

TITRE

Merwan Achibet

Contents

1	Introduction	
1.1	Les moteurs physiques	1
1.2	Travail à accomplir	2
1.3	Étude de cas	2
1.3.1	La chute	2
1.3.2	Le rebond	3
1.3.3	Le repos	3
2	Dynamique	
2.1	La composante linéaire du mouvement . .	3
2.2	Intégration	4
2.3	Modélisation d'un corps rigide	5
2.4	La composante angulaire du mouvement	6
2.4.1	L'orientation	6
2.4.2	Élan angulaire	6
2.5	Quantités auxiliaires	7
2.6	Intégration complète	7
2.6.1	Correction de l'intégration	7
3	Gestion des collisions	
3.1	Détection d'une collision	8
3.1.1	Détection grossière	8
3.1.2	Détection fine	9
3.2	Correction du contact	10
3.3	Réponse à une collision	11
4	Le moteur physique	
4.1	Ordre des tâches	12
4.2	Démonstrations	12
4.3	Limitations et perspectives d'évolution . .	12
4.3.1	Tunneling	12
4.3.2	Partitionnement de l'espace	13
4.3.3	Extension aux corps concaves	13

1 Introduction

1.1 Les moteurs physiques

Invisibles, les phénomènes physiques qui régissent le fonctionnement de notre univers sont pourtant omniprésents et universels. Étudiées depuis des siècles, les lois les décrivant ont été à maintes reprises redéfinies et affinées et il est de nos jours indispensable de pouvoir les modéliser de façon fidèle ou tout du moins d'être capable de les approximer de façon plausible.

Une simulation industrielle visant par exemple à reproduire virtuellement les interactions entre les différentes pièces qui composent une automobile doit être capable de reproduire de façon réaliste la friction des pneumatiques sur le sol, l'influence de la gravité sur le véhicule, le comportement thermique et volumique des fluides qu'il contient ainsi que de nombreux autres aspects mécaniques de son fonctionnement. Le système informatique simulant tous ces facteurs est appelé moteur physique. Dans cet exemple, les enjeux de sécurité et de qualité sont grands et des résultats d'une précision extrême sont exigés. Les calculs à mettre en jeu pour les obtenir peuvent donc se permettre d'être très coûteux et de se baser sur des modélisations mathématiques complexes. Il n'est pas rare que ces processus de simulation soient répartis sur plusieurs machines et s'étalent sur une durée de calcul de plusieurs heures.

A contrario, les moteurs physiques d'autres types de système complexe ne peuvent se permettre une telle latence et doivent fonctionner en temps réel. La contrainte est encore plus forte lorsque le moteur physique doit cohabiter avec d'autres modules gérant différents aspects de l'application. On pense notamment aux jeux vidéo, qui partagent le temps de calcul alloué entre le moteur graphique, le moteur d'intelligence artificielle, la gestion du son, la gestion du réseau, et bien sûr le moteur physique. Dans ce cadre, auquel on peut gr-

effier la réalité virtuelle et ses applications dérivées, la contrainte la plus importante est le temps d'exécution et non la précision des résultats. On ne cherche plus à obtenir des données exactes mais une représentation plausible du réel. Ainsi, certains raccourcis pourront être tolérés et une part de réalisme est sacrifiée au profit de la vitesse.

La physique est un champ très vaste dont les disciplines vont de l'acoustique à l'électronique. Néanmoins, le spectre d'action des moteurs physiques se limite à la mécanique classique, dite mécanique newtonienne. Ce sous-domaine répond à des questions telles que : Comment réagira cette balle si on la lance sur un mur ? Quelle est l'influence d'une planète sur un objet spatial donné ? Pourquoi un liquide visqueux dispose-t-il d'une faible vitesse d'écoulement ? Quelles déformations engendrera un choc entre deux voitures ?

La mécanique newtonienne est elle-même une vaste discipline et la précision d'une modélisation ne suffit pas à la différenciation entre tous les moteurs physiques. Souvent, un moteur physique sera spécialisé. Certains simuleront les interactions entre corps rigides comme une boîte en plastique tombant sur le sol. Certains simuleront le comportement d'objets déformables comme deux véhicules se percutant. D'autres se concentreront sur les réactions entre liquides ou entre gaz.

1.2 Travail à accomplir

L'objectif de ce projet est de concevoir un moteur physique de base permettant de gérer les interactions entre des corps rigides et convexes. On parle de corps rigides dans la mesure où les objets mis en jeu seront indéformables et incassables. Dans un tel contexte, une tasse en porcelaine surmontée d'un bloc de granite d'une tonne ne serait aucunement endommagée. On parle de corps convexes car se limiter dans un premier temps à ce type de structure autorise certaines facilités dans les calculs. Une piste pour étendre la simulation aux solides concaves sera présentée dans la dernière partie.

La contrainte principale de notre application sera le temps. On veut concevoir une simulation exécutable en temps réel de telle façon que si l'utilisateur modifie l'environnement de la simulation à un instant quel-

conque, une réaction à cette interaction soit immédiatement perceptible. Certains raccourcis dans les calculs ainsi que plusieurs approximations seront acceptés. Le fonctionnement du moteur se base néanmoins sur des lois bien connues de la mécanique de Newton et ses résultats ne devront pas s'éloigner de façon démesurée de ceux que l'on retrouverait dans une situation réelle.

1.3 Étude de cas

L'activité physique d'un corps se divise en plusieurs phases. Afin de les détailler, analysons une situation concrète. Si l'on tenait une balle dans notre main et que nous la lâchions au dessus d'un plan faiblement incliné, quelles seraient les étapes que cet objet traverserait avant d'arriver à un état de repos ?

