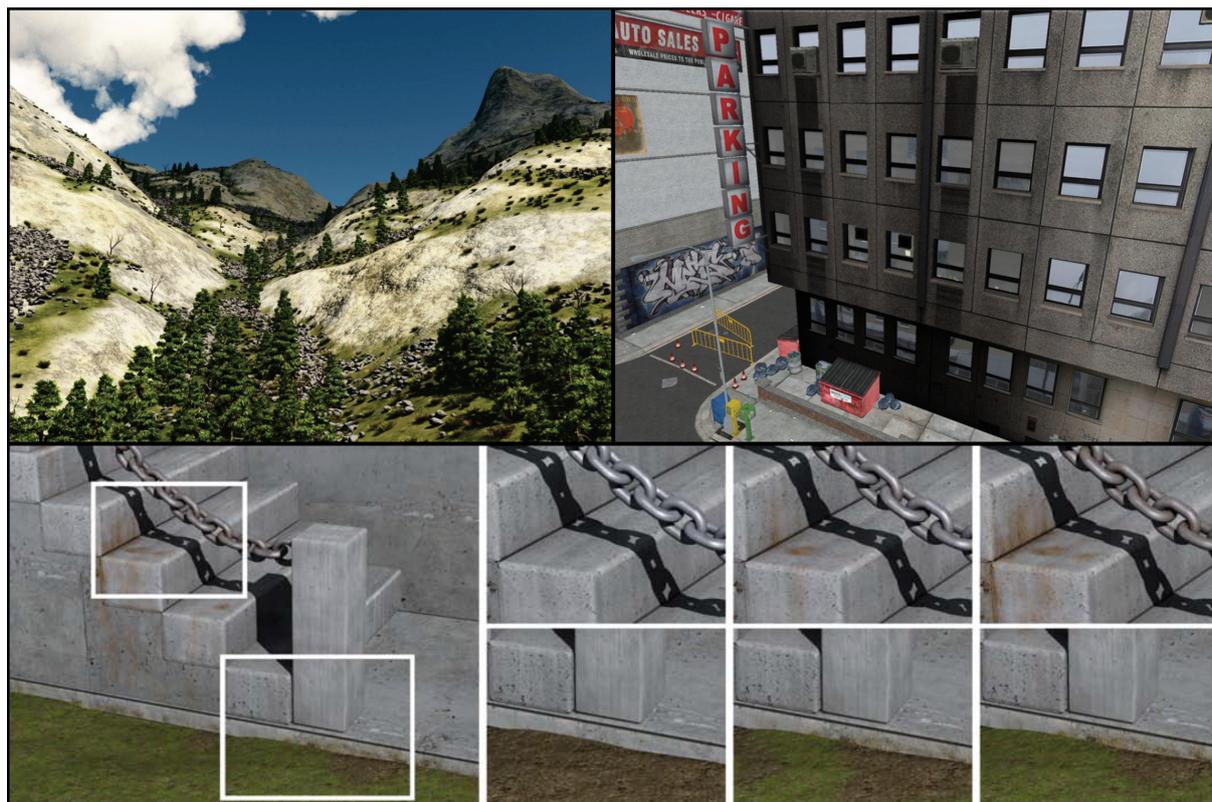


FIGURE 2.13 – **Haut gauche** : Modélisation d'un terrain [CGG⁺17]. **Haut droite** : Transport et dépôt de pollution [MPBM⁺18]. **Bas** : Interaction de phénomènes par la méthode des γ -ton [CXW⁺05].

2.2 Hydrodynamique des particules lissées

Puisque les cycles de mouillage et séchage sont impliqués dans une large variété d'effets de vieillissement des objets, la simulation du fluide présent dans la scène, que ce soit sous forme de fluide libre ou bien de fluide dans l'espace des pores, doit être étudiée.

Les approches particulaires et notamment l'hydrodynamique des particules lissées sont des approches répandues pour la simulation de fluides et sont d'ores et déjà employées dans de nombreuses méthodes de vieillissement (érosion, dépôt de matière, dissolution, mouillage etc...).

Initialement développée dans le domaine de l'astrophysique, l'hydrodynamique des particules lissées (ou SPH) a été introduite en informatique graphique par Muller et al. [MCG03] dans le cadre de la simulation de fluide. Cette méthode de calcul lagrangienne repose sur une discrétisation du continuum de la matière en un ensemble de particules discrètes. Cette représentation a pour avantage, comparée aux approches par éléments finis (FEM), de ne pas nécessiter de maillages pour évaluer l'évolution du système ce qui permet une modélisation par nature des surfaces libres. Dans ce système, l'évolution d'une particule n'est définie que par ses interactions avec les autres particules situées dans un voisinage restreint, il n'est donc pas nécessaire de définir un domaine de simulation fixe et peut en conséquence représenter des formes géométriques complexes et éparées avec un impact mémoire raisonnable.

Le concept de SPH peut être compris comme une discrétisation d'un champ de quantité dans l'espace par des particules ainsi qu'une série d'opérateurs différentiels (gradient, divergence, rotationnel ...). Chaque particule contient les informations des différentes quantités nécessaires à la simulation du phénomène étudié. La continuité des champs correspondants à ces quantités est assurée par une fonction de noyau noté $W(r, h)$ ou $r = \|\mathbf{x}_j - \mathbf{x}\|$ est la distance entre l'échantillon de position \mathbf{x} et la position \mathbf{x}_j de la particule j et h est la longueur du support compact de la fonction.

Le comportement d'un fluide newtonien est décrit en mécanique des fluides par les équations de Navier-Stokes. L'équation de conservation du moment simplifiée pour les fluides incompressibles (tel que l'eau) s'exprime :

$$\rho\left(\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v}\right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{v} + \mathbf{f}^{\text{external}} \quad (2.1)$$

Où $\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t}$ représente l'accélération du fluide, $\mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v}$ est le terme de convection, ∇p est le gradient de pression et $\mu \nabla^2 \mathbf{v}$ modélise la viscosité du fluide. Le terme $\mathbf{f}^{\text{external}}$ représente la somme des forces extérieures appliquées sur le fluide (gravité, vent ...). Ces dernières peuvent être les forces appliquées à la surface (tension de surface, interactions avec d'autres surfaces) ou encore l'attraction gravitationnelle (g). La résolution de ces équations permet l'évaluation de l'évolution de la vitesse du fluide dans le temps. Comme mentionné plus haut, la conservation de la masse est garantie par le modèle particulaire ainsi la conservation du moment est la seule équation à considérer pour simuler un fluide dans une simulation lagrangienne.

Dans un système particulaire, puisque les déplacements des quantités de matière sont gérés par celui des particules, l'évaluation de la convection $\mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v}$ peut être omise. La partie gauche de l'équation peut alors être simplifiée par $\rho \frac{D\mathbf{v}}{Dt}$:

$$\frac{D\mathbf{v}}{Dt} = -\frac{1}{\rho}(\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{v} + \mathbf{f}^{\text{external}}) \quad (2.2)$$

Afin de permettre la simulation des équations de Navier-Stokes en utilisant l'hydrodynamique des particules lissées, un certain nombre d'opérateurs doit être défini sur les champs de quantité.

La méthode de simulation de fluide décrite par Muller et al. [MCG03] faisant suite à celle de Monaghan [Mon94] décrit une particule d'indice i par sa position \mathbf{x}_i , sa masse m_i , sa densité ρ_i , sa pression p_i , son accélération \mathbf{a}_i , sa vitesse \mathbf{v}_i ainsi que les diverses forces qui s'exercent sur elle tel que la force exercée par la pression du fluide $\mathbf{f}_i^{\text{pressure}}$, sa viscosité $\mathbf{f}_i^{\text{viscosity}}$ et la tension de surface $\mathbf{f}_i^{\text{surface}}$.

Soit A une quantité quelconque dont on souhaite modéliser le continuum dans l'espace, i et j des indices de particules et \mathbf{x} une position quelconque de l'espace, la valeur du champ A à la position \mathbf{x} peut être obtenue via l'équation suivante :

$$A(\mathbf{x}) = \sum_j A_j \frac{m_j}{\rho_j} W(\mathbf{x}_j - \mathbf{x}) \quad (2.3)$$

La densité de matière ρ en un point \mathbf{x} s'exprime :

$$\rho(\mathbf{x}) = \sum_j m_j W(\mathbf{x}_j - \mathbf{x}) \quad (2.4)$$

La densité d'une particule i est : $\rho_i = \rho(\mathbf{x}_i)$. La figure 2.14 illustre le résultat de l'équation 2.4.

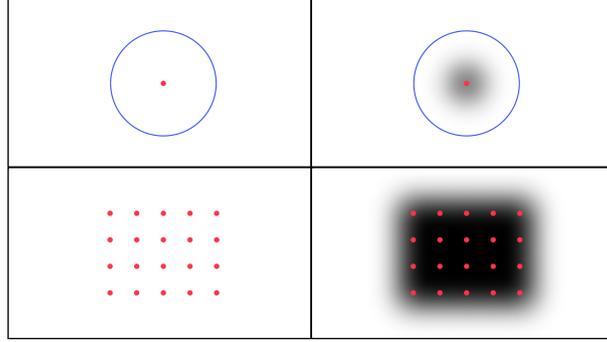


FIGURE 2.14 – Calcul de densité des particules. **Haut à gauche** : centre d'une particule en rouge et support du noyau h en bleu. **Haut à droite** : visualisation de la fonction de densité inversée $1.0 - \rho(\mathbf{x})$. **Bas à gauche** : centre d'un ensemble de particules en rouge. **Bas à droite** : visualisation de la fonction de densité inversée de cet ensemble.

Le gradient d'un champ A pour une particule i s'obtient de la manière suivante :

$$\nabla A_i = \sum_j \frac{m_j}{\rho_j} A_{ij} \nabla W(\mathbf{x}_j - \mathbf{x}) \quad (2.5)$$

Le gradient de pression ∇p de l'équation (2.1) modélise le fait que le fluide tend à se déplacer des zones de forte pression vers les zones de plus basse pression. Ainsi en stockant dans les particules un champ de pression p il est possible d'obtenir ce gradient directement.

L'opérateur laplacien d'un champ A noté $\nabla^2 A$ représente la divergence du gradient $\nabla \cdot (\nabla A)$. Il s'obtient pour une particule i par l'équation suivante :

$$\nabla^2 A_i = \sum_j \frac{m_j}{\rho_j} A_{ij} \frac{2 \|\nabla W(\mathbf{x}_j - \mathbf{x}_i)\|}{\|\mathbf{x}_j - \mathbf{x}_i\|} \quad (2.6)$$

Une itération sur un pas de temps Δt d'un simulateur de fluides faiblement compressible est décrit par l'algorithme 1.

Avec ν la viscosité cinématique du fluide, \mathbf{v}_i^* une variable temporaire pour stocker la vitesse et $\mathbf{f}_i^{\text{ext}}$ la somme des forces externes appliquées au fluide (comme la gravité $\rho \mathbf{g}$). On distingue quatre étapes que sont le calcul de la densité des particules, le calcul des forces extérieures appliquées sur le fluide, le calcul de la force exercée sur les particules par la pression du fluide et pour finir la mise à jour de la vitesse des particules et de leur position. En pratique, le calcul de la force appliquée sous l'action de la pression $\mathbf{f}_i^{\text{pression}}$ est calculé par le solveur de pression. Celui-ci calcule en général directement l'accélération \mathbf{a}_i^p des particules sous l'action de cette force. L'utilisation d'une équation d'état permet la conversion de la densité ρ_i des particules en pression p_i .

Dans la suite de cette section nous aborderons différentes fonctions de noyaux et leurs principes, l'optimisation du parcours des particules voisines par des algorithmes de recherche de voisinage, les solveurs de pression, la gestion des frontières pour la prise en

Algorithm 1 Boucle de simulation d'un solveur élémentaire de fluide faiblement compressible

```

1: for each particule  $i$  do
2:   Reconstruire la densité  $\rho_i$  à la position  $x_i$  avec l'équation (2.4)
3: end for
4: for each particule  $i$  do
5:   Calculer  $\mathbf{f}_i^{\text{viscosity}} = m_i \nu \nabla^2 \mathbf{v}_i$  avec l'équation (2.6)
6:    $\mathbf{v}_i^* = \mathbf{v}_i + \frac{\Delta t}{m_i} (\mathbf{f}_i^{\text{viscosity}} + \mathbf{f}_i^{\text{ext}})$ 
7: end for
8: for each particule  $i$  do
9:   Calculer  $\mathbf{f}_i^{\text{pressure}} = -\frac{1}{\rho} \nabla p$  en utilisant l'équation d'état (2.14) et l'équation (2.5)
10: end for
11: for each particule  $i$  do
12:    $\mathbf{v}_i = \mathbf{v}_i^* + \frac{\Delta t}{m_i} \mathbf{f}_i^{\text{pressure}}$ 
13:    $\mathbf{x}_i = \mathbf{x}_i + \Delta t \mathbf{v}_i$ 
14: end for

```

compte de solides dans les simulations pour conclure sur l'utilisation du SPH dans le cadre du vieillissement et plus spécifiquement des matériaux poreux. Nous ne traiterons pas de la viscosité des fluides ni de la vorticité puisqu'ils ne font pas partie des procédés  etudi es dans cette thèse.

2.2.1 Les fonctions de noyau

Dans la littérature sur les SPH, des fonctions de noyau alternatives à la fonction Cubic-Spline ont été proposées pour répondre à des cas d'utilisations spécifiques. Tous les noyaux W doivent toutefois répondre à certaines contraintes. Lorsque le support de la fonction h tend vers 0, le noyau doit tendre vers une fonction σ de Dirac. Il doit être symétrique et ne dépendre que de $r = \|\mathbf{x}_j - \mathbf{x}\|$ et de h et ne prendre pour valeur que des nombres positifs. De plus, le noyau doit être normalis e de tel sorte que l'aire sous sa courbe soit 1 c'est à dire $\int_{\mathbb{R}^d} W(r', h) dv' = 1$ avec d la dimension du noyau et dv' la variable d'intégration du volume correspondant à r' . Enfin il doit être défini sur le support compact h à savoir posséder une valeur nulle lorsque $r \geq h$.

Toutes les fonctions de noyaux contenues dans cette thèse seront exprimées pour des espaces à 3 dimensions. La fonction de noyau cubic-spline est la plus générale. Introduite par Monaghan [Mon92], elle permet entre autre d'échantillonner le continuum des champs dans l'espace. Elle s'exprime comme suit :

$$W(r, h) = \frac{8}{\pi h^3} \begin{cases} 6d^3 - 6d^2 - 1 & , 0 \leq d \leq 0.5 \\ 2(1 - d)^3 & , 0.5 < d < 1.0 \\ 0 & , d \geq 1.0 \end{cases} \quad (2.7)$$

$$\text{avec } d = \frac{r}{h} \quad (2.8)$$

Et son gradient est le suivant avec $\mathbf{r} = \mathbf{x}_j - \mathbf{x}_i$:

$$\nabla W(\mathbf{r}, h) = \frac{48}{\pi h^3} \frac{\mathbf{r}}{\|\mathbf{r}\| h} \begin{cases} d(3d-2) & , 0 < d \leq 0.5 \\ (-1+d)(1-d) & , 0.5 < d < 1.0 \\ 0 & , d \geq 1.0 \end{cases} \quad (2.9)$$

Afin d'éviter le calcul de la racine carré lors du calcul de la distance r entre deux particules, Muller et al. [MCG03] introduisent la fonction "Poly6" (2.10), une version alternative au noyau Cubic-spline utilisant directement le terme r^2 .

$$W_{\text{poly6}}(r, h) = \frac{315}{64\pi h^9} \begin{cases} (h^2 - r^2)^3 & , 0 \leq r \leq h \\ 0 & , \text{autrement} \end{cases} \quad (2.10)$$

De nos jours, l'impact mémoire lié au stockage du pré-calcul d'un noyau est négligeable. En pratique un tableau 1D est stocké, définissant toutes les valeurs du noyau pour des valeurs de r comprises entre 0 et h .

Le noyau Poly6 tend à générer des groupements de particules lorsqu'il est employé dans le calcul du gradient de pression. Muller et al. [MCG03] ont introduit un noyau spécialisé dit "Spiky" (2.11) permettant d'éviter ce problème et améliorer la stabilité ainsi que la convergence du calcul de gradient de pression :

$$W_{\text{spiky}}(r, h) = \frac{15}{\pi h^6} \begin{cases} (h-r)^3 & , 0 \leq r \leq h \\ 0 & , \text{autrement} \end{cases} \quad (2.11)$$

Pour améliorer la stabilité dans le calcul de la viscosité, un noyau spécifique a également été proposé par Muller et al. [MCG03] :

$$W_{\text{viscosity}}(r, h) = \frac{15}{2\pi h^3} \begin{cases} -\frac{r^3}{2h^3} + \frac{r^2}{h^2} + \frac{h}{2r} - 1 & , 0 \leq r \leq h \\ 0 & , \text{autrement} \end{cases} \quad (2.12)$$

D'autres noyaux ont été proposés pour des cas d'utilisations spécifiques. Akinci et al. [AAT13] ont introduit un noyau spécifique à l'adhésion des particules aux surfaces et un autre à la cohésion des particules entre elles. L'utilisation d'un noyau anisotrope dans le cadre de la reconstruction de la surface du fluide a été proposée par Yu et Turk [YT10].

2.2.2 Recherche de voisinage

Afin d'évaluer les équations (2.3), (2.5) et (2.6), il est nécessaire de parcourir l'ensemble des particules de la simulation. Cette opération a une complexité $O(n^2)$ pour n particules. Or, on peut noter que les noyaux sont définis sur un support fini de rayon h et qu'ils doivent avoir une valeur nulle lorsque la distance entre deux particules est supérieure à h . Il est possible de tirer profit de cette propriété des noyaux pour simplifier la recherche de voisinage par l'utilisation d'une grille régulière.

Dans cette structure, chaque particule est associée à une case d'une grille régulière dont chaque case a un côté de longueur h . Trouver les particules dont la distance à un point x est inférieure à h se fait en trouvant la case à laquelle appartient le point x et

transformation des coordonnées d'une case (x, y, z) en un entier :

$$\text{hash}(x, y, z) = ((x \ p1) \ \mathbf{xor} \ (y \ p2) \ \mathbf{xor} \ z \ (p3) \ \mathbf{xor}) \ \mathbf{mod} \ n \quad (2.13)$$

Avec $p1$, $p2$ et $p3$ de grands nombres premiers, les valeurs habituellement utilisées de ces nombres sont (73856093, 19349663, 83492791).

De manière générale, une particule dans une simulation SPH possède entre 30 et 50 particules dans son voisinage pour garantir un bon échantillonnage. Toutefois le nombre de particules associées à une case de la table de hachage n'est pas nécessairement compris dans cet ordre de grandeur. En effet, il est possible que plusieurs cases de la grille régulière soient associées à une unique case de la table de hachage. On appelle cela une collision. Teschner et al. [THM⁺03] propose ainsi une méthode afin de détecter et de pallier ces collisions. De plus, ils proposent de représenter la table d'indice par des listes chaînées de blocs de n particules. Cette représentation permet d'éviter de dépasser la capacité de la table d'indice ou de ne pas pouvoir tenir compte de l'ensemble des particules en ajoutant des blocs bout à bout.

