Le Moteur 3D Kyzis 2.0

L’Architech (Gabriel Breton-Breault)

Introduction

Le **Moteur 3D Kyzis 2.0** repose sur une idée fondamentale : un monde tridimensionnel ne devrait pas nécessairement être construit en imposant les mêmes dimensions fixes à tous les objets. Chaque objet possède sa propre géométrie, son propre référentiel, ses propres surfaces et ses propres possibilités de déplacement.

Dans cette conception, les dimensions ne servent donc pas uniquement à positionner un objet dans un espace global. Elles participent directement à sa construction, à sa mesure, à ses déplacements, à ses déformations et à ses interactions.

Un ballon en fournit un exemple simple.

Le ballon possède un référentiel volumique permettant de définir sa forme sphérique. Sa surface possède également son propre référentiel constitué de deux dimensions courbes et finies. Un élément situé sur cette surface peut suivre directement ces dimensions sans devoir être considéré comme un élément indépendant repositionné continuellement dans le référentiel général de la scène.

Cette approche avait déjà été introduite dans la première conception du moteur, où les textures étaient considérées comme des dimensions propres aux objets et où la position devait suivre leur référentiel.

Les dimensions potentielles

Le Moteur 3D Kyzis 2.0 introduit également la notion de **dimensions potentielles appliquées à la géométrie**.

Les dimensions potentielles représentent ici les dimensions qui peuvent être nécessaires pour construire, mesurer, parcourir ou transformer un objet à une résolution donnée.

Un pentagone peut être décrit comme une surface bidimensionnelle. Mais sa construction révèle plusieurs directions géométriques calculables : les cinq côtés, les directions reliant son centre à ses cinq sommets et, si sa géométrie est décomposée davantage, les nouvelles directions résultant de cette décomposition.

Le nombre de dimensions potentielles n'est donc pas absolu. Il dépend de la géométrie décrite et de la résolution choisie.

Plus la géométrie est complexe et précisément définie, plus elle peut révéler de dimensions potentielles.

La surface comme structure flexible

Dans le Moteur 3D Kyzis 2.0, une texture n'est pas conçue comme une simple image collée sur un objet.

Elle constitue une **surface dimensionnelle flexible**.

Une surface possédant deux dimensions peut être courbée. Cette courbure lui permet de produire une forme tridimensionnelle. Une texture peut ainsi être comparée à une feuille flexible que l'on courbe autour d'un ballon, puis que l'on peut déformer de nouveau dans une région particulière.

Cette propriété devient fondamentale pour les collisions.

Lorsque deux objets entrent en contact, leurs surfaces créent localement un **référentiel de collision et de courbure**. La direction du mouvement, l'angle d'arrivée, les orientations locales des surfaces et leurs propriétés déterminent la manière dont la courbure évolue.

La collision devient alors une transformation géométrique :

contact → courbure → déformation → limite → restitution → poussée → rebond

Une surface rigide conserve sa géométrie. Une surface flexible peut au contraire adapter localement sa courbure à la surface rencontrée.

La collision appartient aux surfaces

Un ballon frappant le sol illustre cette logique.

Au point initial de contact, une région locale de la surface du ballon commence à se courber relativement à la géométrie du sol. La vitesse d'arrivée participe à déterminer l'importance de cette déformation.

La flexibilité est exprimée en pourcentage.

À **100 % de courbure**, dans cette définition, la surface peut atteindre la courbure déterminée par la surface rencontrée et les conditions de l'impact. Cette valeur ne représente donc pas une courbure infinie. Elle représente l'atteinte complète de la courbure de référence déterminée par la collision.

Lorsque la limite est atteinte, la surface cherche à retrouver sa géométrie. L'inversion de cette déformation exerce alors une poussée sur la surface opposée et participe au déplacement ou au rebond de l'objet.

Ainsi, la collision n'est plus seulement la constatation que deux volumes se croisent.

Elle devient une interaction temporaire entre les dimensions propres de deux surfaces.

Une géométrie vivante

C'est finalement l'idée centrale du Moteur 3D Kyzis 2.0.

Un objet n'est pas seulement une forme dessinée dans un espace tridimensionnel fixe. C'est une structure possédant :

- un référentiel propre ;
- une géométrie propre ;
- des dimensions de surface ;
- des dimensions potentielles ;
- des dimensions de déplacement ;
- des propriétés locales de courbure ;
- des propriétés de rigidité et de flexibilité ;
- des interactions dimensionnelles avec les autres objets.

Le décor n'a donc pas besoin d'imposer sa géométrie à tous les objets. **Chaque objet transporte sa propre géométrie et interagit avec celle des autres.**

Le Moteur 3D Kyzis 2.0 peut ainsi être résumé par un principe :

La géométrie ne sert pas seulement à représenter l'objet. Elle devient le mécanisme par lequel l'objet existe, se déplace, se déforme et interagit.