1.3.1 La chute

La main s'ouvre et laisse s'échapper la balle. Notre appréhension du monde qui nous entoure nous permet de prévoir que l'objet tombera et accélérera vers le bas. Ce phénomène est quantifié par la seconde loi de Newton.

$$\vec{a} = \frac{1}{m} \sum \vec{F}_i$$

Cette règle décrit l'accélération \vec{a} d'un corps comme étant le produit de l'inverse de sa masse m et de la somme des forces \vec{F}_i qui lui sont appliquées. Dans notre exemple, on lâche la balle sans lui donner d'élan initial et la seule influence qu'elle subit au cours de sa chute est celle de la gravité. La gravité terrestre est une force de $9.81N$ dirigée vers le noyau de la planète mais dans la simulation, on peut la réduire à une force dirigée vers le "bas" (dans la direction négative de l'axe y). Afin de bénéficier d'un moteur physique versatile, la puissance de la gravité pourra être modifiée, pour simuler une situation lunaire par exemple, ou être totalement annulée, pour simuler une situation d'apesanteur. En réalité, la gravité ne sera même pas codée "en dur" mais appartiendra à une liste de forces environnementales qui contiendra toutes les influences que le monde extérieur fait subir aux corps qu'il contient. On pourra par

exemple modéliser, entre autres, la résistance de l'air ou le roulis irrégulier du vent.

Cette observation du comportement de la balle nous oriente sur la façon dont l'on pourra modéliser les déplacements d'objets soumis à des forces extérieures. À chaque corps seront associées des quantités physiques telles que la position, la vitesse et l'accélération. C'est la façon dont ces variables évolueront et s'influenceront entre elles qui déterminera la qualité du rendu du moteur physique. Dans la première partie de ce compte-rendu, on précisera donc les méthodes employées pour simuler la dynamique des corps.

1.3.2 Le rebond

Alors que la balle s'approche du plan incliné, on s'attend naturellement à ce qu'elle entre en contact avec ce dernier et qu'une réaction proportionnelle à la puissance du choc soit produite. Cette réaction dépend de nombreux facteurs, notamment des masses des objets et de leur vitesse respective.

Le moteur physique devra être capable de générer une réaction réaliste dont la détermination passe par une formule présentée dans la seconde partie. Néanmoins, le travail le plus complexe n'est pas de calculer une réponse mais de détecter une collision. Plusieurs processus géométriques devront être mis en place afin de vérifier si une collision a lieu et si tel est le cas, afin de mesurer précisément quels points des deux corps entrent en contact.

Une difficulté supplémentaire vient du fait que la simulation est mise à jour de façon discrète. Lorsqu'une collision sera détectée entre deux corps, il est presque impossible de se retrouver dans une situation de contact parfait. On aura plutôt des contacts pénétrants au sein desquels l'intégrité physique des corps est rompue et les objets rentrent l'un dans l'autre. Une des tâches du moteur physique sera de pallier ce problème en recalant les corps dans la position de contact parfait qu'ils auraient dû atteindre.

Cette phase de la vie d'un corps rigide est la plus courte, puisqu'instantanée, mais demandera paradoxalement le plus de travail. Les considérations géométriques qui entrent en jeu, ainsi que les limites à contourner, imposées par l'arithmétique des ordinateurs, seront détaillées dans la seconde section.

1.3.3 Le repos

Les rebonds sur le plan sont de plus en plus faibles, jusqu'à ce que la balle n'ait plus assez d'énergie cinétique pour s'élever à nouveau. Puisque qu'elle repose sur un plan légèrement incliné, elle roule quelques instants, de plus en plus lentement, jusqu'à parvenir à un arrêt total.

Son état de repos laisse penser que plus aucune force ne s'applique sur elle. Contrairement aux apparences, dans le monde réel ce n'est pas parce qu'un corps est fixe qu'il est libre de toute influence. La gravité n'a pas disparu par magie et pourtant l'accélération de la balle est nulle, puisqu'elle est immobile. La troisième loi de Newton est là pour démystifier cette situation :

Tout corps A exerçant une force sur un corps B subit une force d'intensité égale, de même direction mais de sens opposé, exercée par le corps B .

Autrement dit :

$$\begin{aligned}\vec{F}_{A/B} &= -\vec{F}_{B/A} \\ \vec{F}_{A/B} + \vec{F}_{B/A} &= 0\end{aligned}$$

Ici, la balle subit toujours la gravité mais le plan produit une force inverse qui permet d'annuler tout mouvement. Même si un spectateur aura l'impression que la balle est inactive, des micro-collisions lui permettent de rester à la surface du plan et d'équilibrer le système. Ce phénomène sera reproductible dans le moteur physique. [détails]

2 Dynamique

2.1 La composante linéaire du mouvement

Nous allons pour l'instant nous concentrer sur l'aspect cinématique d'un corps rigide, c'est à dire son mouvement lorsqu'il n'est soumis à aucune force extérieure. Dans un premier temps, seule la composante linéaire du mouvement sera étudiée et les objets dont nous allons simuler le comportement seront réduits à de simples particules. Les figures présentées tout au long de

ce rapport sont en deux dimensions pour des raisons de clarté mais le principe reste similaire lorsqu'il est étendu à la troisième dimension.

La quantité physique la plus perceptible visuellement pour un spectateur est la position \vec{p} d'un corps. Pour notre affichage final, c'est cette valeur à tout instant t de la simulation que l'on veut déterminer. Le travail de la partie dynamique du moteur physique revient donc à déterminer la nouvelle position d'un objet à partir de la connaissance des forces qui lui sont appliquées. Un corps possède aussi une vitesse \vec{v} , qui correspond à la variation de sa position pour une unité de temps. On note cette relation sous la forme dérivée :

$$\vec{v} = \frac{\partial \vec{p}}{\partial t}$$

Pareillement, l'accélération \vec{a} , qui apparaissait plus tôt dans la seconde loi de Newton, correspond à la variation de la vitesse par rapport à une unité de temps.

$$\vec{a} = \frac{\partial \vec{v}}{\partial t}$$

Par transitivité, on confirme que la position est dépendante de l'accélération.

$$\vec{a} = \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = \frac{\partial^2 \vec{p}}{\partial t^2}$$