Par la suite, Ihmsen et al. [IABT11] ont proposé des améliorations variées afin de permettre une implémentation plus efficace et parallélisable : tri des particules, ordre de parcours de la grille lors de sa construction, pré-calcul des paires de particules avant évaluation de la dynamique, etc... Leur modèle de construction et de parcours du voisinage améliorent significativement les performances comparées aux approches précédentes pour les architectures multi-coeurs.

Les fonctions de noyaux requièrent qu'un nombre suffisant de particules soient présentes dans leurs voisinages afin de garantir une évaluation correcte des champs. Pour le noyau Cubic-Spline il est entendu que le nombre de particules participantes doit être compris entre 30 et 50. Toutefois la prise en compte d'un nombre de particules trop important dans un voisinage soulève un problème de performance lors de la construction de la liste des paires de particules voisines et une augmentation de la mémoire nécessaire à son stockage. En ce sens Winchenbach, Hochstetter et Kolb [WHK16] ont introduit une méthode de création de liste de voisinage permettant de contraindre le voisinage à nombre maximal de particule. Leur approche repose sur une adaptation de la taille du support des noyaux de chaque particule afin de respecter cette contrainte. Cette approche réduit significativement le temps de calcul des simulations.

Si d'autres méthodes de recherche de voisinage existent dans la littérature, kd-tree, Octree, Ball-tree, l'emploi de table de hachage et de grilles régulières permet une implémentation GPU efficace et reste donc la méthode la plus couramment utilisée pour ce type de simulations.

2.2.3 Solveur de pression

Certains fluides tels que l'eau n'exhibent aucune variation de volume durant leur évolution dans l'espace. Le terme $-\frac{1}{\rho}\nabla p$ de l'équation de Navier-Stokes pour les fluides incompressibles (equation 2.2) indique que les fluides se déplacent depuis les zones de fortes pressions vers les zones de faibles pressions. Dans le cas des fluides incompressibles, c'est ce terme qui garantis la conservation du volume et contraint la densité du fluide à rester fixe.

La déviation du volume, autrement dit une représentation de la variation entre le volume du fluide par rapport à son volume au repos peut être modélisée par une équation d'état tel que proposé par Muller et al. [MCG03]. Cette équation (2.14) permet de transformer cette déviation en une pression utilisable par notre solveur :

$$p = k(\rho - \rho_0) \quad (2.14)$$

Où p est la pression, k est une constante dépendant de la température, ρ est la densité du fluide, ρ_0 est la densité du fluide au repos (exemple : $997kg/m^3$ pour l'eau). Cette formulation pose un problème pour les particules proches de la surface puisque leur densité ρ_i est sous évaluée à cause d'une carence en particules voisines. Pour pallier ce problème, le terme $(\rho - \rho_0)$ est remplacé par d'autres formes tels que : $\max(\rho_i - \rho_0, 0)$ ou $\max(\frac{\rho_i}{\rho_0} - 1, 1)$.

Le calcul du gradient de pression peut alors être évalué via l'équation (2.5) et appliqué comme accélération aux particules. Toutefois cette approche ne garantit pas l'incompressibilité du fluide dans son ensemble. Becker et al. [BT07] utilisent l'équation d'état de Tait paramétrée en fonction de la vitesse maximum du fluide dans la scène afin de limiter la compressibilité du fluide sans la prévenir intégralement.

Le calcul de la fonction de pression de Poisson cherche à donner aux particules une accélération due à la pression de sorte qu'après advection le fluide soit non comprimé. Autrement dit pour que la densité de chaque particule soit égale à la densité du fluide au repos. Un solveur de pression doit en plus calculer ces accélérations de tel sorte que les changements de vitesses des particules de l'ensemble du système soient minimales. En ce sens, les solveurs de ce type sont plus coûteux en calcul que les solveurs basés sur les équations d'état.

Pour résoudre ce problème, le solveur PCISPH (Predictive-Corrective Incompressible SPH) introduit par Solenthaler et Pajarola [SP09] calcule la pression des particules de telle sorte que la densité du fluide après advection soit celle du fluide au repos.

L'algorithme prédit dans un premier temps la position des particules après advection par leur vitesse. La densité des particules est alors calculée depuis la position prédite puis l'erreur de cette densité est calculée. La pression est alors calculée afin de minimiser cette erreur après advection par le gradient de pression. Ces étapes sont alors répétées jusqu'à ce que l'erreur de densité de l'ensemble des particules soit suffisamment faible. Cette approche permet la modélisation de fluide incompressible réaliste avec un impact mémoire faible comparé à l'implémentation par équation d'état (seule la position et la pression prédites ont besoin d'être stockés par particule).

Le solveur IISPH (Implicit Incompressible SPH) [ICS+14] résout par itération successive un système d'équations linéaires liant l'accélération par la force de pression et l'erreur de pression après advection.

Le solveur DFSPH (Divergence Free SPH) introduit par Bender et Koschier [BK15] minimise par itération successives la divergence du champ de vitesse et l'erreur du champ de densité des particules permettant de renforcer l'incompressibilité du fluide et la stabilité de la simulation. Malgré les calculs supplémentaires requis pour garantir une divergence nulle du fluide, le gain de stabilité permet de faire évoluer le système avec des pas de temps plus élevés. Cela permet généralement un gain de performances comparé aux approches basées uniquement sur la pression telles que PCISPH ou au IISPH.

2.2.4 Gestion des frontières

La gestion des frontières, autrement dit l'interaction entre la phase fluide et la phase solide peut être gérée par l'utilisation de particules fluides "statiques" pour représenter l'objet solide.

La manière d'échantillonner l'objet peut introduire des défauts ou des discontinuités de densité à la surface dues à un trop faible nombre de particules dans le voisinage. Pour pallier ce problème, Akinci et al. [AIA⁺12] ont introduit l'utilisation d'un terme de correction de densité des particules de frontière pour s'assurer que leur densité au niveau de la surface des objets soit correcte. Leur approche permet la représentation du solide par une couche unique de particules disposées à la surface des objets solides tel qu'illustré dans la figure 2.17.

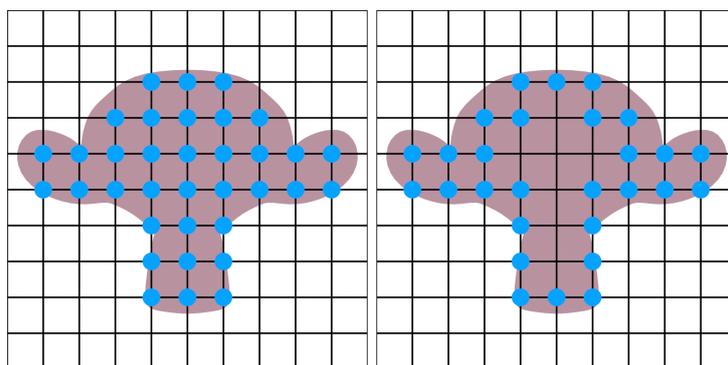


FIGURE 2.17 – Les objets solides peuvent être approximés via des particules disposées dans l'intégralité de leur volume (à gauche) ou bien uniquement à proximité de leur surface (à droite).

D'autres approches utilisant des maillages, des fonctions de distances ou encore des cartes généralisées (G-carte) ont été proposées pour modéliser les surfaces solides et les interactions avec le fluide.

2.2.5 Applications et limitations

Les matériaux poreux ont la capacité d'interagir avec les fluides en les absorbant dans leurs pores. Lenaert et al. [LAD08] ont proposé un modèle d'interaction pour modéliser ce processus. La pénétration de l'eau dans la matière poreuse est calculée via l'équation de Darcy [Dar56] et l'équation d'état de Tait pour modéliser la pression du fluide capturé comme fonction de la saturation des pores de manière similaire à [DEJ⁺99]. En plus de modéliser le transport d'eau dans les pores, la déformation d'objets élastiques influencée par la saturation des pores est introduite. Ce modèle permet l'animation du mouillage, de la déformation et de l'essorage de l'eau par compression de l'objet élastique.

Muller et al. [MSKG05] ont proposé de modéliser l'interaction entre plusieurs fluides dans une même simulation. Leur modèle permet de modéliser les forces exercées à la frontière entre deux fluides. Le calcul des forces exercées par les fluides à leur frontière commune permet de visualiser des phénomènes d'interactions complexes tels que le comportement des fluides d'une lampe à lave. La gestion de particules d'air exclusivement à la frontière du fluide rend l'interaction air-solide calculable sans avoir à remplir l'espace de particules d'air.

Plus récemment, Ren et al. [RXL21] ont publié un modèle de simulation unifié pour la modélisation d'interactions de plusieurs fluides et de matières poreuses. Leur modèle permet de gérer des fluides de viscosité différentes au sein d'un même objet poreux. De plus, une méthode permettant de s'affranchir de la suppression ou de la création de particules lors de l'absorption ou l'égouttement du fluide est introduite par l'utilisation de phases virtuelles permettant aux particules de changer de comportement au cours de la simulation.

L'hydrodynamique des particules lissées a été utilisée dans de nombreux cas de figures : de la simulation de fluides à la modélisation du comportement de matériaux élastiques et de l'interaction entre ces deux processus. La représentation du continuum de matière par un ensemble de particules discrètes possède l'avantage de représenter des surfaces libres de manière naturelle sans avoir à gérer explicitement les variations de géométrie importante par la reconstruction d'un maillage. De plus, une majorité des approches utilisant les SPH a l'avantage de n'avoir qu'à évaluer les phénomènes localement dans l'espace et de ne nécessiter qu'un voisinage restreint. Cette propriété du modèle est un atout pour son calcul puisqu'il peut être dans un grand nombre de cas parallélisé directement. Si il existe des algorithmes de simulation de fluide via SPH sur GPU, tous ne sont pas facilement applicables sur ce matériel.

Les phénomènes de vieillissement impactent tous les aspects des objets, de leur couleur à leur géométrie. L'hydrodynamique des particules lissées permet de discrétiser via des particules, des champs de matière, leur répartition spatiale, les interactions entre différentes phases fluides et solides, le comportement réaliste du fluide et les déformations d'objets élastiques. Ce système est donc un choix pertinent pour modéliser le processus de changement d'apparence de la matière.

Un état de l'art sur les modèles de simulation de fluide reposant sur l'hydrodynamique des particules lissées a été proposé par Koschier et al. [KBS19].

2.3 Conclusion

Les modèles généralistes permettent, par la modélisation des causes des différents effets du vieillissement, de modéliser des phénomènes plus complexes et leurs intrications. L'environnement d'un objet est un des piliers dans la compréhension de son évolution dans le temps car l'environnement guidera en partie les différents processus. L'eau est un des éléments environnementaux jouant un rôle clé dans les causes des effets du vieillissement car elle a un rôle abrasif (érosion, réactions chimiques), de solvant (dissolution), de méthode de transport et à plus court terme elle impacte l'apparence de la surface des objets par le mouillage ou le séchage de leur surface. La présence, les mouvements et la quantité d'eau dans une scène et interagissant avec les objets sont un facteur clé dans la modélisation des effets du vieillissement. L'hydrodynamique des particules lissées est une méthode de simulation largement étudiée en informatique graphique et offre des garanties fortes quant à la conservation de la masse de fluide présente dans une simulation. Les matériaux poreux interagissent directement avec l'eau présente dans une scène par des échanges de matière et de sédiments fréquents. Les interactions entre surface solide et fluide des matériaux, le comportement du fluide externe et interne aux matériaux poreux ainsi que le transport de sédiments dans le fluide, les contraintes environnementales (insolation ... etc) sont autant de facteurs à considérer pour proposer une modélisation des causes du vieillissement.

Chapitre 3 :

Simuler le changement d'apparence

3.1 Introduction

Comme vu précédemment, le changement d'apparence est directement lié au transport de matière dans l'environnement. Bien que certaines techniques aient étudié le flux d'eau dans les matériaux poreux ou encore le transport de matières dans le cadre de l'érosion ou de la dissolution, peu de méthodes ont abordé le transport de matières dans les pores d'un matériaux. Or ce processus est le pilier du changement d'apparence des objets. Ce transport est principalement lié aux mouvements du vent et de l'eau qui dans la nature emportent avec leurs mouvement des quantités de matière. Dans ce chapitre nous allons étudier le modèle que nous avons développé basé sur la méthode de l'hydrodynamique des particules lissées (Smooth particle hydrodynamics en anglais ou SPH) afin de simuler ces transports de matières dus aux mouvements de l'eau intérieurs et extérieurs aux matériaux poreux.

Dorsey et al. [DRS07] ont classifié les processus impactant l'apparence d'un objet en trois catégories : mécaniques, chimiques et biologiques. Puisque chaque processus peut affecter plusieurs propriétés du matériau dont est composé l'objet, Merillou et Ghazanfarpour [MG08] ont proposé une classification phénoménologique de ces processus. De manière analogue, nous avons identifié que la plupart des phénomènes changeant l'apparence des objets sont dus à l'interaction simultanée de processus élémentaires. En se basant sur ces précédents travaux nous avons mis en avant un ensemble de processus élémentaires pour la modélisation du vieillissement.

Dépôt : Le dépôt est le processus suivant lequel de la matière est laissée à la surface d'un objet suite à son interaction avec un fluide transportant des particules. Ce dépôt recouvre la surface initiale qui impacte l'albedo, la géométrie et les propriétés physiques de l'objet. Ce processus peut à terme créer des volumes de matière solide durable ou bien être totalement retiré de la surface par des interactions futures avec du fluide. Voir **A** dans la figure 3.6. Des photographies d'effets mettant en oeuvre ce processus élémentaire peuvent être observées figure 3.1.

Dissolution : Lorsqu'un objet interagit avec un solvant la matière peut alors changer de phase et se disperser dans le fluide. Cette réaction affecte la géométrie de la surface mais aussi la couleur et les propriétés d'absorption ou de diffusion lumineuse du solvant. Voir **B** dans la figure 3.6.

Erosion : L'érosion est un concept générique qui englobe les altérations de la surface d'un solide par interaction avec un fluide. Elle peut être la conséquence directe d'une dissolution ou bien liée à l'interaction mécanique entre la surface d'un objet et le fluide. Dans la suite de ce document nous considérons l'érosion comme une interaction purement mécanique. Voir **C** dans la figure 3.6.

Réactions chimiques : Une réaction chimique se produit lorsque des réactifs interagissent afin de créer un nouveau produit. Lorsque plusieurs matériaux qu'ils soient solides ou en suspension dans un fluide entrent en contact leur composition chimique peut être altérée modifiant ainsi leurs propriétés. Ces processus affectent la géométrie et l'albedo des solides impactés. Voir **D** dans la figure 3.6. Des exemples de vieillissement liés à ce processus sont visibles sur la figure 3.2.

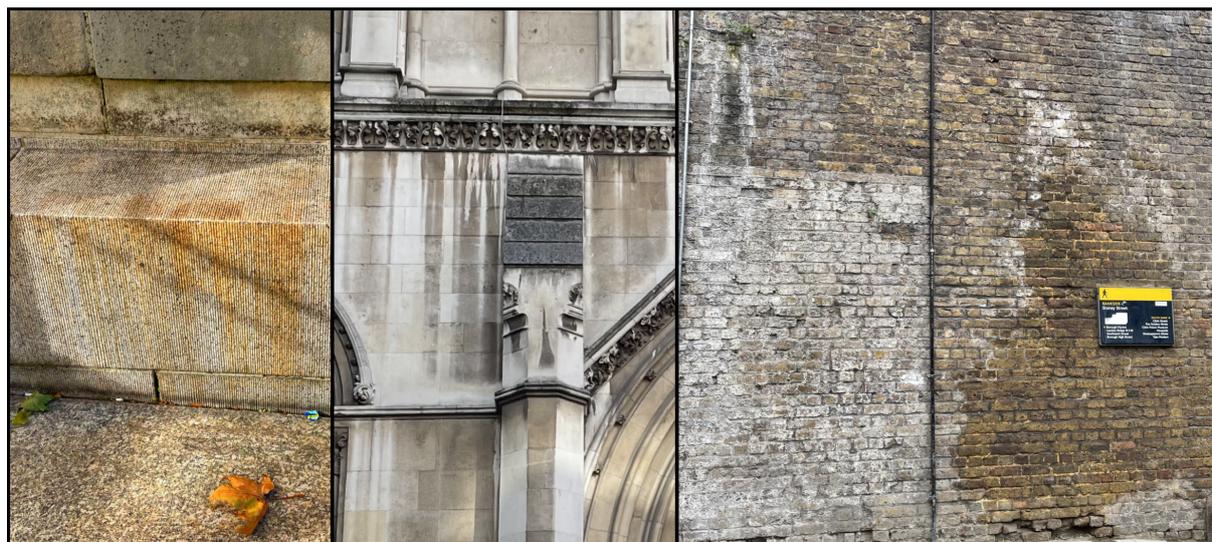


FIGURE 3.1 – Photographies de différents effets de vieillissement liés au dépôt. De gauche à droite : Traces de rouille déposées sur de la pierre, traces de pollutions et de son lavage par la pluie, efflorescence sur un mur de brique liée à la cristallisation de sel à la surface.



FIGURE 3.2 – Photographies d'effets de vieillissement liés à des processus chimiques. De gauche à droite : Formation de patine sur une fontaine en bronze, corrosion d'une rambarde en fer, coloration de la roche par oxydation du fer qu'elle contient.

Développement organique : Lorsque des graines ou des spores sont transportés dans l'environnement ils peuvent prendre racine à la surface d'un objet. Le développement organique de ces plantes peut nécessiter l'intervention de conditions complémentaires (température, humidité, luminosité). Durant leur développement les racines peuvent créer un stress interne dans les pores de la surface impactée pouvant la déformer voire la fracturer lorsque le stress devient trop important. Voir **E** dans la figure 3.6. Ce processus peut prendre plusieurs formes (lichen, mousses, algues, plantes) et est illustré dans la figure 3.3.

Déformation, fracture et craquelure : Lorsqu'un matériau subit des changements d'environnement fréquents ses propriétés peuvent s'altérer. Selon le matériau considéré, la fréquence et l'amplitude des changements des déformations peuvent être observées



FIGURE 3.3 – Photographies de développements organiques. De gauche à droite : Formation de mousse sur un monument, apparition de mousses et de plantes sur une avancée en pierre, formation d’algues permise par la sudation d’un mur.

et provoquer l’apparition de fractures ou de craquelures. Voir **F** dans la figure 3.6. Des exemples de fractures et de craquelures et de peelings sont visibles dans la figure 3.4.



FIGURE 3.4 – Photographies d’effets de fractures et de peeling. De gauche à droite : peeling de la peinture d’un mur, apparition de craquelures autour de la fixation d’un portail, fissures d’un mur conséquence de la déformation du sol.