Chapitre 1 — Les dimensions potentielles

Le **Moteur 3D Kyzis 2.0** repose sur une conception particulière des dimensions : les dimensions d’un objet ne sont pas limitées aux trois axes fixes d’un espace global. Elles dépendent de la géométrie de l’objet, de son référentiel, de ses surfaces et du degré de précision avec lequel cette géométrie doit être construite, mesurée ou parcourue.

Dans cette approche, une **dimension potentielle** représente une direction géométrique calculable pouvant devenir nécessaire pour définir un objet ou permettre un déplacement dans sa structure.

1.1 — De l’axe fixe à la direction calculable

Un objet peut être situé dans une scène à l’aide de trois coordonnées générales. Cependant, ces coordonnées ne décrivent pas nécessairement toute sa structure.

Prenons un pentagone.

Il est possible de le représenter sur une surface avec deux dimensions. Pourtant, sa construction fait apparaître plusieurs directions géométriques :

- cinq segments forment son contour ;
- cinq directions peuvent relier son centre à ses cinq sommets.

À ce niveau de description, le pentagone possède donc dix directions directement calculables.

Dans le Moteur 3D Kyzis 2.0, ces directions peuvent être considérées comme des **dimensions potentielles**, car elles participent à la définition géométrique de l’objet.

Cela ne signifie pas que le pentagone devient un espace absolu à dix dimensions. Le terme *potentielle* est essentiel : il indique que ces dimensions apparaissent selon les besoins de construction, de mesure, de déplacement et selon la résolution géométrique choisie.

1.2 — La résolution dimensionnelle

La quantité de dimensions potentielles dépend directement du niveau de détail avec lequel un objet est décrit.

Le pentagone peut, par exemple, être décomposé en cinq triangles. Chacun de ces triangles peut ensuite être analysé séparément. De nouvelles directions géométriques deviennent alors calculables.

Si cette subdivision continue, la description peut devenir de plus en plus complexe et progressivement rejoindre une logique fractale.

Il n’existe donc pas nécessairement un nombre absolu de dimensions potentielles associé définitivement à une forme.

Le principe est plutôt :

Plus la géométrie d’un objet est complexe et plus sa structure est définie avec précision, plus l’objet peut révéler de dimensions potentielles.

La résolution choisie détermine jusqu’où cette décomposition doit aller.

Pour une simulation simple, seules quelques dimensions peuvent être nécessaires. Pour une simulation extrêmement précise, une quantité beaucoup plus importante de dimensions potentielles peut devenir pertinente.

1.3 — Les dimensions propres à la surface

Les surfaces possèdent également leur propre référentiel dimensionnel.

Un ballon permet de comprendre ce principe.

La surface du ballon peut être parcourue selon deux dimensions propres à cette surface. Cependant, ces deux dimensions ne sont pas planes. Elles sont **courbes et refermées autour de l'objet**.

Le ballon possède parallèlement un référentiel permettant de définir sa géométrie volumique.

Il faut donc distinguer :

le référentiel de l'objet, qui définit sa structure globale,

et

le référentiel de sa surface, qui définit comment un élément peut parcourir cette surface.

Cette séparation devient fondamentale dans le moteur.

Un élément attaché à la surface du ballon n'a pas besoin d'être considéré uniquement comme une position indépendante dans l'espace global. Sa position peut être définie relativement aux dimensions courbes de la surface du ballon.

Lorsque le ballon se déplace ou tourne, l'élément suit son référentiel.

1.4 — La courbure comme transformation dimensionnelle

Deux dimensions de surface peuvent également se courber.

Cette propriété est centrale dans le Moteur 3D Kyzis 2.0.

Une feuille fournit une représentation intuitive. Elle possède une surface que l'on peut considérer suivant deux directions. Lorsque la feuille est courbée autour d'un ballon, ses directions de surface ne disparaissent pas. Elles changent progressivement d'orientation et produisent une géométrie qui s'étend en profondeur.

Dans le modèle du moteur :

surface 2D flexible + courbure = géométrie 3D

La profondeur n’a donc pas nécessairement besoin d’être imposée à chaque portion de surface sous la forme d’un troisième axe fixe indépendant. Elle peut émerger de la courbure des dimensions propres de la surface.

Cette propriété permet ensuite de définir des déformations locales. Une petite région de la texture peut changer de courbure tandis que le reste de la surface conserve sa géométrie.

1.5 — Dimensions potentielles et dimensions de déplacement

Une dimension potentielle peut devenir une **dimension de déplacement** lorsqu’elle fournit effectivement un chemin qu’un élément peut parcourir.

Cette dimension peut être droite, courbe, fermée, repliée ou cyclique.

Elle n’a pas nécessairement besoin d’être infinie.

Une dimension peut contenir un nombre fini de positions tout en permettant un déplacement continu lorsque son extrémité rejoint son origine.

Ainsi :

fini ne signifie pas nécessairement terminé par une frontière.

Une dimension finie peut se refermer sur elle-même.

Cette propriété permet au moteur de représenter des déplacements dans lesquels l'élément suit directement la géométrie de l'objet plutôt que de dépendre constamment d'un espace global uniforme.