Grâce à cette équation, on peut calculer l'accélération d'un objet à partir de sa variation de position. Dans le moteur physique, ce sera en fait l'opération inverse qui devra être effectuée : on connaîtra les forces appliquées, on en déduira par la seconde loi de Newton l'accélération induite puis on calculera le changement de position. Il faut donc exploiter le fait que ces trois quantités partagent aussi des relations de primitive.

$$\vec{p} = \int \vec{v} \partial t = \int \vec{a} \partial t^2$$

Récapitulons. Chacun des corps rigides dont l'on veut simuler l'évolution possèdera trois quantités sous

forme vectorielle : position \vec{p} , vitesse \vec{v} et accélération \vec{a} . L'une des tâches de base du moteur physique sera de traduire l'application de forces sur un corps en un changement de sa position. On sait que les quantités énoncées entretiennent des relations de dérivation, il faudra donc procéder par intégration pour calculer la nouvelle position d'un objet à partir de son accélération.

2.2 Intégration

Les trois quantités physiques entrant en jeu dans les mouvements linéaires ont été présentées. Étudions maintenant de façon plus concrète sur quels calculs se basera l'exercice le plus élémentaire du moteur physique.

Les phénomènes mécaniques du monde réel évoluent de façon continue mais notre simulation ne peut pas s'autoriser ce luxe. Le modèle du moteur physique sera donc discret et avancera par pas de temps fixe ∂t . À chaque mise à jour de la simulation, des intégrations doivent être réalisées pour déterminer le changement d'état d'un corps d'un instant t_n à un instant $t_{n+1} = t_n + \partial t$. Toujours pour des raisons d'efficacité, nous ne pouvons pas nous permettre d'allouer un temps de calcul trop important à cette phase de la mise à jour et nous devons trouver un moyen d'approximer ces intégrales.

Parmi les techniques classiques d'intégration approximative, on trouve l'intégration d'Euler. Cette méthode part du principe que l'on dispose de la valeur initiale x_0 de la quantité que l'on souhaite faire évoluer ainsi que de son taux de changement x' et de la variation de temps par rapport à l'état précédent.

$$x_{n+1} = x_n + x' \partial t$$

Si l'on adapte cette méthode à notre problème, on obtient la succession de calculs suivante :

$$\begin{aligned} \vec{a}_{n+1} &= \frac{\sum \vec{F}_i}{m} \\ \vec{v}_{n+1} &= \vec{v}_n + \vec{a}_{n+1} \partial t \\ \vec{p}_{n+1} &= \vec{p}_n + \vec{v}_{n+1} \partial t \end{aligned}$$

On calcule l'accélération à un instant t puis on intègre en fonction du temps jusqu'à obtenir la nouvelle position du corps. Ce processus doit être répété à chaque mise à jour du système et ce, pour chaque corps. On aurait pu choisir une autre méthode d'intégration, telle que l'intégration Runge-Kutta d'ordre 4 qui divise un pas de temps en plusieurs segments [source], ou bien telle que l'intégration de Verlet qui dispose d'une meilleure stabilité [source], mais Euler reste le choix le plus économique et fournit des résultats relativement corrects.

Afin de réduire la complexité de la structure informatique qui représentera un corps rigide, nous allons introduire la notion d'élan linéaire. Pour un corps rigide, l'élan linéaire \vec{L} est le produit de la masse et de la vitesse. Cette nouvelle quantité a pour avantage majeur de posséder comme primitive la variation de force exercée sur le corps.

$$\sum \vec{F}_i = \frac{\partial \vec{L}}{\partial t} = \frac{\partial(m\vec{v})}{\partial t}$$

Ce qui signifie que l'on peut réduire l'intégration de l'état d'un corps à :

$$\begin{aligned}\vec{L}_{n+1} &= \vec{L}_n + \sum \vec{F}_i \\ \vec{p}_{n+1} &= \vec{p}_n + \frac{\vec{L}_{n+1}}{m} \partial t\end{aligned}$$

L'élan linéaire remplace l'accélération dans la définition d'un corps et permet de calculer sa vitesse si besoin en est. Cette organisation permet à première vue une intégration plus courte et une occupation moindre de la mémoire mais les avantages majeurs de ce choix prendront tous leurs sens lorsque le mouvement angulaire sera introduit.

2.3 Modélisation d'un corps rigide

Nous avons décrit dans la partie précédente les quantités régissant le mouvement linéaire d'une particule ainsi que la façon dont elles évoluent mais le moteur physique que l'on conçoit a pour visée de simuler les interactions entre des corps rigides à volume convexe.

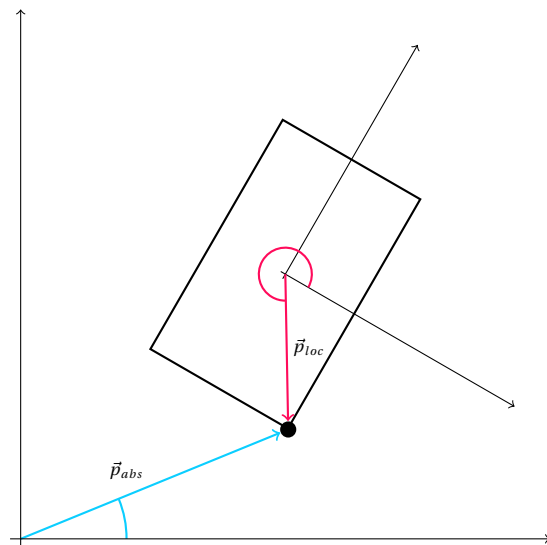


Figure 1: Les repères absolu et local d'un rectangle

Comment peut-on étendre les principes énoncés pour des particules à ce modèle ?