Impacts et rayures : Les interactions mécaniques entre les objets peuvent être responsables d’altération de la surface à des échelles variées. Elles peuvent être aussi bien microscopiques que de taille importante. Elles peuvent aussi fragiliser la couche protectrice de certains objets ou matériaux laissant émerger d’autres phénomènes (ex. un impact sur une carrosserie de voiture peut permettre au métal sous-jacent de s’oxyder/rouiller). Voir **G** dans la figure 3.6. La figure 3.5 montre des photographies de rayures sur des objets.

Toutes les photographies illustrant les effets du vieillissement présentes dans cette section exhibent l’interaction de plusieurs de ces processus élémentaires. Ainsi, les dépôts



FIGURE 3.5 – Photographies d'effets de rayures. De gauche à droite : Rayures sur un véhicule, rayures de la peinture d'un objet en fer entraînant l'oxydation de la couche inférieure.

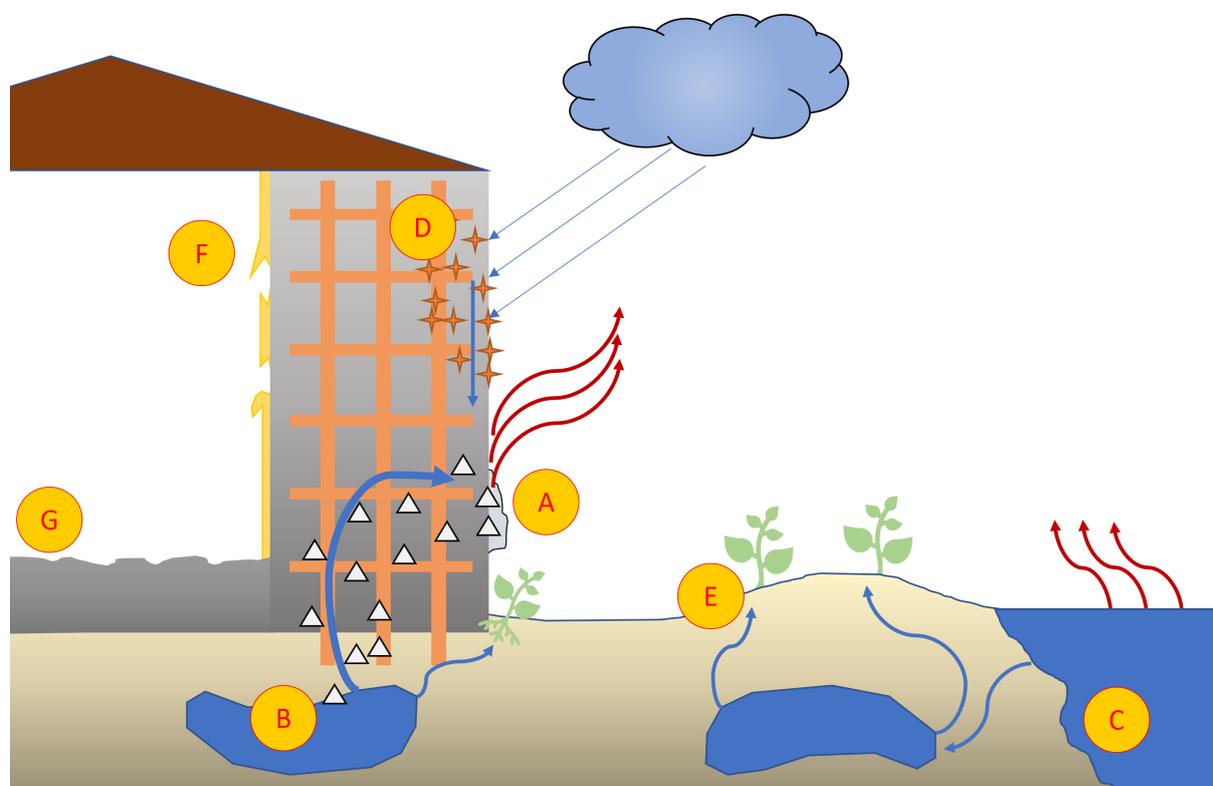


FIGURE 3.6 – Schémas illustrant des effets de vieillissement variés dans une scène. **A** : Dépôt et cristallisation du sel sur la surface d'un bâtiment. **B** : Dissolution des sels minéraux et transport par l'eau souterraine. **C** : Erosion du lit et des bordures de rivière. **D** : Corrosion des tiges métalliques du béton armé et transport par l'humidité de la rouille à la surface. **E** : Développement organique de plantes favorisé par l'exposition au soleil ainsi que les minéraux contenus dans les sols. **F** : Les peintures se craquèlent et se fracturent conséquence d'une déformation due à l'interaction avec l'humidité du mur. **G** : Rayures et fracture du sol par des impacts avec d'autres objets.

de pollution visibles sur la façade d'un monument de la figure 3.1 illustrent également le processus de dissolution par l'eau de pluie puisque la façade est "lavée" localement. La patine formée sur la fontaine de la figure 3.2 peut également servir d'exemple au processus de dépôt puisque la matière patinée s'est retrouvée transportée puis déposée sur la pierre sous la fontaine. De même les processus de développement organique visibles dans la figure 3.3 sont en réalité permis grâce à une bonne irrigation, un bon apport en ressources et une bonne insolation pour chaque espèce organique observée.

3.2 Modèle physique

La simulation du vieillissement d'un objet requiert la modélisation des processus élémentaires que nous venons de présenter. Nous nous concentrerons sur les phénomènes impactant le transport de la matière puisque le changement des matériaux présents sur une surface est responsable du changement d'apparence des objets. Ainsi, ni les processus liés aux interactions mécaniques (déformations, fractures, craquelures, impacts et rayures) ni ceux liés au développement organique (lichens, champignons, plantes grimpantes, etc.) ne seront abordés.

Dans cette section nous définissons un modèle de simulation SPH pour les interactions fluide-solide basé sur le volume (sous-section 3.2.1). Par la suite nous étudierons le transport de l'eau dans les matériaux poreux (sous-section 3.2.2) puis le transport de sédiments par l'eau dans la scène (sous-section 3.2.3). La transformation de matière solides en sédiment par interactions avec le fluide sera étudiée dans les sous-sections 3.2.4 et 3.2.5. Nous présenterons ensuite un modèle d'évaporation de l'eau (sous-section 3.2.6). Enfin, le dépôt des sédiments sera abordé dans la sous-section 3.2.7.

3.2.1 Modèle SPH basé volume

L'objectif de notre modèle est de permettre la modélisation de scènes mettant en oeuvre plusieurs matériaux en simultanément afin de permettre l'émergence de phénomènes complexes permis par les processus élémentaires. Nous nous intéressons tout particulièrement aux phénomènes liés au transport de matière. Il est possible d'associer à chaque particule un matériau spécifique ayant ses propriétés propres et d'échantillonner des mélanges de matière via l'équation (2.3). Ces mélanges peuvent être dus à des interactions de l'eau avec du sable et de la terre donnant lieu au dépôt d'une couche mélangée entre ces deux matériaux.

Pour que cette approche permette la continuité des champs de matières ainsi déposées il faudrait représenter ces couches de dépôt par un grand nombre de particules, chacune propre à un matériau particulier.

Pour limiter le nombre de particules pour représenter ce type de phénomènes nous avons choisi de modéliser ces mélanges de matériaux directement au sein des particules. Ainsi pour chaque particule, le terme m_j/rho_j doit être sommé entre tous les matériaux présents dans la particule afin de pouvoir résoudre l'équation (2.3). Nous proposons donc d'utiliser dans les différentes étapes de notre simulateur le volume V_j comme étant équivalent. Toutes les méthodes présentées dans les sections suivantes proposeront d'étudier des variations de ce volume. L'équation (2.3) peut ainsi s'écrire :

$$A(\mathbf{x}) \equiv \sum_j A_j V_j W(\mathbf{x}_j - \mathbf{x}, h) \quad (3.1)$$

Le terme $W(\mathbf{x}_j - \mathbf{x}_i, h)$ sera dorénavant noté W_{ij} .

Symbole	Description	Unité	Phase
i	Indice de particule	—	—
k	Indice de matériaux	—	—
s_k	Indice de sédiment	—	—
r	Rayon des particules	m	—
H	Humidité Relative	—	—
\mathbf{g}	Gravité	$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$	—
D^{s_k}	Diffusivité des sédiments	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	—
\mathbf{x}_i	Position d'une particule	m	Solide et fluide
V_i	Volume d'une particule	m^3	Solide et fluide
V_i^f	Volume de fluide	m^3	Solide et fluide
$V_i^{s_k}$	Volume de sédiment	m^3	Solide et fluide
$C_i^{s_k}$	Concentration en sédiment	—	Solide et fluide
$v_i^{s_k}$	Vitesse de sédimentation	$\text{m} \cdot \text{s}$	Solide et fluide
p_i^c	Pression capillaire	Pa	Solide et fluide
T_i	Température	$^\circ\text{C}$	Solide et fluide
α_i	Coefficient de diffusion thermique	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	Solide et fluide
S_i	Saturation en fluide des pores	—	Solide
V_i^k	Volume de matière solide	m^3	Solide
λ_i	Perméabilité	m^2	Solide
β_i	Rigidité des pores	Pa	Solide
σ^k	Résistance au cisaillement du matériaux	Pa	Solide
ϕ_i	Porosité	—	Solide
τ_i	Tortuosité	—	Solide
r^{s_k}	Rayon d'une particule de sédiment	mm	Solide
r^{p_k}	Rayon caractéristique d'un tube capillaire	mm	Solide
ρ_i	Densité de la particule i	$\text{kg} \cdot \text{m}^3$	Fluide
ρ_0	Densité du fluide au repos	$\text{kg} \cdot \text{m}^3$	Fluide
μ	Viscosité dynamique	$\text{Pa} \cdot \text{s}$	Fluide
Paramètres de contrôle			
κ_{concentr}	Concentration	—	—
κ_{depos}	Déposition	—	—
κ_{erosion}	Erosion	—	—
κ_{evap}	Evaporation	—	—
κ_{satur}	Saturation	—	—

TABLEAU 3.1 – Table de notations. Les propriétés des particules sont indexées par i et j . Les propriétés des matériaux solides utilisent k comme exposant, celles liées aux sédiments du matériau k utilisent s_k , pour finir, les propriétés liées au fluide utilisent f . Les paramètres de contrôle permettent d'influencer de manière simplifiée le comportement de la simulation.

Les équations (2.5) et (2.6) deviennent :

$$\nabla A_i \equiv \sum_j V_j A_{ij} \nabla W_{ij} \quad (3.2)$$

$$\nabla^2 A_i \equiv \sum_j V_j A_{ij} \frac{2\|\nabla W_{ij}\|}{\|\mathbf{x}_j - \mathbf{x}_i\|} \quad (3.3)$$

Travailler avec les volumes requiert que la densité ρ_i d'une particule soit toujours égale à sa densité au repos. Il est donc nécessaire lors de la simulation du fluide "externe" d'utiliser un solveur de fluide incompressible. Nous appelons fluide "externe" le fluide se situant à l'extérieur de l'espace des pores de la matière solide. Parmi les solveurs disponibles, nous avons choisi PCISPH [SP09] pour son faible impact mémoire et sa simplicité de mise en place. Il est toutefois possible d'employer d'autres solveurs de pression garantissant l'incompressibilité de la matière (IISPH [ICS+14], DFSPH [BK15], ...).

3.2.2 Flux poreux

L'élément clé de notre approche consiste à simuler les écoulements d'eau qui ont lieu à l'intérieur des matériaux poreux. Cette étape nous permettra ensuite de modéliser le transport de matière dans les pores de l'objet et plus généralement dans la scène.

Comme décrit dans [DEJ+99] et [LAD08], le flux de fluide traversant un milieu poreux est gouverné par la loi de Darcy [Dar56]. Cette loi exprime le flux instantané \mathbf{q} d'un fluide de viscosité dynamique μ et de densité ρ traversant un milieu poreux de perméabilité λ en fonction d'un gradient de pression ∇p et de l'accélération due à la gravité \mathbf{g} :

$$\mathbf{q} = -\frac{\lambda}{\mu}(\nabla p - \rho\mathbf{g}) \quad (3.4)$$

La vitesse du fluide dans le milieu poreux (appelée vitesse poreuse par la suite) peut être obtenue en divisant le flux instantané par la porosité du matériau ϕ . Bien que la loi de Darcy décrive le comportement d'un fluide dans un milieu poreux homogène, une évaluation par morceaux permet de représenter des matériaux hétérogènes. Puisque dans notre simulation chaque particule solide est définie par un ensemble de propriétés tels que sa porosité moyenne ϕ_i et sa perméabilité moyenne λ_i , la vitesse poreuse peut être reformulée en utilisant le formalisme du SPH afin de modéliser le volume échangé dans le médium. Cette vitesse peut alors se décomposer en deux composantes distinctes : d'un côté la vitesse de diffusion (Diff^f (3.5)) et de l'autre la vitesse d'advection (Adv^f (3.6)). Elles représentent respectivement la vitesse à laquelle un fluide se déplace d'une zone de forte pression vers une zone à basse pression et la vitesse à laquelle la gravité guide le fluide. La Figure 3.7 illustre le transport de fluide dans un solide poreux par ces deux processus isolés puis leur combinaison.

$$\text{Diff}^f = -\frac{\lambda}{\mu\phi}(\nabla p) \quad (3.5)$$

$$\text{Adv}^f = -\frac{\lambda}{\mu\phi}(-\rho\mathbf{g}) \quad (3.6)$$

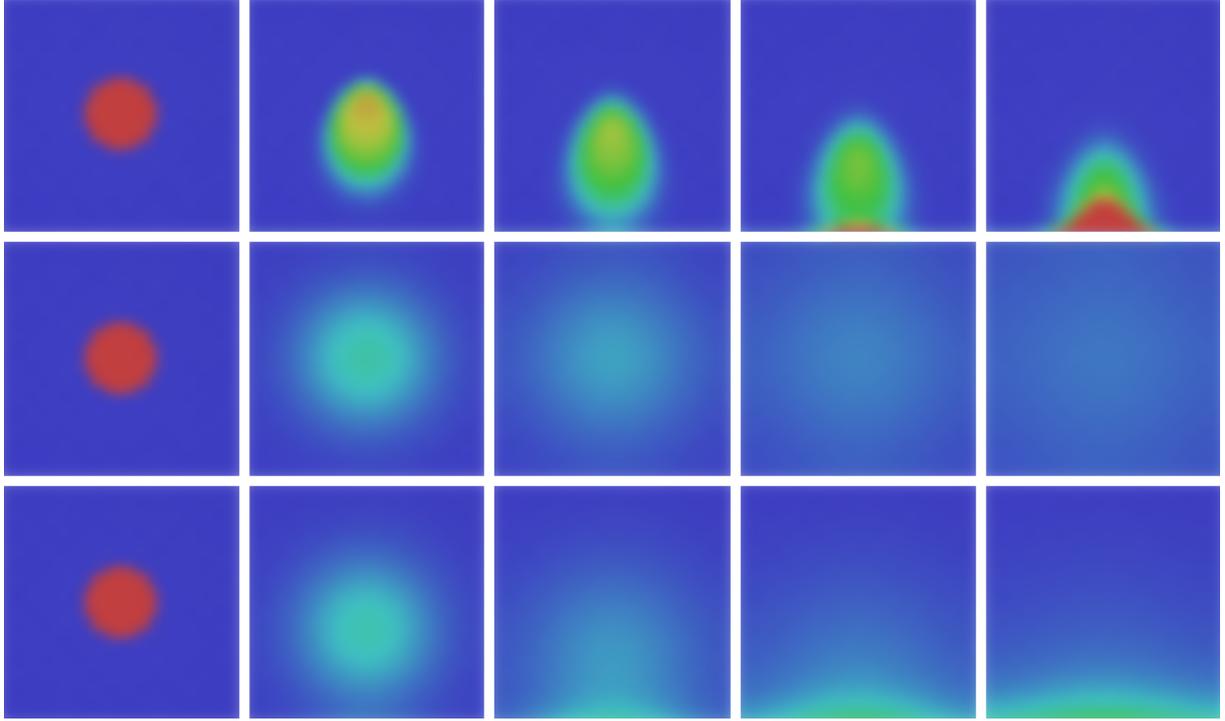


FIGURE 3.7 – Coupe verticale d'un solide poreux saturé en eau en son centre (disque rouge). La carte de température représente la saturation des pores en eau (pores saturés en rouge, et secs en bleu). **Première ligne** : seule l'advection est calculée; **deuxième ligne** : seule la diffusion est calculée; **troisième ligne** : calcul complet du transport d'eau dans le médium.