1.6 — L’objet comme ensemble de référentiels dimensionnels

Un objet complexe ne possède donc pas nécessairement un seul référentiel dimensionnel.

Il peut posséder simultanément :

- un référentiel global propre à l’objet ;
- des référentiels associés à ses différentes surfaces ;
- des dimensions de déplacement ;
- des dimensions potentielles révélées par sa géométrie ;
- des dimensions locales apparaissant lors d’une déformation ;
- des référentiels temporaires créés lors des interactions avec d’autres objets.

Un bras, un ballon, une roue, une surface accidentée ou un objet articulé n'ont pas nécessairement besoin d'être décrits de manière identique.

La géométrie détermine les dimensions nécessaires à sa propre description.

1.7 — Principe fondamental

Le Moteur 3D Kyzis 2.0 peut donc établir son premier principe :

Une dimension potentielle est une direction géométrique calculable pouvant être nécessaire pour construire, mesurer, parcourir, déformer ou transformer un objet. Le nombre de dimensions potentielles n'est pas absolu : il dépend de la géométrie de l'objet et de la résolution avec laquelle cette géométrie est définie.

Cette définition change profondément la manière dont le moteur peut considérer un objet.

L'objet n'est plus simplement placé dans trois dimensions auxquelles il doit entièrement se conformer.

L'objet possède sa géométrie.
Sa géométrie définit ses dimensions.
Ses dimensions définissent ses possibilités de déplacement et de transformation.

Chapitre 2 — Le référentiel dimensionnel

Le **Moteur 3D Kyzis 2.0** considère qu'un objet ne doit pas être défini uniquement par sa position dans un système général à trois axes. Chaque objet possède son propre référentiel, déterminé par sa géométrie, son orientation, ses dimensions de surface et ses possibilités de déplacement.

Le référentiel devient ainsi le lien entre la forme d'un objet et son comportement dans la simulation.

2.1 — Chaque objet possède son propre référentiel

Un objet n'existe pas seulement par sa position dans le décor. Il possède une organisation géométrique interne qui lui appartient.

Un ballon, par exemple, possède un centre, un volume sphérique et une surface courbe. Ces éléments restent liés les uns aux autres lorsque le ballon roule, tourne, rebondit ou se déforme.

Le principe du moteur consiste donc à considérer que les éléments appartenant au ballon **suivent son référentiel**.

Lorsqu'un élément est attaché à sa surface, sa position peut être définie relativement aux dimensions de cette surface. Si le ballon tourne, l'élément n'a pas besoin d'être pensé comme une entité indépendante dont la position serait redéfinie à partir de zéro. Il suit les transformations du référentiel auquel il appartient.

Le principe peut être résumé ainsi :

Un élément appartient d'abord au référentiel de l'objet qui le porte. Sa position dans le monde résulte ensuite de la position et de la transformation de ce référentiel.

2.2 — Les référentiels peuvent être imbriqués

Un même objet peut posséder plusieurs niveaux de référentiels.

Pour le ballon, on peut distinguer au minimum :

Le référentiel de l'objet

Il représente la structure générale du ballon, son centre, sa forme et son orientation.

Le référentiel de surface

Il contient les deux dimensions courbes permettant de parcourir la surface.

Les référentiels locaux

Une petite région de la surface peut posséder temporairement une géométrie différente lorsque le ballon se déforme.

Ces référentiels ne sont pas indépendants. Ils sont imbriqués.

Une modification du référentiel principal entraîne la surface. Une modification locale de la surface transforme uniquement la région concernée tout en restant rattachée à l'ensemble de l'objet.

On obtient donc une hiérarchie :

objet → surface → région locale → élément

Chaque niveau suit celui auquel il appartient.

2.3 — Le référentiel de surface

Le référentiel de surface est particulièrement important.

Une surface n'est pas seulement une enveloppe visuelle. Elle constitue un espace dans lequel des déplacements peuvent avoir lieu.

Sur un ballon, les deux dimensions de surface sont courbes. Un élément se déplaçant sur cette surface suit cette courbure.

C'est le cas d'une mouche parcourant un ballon : le mouvement pertinent est celui effectué **sur la surface**, et non une succession arbitraire de déplacements imposés selon trois axes extérieurs.

Le moteur peut donc considérer directement les dimensions propres de la surface comme espace de déplacement.

Cette approche permet de conserver une relation naturelle entre :

position locale → géométrie de surface → référentiel de l'objet → environnement

2.4 — Le référentiel est dynamique

Le référentiel d'un objet n'est pas nécessairement fixe.

Si le ballon roule, son référentiel tourne.

S'il rebondit, le référentiel se déplace.

S'il se déforme, certaines parties de son référentiel de surface changent de courbure.

S'il entre en collision avec un autre objet, un nouveau référentiel local peut apparaître temporairement entre les surfaces.

Le moteur ne considère donc pas la géométrie comme une structure immobile.