On pourrait en premier lieu penser à représenter un tel corps par une liste de particules, chacune placée à un coin de l'objet. Chaque particule évoluerait indépendamment et des contraintes de cohésion entre particules voisines seraient appliquées pour empêcher toute déformation du corps. Cette méthode est envisageable mais elle présente plusieurs désavantages. Premièrement, les règles de cohésion à mettre en place nécessiteraient des traitements supplémentaires, et donc un temps de calcul plus élevé. Deuxièmement, un corps devrait passer par autant d'intégrations qu'il a de points à chaque mise à jour. Il existe une solution plus simple et plus élégante qui permet de réduire les mouvements linéaires d'un corps rigide à ceux d'une unique particule judicieusement placée.

Introduisons en premier lieu la notion de repères absolu et local. Le repère absolu est le référentiel orthogonal dont l'origine sert de centre à l'environnement de la simulation. Un repère local est un référentiel qui est unique à chaque corps et dont le centre se situe à l'intérieur même de cet objet.

La position exacte de l'origine du repère local dépend de la position des points qui forment l'objet mais il ne

s'agit pas d'un simple centre géométrique puisque la masse de chaque point est aussi un facteur déterminant. Cette position se nomme le centre de masse, ou barycentre, et sera calculée par la formule suivante, où M est la masse totale des points du corps, et m_i et \vec{p}_i respectivement la masse et la position du point i dans le repère absolu.

$$C = \frac{1}{M} \sum m_i \vec{p}_i$$

Une fois le centre de masse défini, la position locale \vec{r}_i d'une particule i peut être calculée en fonction de sa position absolue \vec{p}_i par :

$$\vec{r}_i = \vec{p}_i - C$$

Grâce au centre de masse, on a une seule position à faire évoluer, quelle que soit la complexité de la structure du corps concerné.

2.4 La composante angulaire du mouvement

Le modèle que nous avons défini est encore incomplet puisqu'il ne prend pas en compte la composante rotationnelle des mouvements dont l'on peut être témoin dans un environnement réel. Les particules étant de simples points flottants dans l'espace, cela ne posait pas de problème précédemment mais le moteur physique que l'on conçoit doit gérer des volumes plus complexes. Imaginons une boîte cubique que l'on lancerait en l'air, si aucune rotation n'apparaît (si la base de la boîte reste parallèle au sol), l'imitation du réel que l'on souhaite reproduire perd toute crédibilité.

Les quantités physiques entrant en jeu dans la décomposition d'un déplacement angulaire sont analogues à celles présentées dans la partie traitant de la dynamique linéaire : à la position et à l'élan linéaire correspondent l'orientation et l'élan angulaire.

2.4.1 L'orientation

De la même façon que la position représentait visuellement l'état d'un corps au sein de la composante linéaire, un corps doit posséder une orientation. En

deux dimensions, un nombre flottant représentant l'angle du corps par rapport à un axe fixe suffirait à décrire l'orientation d'un objet mais pas dans notre environnement en trois dimensions.

Le repère local d'un corps a été introduit dans la partie précédente et se résumait à un centre de masse faisant office d'origine, mais un repère possède aussi des axes et ceux du repère local ne sont pas nécessairement alignés avec ceux du repère absolu. Pour représenter la direction des axes du repère local, et donc l'orientation du corps à qui il appartient, on utilisera une matrice de dimension 3 dans laquelle chaque vecteur colonne correspondra à un des axes du repère local [Witkit and Baraff, 1997]. Pour illustrer ces propos, analysons la matrice d'orientation égale à la matrice identité d'ordre 3.

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

Si l'on isole les vecteurs colonnes de cette matrice identité, on remarque que chacun correspond à un des axes du repère global. Le premier vecteur colonne d'une matrice d'orientation correspond donc à l'axe x du repère local. Il en est de même pour la seconde colonne avec l'axe y et la troisième colonne avec l'axe z . [détails]

2.4.2 Élan angulaire

On pourrait utiliser vitesse et accélération angulaires en tant que variables d'état, mais comme pour la dynamique linéaire on choisit de remplacer ces deux valeurs par un unique élan angulaire. L'élan angulaire \vec{A} possède comme primitive la variation de force exercée sur un corps. Mais attention, sa définition diffère de l'élan linéaire dans la mesure où il n'est en relation qu'avec la composante angulaire d'une force.

En effet, il est primordial de faire la distinction entre l'influence linéaire et l'influence angulaire qu'une force exerce sur un corps. Quel que soit le point d'un objet sur lequel une force est exercée, la quantité d'élan linéaire ajoutée est la même. Par contre, la quantité d'élan angulaire transmis par une force dépend de son point d'application; plus précisément de son excentricité par rapport au centre de masse. Imaginons une boîte

cubique flottant en état d'apesanteur. Si l'on exerce une légère poussée sur le milieu d'une de ses faces alors la boîte subira une translation. Si l'on applique maintenant une pression toujours dans la même direction mais cette fois sur l'un des coins de la boîte, la même translation sera accompagné d'une rotation autour du centre de masse. On quantifie cette effet rotatif par le couple τ , qui dépend de la position \vec{C} du centre de masse et de la position \vec{x} du point d'application de la force.

$$\tau = (\vec{x} - \vec{C}) \times \vec{F}$$

2.5 Quantités auxiliaires

On sait désormais qu'un corps possède une orientation et un élan angulaire, on sait aussi comment passer de l'application d'une force à une variation d'élan angulaire. Néanmoins, l'intégration de la composante rotative d'un mouvement n'est pas aussi directe que pour sa version linéaire. Nous avons encore besoin de faire appel à plusieurs quantités auxiliaires, telles que le tenseur d'inertie et le tenseur d'inertie instantanée.

Concrètement, un tenseur d'inertie est une matrice de dimension 3 dont les coefficients servent de facteurs lors du calcul de l'orientation à partir de l'élan angulaire. Il dépend directement de la forme du corps considérés et affecte les axes de rotation principaux de ce dernier. Pour le calculer on doit effectuer des calculs d'intégration par rapport au volume du corps considéré. Les tenseurs d'inertie des volumes usuels sont souvent donnés dans les manuel de physique.