Diffusion : Dans un travail précédent, Laenart et al [LAD08] ont proposés de considérer la pression due à l'action capillaire des pores sur le fluide p^c comme une fonction de la saturation en eau des pores. Le gradient de cette pression dirige le fluide des zones les plus saturées vers les moins saturées. On peut estimer pour chaque particule cette pression p_i^c par une équation d'état :

$$p_i^c = \beta(1 - S_i)^{\kappa_{\text{satur}}} \quad (3.7)$$

Le terme β représente le potentiel de pression qu'applique le matériau poreux au fluide en fonction de sa saturation (plus tard appelé pression capillaire) et le terme κ_{satur} est un facteur de contrôle permettant de simuler une capacité de rétention de l'eau par la matière avant qu'elle ne se diffuse. La saturation en fluide d'une particule S_i est définie comme le rapport entre le volume de fluide présent dans la particule V_i^f et le volume des pores de la particule $V_i\phi_i$ (e.g. le volume de vide dans la matière) :

$$S_i = \frac{V_i^f}{V_i\phi_i} \quad (3.8)$$

En considérant le matériau comme homogène par paire de particules, il nous est possible d'exprimer la diffusion de fluide (3.5) en utilisant le modèle de diffusion issu du SPH tel que décrit par Muller [MSKG05] :

$$\text{Diff}_i^f = - \sum_j \frac{\lambda}{\mu\phi} (p_i^c - p_j^c) V_j \nabla^2 W_{ij} \quad (3.9)$$

Lorsque plusieurs matériaux sont présents dans un même voisinage, leurs particules peuvent posséder des propriétés qui ne peuvent pas être interpolées entre elles sans introduire des comportements erronés. Par l'interpolation de propriétés tel que la porosité entre une particule représentant du métal non poreux et d'une autre particule représentant une roche calcaire très poreuse il serait possible de transférer du fluide vers la particule métallique. Nous avons donc choisi de considérer pour chaque paire la particule ayant les plus grosses contraintes. Ainsi nous proposons de réécrire le terme $\lambda/(\mu\phi)$ en une "résistance poreuse" η^p que nous calculons pour chaque particule :

$$\eta_i^p = \frac{\lambda}{\mu\phi} = \frac{\lambda_i}{\mu} \frac{1}{\phi_i} \quad (3.10)$$

En intégrant l'équation (3.10) dans l'équation (3.9) afin de considérer la particule ayant la résistance la plus forte (ayant la valeur η^p la plus petite) entre les particules i et j on obtient la fonction de diffusion suivante :

$$\text{Diff}_i^f = - \sum_j \min(\eta_i^p, \eta_j^p) (p_i^c - p_j^c) V_j \nabla^2 W_{ij} \quad (3.11)$$

Nous désirons trouver le flux volumique et non simplement la vitesse de propagation de la saturation en fluide. Afin de réintégrer la notion de volume à notre équation on pose le flux volumique lié au processus de diffusion comme suit :

$$\text{DiffV}_i^f = -V_i^f \sum_j \min(\eta_i^p, \eta_j^p) (p_i^c - p_j^c) V_j \nabla^2 W_{ij} \quad (3.12)$$

Advection : Nous considérons le fluide et le solide de notre simulation incompressible et la densité du fluide ρ de l'équation (3.6) constante et équivalente à la densité du fluide au repos ρ_0 . Nous remarquons en suivant cette formule que le flux d'eau lié à l'advection se déplace en suivant une direction principale directement liée à la gravité \mathbf{g} . Pour chaque paire de particules (i, j), nous identifions celle qui transmettra de la matière à la seconde et celle qui la recevra tel que défini par le modèle donneur-receveur décrit par [KBKS09]. Il nous faut une fois de plus considérer la particule ayant la résistance poreuse la plus élevée entre les deux particules afin de s'assurer que l'échange de matière respecte bien les contraintes de chaque matériau. Le flux lié à l'advection peut alors s'écrire de la manière suivante :

$$\text{Adv}_i^f = - \sum_j \begin{cases} V_j \min(\eta_i^p, \eta_j^p) (-\rho_0 \vec{g} \cdot \hat{\mathbf{x}}_{ij}) \|\nabla W_{ij}\| & , -\rho_0 \mathbf{g} \cdot \mathbf{x}_{ij} \geq 0 \\ V_i \min(\eta_i^p, \eta_j^p) (-\rho_0 \vec{g} \cdot \hat{\mathbf{x}}_{ij}) \|\nabla W_{ij}\| & , -\rho_0 \mathbf{g} \cdot \mathbf{x}_{ij} < 0 \end{cases} \quad (3.13)$$

Avec $\hat{\mathbf{x}}_{ij}$ le vecteur normalisé entre la particule i et la particule j (ou $\frac{\mathbf{x}_j - \mathbf{x}_i}{\|\mathbf{x}_j - \mathbf{x}_i\|}$). Comme pour l'équation (3.12) nous souhaitons convertir notre vitesse en flux volumique, nous

pouvons simplifier cette formulation comme suit :

$$\text{Adv}V_i^f = \sum_j \begin{cases} V_j^f V_j \min(\eta_i^p, \eta_j^p) \rho_0 (\mathbf{g} \cdot \hat{\mathbf{x}}_{ij}) \|\nabla W_{ij}\| & , \mathbf{g} \cdot \mathbf{x}_{ij} \leq 0 \\ V_i^f V_i \min(\eta_i^p, \eta_j^p) \rho_0 (\mathbf{g} \cdot \hat{\mathbf{x}}_{ij}) \|\nabla W_{ij}\| & , \mathbf{g} \cdot \mathbf{x}_{ij} > 0 \end{cases} \quad (3.14)$$

La variation finale du volume de fluide d'une particule i , ∂V_i^f peut être calculée en utilisant l'équation (3.15).

$$\frac{\partial V_i^f}{\partial t} = \text{Diff}V_i^f + \text{Adv}V_i^f \quad (3.15)$$

3.2.3 Transport de sédiments

Les sédiments transportés par un fluide dans un matériau poreux sont ralentis par les diverses interactions avec la surface des pores. Ainsi, le calcul du flux d'eau n'est pas suffisant pour calculer le transport de sédiments dans de tels matériaux. Le déplacement des sédiments dans un fluide, tout comme dans un milieu poreux est affecté par une composante de diffusion et d'advection. Nous calculerons donc ces deux composantes indépendamment comme vu dans la section précédente 3.2.2.

En nous basant sur les travaux de Monaghan [Mon05], la diffusion d'un attribut A dans un fluide peut être exprimé en fonction de son coefficient de diffusion D comme suit :

$$\frac{\partial A}{\partial t} = D \nabla^2 A \quad (3.16)$$

Dans notre cas, la variation de volume de sédiment dans le fluide est une combinaison entre la diffusion de ces sédiments dans le medium et l'advection de ces sédiments liée à leur vitesse de sédimentation.

Avec N matériaux présents dans la scène, nous pouvons calculer la variation de volume du sédiment s_k correspondant au matériau d'indice $k \in [0, N]$ comme la combinaison de la diffusion (eq. (3.16)) et la vitesse de sédimentation $v_i^{s_k}$:

$$\frac{\partial V_i^{s_k}}{\partial t} = D^{s_k} \nabla^2 C_i^{s_k} - v_i^{s_k} \quad (3.17)$$

Où V^{s_k} est le volume du sédiment s_k , D^{s_k} est la diffusivité dans le fluide du sédiment s_k et C^{s_k} correspond à la saturation du fluide en sédiment s_k . On peut calculer la concentration C^{s_k} pour une particule i comme suit :

$$C_i^{s_k} = \frac{V_i^{s_k}}{V_i^f + \sum_n^N V_i^{s_n}} \quad (3.18)$$

La géométrie interne des pores peut être plus ou moins complexe selon le matériau considéré. Nous nous référerons à cette complexité comme la tortuosité. La tortuosité d'un matériau poreux interfèrera avec le mouvement des micro particules d'un sédiment limitant leur vitesse dans le médium. Cela peut se traduire par des interactions avec la surface interne des pores liées aux courbes des tubes capillaires. Le rapport entre le rayon d'une particule de sédiment r^{s_k} et celui des pores du matériau r^{p_k} est un facteur de ralentissement important également.

Nous représentons la tortuosité comme l'exposant τ permettant de modéliser l'impact

du rapport r^{s_k}/r^{p_k} sur la vitesse des sédiments. Le facteur de ralentissement des sédiments filtre peut alors s'exprimer :

$$\text{filtre}_i = (1.0 - r^{s_k}/r_i^{p_k})^{T_i} \quad (3.19)$$

$$\text{filtre}_{(i,j)} = \min(\text{filtre}_i, \text{filtre}_j) \quad (3.20)$$

Etant donné que le nombre de matériaux est fini dans chaque scène, il est possible de pré-calculer la fonction filtre dans une table de correspondance pour tous les couples sédiments-matériaux. La diffusion du volume de sédiments (eq. (3.21)) est dominée par un facteur de diffusivité D^{s_k} qui représente la propension d'un sédiment à se disperser dans un solvant (l'eau dans notre cas). Comme précédemment, nous considérons pour chaque couple de particules i et j , le filtre impliquant la plus grande contrainte (eq. (3.20)) afin d'éviter les artefacts dus au lissage de l'information.

$$\text{Diff}V_i^{s_k} = V_i^f \sum_j \text{filtre}_{(i,j)} D^{s_k} (C_i^{s_k} - C_j^{s_k}) V_j^f \nabla^2 W_{ij} \quad (3.21)$$

Les sédiments peuvent se déposer avec le temps lorsque leur densité est plus importante que celle du solvant dans lequel ils se trouvent. La diffusion seule n'est donc pas suffisante pour modéliser le transport des sédiments dans le fluide. En développant la loi de Stoke [Sto48], il est possible de déterminer la vitesse terminale d'une particule sphérique dans un fluide au repos :

$$v_i^{s_k} = \frac{2}{9} (r^{s_k})^2 \frac{\rho^{s_k} - \rho_0}{\mu} f(C_i^{s_k}) \mathbf{g} \quad (3.22)$$

Avec v^{s_k} la vitesse terminale de sédimentation du sédiment s_k , r^{s_k} le rayon d'une particule de sédiment et ρ^{s_k} la densité du sédiment s_k . Pour prévenir une sur-saturation sous l'action de l'advection, Krištof et al. [KBKS09] proposent d'utiliser la relation de Richardson-Zaki $f(C^{s_k})$ [RZ54] afin de garantir que la concentration d'un sédiment ne dépasse pas une valeur maximale $\text{Max}C^{s_k}$. Cette relation utilise un paramètre de contrôle supplémentaire $\kappa_{\text{concentr}} \in [4; 5.5]$:

$$f(C^{s_k}) = \begin{cases} 1 - (C^{s_k}/\text{Max}C^{s_k})^{\kappa_{\text{concentr}}} & , C^{s_k} < \text{Max}C^{s_k} \\ 0 & , C^{s_k} \geq \text{Max}C^{s_k} \end{cases} \quad (3.23)$$

En utilisant la vélocité terminale d'une particule de sédiment dans un fluide (eq. (3.22)), nous pouvons exprimer la vitesse volumique des sédiments dans le fluide à l'intérieur et à l'extérieur des pores d'un objet en exploitant à nouveau notre modèle de donneur-receveur (de manière analogue à l'équation (3.14)) :

$$\text{Adv}V_i^{s_k} = - \sum_j \begin{cases} V_j^f V_j^{s_k} \text{filter}_{(i,j)} (v_{ij}^{s_k} \cdot \hat{\mathbf{x}}_{ij}) \nabla W_{ij} & , v_{ij}^{s_k} \cdot \mathbf{x}_{ij} \geq 0 \\ V_i^f V_i^{s_k} \text{filter}_{(i,j)} (v_{ij}^{s_k} \cdot \hat{\mathbf{x}}_{ij}) \nabla W_{ij} & , v_{ij}^{s_k} \cdot \mathbf{x}_{ij} < 0 \end{cases} \quad (3.24)$$

Le terme $v_{ij}^{s_k}$ dénote la vitesse dont la norme est minimale entre $v_i^{s_k}$ et $v_j^{s_k}$. Le transport de sédiments dans les pores des matériaux est illustré dans la figure 3.8.

Tout sédiment présent dans une particule en absence d'eau sera déposé. Nous contrôlons ce processus de manière explicite en répartissant le volume superflu de sédiment dans les particules solides non pleines avoisinantes ou bien en créant de nouvelles particules. Ce processus sera décrit plus en détail dans la partie 3.2.7.



FIGURE 3.8 – Le café se dissout dans l'eau qui pénètre ensuite le filtre. Les sédiments issus de la dissolution sont transportés par l'eau dans le matériau poreux. L'eau concentrée s'écoule ensuite hors du filtre se retrouvant dans le verre. De gauche à droite : Rendu de la scène, partie solide mouillée, fluide et sédiments, densité de sédiment.

3.2.4 Erosion

L'érosion est un processus majeur dans la dégradation des objets. Il peut impacter de manière significative sa géométrie en arrachant à sa surface des particules de matière par l'interaction avec un fluide. Dans notre simulation, cela signifie que le volume de matière dans la phase solide se transforme en volume de sédiment dans la phase fluide. Un fluide en mouvement en contact avec de la matière solide induit un stress σ appelé cisaillement. Cette force n'apparaît qu'en présence d'une interaction entre les deux phases et est dépendante de leur vitesse relative l'une par rapport à l'autre. Nous pouvons donc dans notre simulation ignorer le calcul de cette interaction lorsque les particules i et j appartiennent à la même phase.

$$\sigma_{ij} = \left(\frac{\|v_i - v_j\|}{\|\mathbf{x}_{ij}\|} \right)^{0.5} \quad (3.25)$$

L'érosion a lieu lorsque le cisaillement σ_{ij} devient plus important que la résistance intrinsèque du matériau σ^k .

Etant donné que nous ne calculons l'érosion qu'à l'interface entre le solide et le fluide et qu'il s'agit d'un phénomène majoritairement surfacique, son impact est dépendant de la surface de contact entre les phases fluide et solide. Nos particules étant organisées sur une grille régulière, nous considérons la surface de contact comme égale à $(2r)^2$ (l'aire d'une des faces d'un cube associé avec r , le rayon d'une particule). Le volume échangé par l'érosion entre un matériau k d'une particule solide j et une particule fluide i est :

$$\frac{\partial V_i^{sk}}{\partial t} = (2r)^2 \kappa_{\text{erosion}} \sum_j \begin{cases} \frac{V_j^k}{V_j} (\sigma_{ij} - \sigma^k), & \sigma_{ij} > \sigma^k \\ 0, & \sigma_{ij} \leq \sigma^k \end{cases} \quad (3.26)$$

$$\frac{\partial V_j^k}{\partial t} = -(2r)^2 \frac{V_j^k}{V_j} \kappa_{\text{erosion}} \sum_i \begin{cases} (\sigma_{ij} - \sigma^k), & \sigma_{ij} > \sigma^k \\ 0, & \sigma_{ij} \leq \sigma^k \end{cases} \quad (3.27)$$

Avec V^k le volume du matériau k et κ_{erosion} un paramètre de contrôle. En pratique cette formulation pourrait mener à des échanges de matières d'un volume supérieur à celui présent initialement contenu dans les particules solides sous l'action d'un cisaillement

important ou d'un faible volume en présence dans la particule solide. Dans les cas où cela se produit, nous choisissons de limiter directement l'échange à la plus petite valeur entre l'érosion ainsi calculée et le volume présent initialement dans la particule solide afin de garantir la conservation de volume de notre simulation.

L'utilisation d'un modèle reposant sur les SPH pour la phase solide permet de simuler des processus d'érosions modifiant fortement la géométrie de l'objet. La figure 3.9 illustre l'érosion d'un matériau jusqu'à ce que le fluide puisse le traverser. De telles modifications géométriques ne requièrent aucun traitement particulier.



FIGURE 3.9 – Erosion, transport et dissolution d'un matériau fragile (en brun) sur une surface immuable (blanc). Chaque colonne décrit un aspect spécifique de la simulation. De gauche à droite : Résultat de la simulation complète, sédiments en vert dans le fluide, partie solide uniquement.

3.2.5 Dissolution

Certains matériaux peuvent avoir une liaison plus forte avec les molécules d'un solvant qu'avec celles qui les entourent initialement, ils sont appelés solubles (e.g. sucre, sels ...). La capacité d'un matériau à se dissoudre est corrélée à sa capacité à se diffuser dans un fluide.

A la différence de l'érosion, la dissolution ne requiert pas de force supplémentaire, comme par exemple le cisaillement, pour avoir lieu. Ce processus est dépendant de la surface de contact entre les deux phases ainsi que de la concentration en sédiment C^{sk} de la phase fluide.

Il s'agit d'une variation de l'équation 3.21 en considérant les particules solides contenant un volume non nul du matériau k comme ayant une concentration égale à $\text{Max}C^{sk}$.

Ainsi pour des particules fluides i et les particules solides j , la dissolution peut se

calculer :

$$\frac{\partial V_i^{s_k}}{\partial t} = (2r)^2 \sum_j V_j^k D^{s_k} (C_i^{s_k} - C_j^{s_k}) \nabla^2 W_{ij} \quad (3.28)$$

$$\frac{\partial V_j^{s_k}}{\partial t} = (2r)^2 V_j^k \sum_i D^{s_k} (C_j^{s_k} - C_i^{s_k}) \nabla^2 W_{ij} \quad (3.29)$$

3.2.6 Evaporation

L'évaporation est un phénomène prenant place à la surface d'un liquide, le transformant en gaz. Il s'agit d'un composant clé du changement d'apparence puisqu'il contribue à la déposition et la cristallisation de sédiments. De plus, il guide le flux d'eau dans l'espace des pores en permettant aux pores en contact avec l'air de se vider de leur eau et par extension de diriger le flux d'eau avoisinant vers la surface par capillarité. L'évaporation de l'eau est principalement liée à deux facteurs environnementaux : la température et l'humidité relative.

La diffusion de température est régie par la diffusivité thermique α des matériaux étudiés. La variation de la température T peut être étudiée en employant la seconde loi de Fick :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \nabla^2 T \quad (3.30)$$

On peut obtenir le coefficient de diffusion de chaque particule α_i comme une moyenne pondérée des coefficients de diffusion intrinsèques à chaque matériau par rapport au volume occupé par ce matériau dans la particule. Ce coefficient est défini comme constant pour les particules fluides et nous avons choisi de leur donner celui de l'eau (e.g. $\alpha_i \approx 0.143e^{-6} \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$). On peut poser l'équation (3.30) sous sa forme SPH :

$$\frac{\partial T_i}{\partial t} = - \sum_j \min(\alpha_i, \alpha_j) (T_i - T_j) V_j \nabla^2 W_{ij} \quad (3.31)$$

L'humidité relative est la proportion de vapeur d'eau présente dans l'air par rapport à la vapeur d'eau qui serait présente à l'équilibre. Le volume de vapeur d'eau présent dans l'air est le volume d'eau en suspension pour une température donnée de telle sorte que l'eau présente sous forme liquide dans un tel environnement ne voit pas son volume fluctuer. On peut interpréter l'humidité relative comme la propension de l'air à capturer ou à déposer des molécules d'eau sur une surface d'eau liquide. L'humidité relative H est définie comme la proportion entre la pression de vapeur d'eau partielle p^w et la pression de vapeur d'eau à l'équilibre p^{*w} .

Dans notre simulation, H est saisi par l'utilisateur comme un facteur de contrôle environnemental. Cette valeur est très fréquemment utilisée et toutes les sources d'informations météo d'une région la fournissent. Parmi les différents modèles permettant d'estimer la pression de vapeur d'eau à l'équilibre p^{*w} pour une température donnée, l'équation de Buck [Buc81] 3.32 offre la meilleure précision pour des températures comprise entre 0 et 100 degrés celsius. Puisqu'une majorité des phénomènes naturels impliquant le

transport de matières a lieu à ces températures il s'agit du modèle que nous avons retenu.

$$p^{*w}(T) = 6.1121 \cdot e^{(18.678 - \frac{T}{234.5}) \cdot \frac{T}{257.14 + T}} \quad (3.32)$$

La pression de vapeur d'eau dans l'air p^w peut être obtenue à partir de la température de l'air T_{air} et l'humidité relative de l'environnement H .

$$p_{\text{air}}^w = H p^{*w}(T_{\text{air}}) \quad (3.33)$$

Afin de connaître le taux d'évaporation à la surface (solide et/ou fluide), nous considérons la pression de vapeur d'eau partielle p^w à la surface comme équivalente à la pression de vapeur d'eau à l'équilibre si l'air était à la même température que la surface. Ainsi pour une particule i , la pression de vapeur d'eau partielle est :

$$p_i^w = p^{*w}(T_i) \quad (3.34)$$

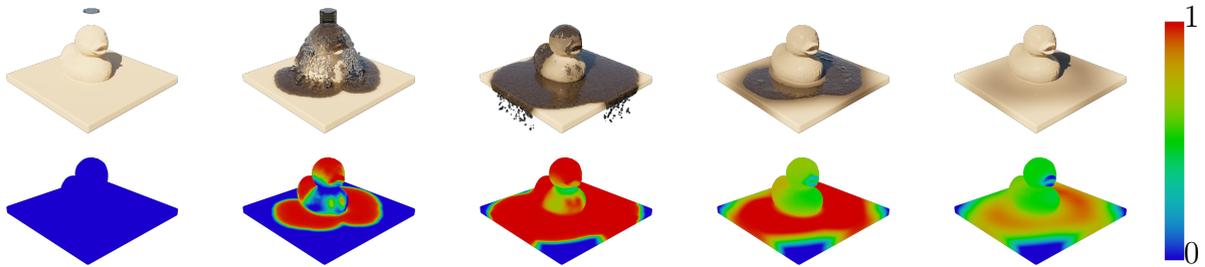


FIGURE 3.10 – Mouillage et séchage d'un matériau poreux. La ligne supérieure montre le rendu final. La ligne inférieure montre une carte de température représentant la saturation des pores en eau.