Le référentiel est une **structure dynamique transportant les dimensions de l'objet**.

Les dimensions appartenant au ballon suivent naturellement ses transformations.

2.5 — Les deux dimensions courbes de la surface

Une caractéristique fondamentale du moteur est qu'une surface flexible conserve ses dimensions lorsqu'elle se courbe.

Prenons une feuille.

Lorsqu'elle est plane, sa surface peut être décrite suivant deux dimensions. Si cette feuille est courbée autour du ballon, ces dimensions continuent d'exister, mais leurs directions varient progressivement le long de la surface.

La courbure transforme alors la géométrie produite par ces deux dimensions.

Dans le modèle :

2 dimensions de surface + courbure → forme tridimensionnelle

La troisième composante géométrique n'a donc pas nécessairement besoin d'être imposée localement comme un axe fixe supplémentaire. Elle peut apparaître par la courbure des dimensions de surface.

Cette propriété devient particulièrement importante lors des déformations.

2.6 — Le référentiel local de courbure

Lorsqu'une région flexible se déforme, le moteur peut établir autour de cette région un **référentiel local de courbure**.

Celui-ci décrit la transformation temporaire de la surface.

Prenons un ballon qui frappe un sol rigide.

Au début, les deux surfaces se rencontrent dans une très petite région. La géométrie du sol, l'orientation du ballon, la vitesse d'arrivée et les propriétés des surfaces déterminent comment cette région doit évoluer.

Les dimensions de surface du ballon commencent alors à se courber localement.

Le reste du ballon conserve son référentiel général tandis que la région du contact possède temporairement une transformation supplémentaire.

Le moteur n'a donc pas besoin de considérer la déformation comme une modification arbitraire de tout l'objet.

La déformation appartient à la région concernée et à son référentiel local.

2.7 — Interaction entre deux référentiels

Une collision devient alors la rencontre de deux référentiels dimensionnels.

Chaque surface apporte :

- ses directions locales ;
- son orientation ;
- sa courbure actuelle ;
- sa capacité de courbure ;
- ses propriétés de texture ;
- son mouvement.

L’angle d’arrivée détermine également la manière dont les deux géométries se rencontrent.

Les directions locales peuvent être combinées afin de déterminer l’orientation pertinente de la collision. Les produits croisés peuvent notamment fournir des directions perpendiculaires utiles au calcul du référentiel local de contact.

La collision devient alors une interaction géométrique :

référentiel A + référentiel B + mouvement relatif → référentiel local de collision

Ce référentiel n’existait pas nécessairement avant le contact.

Il apparaît parce que les deux surfaces interagissent.

2.8 — Un référentiel temporaire

Le référentiel de collision possède une caractéristique particulière : il peut être temporaire.

Il apparaît au contact.

Il évolue pendant la déformation.

Il change lorsque la surface atteint sa courbure maximale.

Il accompagne ensuite la restitution de la surface.

Finalement, lorsque les objets se séparent, ce référentiel n’est plus nécessaire.

On obtient ainsi :

contact → création du référentiel → courbure → restitution → séparation → disparition du référentiel

La géométrie du moteur devient donc capable de créer et de supprimer des référentiels selon les interactions.

2.9 — L’objet ne dépend plus entièrement du monde

Dans cette architecture, le système général de la scène peut toujours servir à déterminer où se trouvent les différents objets les uns par rapport aux autres.

Mais il ne doit plus décrire à lui seul toute leur géométrie interne.

Un ballon connaît sa surface.

Une surface connaît ses dimensions.

Une région connaît sa courbure.

Un élément attaché à cette région connaît sa position relativement à celle-ci.

Le monde n'a donc pas besoin de constituer **l'unique référentiel de toutes les propriétés géométriques**.

C'est l'objet qui possède en premier lieu sa structure dimensionnelle.

2.10 — Principe du référentiel dimensionnel

Le deuxième principe fondamental du Moteur 3D Kyzis 2.0 peut donc être formulé ainsi :

Tout objet possède un référentiel dimensionnel propre auquel sont rattachés sa géométrie, ses surfaces et ses éléments. Des référentiels locaux peuvent apparaître ou se transformer lorsque la géométrie de l'objet se courbe, se déforme ou interagit avec celle d'un autre objet.

Cette architecture relie directement les deux premiers principes du moteur :

les dimensions potentielles déterminent les directions géométriques disponibles ;

le référentiel dimensionnel organise ces directions et permet aux éléments de les suivre.

Ainsi, le moteur ne décrit plus seulement **où se trouve un objet**.

Il décrit **l'espace propre dans lequel cet objet existe et peut se transformer**.

C'est cet espace propre qui accompagnera l'objet dans son mouvement.

Chapitre 3 — La mécanique des collisions

Dans le **Moteur 3D Kyzis 2.0**, une collision n'est pas définie uniquement comme la rencontre de deux volumes. Elle est considérée comme une **interaction dynamique entre les référentiels dimensionnels de deux surfaces**.