Le tenseur d'inertie instantanée est le pendant local du torseur d'inertie. blabla

$$I(t) = R(t)IR(t)^T$$

2.6 Intégration complète

$$\begin{aligned} I(t) &= R(t)IR(t)^T \\ \vec{w}_{n+1} &= \frac{\vec{A}}{I(t)} \\ R &= \vec{w}R\partial t \end{aligned}$$

2.6.1 Correction de l'intégration

Notre processus d'intégration est désormais complet et nous pouvons simuler les réactions de corps soumis à des forces externes. Il reste pourtant un problème à résoudre : à cause de l'utilisation de nombres à virgule flottante, de légères erreurs de précision apparaissent à chaque intégration du système et s'accumulent. L'intégration linéaire ne passe que par des opérations de base et peu d'erreur se font ressentir. Par contre, l'erreur la plus flagrante touche l'orientation des objets. Le problème principal vient du fait que la matrice d'orientation R , qui détermine la direction des axes du repère local, perd progressivement de son orthonormalité : les axes ne sont plus orthogonaux entre eux et leur longueur n'est plus égale à 1. Lors du rendu graphique de la simulation, on utilise la liste des points qui forment un corps ainsi que sa matrice de rotation pour le dessiner, et à cause de cette erreur de précision les solides dessinés sont déformés.

Afin de contrer cet effet indésirable, on ajoutera deux étapes supplémentaires à la fin de chaque intégration. Premièrement, il nous faudra normaliser les axes du repère local. Chaque axe correspondant à un vecteur colonne de la matrice d'orientation, il faudra donc les extraire un par un et recalculer leur magnitude pour s'assurer de leur normalité. En second lieu, il sera nécessaire de réorthogonaliser le repère local, autrement dit s'assurer que ses axes restent orthogonaux entre eux. Pour cela, on orthogonalisera la matrice de rotation par l'algorithme de Gram-Schmidt. [détails]

3 Gestion des collisions

Maintenant que la première section nous a éclairé sur la façon dont les corps de la simulation évoluent indépendamment les uns des autres, il est temps de les faire interagir entre eux. Cette phase se divise en trois étapes. Premièrement, le moteur physique doit être capable de déterminer si une collision a lieu entre deux corps. Ensuite, il doit pouvoir corriger leur état afin de contrebalancer les décalages dus aux erreurs numériques et à l'intégration discrète de l'environnement. Finalement, une force de séparation doit être calculée et appliquée aux deux objets afin de simuler le rebond ou le repos.

3.1 Détection d'une collision

Une collision fait entrer en jeu deux corps rigides dont l'intégrité physique a été corrompue, autrement dit : les corps rentrent l'un dans l'autre. Nous allons définir un traitement à appliquer à deux objets pour savoir si tel est le cas et de façon certaine. Néanmoins, bien que l'algorithme que nous allons présenter ait fait ses preuves dans le domaine des simulations physiques, il faut garder à l'esprit que ce test sera exécuté à chaque intégration de la simulation et ce, pour chaque paire de corps. Dans de telles circonstances, l'usage d'un algorithme a priori rapide peut se révéler désastreux au niveau des performances.

Nous faisons donc le choix de séparer la détection de collision en deux étapes : une détection grossière et une détection fine. La détection grossière fera usage d'un algorithme approximatif qui informe de la possibilité d'une collision, si le résultat est positif alors on exécute la détection fine (mais plus coûteuse) pour confirmer ou infirmer le contact de façon certaine.

3.1.1 Détection grossière

Le but de la phase de détection grossière (*broad-phase collision*) est de renseigner sur la possibilité d'une collision et ce, à moindre coût. Si une collision a réellement lieu, le résultat sera toujours positif, néanmoins il est aussi possible que le résultat soit positif sans qu'aucune collision ne prenne vraiment place. Dans ce dernier cas, la détection fine invalidera la collision.

On se base sur l'utilisation de boîtes englobantes, ou *AABB* (*axis-aligned bounding-boxes*), pour détecter l'éventualité d'un contact. Les boîtes englobantes sont des volumes alignés avec les axes du repère global qui contiennent tous les points d'un corps. Pour savoir si deux corps rentrent possiblement en collision, on vérifie si leur boîte englobante entrent en collision.

Le processus de construction d'une boîte englobante est simple : on enregistre pour chaque axe les deux points du corps qui sont les plus éloignés dans les sens positifs et négatifs.

entrée : le corps C

sortie : une boîte englobant C

boite_englobante :

```
boite.min = [INF, INF, INF]
boite.max = [INF, INF, INF]
```

Pour tous les axes

```
Pour tous les points P de C
  Si P[axe] < boite.min[axe]
    boite.min[axe] = P[axe]
  Si P[axe] > boite.max[axe]
    boite.max[axe] = P[axe]
```

retourner boite

Le test vérifiant la collision entre deux boîtes englobantes est très rapide puisque qu'il tire parti du fait que les boîtes sont alignées avec le repère absolu. Pour vérifier que deux AABB sont en état d'interpénétration, on utilise le théorème des axes de séparation selon lequel deux boîtes sont séparées si leur projection sur au moins un axe du repère absolu ne se superposent pas [Ericson, 2005]. En deux dimension, on peut résumer ce théorème par le fait que si une ligne parallèle à un des axes du repère global sépare deux corps, alors ils ne peuvent pas être en état de collision. En trois dimension le principe est le même, à la différence que l'on parle de plan de séparation.

entrée : deux boîtes englobantes b1 et b2
sortie : booléen

detection_collision_grossiere :

```
Si b1.min[x] > b2.max[x] ou
  b1.max[x] < b2.min[x] ou
  b1.min[y] > b2.max[y] ou
  b1.max[y] < b2.min[y] ou
  b1.min[z] > b2.max[z] ou
  b1.max[z] < b2.min[z]
  retourner faux
```

retourner vrai

La figure ?? illustre les trois situation possibles impliquant deux corps.