En utilisant la pression de vapeur d'eau induite par la surface p_i^w et la pression de vapeur d'eau de l'air avoisinant p_{air}^w , le taux d'évaporation peut être calculé en étudiant le gradient de ce champ. La surface de contact entre les deux phases doit une fois encore être prise en compte dans ce calcul. De plus, afin de transformer notre gradient de pression en un volume échangé nous introduisons le paramètre de contrôle κ_{evap} . Bien qu'exagérant la vitesse d'évaporation, nous utilisons une valeur de 10^{-3} dans la majorité des résultats présentés. Le volume d'eau évaporé ou condensé à la surface peut alors se calculer comme suit :

$$\frac{\partial V_i^f}{\partial t} = \kappa_{\text{evap}} (2r)^2 (p_i^w - p_{\text{air}}^w) \quad (3.35)$$

Un exemple de cycle de mouillage séchage est illustré dans la figure 3.10.

3.2.7 Dépôt

Nous avons étudié les déplacements du volume d'eau dans la scène, ses interactions avec les matériaux présents et sa diffusion dans l'espace des pores. Nous avons également étudié la transformation de la matière solide en sédiment par les processus d'érosion et de dissolution de la surface ainsi que le transport de ces sédiments par le fluide. Dans cette section nous étudierons la transformation de sédiments présents dans la phase fluide en matière solide afin de finaliser notre modèle de transport.

Lorsque des sédiments tombent au fond d'un volume de fluide ou bien que par évaporation la concentration en sédiments dépasse la capacité du fluide à les maintenir en suspension ces derniers se déposent sur les surfaces solides avoisinantes.

Comme mentionné dans la section 3.2.3, les sédiments se déplacent dans le fluide sous l'influence de la gravité (3.24). La nouvelle formulation doit prendre en compte l'interaction à la surface entre les particules fluides i et solides j s'écrit :

$$\frac{\partial V_j^k}{\partial t} = (2r)^2 \sum_i \kappa_{\text{depos}} V_i^{s_k} (v_{ij}^{s_k} \cdot \hat{\mathbf{x}}_{ij}) \nabla W_{ij} \quad (3.36)$$

Pour permettre un contrôle de l'influence des dépôts par rapport au transport nous avons introduit le terme κ_{depos} . Dans le cas où des particules fluides seraient trop concentrées ($C^{s_k} > \text{Max}C^{s_k}$) suite à une perte de volume de fluide (e.g. évaporation ou bien par pénétration dans un matériau poreux), les sédiments excédentaires doivent être déposés sur les surfaces solides avoisinantes si elles existent. Dans ce cas une recherche des particules voisines candidates est effectuée. Si leur volume est déjà maximal alors de nouvelles particules solides doivent être créées.

3.3 Détail d'implémentation

Du fait de la multitude de phénomènes que notre méthode modélise, de nouvelles particules doivent être créées (déposition) et des particules existantes peuvent être supprimées (érosion, dissolution). Ces deux aspects doivent être traités avec précaution afin de garantir la stabilité de la simulation. Lors de la simulation la création et la suppression de particules ne peut avoir lieu qu'à proximité de la surface de la phase solide. Afin de s'assurer de la stabilité du simulateur nous proposons dans cette section un modèle de gestion de la variation de volume à la frontière. Nous présenterons également la création de particules fluides à la frontière permettant de représenter les égouttements depuis l'espace des pores sous l'action de la gravité.

3.3.1 Gestion des frontières

Les différents effets du vieillissement sont liés aux interactions entre les phases fluides et solides. En ce sens l'un des aspects principaux de notre méthode est la gestion des frontières entre ces phases et leur évolution dans le temps. Sous l'effet de la déposition, de la dissolution et de l'érosion, le volume de matière peut changer de phase passant du fluide vers le solide ou inversement. Dans les deux cas, le volume de solide fluctue, faisant évoluer la frontière.

Si l'on considère seulement l'évolution du champ de volume solide, les particules fluides pourraient passer au travers de cette phase. En effet, la densité serait alors trop faible par rapport à l'état du solide au repos et les forces de pression appliquées aux particules fluides seraient trop faibles.

Pour s'assurer de la continuité de l'iso-surface de la phase solide nous proposons une adaptation du modèle de frontière de Akinci et al. [AIA⁺12] en prenant en compte la variation de volume des particules solides.

$$\text{BoundaryVolume}_i = \frac{\left(\frac{V_i}{\max V}\right)^{0.5}}{\sum_j \left(\frac{V_j}{\max V}\right)^{0.5} W_{ij}} \quad (3.37)$$

La dissolution et l'érosion sont des effets qui retirent au solide de la matière alors que la déposition en ajoute. Ces effets sont ainsi en compétition permanente. Si ils sont gérés de manière séquentielle, le résultat de leurs effets combinés sera dépendant de l'ordre dans lequel on l'applique et nécessite le re-calcul du voisinage des particules. Calculer le résultat combiné de ces trois opérations avant de les appliquer permet ainsi de briser leur dépendance d'ordre et de réduire le coût d'une étape de simulation. Nous savons désormais quelle variation de volume appliquer à nos particules. Il nous reste à les refléter à la frontière solide.

Nous organisons les particules solides sur une grille régulière afin de nous assurer qu'elles sont toutes espacées de manière égale dans l'espace lorsque leur fraction de volume $V_i/\max V$ est maximale. Cela nous permet également de nous assurer de la continuité de la surface et de la densité interne des objets. L'utilisation d'une grille régulière simplifie également la détection des particules participant à la surface du solide. Chaque case de la grille régulière ne peut être associée qu'à une unique particule solide. Lorsqu'une nouvelle particule solide est créée, une case vide de la grille régulière est associée à cette particule, celle-ci est alors positionnée sur la particule solide ayant un volume égal au volume

maximal la plus proche. Cette nouvelle particule sera alors déplacée au fur et à mesure que son volume augmente en direction de la case vide de la grille régulière qui lui a été attribuée.

Le volume d'une particule est typiquement de $(2r)^3$ avec r son rayon et la taille du support de la fonction noyau est $h = 4r$. Chaque case de la grille possède alors un côté de taille $2r$.

La position finale d'une particule solide est obtenue en décalant sa position depuis le centre de sa case associée dans la grille régulière en direction de la normale à la surface. La normale à la surface peut être obtenue en calculant le gradient du champ de volume des particules solides. Ce décalage est dépendant de la fraction de volume de la particule.

Une particule est progressivement décalée vers l'intérieur de la phase solide au fur et à mesure qu'elle perd en volume. Lorsque le volume d'une particule tend vers 0, celle-ci est incluse sous la surface, prévenant ainsi toute discontinuité lors de sa suppression ou création. De manière analogue, une particule nouvellement créée sera associée à une case vide de la grille régulière de telle sorte qu'au moins une case voisine corresponde à une particule dont la fraction volumique vaut 1. La nouvelle particule est alors décalée vers la surface pour qu'elle soit inscrite dans cette dernière. Sa position évoluera progressivement vers le centre de sa case de grille régulière au fur et à mesure que son volume augmentera (voir figure 3.11).

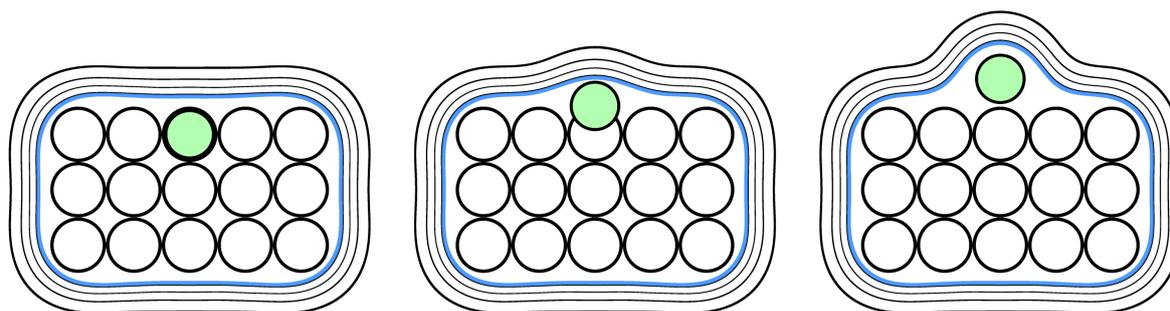


FIGURE 3.11 – Lorsque des sédiments sont déposés à la surface de matériaux solides de nouvelles particules doivent être créées pour prendre en compte la variation de volume de matière. Lorsque sa fraction de volume croît, la particule est déplacée jusqu'à atteindre sa position finale alignée sur une grille régulière. De gauche à droite, la nouvelle particule en vert possède une fraction de volume de 0.0, 0.5 puis 1.0. En bleu, l'iso-surface du champ de volume des particules.

3.3.2 Egouttement du fluide

Comme discuté dans la Section 3.2.2, l'eau peut traverser l'espace des pores de la matière solide. Le volume d'eau échangé entre les particules est décrit par les équations (3.12) et (3.14). Les particules fluides sont considérées comme totalement saturées dans le cadre de ces équations. Le processus de diffusion ne permet les échanges de volume que depuis des particules saturées en eau vers des particules qui le sont moins. Par conséquent ce processus seul ne causera jamais d'égouttement.

En utilisant l'équation (3.14), le volume d'eau est transféré depuis une particule solide i vers une particule fluide j si et seulement si cette particule fluide se trouve dans la

direction de l'advection ($\rho_0 \mathbf{g} \cdot \mathbf{x}_{i,j} > 0$) et $V_j^f < \max V$. Les nouvelles particules fluides sont alors créées à la frontière sous condition qu'il n'y en ait pas déjà une présente.

3.3.3 Export et rendu

Pour permettre la génération d'image depuis les données de la simulation, nous détaillons dans cette partie la méthode d'export de la géométrie et des textures de paramétrisation de BRDF permettant le rendu dans un moteur de rendu basé physique standard.

Pour chaque phase (fluide et solide) nous projetons le champ de volume sur les sommets d'une grille régulière en utilisant l'équation de continuité du SPH, équation (2.3). La surface est ensuite reconstruite par un algorithme de *marching cubes* [LC87] puis exportée dans un format standard (obj). Afin de visualiser et d'exploiter la présence de sédiments dans le fluide, des informations volumiques sont également traitées. Pour cela nous exportons les champs de concentration en sédiments et les stockons dans une grille régulière. Le résultat est enregistré sous la forme d'une matrice éparsée via OpenVDB. Cette matrice contenant le champ de concentration de chaque type de sédiment est ensuite utilisée comme paramètre de contrôle d'absorption d'une BSDF dans le volume.

Pour le rendu d'images finales, nous avons choisi d'utiliser un modèle de matériau PBR standard (Disney principled model ou "Uber" shader).

Afin de paramétrer la BSDF du matériau appliqué à la phase solide, une paramétrisation UV de la surface reconstruite est calculée.

Les textures de contrôle local de la BSDF (albedo, metallic, roughness, specular) sont alors obtenues par la projection de chaque texel dans l'espace monde afin de connaître leurs positions. Pour chaque position ainsi obtenue dans l'espace monde, les valeurs des texels sont obtenues par l'échantillonnage des particules avoisinantes avec (3.1) avec A les paramètres de BSDF associé à chaque matériau présent dans la particule j .

La valeur d'un paramètre de BSDF pour une particule i , notée P_i est obtenue par une somme pondérée du paramètre intrinsèque de chaque matériau P_k par le volume occupé par ce matériau dans la particule V_k (équation (3.38)).

$$P_i = \frac{1}{\sum_k V_i^k} \sum_k P_k V_i^k \quad (3.38)$$

La texture d'albedo est modifiée pour prendre en compte l'absorption liée à la présence de sédiments dans les pores de la surface. Finalement, l'effet de mouillage est obtenu par assombrissement de l'albedo final et une augmentation du paramètre clearcoat de notre modèle PBR. Cette approche empirique permet d'imiter l'apparence lissée et hautement spéculaire de la surface d'objets mouillés. Pour finir, ces données sont utilisées dans un moteur de rendu de production afin d'obtenir des images réalistes (Cycles, Blender).

Cette méthode spécifique de génération d'image finale est à visée purement illustrative et certains effets ont été volontairement exagérés (mouillage, absorption) afin de permettre une meilleure visibilité des effets du vieillissement.

3.4 Résultats

Le simulateur présenté dans ce chapitre permet la modélisation par une approche particulière de matériaux poreux et de leurs interactions avec les fluides et l'environnement. Ces interactions comprennent : la transformation de la matière solide en sédiments via des interactions avec le fluide, leur transport par le fluide et dans les pores de la matière ainsi que leur dépôt en matière solide.

Les résultats présentés ici ont été obtenus sur une machine équipée d'un intel core i7 6700 (4c/8t @3.4GHz) et de 16Go de mémoire vive. Les temps annoncés dans cette section ne tiennent compte que du temps de simulation et non de la génération de la géométrie, des textures associées ainsi que du volume OpenVDB. Une image correspond ici à $\frac{1}{30}s$

La figure 3.9 montre l'érosion hydrique d'un matériau sensible au cisaillement ($\sigma^k = 10.0$). Dans cette simulation, la phase solide est modélisée par 28000 particules et leurs interactions avec environ 6000 particules fluides. La vitesse à laquelle le matériau sous forme sédimentaire est arraché à la surface, est contrôlée par le paramètre $\kappa_{\text{erosion}} = 5.10^{-3}$. La matière érodée est alors transportée dans la scène par le fluide. Ici le sédiment, correspondant à des grains de sable ou de terre ($r^{sk} = 0.1$), ne se diffuse pas dans le fluide ($D^s = 0.0$). Les sédiments transportés par le fluide sont déposés à la surface du solide dans les zones où le dépôt (ici par évaporation de l'eau) est plus rapide que l'érosion. Notons que la modélisation du solide via des particules nous permet, par l'absence de maillage, de modifier fortement la géométrie de l'objet sans recourir à une gestion explicite de la surface.

Notre modèle propose également la simulation du mouillage par saturation des pores d'objets poreux ainsi que leur séchage en fonction de l'humidité relative de l'environnement et de la température de la surface. La figure 3.10 illustre ce processus et permet d'observer la manière dont le fluide sature la surface lors du mouillage. Le temps de calcul pour cette simulation est de $0.47s/image$ soit 14 secondes de calcul par seconde de simulation. Malgré ce temps de calcul, l'exagération de certains paramètres permet d'obtenir des résultats visuellement intéressants en un temps raisonnable. La phase solide de cette figure est composée de 184000 particules paramétrée pour représenter un matériau poreux non soluble ($D^s = 0.0$) et non érodable ($\kappa_{\text{erosion}} = 0$) d'une porosité de 30% et d'une perméabilité de $5.10^{-8}m^2$. Ce paramétrage permet à ce matériau d'absorber le fluide de manière similaire à du sable. Lors de l'évaporation les parties de l'objet les plus longuement exposées au fluide sèchent plus lentement puisque le liquide a pénétré plus en profondeur. Grâce à la représentation volumique, les parties fines de l'objet tel que le bec du canard sèchent plus rapidement puisque le fluide peut traverser la matière par l'espace des pores et ainsi s'évaporer des deux cotés de la surface. L'apparence mouillée est directement contrôlée par l'utilisation du champ de saturation (S).

Outre le mouillage, la pénétration du fluide dans les pores de la surface permet de transporter des sédiments dans ces derniers. Utiliser les informations de saturation des pores (S), de concentration en sédiments (C^{sk}) permet alors de modéliser l'évolution de tâches jusqu'à évaporation du fluide comme illustré dans la figure 3.12. De plus le dépôt de sédiments sous forme de particules solides à la surface se traduit directement

par un changement des propriétés locales de la BSDF de l'objet (équation (3.38)). Dans cette simulation, ces interactions sont modélisées par 3000 particules d'eau saturées en sédiment et 180000 particules solides. Les sédiments initialement présents dans les particules fluides ont un rayon caractéristique r^{sk} de $0.1mm$, une densité égale à celle de l'eau ($1000kg.m^3$). La concentration maximale du sédiment dans l'eau ($MaxC^{sk} = 0.3$) ainsi que la perméabilité du matériau représentant le mur ($\lambda = 1.10^{-6}$) sont exagérées afin d'obtenir l'effet désiré en un unique cycle de mouillage et de séchage.

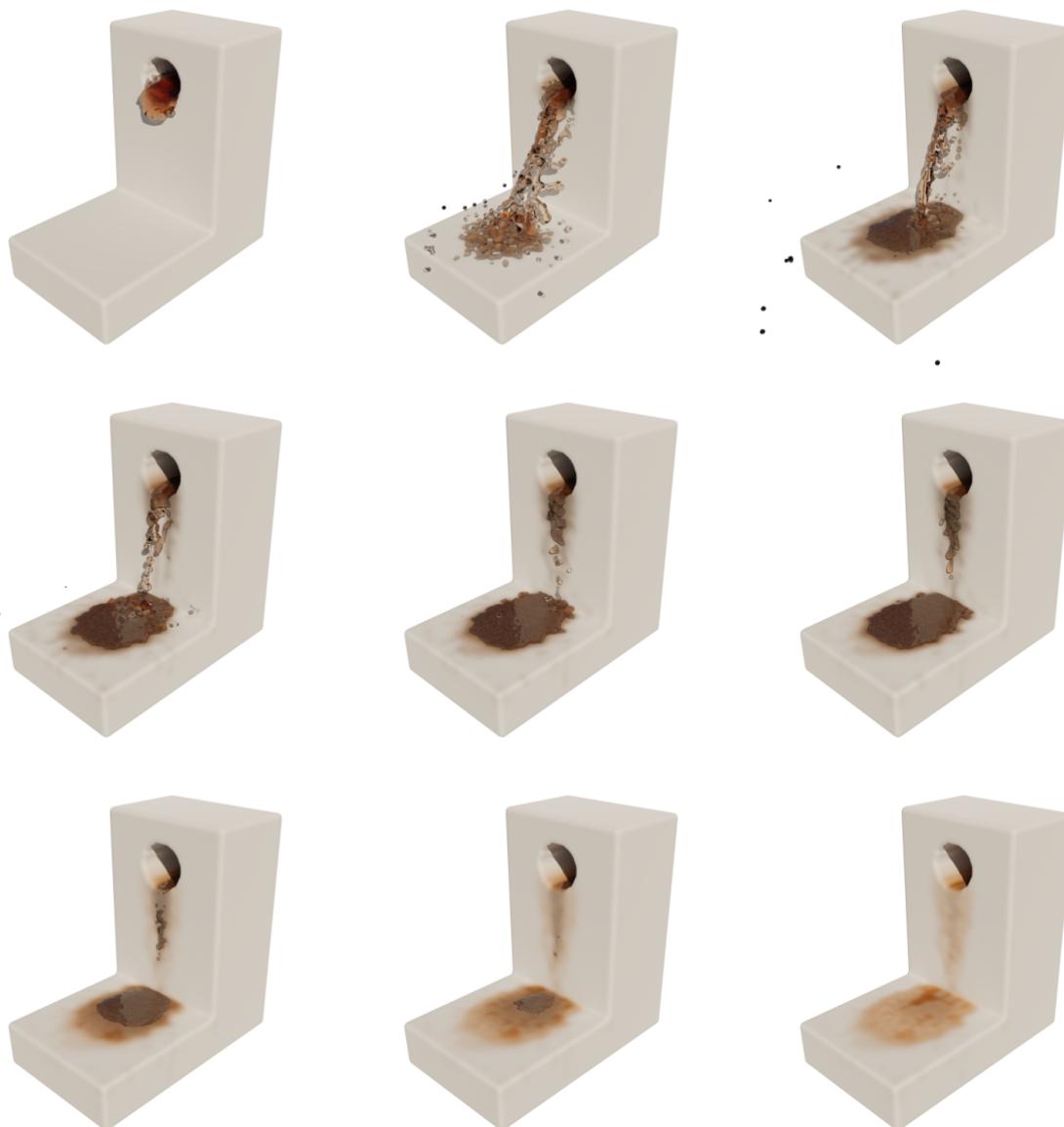


FIGURE 3.12 – Tâches produites par la saleté sortant d'une évacuation. Cette scène montre la diffusion de l'eau et des sédiments dans l'espace des pores de la matière ainsi que le dépôt résultant après évaporation.