Chaque surface possède sa géométrie, ses dimensions locales, son orientation, sa capacité de courbure et ses propriétés physiques. Lorsque deux surfaces se rencontrent, ces propriétés déterminent comment la zone de contact évolue.

La collision devient ainsi un phénomène géométrique dynamique dans lequel les surfaces peuvent se courber, transmettre leur mouvement, atteindre leurs limites de déformation puis restituer cette déformation sous forme de déplacement ou de rebond.

3.1 — La rencontre de deux surfaces

Toute collision commence par la rencontre de deux surfaces.

Avant le contact, chaque objet évolue dans son propre référentiel. Ses dimensions de surface suivent sa géométrie et son mouvement.

Au moment du contact, les deux géométries locales se rencontrent.

Le moteur dispose alors de plusieurs informations :

- la géométrie locale de chaque surface ;
- les directions suivies par leurs dimensions ;
- l'orientation des surfaces ;
- la vitesse relative des objets ;
- leur angle d'arrivée ;
- leur capacité de courbure ;
- leurs propriétés de rigidité ou de flexibilité.

Ces informations permettent de construire un **référentiel local de collision**.

Ce référentiel appartient à l'interaction elle-même. Il n'est pas nécessairement permanent dans la structure des deux objets.

3.2 — Le point de contact comme espace dimensionnel

Dans le moteur, le point de contact ne doit pas être considéré uniquement comme un point mathématique sans étendue.

Il constitue l'origine d'une région de contact possédant ses propres dimensions de surface.

Au commencement de la collision, cette région peut être extrêmement petite. Lorsque la déformation augmente, la région s'étend progressivement sur les surfaces concernées.

Il devient alors possible de considérer cette région comme un **espace local bidimensionnel susceptible de se courber**.

Cette courbure produit naturellement une géométrie tridimensionnelle locale :

surface 2D → courbure → forme 3D locale

Le comportement tridimensionnel de la collision peut ainsi émerger de la transformation des dimensions propres aux surfaces.

3.3 — L'angle d'arrivée

La collision dépend directement de la manière dont les objets se rencontrent.

Un impact direct ne possède pas la même géométrie qu'un impact oblique.

La vitesse relative donne une direction de mouvement, tandis que l'orientation locale des surfaces indique comment ce mouvement rencontre leurs dimensions.

L'angle d'arrivée participe donc à déterminer :

- la direction de la déformation ;
- la répartition de la courbure ;
- l'évolution de la zone de contact ;
- la direction de la restitution ;
- la trajectoire résultant de la collision.

Ainsi, la collision n'est pas calculée uniquement à partir de la position des centres des objets. **La géométrie réelle des surfaces au point de rencontre participe directement au résultat.**

3.4 — Les produits croisés et l'orientation du contact

Les directions locales des surfaces fournissent également les informations nécessaires pour déterminer l'orientation du référentiel de collision.

Si deux directions locales sont représentées par les vecteurs $\vec{u}$et $\vec{v}$, leur produit croisé permet d'obtenir une direction perpendiculaire :

$$\vec{n} = \vec{u} \times \vec{v}$$

Cette direction peut participer à la définition de l'orientation locale du contact.

Le moteur peut donc utiliser les propriétés géométriques des surfaces elles-mêmes pour déterminer les directions pertinentes de la collision.

Le référentiel de collision n'est pas imposé arbitrairement par les axes généraux du monde. **Il est construit à partir des directions réellement présentes dans la géométrie locale des objets.**

3.5 — La courbure provoquée par l'impact

Prenons l'exemple d'un ballon frappant un sol rigide.

La surface du ballon possède deux dimensions courbes et flexibles. Le sol possède également sa géométrie de surface, mais sa rigidité empêche cette géométrie de se déformer de manière significative.

Au contact, la géométrie du sol devient donc une contrainte pour la surface flexible du ballon.

La vitesse d'arrivée, l'angle d'impact et les propriétés de la texture déterminent progressivement le degré de courbure appliqué à la zone de contact.

La texture du ballon commence alors à modifier localement ses dimensions.

Le ballon ne perd pas son référentiel principal. C'est **une région de sa surface qui adopte temporairement un nouveau référentiel de courbure**.

3.6 — Le pourcentage de courbure

La déformation peut être représentée par un pourcentage.

Ce pourcentage exprime le degré auquel la surface flexible peut rejoindre la courbure déterminée par la surface rencontrée dans les conditions actuelles de l'impact.

Ainsi :

0 % correspond à l'état dans lequel la surface conserve sa géométrie initiale.

Une valeur intermédiaire correspond à une adaptation partielle de sa courbure.

100 % représente l'atteinte complète de la courbure définie par l'interaction avec la surface rencontrée.

Le 100 % ne représente donc pas une courbure infinie.

Il constitue **la limite de courbure déterminée pour cette interaction particulière**.

Cette limite dépend notamment de la vitesse d'arrivée et des propriétés des textures qui entrent en contact.