Sur la sous-figure *a*, les boîtes englobantes ne rentrent pas en collision car leur projection sur l'axe des abscisses ne se superposent pas. Il est donc impossible que les corps qu'elles contiennent soient eux-mêmes

en état de collision, il est inutile d'aller plus loin et de lancer la détection fine.

La sous-figure *b* montre qu'il est possible dans certaines configurations que les boîtes englobantes entrent en collision sans que ce soit nécessairement le cas pour les corps qu'elles contiennent. Les boîtes sont en état d'interpénétration puisque leurs projections ne se séparent sur aucun axe. Ici, la détection grossière renvoie un résultat positif et c'est l'algorithme de détection fine qui réfutera la collision.

La sous-figure *c* illustre quant à elle un troisième cas de figure dans lequel les boîtes entrent en collision et les corps aussi.

3.1.2 Détection fine

La phase de détection fine (*narrow-phase collision*) est plus coûteuse mais détermine de façon certaine si deux corps sont en collision.

Introduisons en premier lieu la somme de Minkowski, une opération mathématique notée $A \oplus B = \{a + b \mid a \in A, b \in B\}$ avec A et B deux corps. On peut résumer la somme de Minkowski en un balayage de chaque corps par l'autre.

Nous utilisons une variante de cette opération : la différence de Minkowski, notée $A \ominus B = A \oplus (-B)$. La propriété de cette opération qui nous intéresse le plus est le fait que la plus petite distance entre les points qui la forment et l'origine du repère absolu est égale à la plus petite distance entre les corps A et B (figure ??). Nous pouvons exploiter cette caractéristique pour déterminer si deux corps entrent en collision. En effet, si la distance minimum entre les deux corps est supérieure à zéro, alors aucune collision ne peut possiblement exister. Si au contraire, la distance minimum est inférieure à zéro, alors les deux objets sont en état d'interpénétration.

Le processus de détection fine passera donc par le calcul de la différence de Minkowski M entre deux corps. Une fois M calculée, il reste encore à calculer la distance séparant M et l'origine du repère absolu. Dans cette optique, on utilise l'algorithme GJK, ou *Gilbert-Johnson-Keerthi algorithm*. De façon générale, cet algorithme est capable de calculer efficacement la plus petite distance entre la coque formée par un nuage de points et un point précis de l'espace. Dans le cadre de notre problématique, le nuage de points correspond

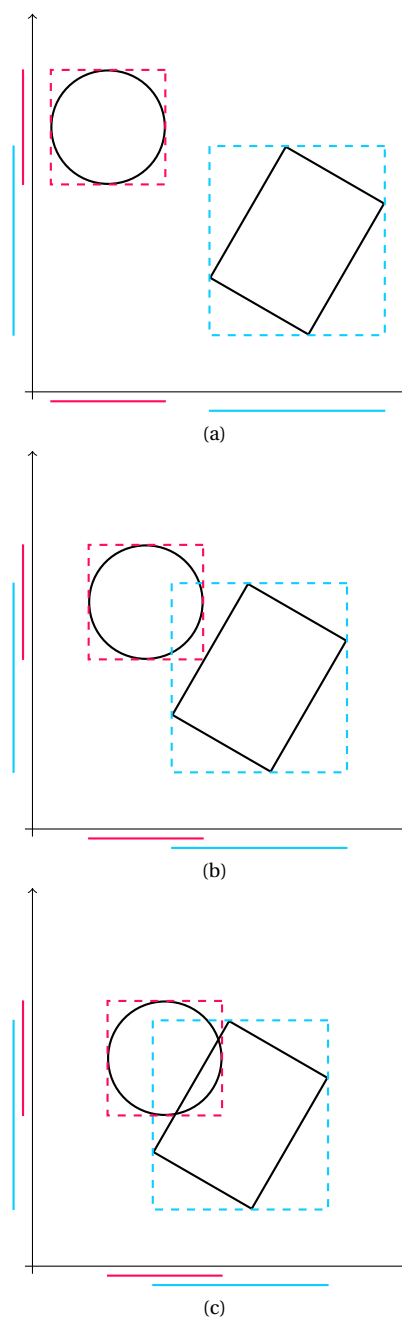


Figure 2: blabla

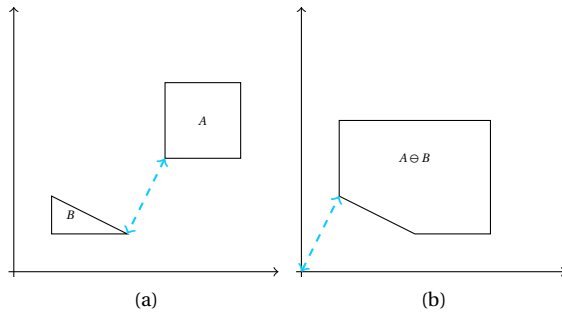


Figure 3: Différence de Minkowski entre un rectangle et un triangle

aux vertex de M et le point cible correspond à l'origine du repère absolu.

GJK se base sur l'utilisation de simplex. Un simplex d'un corps est une structure géométrique entièrement contenue dans ce dernier et étant caractérisée par une dimension. Un simplex de dimension 0 est un point, un simplex de dimension 1 est une ligne, un simplex de dimension 2 est un triangle et un simplex de dimension 3 est un tétraèdre. Un corps de dimension d peut contenir un simplex de dimension d au maximum. Le principe de GJK est de partir d'un simplex de base choisi aléatoirement (souvent un point, donc un simplex de dimension 0) et d'augmenter sa dimension pour se rapprocher progressivement du point de la figure le plus proche du point cible. À la fin de cette procédure, on a déterminé, le point de M le plus proche de l'origine, et une simple soustraction vectorielle permet de calculer leur distance.

