Grains de son · Première expérience

Cyclonium · Version 1 · 19 octobre 2026

Une grille carrée dont les nœuds ne se déplacent qu’en altitude, un point excité par le son et des grains soumis à la gravité. Les grains heurtent la toile et se heurtent entre eux, mais ne rendent aucune force à la toile. Le son anime donc une surface qui anime une matière légère.

Commencer

Appuyer sur Calculer l’expérience. Un sinus de 35 Hz et six secondes est déjà disponible. Le calcul se prépare dans un Worker, puis Lire lance simultanément le son et la visualisation. La barre temporelle permet d’observer un instant précis. Les vitesses × ¼ et × ₁⁄₁₀ ralentissent aussi le son : sa hauteur baisse volontairement.

Faire glisser la scène pour tourner la caméra. Le mouvement vertical permet de regarder sous la toile. La molette règle le zoom. Vue initiale rétablit la caméra. L’amplification verticale rend visibles les petits déplacements, sans modifier les calculs ; elle déforme également les grains à l’image pour conserver leur contact apparent avec la toile.

Dans Réglages & fichiers, importer un fichier audio ou créer un autre sinus. Les vingt premières secondes au maximum sont conservées ; un fichier stéréo est ramené à la moyenne de ses canaux. Les canaux en opposition peuvent donc s’annuler. Le navigateur décode le fichier à la cadence du contexte audio : la promesse porte sur chaque échantillon du signal décodé, pas sur la conservation brute de tous les formats compressés ou de leur cadence native.

Choisir les bords, la taille de grille, les couplages et les grains. Un réglage physique invalide les trajectoires précédentes : il faut recalculer. Placer le point excitateur permet de choisir un nœud intérieur. La sélection utilise la projection du plan au repos. Changer le dépôt initial choisit une nouvelle graine pseudo-aléatoire, conservée dans le projet.

Captures et sauvegarde

Le JSON contient les paramètres, la graine, la caméra et les échantillons float32 little-endian encodés en base64. Il ne réduit pas le signal à 16 bits. Au rechargement, les trajectoires sont recalculées. Le PNG photographie la scène. La vidéo enregistre sa lecture et le son, dans un format pris en charge par le navigateur. Exporter aussi le JSON pour accompagner ces captures de leurs paramètres et de leur provenance.

Il n’y a pas de sauvegarde automatique. La première version ne comporte pas d’entrée microphone : la priorité est un calcul reproductible sans saut d’échantillons. Le microphone n’est pas déclaré impossible ; il demandera une implantation audio temps réel et un budget mesuré sur les appareils visés.

La toile et les grains

Couplages symétriques

Le domaine horizontal mesure 4 × 4 unités assimilées à des mètres. Chaque nœud libre de masse unitaire a quatre voisins, reliés par des couplages linéaires symétriques. La loi est : accélération z_i = κ × somme($z_j - z_i$) − γ × vitesse z_i. κ représente k/m, en s^{-2} ; γ est l'amortissement, en s^{-1}. Il n'existe pas de rappel supplémentaire de chaque nœud vers zéro.

Le point excitateur suit $z_p[n] = A \times s[n]$, où A est l'amplitude en mètres. Sa vitesse est calculée par différence de deux positions imposées : $v_p[n]$ = cadence × A × ($s[n] - s[n-1]$). Il ne suit pas simultanément l'équation des nœuds libres. Avant le premier échantillon, la source, les hauteurs et les vitesses sont nulles. Une discontinuité du signal peut donc imposer une grande vitesse ; le sinus fourni possède des rampes de 40 ms.

En mode fixe, le pourtour reste à z = 0 ; les grains rencontrent également des limites latérales réfléchissantes et dissipatives. En mode torique, les voisins, la surface interpolée, les grains et la recherche des collisions sont périodiques. Le rendu montre une tuile du domaine avec ses bords raccordés, pas un donut. Le bord supérieur de la tuile graphique répète les nœuds du bord opposé.

Intégration

Chaque échantillon avance la toile et les grains. Le solveur accumule d'abord les accélérations de tous les nœuds, puis met à jour les vitesses et les positions par Euler semi-implicite. Les degrés de liberté libres ne sont donc pas mis à jour en cascade dans la même boucle d'accumulation. Une subdivision du pas est prévue d'après la borne fréquentielle √(8κ) : le pas est choisi pour que Δt × √(8κ) ne dépasse pas 1,5. Dans les plages actuellement proposées, un pas par échantillon suffit à ce critère de stabilité linéaire.