3.7 — Deux surfaces flexibles

Lorsque deux surfaces flexibles entrent en collision, aucune ne constitue nécessairement une référence rigide absolue.

Les deux surfaces participent à la formation du référentiel de collision.

Leurs directions locales, leur orientation, leur capacité respective de courbure et leur mouvement déterminent la géométrie temporaire créée entre elles.

La déformation devient alors **mutuelle**.

Une surface peut se courber dans un sens tandis que l'autre se transforme dans le sens complémentaire. La géométrie du contact résulte de cette interaction.

Le moteur ne demande donc pas simplement :

« Quel objet frappe quel objet ? »

Il cherche plutôt :

« Comment les deux référentiels de surface peuvent-ils géométriquement répondre à cette rencontre ? »

3.8 — La limite de courbure

Une surface flexible ne continue pas nécessairement à se courber indéfiniment.

La déformation évolue jusqu'à atteindre la limite définie par les conditions de la collision et les propriétés de la surface.

Cette limite constitue un moment essentiel.

Avant cette limite, l'impact provoque principalement la progression de la courbure.

À la limite, la surface atteint son état maximal de déformation pour cette interaction.

Après cette limite commence la **restitution**.

La surface cherche à retrouver sa géométrie.

3.9 — La restitution et le rebond

Le rebond apparaît lorsque la surface courbée revient vers sa forme.

La zone qui avait absorbé la déformation change alors de comportement : au lieu de continuer à céder devant l'impact, elle revient dans la direction opposée.

Ce retour exerce une poussée sur l'autre surface.

Le cycle peut être décrit ainsi :

contact → courbure → compression géométrique → limite de courbure → restitution → poussée → séparation

Le rebond devient ainsi la conséquence de la transformation puis de la restitution de la géométrie locale.

Un ballon peut s'écraser momentanément contre le sol, atteindre sa limite de courbure puis restituer cette déformation. La surface repousse alors le sol, tandis que la réaction obtenue contribue au mouvement du ballon dans la direction opposée.

3.10 — La zone de collision est dynamique

La région de contact n'a pas besoin de conserver la même taille pendant toute la collision.

Elle peut commencer presque ponctuellement, puis s'agrandir lorsque les surfaces se déforment.

Pendant la restitution, cette région peut ensuite diminuer progressivement jusqu'à disparaître lors de la séparation des objets.

On obtient donc une évolution géométrique :

point initial → région de contact → courbure maximale → diminution de la région → séparation

Le référentiel de collision suit cette évolution.

Il naît avec le contact, évolue avec la courbure et disparaît lorsque l'interaction prend fin.

3.11 — La texture comme élément mécanique

Dans cette architecture, une texture n'est plus seulement une propriété visuelle.

Elle participe au comportement de la surface.

Une texture peut définir notamment :

- sa capacité à se courber ;
- sa limite de déformation ;
- sa réaction à une autre texture ;
- son comportement pendant la restitution ;
- sa capacité à conserver ou modifier localement sa géométrie.

La texture devient donc une **structure dimensionnelle et mécanique**.

Deux objets ayant exactement la même forme peuvent ainsi réagir différemment parce que leurs surfaces ne possèdent pas les mêmes propriétés.

3.12 — Une collision résolue localement

L’une des conséquences importantes de cette architecture est que la collision peut être étudiée principalement là où elle se produit.

L’ensemble de l’objet n’a pas nécessairement besoin de subir la même transformation géométrique.

La région concernée crée son référentiel local de collision, tandis que cette région demeure reliée au référentiel de surface, lui-même relié au référentiel général de l’objet.

La hiérarchie devient :

objet → surface → zone de collision → courbure locale

La transformation peut ensuite se propager si les propriétés de l’objet l’exigent.

Ainsi, une collision locale produit d’abord une réponse locale avant de transmettre ses conséquences au reste de l’objet.

3.13 — Principe de collision du Moteur 3D Kyzis 2.0

Le troisième principe fondamental peut donc être formulé ainsi :

Une collision est une interaction temporaire entre les référentiels dimensionnels de deux surfaces. La géométrie locale, l’angle d’arrivée, la vitesse et les propriétés des textures déterminent un référentiel de courbure dans lequel les surfaces peuvent se déformer, atteindre leur limite puis restituer cette déformation sous forme de poussée et de mouvement.

La collision n’est donc plus simplement un événement indiquant que deux objets occupent momentanément une région commune.

Elle devient une **transformation géométrique calculable entre deux surfaces**.

Dans le Moteur 3D Kyzis 2.0, la surface n’est pas seulement l’endroit où la collision se produit.

La surface devient le mécanisme même de la collision.

Chapitre 4 — Les équations

Le **Moteur 3D Kyzis 2.0** doit traduire ses principes dimensionnels en relations calculables. Les équations proposées dans ce chapitre constituent une première formalisation du modèle : elles décrivent le référentiel propre de l’objet, les dimensions de surface, le déplacement, la courbure et la mécanique locale des collisions.