La figure 4 illustre la succession d'étapes qui amène à la détermination du point le plus proche de l'origine O

- Le vertex A est choisi aléatoirement pour faire office de simplex de base. Le point du simplex actuellement le plus proche de l'origine ne peut que être A . On cherche le vertex de la figure le plus extrême dans la direction du point le plus proche (A) à l'origine.
- Le vertex le plus extrême est C , on l'ajoute au simplex. Le point du simplex le plus proche de l'origine est ???.

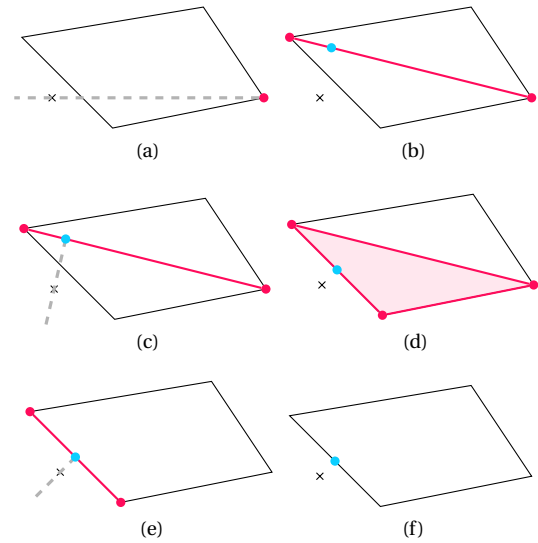


Figure 4: Étapes de l'algorithme GJK

- On cherche le vertex le plus extrême dans la direction de ??? à l'origine.
- Le vertex le plus extrême est B , on l'ajoute au simplex. Le point du simplex le plus proche de l'origine est ???2.
- Le vertex A n'est plus utile à la définition du simplex contenant le point le plus proche de l'origine. On le retire du simplex. On cherche le vertex le plus extrême dans la direction de ???2 à l'origine.
- Aucun vertex n'est plus extrême que ???2, on a donc le point de la figure le plus proche de l'origine.

3.2 Correction du contact

À chaque itération de la simulation, les corps présents dans l'environnement du moteur physique sont susceptibles de se déplacer et donc d'entrer en contact. Le moteur simule ces évolutions de manière discrète et il est très improbable qu'une collision soit détectée au moment précis où elle se produit. On est donc régulièrement témoin de situations d'inter-pénétration au sein desquelles des corps rentrent l'un dans l'autre.

DESSIN imprécision

On pourrait se satisfaire de cette imprécision et calculer les forces de rebond appropriées mais plusieurs situations critiques risquent d'apparaître. Pour trouver le point de contact réel entre deux objets, il existe plusieurs approches. Les systèmes préférant favoriser le temps d'exécution au détriment du réalisme se contentent de repositionner les corps à un point de contact calculé par interpolation en fonction du temps de la dernière intégration. Il est évident que des objets sujets à des déplacements non linéaires (variation de la vitesse pendant un pas de temps, trajectoire elliptique) seront mal replacés. Même si la vitesse d'exécution est un facteur important dans nos choix de conception, nous allons prendre un chemin différent et sélectionner une méthode plus précise qui fonctionnera par retour en arrière.

La fonction d'intégration du moteur prend comme seul argument le pas de temps duquel faire avancer la simulation et pour l'instant on utilisait un pas constant. Or, une caractéristique intéressante de cette fonction et qu'elle peut prendre en argument un pas de temps variable et négatif et simuler en sens inverse. Grâce à cette caractéristique, dès qu'une inter-pénétration est détectée, on peut revenir en arrière jusqu'à retrouver le temps de contact exact. Le terme "exact" est à prendre avec des pincettes puisque notre simulation est limitée par l'arithmétique des nombres à virgules flottantes et que l'on devra se contenter d'un résultat validé par un seuil de tolérance adapté.

Afin d'accélérer cette phase de recherche de la configuration de contact, le retour en arrière se fera par dichotomie. On recule en premier lieu de la moitié du pas de temps puis, si l'inter-pénétration est toujours présente, on recule d'un quart du pas de temps, sinon on avance d'un quart du pas de temps, et ainsi de suite jusqu'à obtenir une précision satisfaisante.

entrée: deux corps A et B, le pas de temps
sortie: deux corps en collision exacte

```
correction:
  si collision_exacte(A,B)
    retourner A et B
  sinon si collision(A,B) alors
    A.integrer(-dt/2)
```

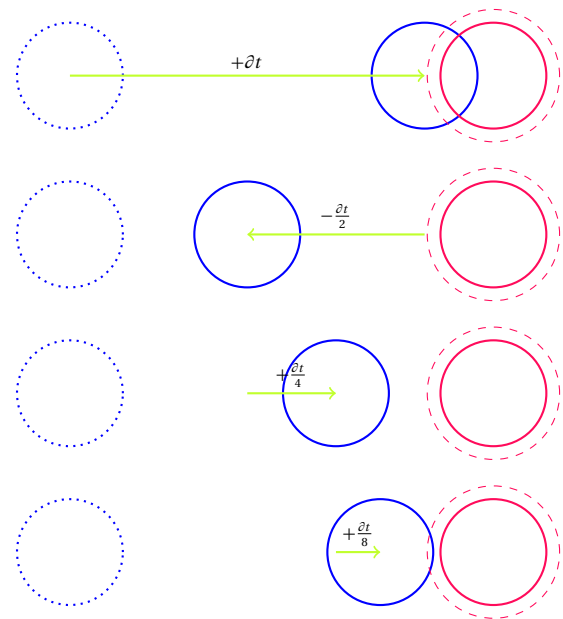


Figure 5: Correction dichotomique de la configuration de contact

```
B.integrer(-dt/2)
sinon
  A.integrer(dt/2)
  B.integrer(dt/2)
```

Une fois ce processus achevé, la configuration de contact est retrouvée et les deux corps ne sont plus en situation de pénétration mutuelle. On remarque que grâce à cette technique, la position n'est pas la seule valeur à avoir été recalée : orientation, élans angulaire et linéaires sont eux aussi revenus à leurs valeurs au moment du contact.