Les figures 3.13 et 3.8 illustrent la transformation de café en sédiments par dissolution, son transport au travers d'un matériau poreux et les égouttements de l'eau saturée

résultante. La solubilité du café est paramétrée via sa diffusivité ($D^{sk} = 2e - 3$). Les particules de sédiments ont un rayon de $r^{sk} = 0.01$ permettant leur passage au travers du filtre dont le rayon des pores est de $r^{pk} = 0.05mm$. A sa création, cette simulation contient 37000 particules solides. Les particules fluides sont créées au fur et à mesure afin de représenter l'eau versée dans le filtre. Les égouttements sous le filtre requièrent la création de nouvelles particules fluides. Ces particules nouvellement créées assimilent le fluide s'échappant du solide jusqu'à ce que leur volume et leur densité soient suffisantes pour qu'elles puissent s'échapper et tomber dans le verre. Pour générer cette scène, nous ne mettons pas à jour la position des particules fluides ayant un volume inférieur à 1% de leur volume maximal. Ceci afin d'éviter des égouttements de particules trop fines. Toutefois les particules se retrouvant dans le verre ont un volume bien inférieur à 100%. Un voisinage important est alors nécessaire pour que le fluide possède sa densité de repos ($\rho_i = \rho_0$). Le fluide contenu dans le verre à la fin de la simulation est ainsi composé de 145000 particules. Il nous a fallu augmenter significativement la taille de pré-allocation du voisinage dans notre table de hachage pour pallier cette augmentation. Les performances de cette simulation sont impactées en ce sens, les premières images sont générées en 0.5s alors que les dernières ont pris plusieurs minutes par image.



FIGURE 3.13 – Vue en coupe illustrant la dissolution de café et son passage au travers d'un matériau poreux en suivant le flux d'eau. **Ligne du haut** : Rendu de l'eau, des solides et des sédiments. **Ligne du bas** : Seule la surface solide est visible afin d'observer le résultat du processus de dissolution.

La dissolution de sel présent sur une surface imperméable, son transport dans l'eau et son dépôt après évaporation peuvent être observés figure 3.14. Ici le sel possède une

diffusivité de $D = 1.10^{-3}$, une concentration maximale de $\text{Max}C^{sk} = 0.3$, une porosité de $\phi = 0.7$ et une perméabilité de $\lambda = 1.10^{-6}$. La phase solide est représentée par 214349 particules dont une couche inférieure d'un matériau non soluble, la couche supérieure, en blanc, représente le sel et placée suivant un bruit de Perlin.

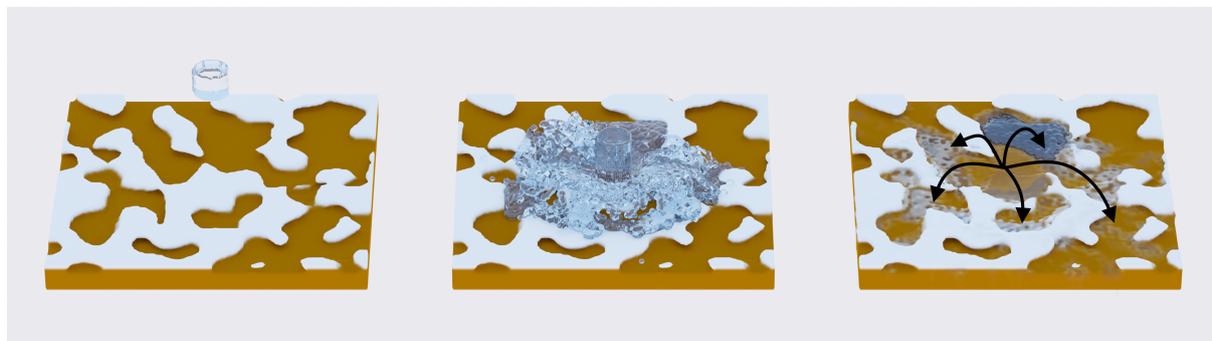


FIGURE 3.14 – Exemple de dissolution et déposition d'un matériau hautement soluble (en blanc) sur un matériau qui ne réagit pas avec l'eau (en marron).

Puisqu'il est possible par cette méthode de modéliser le flux d'eau dans les matériaux poreux, l'évaporation du fluide à la surface ainsi que le transport et le dépôt de sédiments, le système présenté rend aussi possible la modélisation de comportements complexes tel que le dépôt de matière dans les pores 3.12, l'interaction avec des matières solubles et leur transport 3.8, etc. L'efflorescence (voir figure 3.15) est produite par la cristallisation de sels à la surface donnant lieu à la formation de gypse. Ces sels sont transportés depuis les eaux souterraines et remontent à la surface par action capillaire dans les pores de la matière. Finalement, l'évaporation libère le solide du fluide capturé permettant aux sels de se déposer à la surface. Afin de modéliser la nappe souterraine d'eau saline, les particules situées à la base de cette simulation sont contraintes à être saturées en eau et en sédiments (sels). Le fluide remonte par capillarité au coeur du matériau poreux. Par ce mouvement, les sels remontent jusqu'à la surface où par évaporation du fluide, la concentration en sel devient élevée. Ce processus cause la création de nouvelles particules pour modéliser l'excédent de volume de sel approximant ainsi le phénomène de cristallisation.

Les fractures que l'on peut observer dans certains édifices influencent également de manière forte le transport de matière. Il est possible de modéliser la présence de fracture par des particules de matière possédant une forte perméabilité comme illustré dans la figure 3.16. Dans cette scène, une vasque est présente au dos d'un mur fracturé. L'eau présente dans la vasque contient des sédiments qui se déplacent en suivant l'eau au travers de la fracture. Cela permet la formation d'un dépôt de l'autre côté de la paroi. Cet effet illustre encore l'importance de modéliser le volume des objets, il ne serait pas simulable en ne considérant que la surface. Notre approche ne permet pas en l'état la simulation de l'apparition de fractures mais ce résultat démontre qu'il serait possible de modéliser les conséquences de leur formation, nous en discuterons dans le chapitre 4.

Toutes les scènes que nous venons de décrire ont été éditées via des combinaisons de formes simples modélisées par des combinaisons de fonctions de distances signées (SDF).

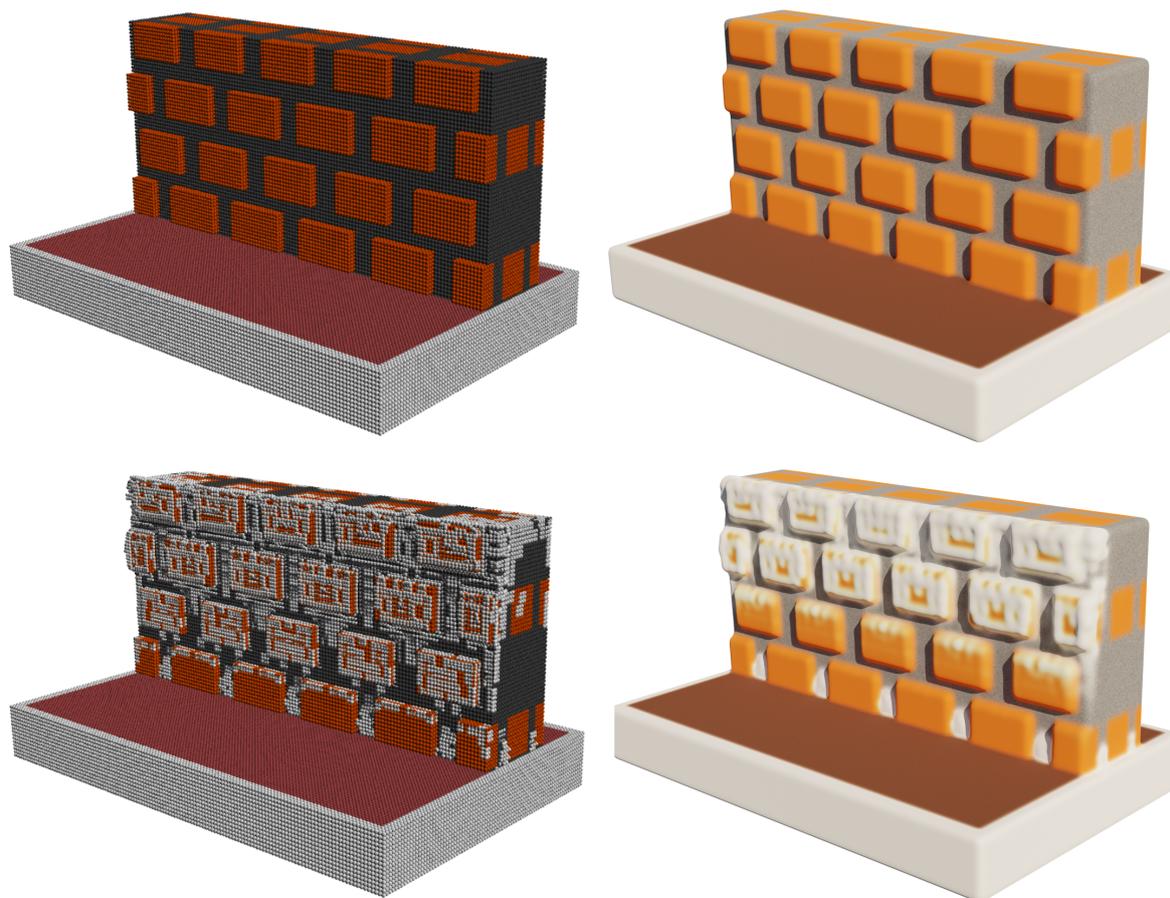


FIGURE 3.15 – Formation d'efflorescence sur un mur de brique. L'eau souterraine se propage dans le matériau jusqu'à atteindre la surface où elle s'évapore. Elle emporte avec elle les sels minéraux qu'elle contient. Lorsque l'eau s'évapore, les sels se déposent à la surface permettant la formation de gypse. **Ligne supérieure** : Mur neuf. **Ligne inférieure** : Mur vieilli. **Colonne gauche** : Représentation particulière. **Colonne de droite** : Vision rendue avec reconstruction de surface.

Le paramétrage des particules est modélisé en leur spécifiant une portion de chaque matériaux représentés ou non via des SDF également. Cette représentation permet de contrôler la structure interne et externe des différents objets de la scène ainsi que les contraintes de l'environnement (températures, saturation, etc.).

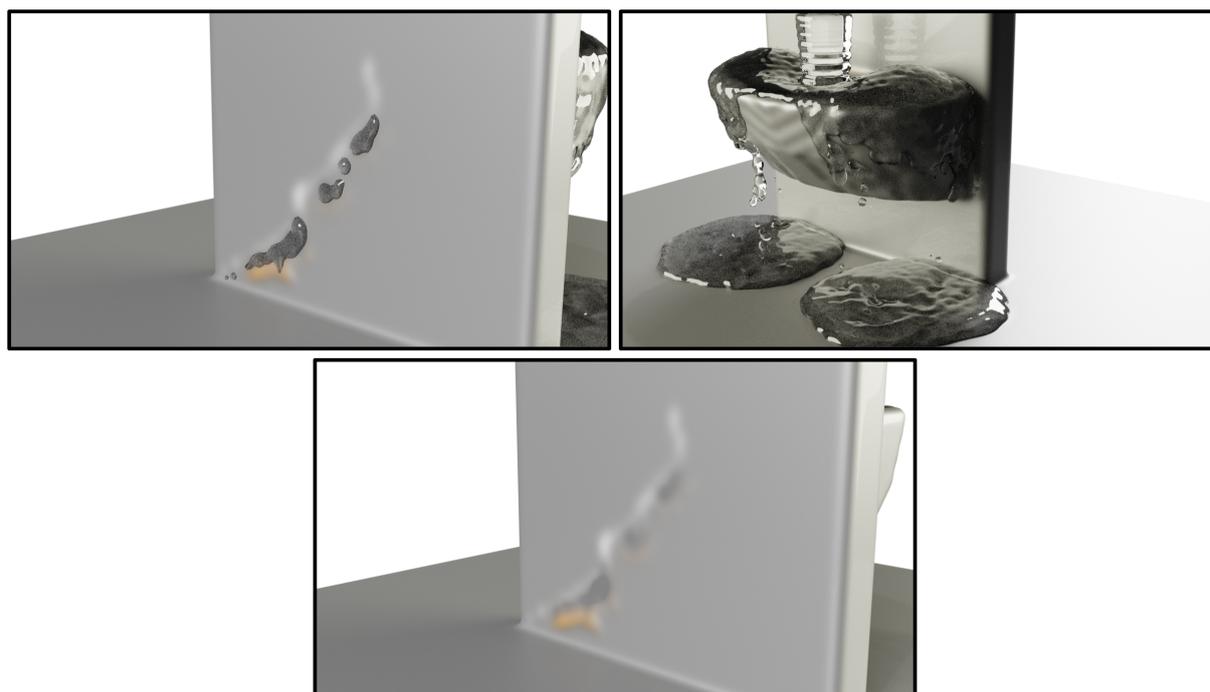


FIGURE 3.16 – Démonstration de l'effet d'une micro-fracture dans le transport de matériaux. L'arrière du mur (image en haut à droite) est une vasque se remplissant d'eau sale. L'eau et les sédiments sont alors transportés au travers d'une micro fracture (zone claire) dans le mur. Le dépôt résultant peut être observé après évaporation en orange sur l'image du bas.

Chapitre 4 :

Conclusion et perspectives

4.1 Conclusion

La synthèse d'images réalistes de mondes virtuels est un problème impliquant plusieurs facettes de l'informatique graphique. En introduction nous avons vu la manière dont le transport de lumière est traité afin de générer des images physiquement réalistes de scène virtuelles. Ce transport est influencé par les propriétés physiques des matériaux avec lesquels la lumière interagit. Une méthode physiquement correcte de transport de lumière couplée à une modélisation complète des interactions de celle-ci avec la matière ne suffirait toutefois pas à générer des images réalistes. Les effets du vieillissement qu'ils soient de cause naturelle ou non doivent être représentés sur les objets des environnements virtuels afin de proposer une apparence réaliste pour l'Homme. Notre œil étant habitué à observer continuellement des objets issus du monde réel et ceux-ci n'étant jamais immaculés, toute absence de défaut dans des images de synthèse nous semble alors immédiatement dérangeante. Différentes méthodes de synthèse ou de simulation de changement d'apparence des objets ont été abordés dans le chapitre état de l'art afin de donner à des objets virtuels une apparence vieillie. La synthèse de texture qu'elle soit purement procédurale ou reposant sur des exemples capturés depuis le monde réel est une solution répandue pour la génération de détails sur les surfaces d'objets virtuels. Pour que l'apparence semble réaliste et cohérente, elle doit toutefois prendre en considération la structure géométrique des objets, leurs matériaux ainsi que les conditions environnementales dans lesquelles ces objets ont évolué durant leur cycle de vie. Les effets du vieillissement visible dans une scène peuvent être dûs aux interactions avec l'environnement extérieur (vent, pluie) mais aussi aux interactions entre les objets de la scène eux-mêmes par le transport de matière et les interactions entre les différents matériaux présents. La modélisation du changement d'apparence d'objets de manière isolée les uns des autres est donc limitante, les objets ainsi vieillis ne semblant pas intégrés dans leur environnement. En ce sens, nous avons proposé un modèle pour simuler des effets impactant l'apparence des objets dans le temps.

Le changement d'apparence peut être considéré comme l'ensemble des transformations de la matière composant un objet et le transport de matière dans la scène. Un ensemble de processus élémentaires a été identifié dans la section 3.1. Le dépôt, la dissolution, l'érosion et le transport de la matière issue de ces transformations par les flux d'eau dans la scène ont ainsi été étudiés. Nous avons choisi ce sous-ensemble de processus élémentaires car il définit une base de travail à partir de laquelle les autres processus peuvent par la suite être incorporés. Le transport de matière dans l'espace des pores est un élément clé dans la modélisation d'effets de vieillissement complexes. La simulation de l'évolution conjointe de ce sous-ensemble de processus a été proposée dans la section 3.2.

Le modèle de simulation basé sur l'hydrodynamique des particules lissées présenté dans la section 3.2 permet de modéliser l'évolution de ces processus et leurs interactions. La modélisation des mouvements de l'eau dans l'espace des pores de la matière couplée à son mouvement dans l'air permet le calcul du transport de sédiments. Le dépôt de matière est permis par un modèle d'évaporation tenant compte de la température des surfaces et de l'humidité relative dans l'air. Le simulateur que nous avons proposé permet la modélisation d'effets complexes tels que l'érosion et le dépôt, l'apparition de tâches sur et dans la matière ainsi que d'efflorescences.

Les processus élémentaires de réactions chimiques, développement organique, déformations et fractures ainsi que les impacts et les rayures n'ont pour l'heure pas été traités mais la poursuite de nos travaux devrait permettre de les aborder puisqu'ils dépendent des processus déjà développés (transport, présence d'eau, variation de température ...). Des modèles particuliers proposent déjà de modéliser certains de ces processus de manière isolée, notre système pourrait être employé afin de lier ces solutions. Dans la suite de ce chapitre nous discuterons des perspectives d'évolutions de notre simulateur.