L'objectif n'est pas d'imposer trois axes fixes à toute la scène, mais de permettre à chaque objet de calculer son comportement à partir de **ses propres dimensions et de ses interactions avec les dimensions des autres objets**.

4.1 — Position locale et position globale

Soit un objet O possédant son propre référentiel R_O.

Un élément appartenant à cet objet possède une position locale :

$$p_L$$

La transformation du référentiel de l'objet vers la scène est représentée par :

$$T_O(t)$$

La position observable de l'élément devient :

$$p_G(t) = T_O(t)p_L$$

L'idée fondamentale est que p_L demeure attachée au référentiel de l'objet. Lorsque l'objet tourne ou se déplace, ses éléments suivent la transformation T_O.

Le moteur peut ainsi distinguer **la position dans l'objet** de **la position de l'objet dans le monde**.

4.2 — Dimensions d'une surface

Une surface flexible peut être décrite localement par deux dimensions :

$$S(u, v)$$

où u et v représentent les deux dimensions propres de la surface.

Les directions locales sont alors :

$$e_u = \frac{\partial S}{\partial u}$$

et

$$e_v = \frac{\partial S}{\partial v}$$

Ces deux directions ne sont pas obligatoirement droites dans l'ensemble de l'objet. Elles peuvent évoluer avec la géométrie de la surface.

La surface devient donc un espace parcourable dont les directions sont déterminées localement.

4.3 — Direction perpendiculaire de la surface

À partir des deux directions locales de la surface, le produit croisé permet de construire une direction perpendiculaire :

$$n = \frac{e_u \times e_v}{\| e_u \times e_v \|}$$

Cette direction $n$fournit une orientation locale utilisable lors d'une collision ou d'une déformation.

Le moteur dispose ainsi de trois informations géométriques locales :

$$(e_u, e_v, n)$$

Les deux premières appartiennent à la surface. La troisième résulte directement de leur relation géométrique.

4.4 — Déplacement suivant les dimensions propres

Un élément situé sur la surface peut se déplacer suivant $u$et v.

Son déplacement local peut être représenté par :

$$\Delta p_S = \Delta u \, e_u + \Delta v \, e_v$$

La direction réellement obtenue dépend donc de la géométrie locale.

Sur une surface courbe, $e_u$et $e_v$évoluent pendant le déplacement. L'élément suit ainsi **la surface elle-même**, plutôt qu'un ensemble de directions mondiales fixes.

4.5 — Dimensions finies et repliées

Certaines dimensions de déplacement peuvent être finies et se refermer sur elles-mêmes.

Pour une dimension comportant Npositions :

$$q' = (q + \Delta q)\, N$$

Dans un canevas cyclique de dimensions N_x, N_y, N_z:

$$x' = (x + \Delta x)\, N_x$$
$$y' = (y + \Delta y)\, N_y$$
$$z' = (z + \Delta z)\, N_z$$

Le dépassement de la dernière position produit alors un retour vers la première.

La dimension possède une taille finie, mais **le déplacement peut continuer sans rencontrer de frontière terminale**.

4.6 — Vitesse relative lors d'une collision

Soient deux surfaces Aet Bpossédant les vitesses :

$$v_A$$

et

$$v_B$$

Leur vitesse relative est :

$$v_{rel} = v_A - v_B$$

Sa grandeur est :

$$v_{rel} = \| v_{rel} \|$$

Cette quantité indique l'intensité cinématique de leur rapprochement relatif.

4.7 — Angle d'arrivée

La vitesse seule ne suffit pas. Il faut également connaître sa relation avec l'orientation locale du contact.

Si $n$représente la direction locale de référence du contact :

$$\theta = \cos^{-1}\left(\frac{v_{rel} \cdot n}{\| v_{rel} \|}\right)$$

L'angle θ permet de distinguer un impact arrivant principalement contre la surface d'un déplacement davantage orienté suivant celle-ci.

On peut également séparer la vitesse relative en deux composantes.

Composante normale :

$$v_n = (v_{rel} \cdot n)n$$

Composante tangentielle :

$$v_t = v_{rel} - v_n$$

Le référentiel de collision possède ainsi directement les informations nécessaires pour déterminer **comment l'impact arrive sur la surface**.

4.8 — Pourcentage de courbure

Dans le modèle Kyzis, la déformation de la surface peut être exprimée par un pourcentage :

$$C \in [0, 1]$$

avec :

$$C = 0$$

pour l'état initial de la région considérée, et :

$$C = 1$$

pour **100 % de la courbure autorisée par cette interaction**.

Si $S_0(u, v)$ représente la surface initiale et $S_C(u, v)$ la géométrie cible déterminée par le contact, une première interpolation géométrique peut s'écrire :

$$S(u, v, C) = (1 - C)S_0(u, v) + C\, S_C(u, v)$$

À 0 % :

$$S(u, v, 0) = S_0(u, v)$$

À 100 % :

$$S(u, v, 1) = S_C(u, v)$$

Cette équation formalise directement le principe selon lequel **100 % signifie que la surface atteint la courbure déterminée par la collision**, et non une courbure infinie.