3.3 Réponse à une collision

Un coefficient de restitution $0 \leq \varepsilon \leq 1$ détermine le taux de rebond d'un corps. Si $\varepsilon = 1$, la balle rebondira avec autant d'énergie qu'elle est arrivée (une situation concrètement impossible à retrouver dans le monde réel). Si $\varepsilon = 0$, la balle repartira avec une énergie nulle; autrement dit, elle restera collée au plan. Le coefficient

de restitution dépend habituellement de la matière que l'on cherche à simuler : une balle en caoutchouc aura un ε élevé tandis qu'un bloc d'argile aura un ε proche de zéro.

Le coefficient de friction influe sur la réponse rotationnelle qu'une collision est susceptible de provoquer. Si la balle avait été lâchée, à partir d'une vitesse nulle, sur un plan droit, le rebond aura été purement linéaire. Dans le cas d'un plan incliné, un frottement non perpendiculaire a lieu et la balle va entrer en rotation. Plus le coefficient de friction est élevé et plus cet effet est puissant. On peut simplifier cette notion en disant que le coefficient de friction détermine si un corps est recouvert d'une matière qui accroche ou au contraire qui glisse.

[Newton, 1687]

4 Le moteur physique

4.1 Ordre des tâches

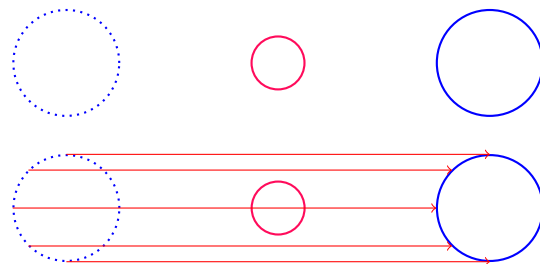
4.2 Démonstrations

4.3 Limitations et perspectives d'évolution

4.3.1 Tunneling

Le moteur physique que nous concevons fonctionne par intégration discrète et si aucun contrôle n'est effectué pour contrecarrer les effets négatifs de cette caractéristique, on risque d'obtenir des résultats imprécis ou pire, complètement éloignés de ce que l'on retrouverait dans la réalité. On a par exemple vu plus tôt qu'une phase de recherche dichotomique est nécessaire pour recalculer les corps à leur position réelle de contact lorsqu'une collision est détectée.

Néanmoins, une éventualité n'a pas été envisagée : que se passerait-il si un objet en traversait entièrement un autre pendant un pas de temps ? On peut imaginer un objet A lancé vers un autre objet B fixe. À l'instant t , A n'entre pas en collision avec B mais se dirige dans sa direction. À l'instant $t + 1$, A a entièrement traversé B . À aucun de ces deux instants une collision n'a été détectée et pourtant A est impunément passé à travers B . Le pas de temps utilisé pour réguler l'intégration du système était donc trop faible pour s'assurer des collisions entre

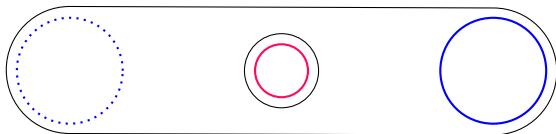


corps évoluant à haute vitesse. À l'heure de l'écriture de ce rapport, le moteur physique est sensible à ce genre de situation. Réellement ce cas ne se produit jamais, puisque les simulations développées représentent des situations terrestres qui font participer des forces d'opposition telles que le frottement de l'air et donc les corps n'atteignent jamais de vitesses démesurées. On souhaite tout de même disposer d'un moteur physique solide et versatile, évaluons les possibilités qui s'offrent à nous pour pallier ce problème.

On pourrait envisager diminuer la durée du pas de temps d'intégration afin de diminuer le risque de tunneling, mais même si un pas de temps faible améliore la qualité des résultats, il ne pourra pas être indéfiniment réduit. Il est principalement limité par le temps de calcul d'une mise à jour du système, puisqu'à partir du moment où ∂t est inférieur au temps nécessaire à une machine pour calculer une itération de la simulation, le programme perdra son statut d'application temps réel.

Une technique usuellement admise est le lancer de rayons (*raycasting*) entre les points de la position de départ du solide et les points de sa position d'arrivée. Si un des rayons touche un autre corps, on sait qu'une collision aurait dû être détectée et on peut revenir en arrière. Cette méthode présente pourtant une faiblesse de taille, car le résultat de cette recherche dépend directement de la concentration de rayons. Si on lance peu de rayons, on risque de ne pas détecter les corps de petite taille et donc de les traverser tandis qu'une concentration élevée de rayons pourrait se révéler regrettable en terme de coûts de calcul.

La technique du ??? permet de ne laisser passer aucun phénomène de tunneling. L'idée est la suivante : soit deux corps A et B dont l'on veut détecter l'éventuelle collision. On construit deux volumes fantômes C_A et C_B englobant tous les points par lesquels passent respec-



tivement A et B entre deux intégrations. Ces volumes n'interviendront pas dans les collisions des autres objets de la simulation, et on vérifie simplement s'ils rentrent tous deux en collision. Si tel est le cas, alors on sait qu'il est possible qu'un tunneling se soit produit. L'un des avantages majeurs de cette méthode, en plus du fait qu'elle ne rate aucun tunneling, est sa simplicité de mise en place puisque toutes les routines utilisées (détection de collision entre volumes, retour en arrière) ont été écrites et entrent déjà en jeu dans le fonctionnement de base du moteur physique.

4.3.2 Partitionnement de l'espace

Quad-tree, Octree, ...

4.3.3 Extension aux corps concaves

blabla

References

- [Ericson, 2005] Ericson, C. (2005). *Real-Time Collision detection*.
- [Newton, 1687] Newton, I. (1687). *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica*.
- [Witkit and Baraff, 1997] Witkit, A. and Baraff, D. (1997). An introduction to physically based modeling. Technical report, Carnegie Mellon University.