Cette borne ne prouve pas l'exactitude des contacts ni de la réponse fréquentielle. À maillage différent, conserver κ ne conserve pas une vitesse d'onde physique identique, puisque la distance entre voisins change. L'atelier expose pour l'instant un réseau discret, pas une membrane continue recalibrée automatiquement.

Contacts

Les grains ont un rayon de 0,045 m et des masses égales. La gravité agit sur leur vitesse verticale. La surface au contact est interpolée bilinéairement ; sa normale est proportionnelle à $(-\partial z/\partial x, -\partial z/\partial y, 1)$. Sa vitesse verticale est interpolée avec les mêmes poids. Les chocs utilisent la vitesse relative du grain à cette surface ; le coefficient de restitution règle le rebond et un frottement de type Coulomb réduit la composante tangentielle.

La pénétration est corrigée selon la normale locale. Les chocs grain–grain utilisent une impulsion normale entre masses égales, sans rotation des grains ni frottement tangentiel entre eux. Un quadrillage horizontal sert à chercher les voisins, puis la distance est testée en trois dimensions. Les raccords périodiques utilisent l'image la plus proche. Aucune impulsion de grain n'est réinjectée dans les nœuds.

Précision, exécution et vérifications

Ce que signifie « chaque échantillon »

Le signal signé complet excite la toile : aucune enveloppe d’amplitude ni valeur RMS ne remplace ses échantillons. La préparation n’a pas de contrainte temps réel et reste annulable par terminaison du Worker. Chaque grain avance et les contacts sont recherchés à chaque pas. Seules les observations sont raréfiées : hauteurs et positions sont conservées à 240 Hz, puis interpolées pour l’affichage.

Conséquence : les vibrations visuelles au-delà de 120 Hz peuvent subir un repliement temporel dans les instantanés. Le ralenti de ces observations n’est pas une reconstruction de chaque état audio. Le calcul, lui, a traité les états intermédiaires. Une observation scientifique de vibrations plus rapides nécessiterait une cadence de capture supérieure ou un enregistrement ciblé des nœuds.

Limites mécaniques assumées

La détection est discrète, sans résolution continue du temps exact d’impact. Le contact grain–toile utilise un plan tangent local, approximatif pour les pentes et courbures fortes. Une seule passe de contacts grain–grain est effectuée par pas ; leur correction peut recréer une pénétration qui sera reprise au pas suivant. Le modèle convient à cette première expérience de grains clairsemés, pas à une garantie de fidélité d’un sable dense.

Les grandes excitations peuvent provoquer des vitesses importantes, des pénétrations ou une perte de précision. Le calcul s’interrompt en cas de hauteur de nœud excessive ou de vitesse extrême. Les couleurs représentent les altitudes, et non une énergie mesurée. Les facettes triangulaires du rendu approchent la surface bilinéaire utilisée pour les contacts. Le tri par profondeur n’est pas un moteur de rendu 3D avec tampon de profondeur : certaines occultations peuvent être approximatives.

Répartition du travail

CPU Worker : intégration en double précision et recherche des contacts. Mémoire d’observation : float32 pour les hauteurs et positions, float64 pour les temps. Fil principal : interface et projection Canvas 2D, dont la vitesse ne conditionne pas le solveur. Web Audio : lecture du signal source et horloge de synchronisation. Le son des collisions n’est pas synthétisé dans cette version.

L’export JSON contient le signal exact conservé en float32, les paramètres et une version du modèle. La reproduction est déterministe dans le même environnement de calcul ; de petites différences entre plateformes restent possibles. Le volume d’écoute ne modifie pas le déplacement imposé : seul le réglage Amplitude agit sur la toile.

Validation

Tests automatiques : déterminisme, source imposée aux instants sauvegardés, bords fixes, absence de rétroaction des grains, toile silencieuse, contacts, raccord torique, rejet de paramètres invalides. Une intégration simulée vérifie le dessin, le Worker, l’invalidation des résultats et l’aller-retour float32 du signal sans perte.

Mesure indicative sur le serveur de développement : 288 000 échantillons à 48 kHz, grille 17 × 17, 24 grains et six secondes de sinus se calculent en environ 2,3 secondes. Ce résultat ne constitue pas une garantie sur téléphone. Les compteurs de contacts dénombrent des pas où un contact est traité, pas nécessairement des chocs physiques distincts.

Le rendu réel dans un navigateur, le tactile, la sortie audio et la capture vidéo n’ont pas été testés sur appareil. Le site HTTPS est conseillé. La page autonome ne requiert aucune bibliothèque externe, mais son ouverture en fichier local peut être soumise aux restrictions du navigateur. Les réglages fins restent disponibles en éloignant verticalement le doigt pendant un glissement horizontal.