4.9 — Courbure dynamique

Le pourcentage de courbure doit évoluer au cours du temps.

On peut représenter son évolution par :

$$C(t + \Delta t) = \text{clamp}(C, (t), +\Delta C01)$$

où ΔCdépend notamment de la vitesse d'arrivée, de l'angle du contact et des propriétés des surfaces.

On peut poser, comme structure générale du modèle :

$$\Delta C = F(v_{rel}, \theta, E_A, E_B, \Delta t)$$

où :

- $E_A$représente les propriétés de flexibilité de la surface A;
- $E_B$celles de la surface B;
- v_{rel}représente la vitesse relative ;
- θreprésente l'angle d'arrivée ;
- Fconstitue la fonction de courbure du moteur.

La forme exacte de Fpourra être déterminée lors de l'implémentation et des expérimentations.

4.10 — Répartition entre deux surfaces flexibles

Lorsque les deux surfaces sont flexibles, la déformation totale peut être distribuée entre elles.

On peut introduire deux coefficients :

$$\alpha_A + \alpha_B = 1$$

et répartir la transformation :

$$C_A = \alpha_A C$$
$$C_B = \alpha_B C$$

Pour une surface pratiquement rigide :

$$\alpha_A \approx 0$$

La majorité de la transformation est alors appliquée à l'autre surface.

Lorsque les deux surfaces peuvent se déformer, $\alpha_A$et $\alpha_B$déterminent leur participation respective au référentiel de courbure partagé.

4.11 — Restitution de la surface

Lorsque la courbure maximale définie pour l'impact est atteinte, le système entre dans sa phase de restitution.

Pendant cette phase :

$$\frac{dC}{dt} < 0$$

La surface se rapproche progressivement de son état initial :

$$C \to 0$$

La direction de restitution dépend du référentiel local de collision ainsi que de l'état géométrique atteint pendant la compression.

Le cycle complet devient :

$$0 \to C_{\max} \to 0$$

Lorsque :

$$C_{\max} = 1$$

la surface a atteint 100 % de la courbure autorisée par cette interaction.

4.12 — Transmission du mouvement

La restitution géométrique produit une modification du mouvement des objets.

Dans un premier modèle général, la variation de vitesse peut être exprimée comme une fonction :

$$\Delta v = G(C_{\max}, n, v_{rel}, E_A, E_B)$$

La nouvelle vitesse devient :

$$v' = v + \Delta v$$

Cette écriture volontairement générale sépare deux problèmes :

la géométrie détermine comment la surface se déforme ;

la mécanique détermine comment cette déformation modifie le mouvement.

Le moteur peut ensuite préciser G selon les propriétés physiques attribuées aux objets.

4.13 — Dimensions potentielles

Le nombre de dimensions potentielles d'un objet dépend de sa géométrie et de la résolution utilisée pour la définir.

On peut donc écrire :

$$D_{pot} = D(G, R)$$

où :

- G représente la structure géométrique de l'objet ;
- R représente la résolution choisie ;
- D_{pot} représente l'ensemble ou le nombre de directions calculables retenues à cette résolution.

Lorsque la résolution augmente :

$$R_2 > R_1$$

la description peut révéler davantage de structures géométriques et donc potentiellement :

$$D_{pot}(G, R_2) \geq D_{pot}(G, R_1)$$

Le moteur n'impose donc pas que chaque objet possède exactement le même nombre de dimensions pertinentes.

4.14 — Dimensions effectives

Toutes les dimensions potentielles d'un objet ne sont pas nécessairement utilisées simultanément.

On peut définir :

$$D_{eff} \subseteq D_{pot}$$

Les dimensions effectives correspondent alors aux dimensions nécessaires pour l'opération actuellement effectuée.

Lors d'un déplacement sur une surface, deux dimensions courbes peuvent suffire.

Lors d'une collision, les directions du contact, de la courbure et du mouvement deviennent également pertinentes.

Lors d'une déformation complexe, un ensemble plus important de dimensions potentielles peut être activé localement.

Le moteur ne calcule alors que **les dimensions nécessaires à l'état courant de l'objet**.

4.15 — Équation conceptuelle du Moteur 3D Kyzis 2.0

L'ensemble du système peut finalement être résumé par une relation conceptuelle :

$$\boxed{\text{Etat futur} = F\left(\text{référentiel}, \text{géométrie}, D_{eff}, \text{mouvement}, \text{interaction}\right)}$$

Le Moteur 3D Kyzis 2.0 ne cherche donc pas uniquement à déterminer une nouvelle position dans trois coordonnées.

Il cherche à déterminer **comment le référentiel propre d'un objet évolue lorsque ses dimensions interagissent avec celles de son environnement**.

Les équations ne sont plus seulement un moyen de déplacer un objet.

Elles deviennent le langage permettant à sa géométrie de se transformer.