4.2 Perspectives

4.2.1 Court terme

Craquelures, fractures et déformations La simulation du transport de la matière présentée dans cette thèse est limitée au transport par le fluide. La prise en charge de fractures permettrait des déplacements de matériaux indépendamment de la présence de fluide dans la scène. La fracture d'une paroi de falaise par exemple, ne nécessite pas la présence d'eau pour expliquer le transport de grandes quantités de matières.

La modélisation des contraintes mécaniques via des modèles particuliers est largement étudiée. Par exemple, Tran et al. [TNNB20] proposent une approche basée sur les SPH pour la modélisation de craquelures, Wolper et al. [WFL⁺19] utilisent les MPM pour modéliser la fracture d'objets, Muller et al. [MHHR07] proposent la résolution de déformation d'objets via une approche reposant sur les positions des particules et non une résolution des forces à appliquer. Interfacer ces processus dans le système de simulation que nous proposons et la gestion des contraintes associées élargiraient le nombre d'effets modélisables. Un modèle de craquelures et de fractures reposant sur la méthode de Bui et al. [BNKS15] pourrait ainsi être développé en tirant profit de notre modèle d'évaporation pour permettre une interaction cohérente avec la scène étudiée.

Pour permettre le support de matériaux élastiques ou déformables il faudra remplacer le terme V_j dans notre système par $\sum_k m_{kj}/\rho_k$ avec m_{kj} la masse du matériau k dans la particule j et ρ_k la densité de ce matériau. Notre modèle de création de nouvelles particules dans le cas du dépôt de sédiments ou des égouttements de fluide suppose que les particules solides de nos objets soient alignées sur une grille régulière. Lors de la déformation des objets, la grille dans laquelle ils s'inscrivent doit suivre cette déformation afin de garantir le fonctionnement de notre modèle d'échantillonnage. Des modèles alternatifs de création de nouvelles particules pourraient également être étudiés.

Réactions chimiques La formation de patine, la disparition et la transformation de matière par corrosion, la création d'acide par contact entre les particules polluantes et l'eau sont des effets de vieillissement fréquemment présents dans la nature ou sur les constructions humaines. Le système de simulation exposé dans cette thèse permet le déplacement de la matière dans la scène et également de quantifier localement les matériaux et sédiments. Des réactions chimiques entre les matériaux de la scène impacteraient la température, permettraient la formation de nouveaux composés non présents à l'initialisation et rendraient ainsi possibles de nouvelles interactions. La prise en

charge de ces transformations chimiques permettrait d'élargir de manière importante la variété d'effets modélisables par notre approche. Le lien entre les propriétés mécaniques d'un objet et les transformations de ses matériaux pourrait également être envisagé.

Effets liés au développement organique Notre modèle pourrait aussi permettre de calculer le transport de matière nécessaire au développement organique tel que les sels-minéraux et l'eau au travers de matière poreuse afin de détecter les zones favorables au développement organique. Une adaptation d'un modèle particulière comme celui proposé par Hadrich et al. [HBDP17] pour tenir compte de la composition du sol pourrait être un ajout intéressant afin d'automatiser le processus de positionnement et d'évolution des plantes. De manière analogue la carte de contrôle employée par la méthode de Desbenoit et al. [DGA04] pourrait être affinée pour tenir compte des informations de mouillage et de séchage de notre modèle.

Toutefois, le développement organique à la surface de matière poreuse impacte le remplissage voir la géométrie des pores. En conséquence, le comportement du fluide et de la matière qu'il transporte s'en retrouveront changés. La modélisation des racines dans les pores et la déformation de la matière sous l'action de leur développement permettrait d'accroître le réalisme des scènes exhibants de la matière organique. La simulation d'érosion côtière et les conséquences de la déforestation sur la topologie des sols seraient ainsi modélisables.

L'objectif de notre simulateur est de proposer une base de travail permettant de modéliser de manière physiquement plausible les processus impactant l'apparence des objets dans le temps. Comme nous l'avons vu dans cette section, de nombreuses pistes sont à explorer pour augmenter la variété d'effets modélisables par notre simulateur. Pour répondre à la problématique de la modélisation du changement d'apparence d'objets dans le temps, il est toutefois important de considérer d'autres pistes de recherches. La suite de ce chapitre se focalise sur des perspectives reposant sur un changement de modèle de simulation ainsi que des problématiques plus larges du domaine de la simulation physique.

4.2.2 Moyen et long terme

Autres modèles de simulation Dans l'exemple du filtre à café 3.13 vu dans la section 3.4 les écoulements de nouvelles particules n'ayant pas atteint une masse suffisante pour garantir la densité de fluide au repos avec un voisinage restreint causent une chute drastique des performances du modèle. La fusion de particules telle que proposée par Qingang et al. [XLX13] pourrait être ainsi explorée pour limiter le nombre de particules de faible masse.

Alternativement, le modèle des points matériels (MPM) propose de calculer les opérateurs de gradient ou de laplacien sur une grille régulière sous-jacente et non via le voisinage des particules. Le surcoût de calcul lié à ce sur-échantillonnage de particules se retrouverait alors réduit au coût de projection des informations entre les particules et les sommets de la grille régulière.

L'utilisation de voxels pourrait être étudiée dans la mise en place d'une approche exploitant un système de règles et de simulations physiques simples, de manière analogue au travail de Cordonnier et al. [CGG⁺17].

Les paramètres pour la simulation physique Lorsque l'on souhaite modéliser les phénomènes physiques, le paramétrage des simulateurs est un processus complexe à mettre en œuvre tant leur nombre et leur variété sont élevés. La mise en œuvre d'approches modélisant plusieurs phénomènes conjoints est d'autant plus compliquée que les unités des paramètres physiques varient entre les différents modèles de simulation. La définition d'un ensemble de paramètres généralistes devrait être proposée pour offrir une base de données de matériaux, exploitable et commune à tous. Celle-ci pourrait alors être utilisée dans le développement d'approches futures et permettre d'uniformiser le domaine. La mise en place d'une telle bibliothèque de données simplifierait le paramétrage des simulations. Le paramétrage des simulateurs est complexe tant l'impact de la variation d'un paramètre sur le résultat est difficile à prévoir. Dans le simulateur décrit dans cette thèse, le changement de la valeur de la porosité d'un matériau pour paramétrer le transport d'un sédiment n'est pas intuitif ni le seul impactant le résultat. Ainsi trouver la bonne combinaison de paramètres pour modéliser l'effet voulu est un processus chronophage d'autant plus que la simulation n'est pas calculée à un rythme interactif. A la manière des approches PBR pour le rendu réaliste comme l'utilisation d'un unique paramètre de rugosité pour modéliser les micro-détails des surfaces, il serait intéressant de réduire voire d'explorer des combinaisons de paramètres plus intuitives donnant lieu à un paramétrage des fonctions de simulations basées physique.

Par la grande variété de variables à considérer, le vieillissement d'un objet est de fait un problème à dimension élevée. Une hypothèse soulevée en apprentissage profond est que de tels problèmes peuvent être rapportés à des variétés géométriques de dimensions plus faibles [FMN13]. Les approches existantes reposants sur les variétés dans le cadre de la génération d'apparences d'objets vieillis montrent qu'il est possible de synthétiser des apparences réalistes de processus complexes. L'utilisation de l'intelligence artificielle comme outil d'analyse statistique afin de réduire la dimensionalité des paramètres à modéliser, combinée à une construction de variété géométrique, peut être un axe à exploiter.

Qualification des résultats Le parti pris de cette thèse est similaire à celui du rendu basé physique : la modélisation des processus physiques devrait garantir la plausibilité des résultats obtenus.

Le vieillissement pouvant potentiellement intervenir au cours de longues périodes et en l'absence de données capturées des changements d'apparences durant ces phases, il est difficile de qualifier un résultat de simulation et de rendu.

Aujourd'hui, en l'absence de références visuelles et de la connaissance des paramètres physiques associés, un jugement perceptuel est toujours central dans l'analyse du réalisme des effets du vieillissement. Pour qualifier de manière correcte un modèle, il conviendrait d'étudier l'évolution de tous les matériaux dans tous types d'environnements.

4.2.3 Domaines d'applications

Conservation du patrimoine La dégradation des matériaux et des processus impliqués est étudiée dans le domaine de la conservation de l'héritage culturel. La compréhension des processus physiques permet de mettre en œuvre de manière concrète

des solutions pour limiter voire enrayer ces processus et ainsi protéger notre patrimoine. La puissance des machines actuelles permet de simuler une partie des processus complexes impliqués dans ces dégradations. L'informatique graphique permet d'ores et déjà de modéliser de manière réaliste certains de ces processus. La combinaison des connaissances issus de la recherche dans le domaine de conservation du patrimoine et des savoirs faire techniques et scientifiques de la recherche en informatique graphique pourrait ouvrir la voie à de nouvelles méthodes de prévention du vieillissement et ainsi améliorer nos capacités à préserver notre héritage culturel.

Architecture et environnement De manière analogue au problème de la conservation du patrimoine, s'assurer de la pérennité des monuments futurs est un enjeu environnemental majeur. De tels outils pourraient prendre la forme de versions interactives de simulateurs similaires à celui décrit dans cette thèse pour orienter la prise de décision par une approximation de la réalité. La mise en place de simulateurs physiques à destination des architectes pourrait simplifier et rendre plus efficace la conception de bâtiments adaptés aux contraintes de leur environnement. L'objectif à terme serait de déterminer automatiquement les matériaux et la structure optimale pour chaque construction. Nous sommes aujourd'hui dans une période où nous constatons la fragilité de nos ressources et la nécessité de penser nos édifices de manière durables. Ce sujet de recherche me semble incontournable pour les années à venir.

Bibliographie

- [AAT13] Nadir Akinci, Gizem Akinci, and Matthias Teschner. Versatile surface tension and adhesion for sph fluids. *ACM Trans. Graph.*, 32(6), November 2013.
- [AIA⁺12] Nadir Akinci, Markus Ihmsen, Gizem Akinci, Barbara Solenthaler, and Matthias Teschner. Versatile rigid-fluid coupling for incompressible sph. *ACM Trans. Graph.*, 31(4), July 2012.
- [BB90] Welton Becket and Norman I. Badler. Imperfection for realistic image synthesis. *The Journal of Visualization and Computer Animation*, 1(1) :26–32, 1990.
- [BCS⁺14] Richard Bézín, Benoît Crespín, Xavier Skapin, O. Terraz, and Philippe Meseure. Generalized maps for erosion and sedimentation simulation. *Computers & Graphics*, 45, 12 2014.
- [BDP21] Juan Bajo, Claudio Delrieux, and Gustavo Patow. Physically inspired technique for modeling wet absorbent materials. *The Visual Computer*, 37 :1–16, 08 2021.
- [BK15] Jan Bender and Dan Koschier. Divergence-free smoothed particle hydrodynamics. 08 2015.
- [BKCO16] Rachele Bellini, Yanir Kleiman, and Daniel Cohen-Or. Time-varying weathering in texture space. *ACM Trans. Graph.*, 35(4), July 2016.
- [Bli77] James F. Blinn. Models of light reflection for computer synthesized pictures. In *Proceedings of the 4th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, SIGGRAPH '77, page 192–198, New York, NY, USA, 1977. Association for Computing Machinery.
- [Bli82] James F. Blinn. Light reflection functions for simulation of clouds and dusty surfaces. In *Proceedings of the 9th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, SIGGRAPH '82, page 21–29, New York, NY, USA, 1982. Association for Computing Machinery.
- [BLR⁺11] Carles Bosch, Pierre-Yves Laffont, Holly Rushmeier, Julie Dorsey, and George Drettakis. Image-guided weathering : A new approach applied to flow phenomena. *ACM Trans. Graph.*, 30(3), May 2011.
- [BNKS15] Ha Bui, Giang Nguyen, Jayantha Kodikara, and Marcelo Sánchez. Soil cracking modelling using the mesh-free sph method. 02 2015.
- [BP18] Carles Bosch and Gustavo Patow. Controllable image based transfer of flow phenomena. *Computer Graphics Forum*, 38, 07 2018.
- [BT07] Markus Becker and Matthias Teschner. Weakly compressible sph for free surface flows. In *Proceedings of the 2007 ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation*, SCA '07, page 209–217, Goslar, DEU, 2007. Eurographics Association.
- [BTHB06] Bedrich Benes, Václav Těšínský, Jan Hornyš, and Sanjiv Bhatia. Hydraulic erosion. *Computer Animation and Virtual Worlds*, 17 :99 – 108, 05 2006.
- [Buc81] Arden L. Buck. New equations for computing vapor pressure and enhancement factor. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 20(12) :1527 – 1532, 1981.

- [BW09] Djalma Bandeira and Marcelo Walter. Synthesis and transfer of time-variant material appearance on images. pages 32–39, 10 2009.
- [Cam95] Dario Camuffo. Physical weathering of stones. *Science of The Total Environment*, 167(1) :1–14, 1995. The Deterioration of Monuments.
- [CBC⁺16] Guillaume Cordonnier, Jean Braun, Marie-Paule Cani, Bedrich Benes, Eric Galin, Adrien Peytavie, and Eric Guérin. Large scale terrain generation from tectonic uplift and fluvial erosion. *Computer Graphics Forum*, 35, 05 2016.
- [CCM18] Xavier Chermain, Frédéric Claux, and Stéphane Mérillou. A microfacet-based brdf for the accurate and efficient rendering of high-definition specular normal maps. *The Visual Computer*, 36 :267–277, 2018.
- [CDM⁺02] Barbara Cutler, Julie Dorsey, Leonard Mcmillan, Matthias Müller, and Robert Jagnow. A procedural approach to authoring solid models. *ACM Trans. Graph.*, 21 :302–311, 07 2002.
- [CGG⁺17] Guillaume Cordonnier, Eric Galin, James Gain, Bedrich Benes, Eric Guérin, Adrien Peytavie, and Marie-Paule Cani. Authoring landscapes by combining ecosystem and terrain erosion simulation. *ACM Transactions on Graphics*, 36, 07 2017.
- [Cha00] A.E. Charola. Salts in the deterioration of porous materials : An overview. *Journal of the American Institute for Conservation*, 39 :327, 09 2000.
- [CLS⁺21] Xavier Chermain, Simon Lucas, Basile Sauvage, Jean-Michel Dischler, and Carsten Dachsbacher. Real-time geometric glint anti-aliasing with normal map filtering. *Proc. ACM Comput. Graph. Interact. Tech.*, 4(1), April 2021.
- [CP06] Dario Camuffo and Emanuela Pagan. *What is behind Relative Humidity? Why it is so a relevant variable in the conservation of Cultural Heritage?*, pages 21–38. 01 2006.
- [CP10] Olivier Clément and Eric Paquette. Adaptable aging factory for multiple objects and colorations. *Computers & Graphics*, 34 :460–467, 08 2010.
- [CS00] Yao-Xun Chang and Zen-Chung Shih. Physically-Based Patination for Underground Objects. *Computer Graphics Forum*, 2000.
- [CS03] Yao-Xun Chang and Zen-Chung Shih. The synthesis of rust in seawater. *The Visual Computer*, 19 :50–66, 03 2003.
- [CXW⁺05] Yanyun Chen, Lin Xia, Tien-Tsin Wong, Xin Tong, Hujun Bao, Baining Guo, and Heung-Yeung Shum. Visual simulation of weathering by gamma-ton tracing. In *ACM SIGGRAPH 2005 Papers*, SIGGRAPH '05, page 1127–1133, New York, NY, USA, 2005. Association for Computing Machinery.
- [CZZ⁺17] Wei Chen, Fei Zhu, Jing Zhao, Sheng Li, and Guoping Wang. Peridynamics-based fracture animation for elastoplastic solids. *Computer Graphics Forum*, 37, 06 2017.
- [Dar56] Henry Darcy. *Les fontaines publiques de la ville de Dijon : exposition et application...* Victor Dalmont, 1856.

- [DEJ⁺99] Julie Dorsey, Alan Edelman, Henrik Wann Jensen, Justin Legakis, and Hans K ohling Pedersen. Modeling and rendering of weathered stone. In *Proceedings of the 26th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, SIGGRAPH '99, page 225–234, USA, 1999. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co.
- [DGA04] Brett Desbenoit, Eric Galin, and Samir Akkouche. Simulating and modeling lichen growth. *Comput. Graph. Forum*, 23 :341–350, 09 2004.
- [DGA05] Brett Desbenoit, Eric Galin, and Samir Akkouche. Modeling cracks and fractures. *The Visual Computer*, 21 :717–726, 09 2005.
- [DH96] Julie Dorsey and Pat Hanrahan. Modeling and rendering of metallic patinas. In *Proceedings of the 23rd Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, SIGGRAPH '96, page 387–396, New York, NY, USA, 1996. Association for Computing Machinery.
- [DHL⁺98] Oliver Deussen, Pat Hanrahan, Bernd Lintermann, Radomir Mech, Matt Pharr, and Przemyslaw Prusinkiewicz. Realistic modeling and rendering of plant ecosystems. *First publ. in : SIGGRAPH '98 conference proceeding, Orlando, FL, USA, July 1998, pp. 275-286*, 01 1998.
- [DPH96] Julie Dorsey, Hans Pedersen, and Pat Hanrahan. Flow and changes in appearance. *Proc. SIGGRAPH*, 96 :3, 08 1996.
- [DRS07] Julie Dorsey, Holly Rushmeier, and François X. Sillion. *Digital Modeling of Material Appearance*. Computer Graphics. Morgan Kaufmann / Elsevier, December 2007.
- [Fic55] Adolf Fick. Ueber Diffusion. *Annalen der Physik*, 170(1) :59–86, January 1855.
- [FMN13] Charles Fefferman, Sanjoy Mitter, and Hariharan Narayanan. Testing the manifold hypothesis. *Journal of the American Mathematical Society*, 29, 10 2013.
- [GC01a] Stéphane Gobron and Norishige Chiba. Crack pattern simulation based on 3d surface cellular automata. *The Visual Computer*, 17 :287–309, 06 2001.
- [GC01b] Stéphane Gobron and Norishige Chiba. Simulation of peeling using 3d-surface cellular automata. pages 338–347, 02 2001.
- [GDGP16] Eric Guérin, Julie Digne, Eric Galin, and Adrien Peytavie. Sparse representation of terrains for procedural modeling. *Computer Graphics Forum*, 35, 05 2016.
- [GGP⁺15] Jean-David G enevaux, Eric Galin, Adrien Peytavie, Eric Guérin, Cyril Briquet, Francois Grosbellet, and Bedrich Benes. Terrain modeling from feature primitives. *Computer Graphics Forum*, 34, 05 2015.
- [GGP⁺19] Eric Galin, Eric Guérin, Adrien Peytavie, Guillaume Cordonnier, Marie-Paule Cani, Bedrich Benes, and James Gain. A review of digital terrain modeling. *Computer Graphics Forum*, 38, 05 2019.
- [GMM⁺12] L. Glondu, L. Muguercia, M. Marchal, C. Bosch, H. Rushmeier, G. Dumont, and G. Drettakis. Example-based fractured appearance. *Comput. Graph. Forum*, 31(4) :1547–1556, June 2012.

- [GP14] Jie Guo and Jin-Gui Pan. Real-time simulating and rendering of layered dust. *The Visual Computer*, 30 :797–807, 06 2014.
- [GPH⁺18] Ming Gao, Andre Pradhana, Xuchen Han, Qi Guo, Grant Kot, Eftychios Sifakis, and Chenfanfu Jiang. Animating fluid sediment mixture in particle-laden flows. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 37 :1 – 11, 2018.
- [GRG12] Tobias Günther, Kai Rohmer, and Thorsten Grosch. GPU-accelerated Interactive Material Aging. In Michael Goesele, Thorsten Grosch, Holger Theisel, Klaus Toennies, and Bernhard Preim, editors, *Vision, Modeling and Visualization*. The Eurographics Association, 2012.
- [HBDP17] Torsten Hädrich, Bedrich Benes, Oliver Deussen, and Sören Pirk. Interactive modeling and authoring of climbing plants. *Computer Graphics Forum*, 36 :49–61, 05 2017.
- [HH02] Christopher Hall and William D. Hoff. Water transport in brick, stone and concrete. 2002.
- [HPMG06] Kevin Hnat, Damien Porquet, Stéphane Merillou, and Djamchid Ghazanfarpour. Real-time wetting of porous media. *Machine Graphics & Vision International Journal*, 15, 10 2006.
- [HTK98] K. Hirota, Y. Tanoue, and T. Kaneko. Generation of crack patterns with a physical model. *The Visual Computer*, 14 :126–137, 1998.
- [HW95] Siu-Chi Hsu and Tien-Tsin Wong. Simulating dust accumulation. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 15(1) :18–22, Jan 1995.
- [IABT11] Markus Ihmsen, Nadir Akinci, Markus Becker, and Matthias Teschner. A parallel sph implementation on multi-core cpus. *Comput. Graph. Forum*, 30 :99–112, 03 2011.
- [ICS⁺14] Markus Ihmsen, Jens Cornelis, Barbara Solenthaler, Christopher Horvath, and Matthias Teschner. Implicit incompressible sph. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 20(3) :426–435, 2014.
- [IFMC03] Tomoya Ito, T Fujimoto, Kazunobu Muraoka, and Norishige Chiba. Modeling rocky scenery taking into account joints. pages 244–247, 08 2003.
- [IO06] Hayley N. Iben and James F. O’Brien. Generating surface crack patterns. In *Proceedings of the ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation*, pages 177–185, Sept 2006.
- [Jen96] Henrik Wann Jensen. Global illumination using photon maps. In Xavier Pueyo and Peter Schröder, editors, *Rendering Techniques ’96*, pages 21–30, Vienna, 1996. Springer Vienna.
- [JFBB10] Michael Jones, McKay Farley, Joseph Butler, and Matthew Beardall. Directable weathering of concave rock using curvature estimation. *IEEE transactions on visualization and computer graphics*, 16 :81–94, 03 2010.
- [JRB11] Joseph Jr, Samantha Raja, and Norman Badler. Fruit senescence and decay simulation. *Comput. Graph. Forum*, 30 :257–266, 04 2011.
- [JSTZ13] Min Jiang, Richard Southern, Safa Tharib, and Jian Jun Zhang. Energy-based dissolution simulation. In *2013 International Conference on Computer-Aided Design and Computer Graphics*, pages 405–406, 2013.

- [JSZ15] M. Jiang, R. Southern, and J.J. Zhang. A particle-based dissolution model using chemical collision energy. *GRAPP 2015 - 10th International Conference on Computer Graphics Theory and Applications; VISIGRAPP, Proceedings*, pages 285–293, 01 2015.
- [JSZ18] Min Jiang, Richard Southern, and Jiang Zhang. Energy-based dissolution simulation using sph sampling : Energy-based dissolution simulation. *Computer Animation and Virtual Worlds*, 29 :e1798, 01 2018.
- [KBKS09] Peter Kristof, Bedrich Benes, Jaroslav Krivanek, and Ondrej Stava. Hydraulic erosion using smoothed particle hydrodynamics. *Computer Graphics Forum*, 28 :219 – 228, 04 2009.
- [KBST19] Dan Koschier, Jan Bender, Barbara Solenthaler, and Matthias Teschner. Smoothed Particle Hydrodynamics Techniques for the Physics Based Simulation of Fluids and Solids. In Wenzel Jakob and Enrico Puppo, editors, *Eurographics 2019 - Tutorials*. The Eurographics Association, 2019.
- [Kub48] Paul Kubelka. New contributions to the optics of intensely light-scattering materials. part i. *J. Opt. Soc. Am.*, 38(5) :448–457, May 1948.
- [LAD08] Toon Lenaerts, Bart Adams, and Philip Dutré. Porous flow in particle-based fluid simulations. *ACM Trans. Graph.*, 27(3) :1–8, August 2008.
- [LC87] William E. Lorensen and Harvey E. Cline. Marching cubes : A high resolution 3d surface construction algorithm. *SIGGRAPH Comput. Graph.*, 21(4) :163–169, August 1987.
- [LDR09] Jianye Lu, Julie Dorsey, and Holly Rushmeier. Dominant texture and diffusion distance manifolds. *Computer Graphics Forum*, 28(2) :667–676, 2009.
- [LGG⁺07] Jianye Lu, Athinodoros S. Georghiades, Andreas Glaser, Hongzhi Wu, Li-Yi Wei, Baining Guo, Julie Dorsey, and Holly Rushmeier. Context-aware textures. *ACM Trans. Graph.*, 26(1) :3–es, January 2007.
- [LGR⁺05] Jianye Lu, Athinodoros Georghiades, Holly Rushmeier, Julie Dorsey, and Chen Xu. Synthesis of material drying history : Phenomenon modeling, transferring and rendering. pages 7–16, 01 2005.
- [LP02] Brendan Lane and Przemyslaw Prusinkiewicz. Generating spatial distributions for multilevel models of plant communities. pages 69–80, 01 2002.
- [LZLW05] Youquan Liu, H.B. Zhu, Xuehui Liu, and Enhua Wu. Real-time simulation of physically based on-surface flow. *The Visual Computer*, 21 :727–734, 09 2005.
- [MBP14] Lien Muguercia, Carles Bosch, and Gustavo Patow. Fracture modeling in computer graphics. *Computers & Graphics*, 45 :86–100, 2014.
- [MCG03] Matthias Müller, David Charypar, and Markus Gross. Particle-based fluid simulation for interactive applications. volume 2003, pages 154–159, 07 2003.
- [MDG01] Stephane Merillou, Jean-michel Dischler, and Djamchid Ghazanfarpour. Corrosion : Simulating and rendering. *Proceedings - Graphics Interface*, 07 2001.

- [MG08] Stéphane Mérillou and Djamchid Ghazanfarpour. A survey of aging and weathering phenomena in computer graphics. *Computers & Graphics*, 32(2) :159 – 174, 2008.
- [MHHR07] Matthias Müller, Bruno Heidelberger, Marcus Hennix, and John Ratcliff. Position based dynamics. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 18(2) :109–118, 2007.
- [Mil94] Gavin Miller. Efficient algorithms for local and global accessibility shading. In *Proceedings of the 21st Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, SIGGRAPH '94, page 319–326, New York, NY, USA, 1994. Association for Computing Machinery.
- [MKC⁺06] Tom Mertens, Jan Kautz, Jiawen Chen, Philippe Bekaert, and Frédo Durand. Texture Transfer Using Geometry Correlation. In Tomas Akenine-Moeller and Wolfgang Heidrich, editors, *Symposium on Rendering*. The Eurographics Association, 2006.
- [MKM89] F. K. Musgrave, C. E. Kolb, and R. S. Mace. The synthesis and rendering of eroded fractal terrains. In *Proceedings of the 16th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, SIGGRAPH '89, page 41–50, New York, NY, USA, 1989. Association for Computing Machinery.
- [MMG⁺10] Nicolas Mérillou, Stéphane Mérillou, Djamchid Ghazanfarpour, J Dischler, and Eric Galin. Simulating atmospheric pollution weathering on buildings. 01 2010.
- [MMGG12] Nicolas Mérillou, Stéphane Merillou, Eric Galin, and Djamchid Ghazanfarpour. Simulating how salt decay ages buildings. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 32 :44–54, 03 2012.
- [Mon92] Joseph Monaghan. Smoothed particle hydrodynamics. *araa*, 30 :543–574, 01 1992.
- [Mon94] J.J. Monaghan. Simulating free surface flows with sph. *Journal of Computational Physics*, 110(2) :399–406, 1994.
- [Mon05] Joseph Monaghan. Smoothed particle hydrodynamics. *Reports on Progress in Physics*, 68 :1703, 07 2005.
- [MPBM⁺17] Imanol Muñoz-Pandiella, Carles Bosch, Nicolas Mérillou, Xavier Pueyo, and Stéphane Mérillou. Real-time solar exposure simulation in complex cities. *Computer Graphics Forum*, 36, 2017.
- [MPBM⁺18] Imanol Muñoz Pandiella, Carles Bosch, Stephane Merillou, Nicolas Mérillou, Gustavo Patow, and Xavier Pueyo. Urban weathering : Interactive rendering of polluted cities. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, PP :1–1, 01 2018.
- [MPSB21] Daniel Meister, Adam Pospíšil, Imari Sato, and Jiří Bittner. Spatio-temporal brdf : Modeling and synthesis. *Computers & Graphics*, 97 :279–291, 2021.
- [MSKG05] Matthias Müller, Barbara Solenthaler, Richard Keiser, and Markus Gross. Particle-based fluid-fluid interaction. In *Proceedings of the 2005 ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation*, SCA '05, page 237–244, New York, NY, USA, 2005. Association for Computing Machinery.

- [Nag98] K. Nagashima. Computer generation of eroded valley and mountain terrains. *The Visual Computer*, 13 :456–464, 1998.
- [OH99] James O’Brien and Jessica Hodgins. Graphical modeling and animation of brittle fracture. *Proceedings of SIGGRAPH 1999*, 07 1999.
- [PC13] Saket Patkar and Parag Chaudhuri. Wetting of porous solids. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 19(9) :1592–1604, 2013.
- [PNdJO14] Tobias Pfaff, Rahul Narain, Juan Miguel de Joya, and James F. O’Brien. Adaptive tearing and cracking of thin sheets. *ACM Trans. Graph.*, 33(4), July 2014.
- [PPD01] Eric Paquette, Pierre Poulin, and George Drettakis. Surface Aging by Impacts. In *Proceedings of Graphics Interface 2001*, Ottawa, Ontario, Canada, 2001.
- [PPD02] Eric Paquette, Pierre Poulin, and George Drettakis. The simulation of paint cracking and peeling. pages 59–68, 05 2002.
- [Pru98] Przemyslaw Prusinkiewicz. Modeling of spatial structure and development of plants : a review. *Scientia Horticulturae*, 74(1) :113–149, 1998.
- [RSKN08] Witawat Rungjiratananon, Zoltan Szego, Yoshihiro Kanamori, and Tomoyuki Nishita. Real-time animation of sand-water interaction. *Computer Graphics Forum*, 27 :1887–1893, 10 2008.
- [RXL21] Bo Ren, Ben Xu, and Chenfeng Li. Unified particle system for multiple-fluid flow and porous material. *ACM Trans. Graph.*, 40(4), July 2021.
- [RZ54] J.F. Richardson and W.N. Zaki. Sedimentation and fluidisation. *Transactions of the Institution of Chemical Engineers*, 32 :35–53, 1954.
- [SBBK08] Ondrej Stava, Bedrich Benes, Matthew Brisbin, and Jaroslav Krivanek. Interactive terrain modeling using hydraulic erosion. pages 201–210, 07 2008.
- [SKS13] Henry Schäfer, Benjamin Keinert, and Marc Stamminger. Real-time local displacement using dynamic gpu memory management. In *Proceedings of the 5th High-Performance Graphics Conference, HPG ’13*, page 63–72, New York, NY, USA, 2013. Association for Computing Machinery.
- [SP09] B. Solenthaler and R. Pajarola. Predictive-corrective incompressible sph. In *ACM SIGGRAPH 2009 Papers*, SIGGRAPH ’09, New York, NY, USA, 2009. Association for Computing Machinery.
- [SQBB18] M. Saba, E.E. Quiñones-Bolaños, and Aida Liliana Barbosa López. A review of the mathematical models used for simulation of calcareous stone deterioration in historical buildings. *Atmospheric Environment*, 180 :156–166, 2018.
- [Ste10] Katja Sterflinger. Fungi : Their role in deterioration of cultural heritage. *Fungal Biology Reviews*, 24(1) :47–55, 2010.
- [Sto48] G. G. Stokes. On the Steady Motion of Incompressible Fluids. *Transactions of the Cambridge Philosophical Society*, 7 :439, January 1848.

- [THM⁺03] Matthias Teschner, Bruno Heidelberger, Matthias Müller, Danat Pomeranets, and Markus Gross. Optimized spatial hashing for collision detection of deformable objects. *VMV'03 : Proceedings of the Vision, Modeling, Visualization*, 3, 12 2003.
- [TNNB20] Hieu Tran, Nhu Nguyen, Giang Nguyen, and Ha Bui. *Meshfree SPH modelling of shrinkage induced cracking in clayey soils*, pages 889–894. 01 2020.
- [TPD⁺17] Evdoxia Taka, Konstantinos Papachristou, Anastasios Drosou, Nikolaos Dimitriou, and Dimitrios Tzovaras. Physical forces aware aging simulation on cultural heritage artifacts. In *2017 3DTV Conference : The True Vision - Capture, Transmission and Display of 3D Video (3DTV-CON)*, pages 1–4, 2017.
- [VPL06] Gilles Valette, Stéphanie Prévost, and Laurent Lucas. A generalized cracks simulation on 3d-meshes. In *Proceedings of the Second Eurographics Conference on Natural Phenomena, NPH'06*, page 7–14, Goslar, DEU, 2006. Eurographics Association.
- [WCMT07] Christopher Wojtan, Mark Carlson, Peter Mucha, and Greg Turk. Animating corrosion and erosion. pages 15–22, 01 2007.
- [WFL⁺19] Joshua Wolper, Yu Fang, Minchen Li, Jiecong Lu, Ming Gao, and Chenfanfu Jiang. Cd-mpm : Continuum damage material point methods for dynamic fracture animation. *ACM Trans. Graph.*, 38(4), July 2019.
- [WHK16] Rene Winchenbach, Hendrik Hochstetter, and Andreas Kolb. Constrained neighbor lists for sph-based fluid simulations. In *Symposium on Computer Animation*, 2016.
- [WRK⁺10] Martin Wicke, Daniel Ritchie, Bryan M. Klingner, Sebastian Burke, Jonathan R. Shewchuk, and James F. O'Brien. Dynamic local remeshing for elastoplastic simulation. *ACM Transactions on Graphics*, 29(4) :49 :1–11, July 2010. Proceedings of ACM SIGGRAPH 2010, Los Angeles, CA.
- [WTL⁺06] Jiaping Wang, Xin Tong, Stephen Lin, Minghao Pan, Chao Wang, Hujun Bao, Baining Guo, and Heung-Yeung Shum. Appearance manifolds for modeling time-variant appearance of materials. In *ACM SIGGRAPH 2006 Papers, SIGGRAPH '06*, page 754–761, New York, NY, USA, 2006. Association for Computing Machinery.
- [XLX13] Qingang Xiong, Bo Li, and Ji Xu. Gpu-accelerated adaptive particle splitting and merging in sph. *Computer Physics Communications*, 184(7) :1701–1707, 2013.
- [XWT⁺08] Su Xue, Jiaping Wang, Xin Tong, Qionghai Dai, and Baining Guo. Image-based material weathering. *Computer Graphics Forum*, 27 :617 – 626, 04 2008.
- [YHJ⁺14] Ling-Qi Yan, Miloš Hašan, Wenzel Jakob, Jason Lawrence, Steve Marschner, and Ravi Ramamoorthi. Rendering glints on high-resolution normal-mapped specular surfaces. *ACM Trans. Graph.*, 33(4), July 2014.
- [YHMR16] Ling-Qi Yan, Miloš Hašan, Steve Marschner, and Ravi Ramamoorthi. Position-normal distributions for efficient rendering of specular microstructure. *ACM Transactions on Graphics*, 35 :1–9, 07 2016.

- [YT10] Jihun Yu and Greg Turk. Reconstructing surfaces of particle-based fluids using anisotropic kernels. volume 32, pages 217–225, 07 2010.

Simulation de changements d'apparence via hydrodynamique des particules lissées

Résumé :

La génération d'images réalistes est un enjeu majeur de l'informatique graphique. Pour relever ce défi il convient de résoudre un ensemble de problèmes variés tels que la modélisation géométrique des scènes, l'étude de modèles d'interactions entre la lumière et les objets et la résolution du transport de la lumière. Si la résolution de ces problèmes permet l'obtention d'image réaliste au sens strict, cela ne permet pas de résoudre le problème du photo-réalisme. Les scènes que l'on peut observer dans la nature n'exhibent que rarement des objets à l'apparence immaculée, leur présence dans une image de synthèse trahi son réalisme instantanément. Afin de tromper notre perception il convient de donner à l'apparence des objets de ces mondes virtuels des détails et imperfections cohérentes à l'environnement dans lequel ils se situent. Cette thèse vise à proposer une solution à ce problème par la mise en oeuvre d'une simulation lagrangienne reposant sur l'hydrodynamique des particules lissées pour modéliser les solides, l'eau, les sédiments et leur transport dans des scènes virtuelles. La représentation particulaire employée permet de traiter simultanément la géométrie et les paramètres matériaux des objets de la scène. L'approche proposée rend possible la modélisation d'une grande variété d'effets du changement d'apparence s'étalant de la simulation de cycles de mouillage et séchage d'objets poreux, l'apparition de tâches sur des parois où même de l'efflorescence via une approche unifiée.

Mots clés : Changement d'apparence, flux poreux, matériaux, hydrodynamique des particules lissées.

Simulating changes in appearance using smooth particle hydrodynamics

Abstract : The generation of realistic images is a central topic of research in computer graphics. In order to obtain such images numerous problems must be solved from the modelisation of the scene geometry, modeling light-matter interactions and solving the light transport in the whole scene. If solving these problem enables the generation of realistic imagery it does not guarantee a photo-realistic appearance. Indeed, real-life scenes rarely exhibit objects with pristine appearance and the presence of perfectly preserved object in a virtual scene seems very uncanny to the human perception. It is thus required to add details to virtual scenes's objects appearance. This thesis proposes a solution based on a lagrangian simulation framework using the smooth particle hydrodynamics to model interactions between solid, fluid, sediments and the transport of matter through virtual scenes. Using particles to discretize the whole volume of objects enables to model geometry and material property changes simultaneously. The proposed approach can simulate a wide variety of weathering effects from the wetting and drying of porous material, stains formation or even efflorescence in a unified fashion.

Keywords : Weathering, Porous flow, material, smooth particle hydrodynamics.

Univ. Limoges, CNRS, XLIM, UMR 7252, F-87000 Limoges, France.