

# Mise en images d'une théorie

Mémoire de DESS

2001-2002

Fabien Pasielsky

Dess Ini - Epinal

## Remerciements

Il est souvent de bon ton de remercier les personnes avec qui l'on a travaillé, mais ici, c'est avec un réel plaisir que je remercie mille fois Christine Chevrier pour sa disponibilité, sa gentillesse et sa bonne humeur : il n'est pas évident de travailler en collaboration avec des personnes aussi agréables.

Merci à Pierre Crozat, quel magnifique sujet que les pyramides égyptiennes !

Merci également à Anne Weisbeck et Tzu-Jen Liu qui m'ont supporté tout ce temps.



# Table des matières

1	INTRODUCTION.....	3
2	LES THESES PRECEDENTES .....	4
2.1	LES RAMPES D'ACCES.....	4
2.2	L'UTILISATION DES MACHINES.....	6
2.3	LE RECIT D'HERODOTE .....	7
3	THEORIE PROPOSEE .....	8
3.1	L'ACCROISSEMENT PYRAMIDAL.....	8
3.2	L'UTILITE DE LA GRANDE GALERIE.....	10
4	LE RECOURS AU MODELE 3D.....	12
4.1	QUAND LA GEOMETRIE S'EN MELE.....	12
4.2	QUAND LES PREUVES FONT DEFAUT.....	15
5	AUX FRONTIERES DU REEL .....	18
5.1	ANIMATION DE LA CONSTRUCTION.....	18
5.1.1	<i>Story-board</i> .....	18
5.1.2	<i>Utilisation d'un langage de programmation</i> .....	21
5.2	ANIMATION DES MONOLITHES .....	22
5.2.1	<i>Story-board</i> .....	22
5.2.2	<i>Difficultés rencontrées</i> .....	26
5.3	APPROCHE DU REALISME.....	27
5.3.1	<i>Effets spéciaux ponctuels</i> .....	27
5.3.2	<i>Choix des textures</i> .....	27
6	CONCLUSION.....	29
7	ANNEXES .....	30
7.1	ANNEXE 1 : GRAPHE DE MAPPING.....	30
7.2	ANNEXE 2 : SCHEMAS DE TRAVAIL (1).....	31
7.3	ANNEXE 3 : SCHEMAS DE TRAVAIL (2).....	32
7.4	ANNEXE 4 : SCHEMAS DE TRAVAIL (3).....	33
7.5	ANNEXE 5 : SCHEMAS DE TRAVAIL (4).....	34
7.6	ANNEXE 6 : SCRIPT DE CONSTRUCTION D'UNE PYRAMIDE.....	35
8	BIBLIOGRAPHIE.....	38
9	WEBOGRAPHIE.....	39



# 1 Introduction

Il y a 4000 ans commençait la construction de monuments aux dimensions surhumaines destinés à glorifier dans leur mort les pharaons d’Egypte. De nos jours, on estime que 20 ans ont séparé la pose de la première pierre de la pyramide de Khéops du coup de pinceau final. On établit aussi que près de 100 000 hommes ont travaillé au même moment à sa construction. Cette masse d’ouvrier ne peut cependant pas expliquer une construction aussi rapide de cet édifice –à peu près une pierre posée toutes les deux minutes jour et nuit pendant 20 ans- et l’utilisation de techniques de constructions performantes paraît être la clé de voûte d’une réalisation aussi imposante.

Il reste cependant très peu de trace de ces techniques. Les quelques textes y faisant allusion (celui d’Hérodote en particulier) font place à de nombreuses interprétations.

Le sujet de mon stage concerne la mise en images d’une nouvelle hypothèse de construction de la pyramide de Khéops : modélisation en trois dimensions (3D) et animation des mécanismes de constructions. Ces réalisations serviront à étayer cette nouvelle théorie proposée par Pierre Crozat, un jeune architecte de 60 ans préparant une thèse sur ce sujet [Crozat2002].

Le but premier de ce projet reste avant tout la création d’images illustrant cette théorie au travers d’un documentaire télévisé.

Le but de ce mémoire est autant d’expliquer les grands principes permettant d’aboutir au résultat attendu, à savoir la reconstruction en images de synthèses de la pyramide, que d’expliquer en quoi la démarche de création des images permet de confirmer –ou d’infirmier- la théorie mise en avant.



## 2 Les thèses précédentes

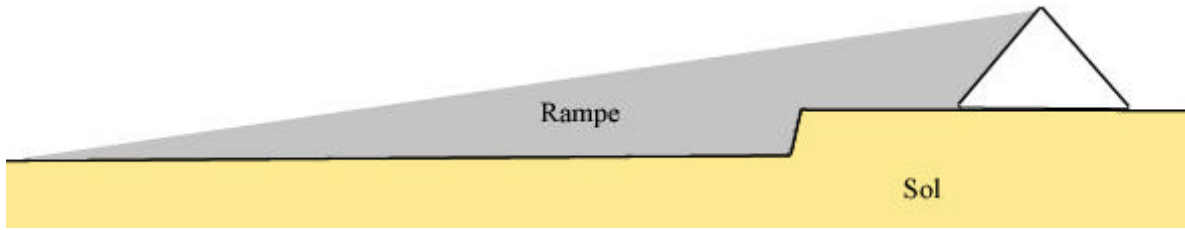


Figure 1: vue aérienne du plateau de Gizet

Il existe deux grands courants de pensée concernant la construction des pyramides du plateau de Gizet en Egypte. Le premier suggère l'utilisation de rampes permettant le transport des pierres vers le haut de la pyramide. L'autre courant est plus favorable à l'utilisation de machines.

### 2.1 *Les rampes d'accès*

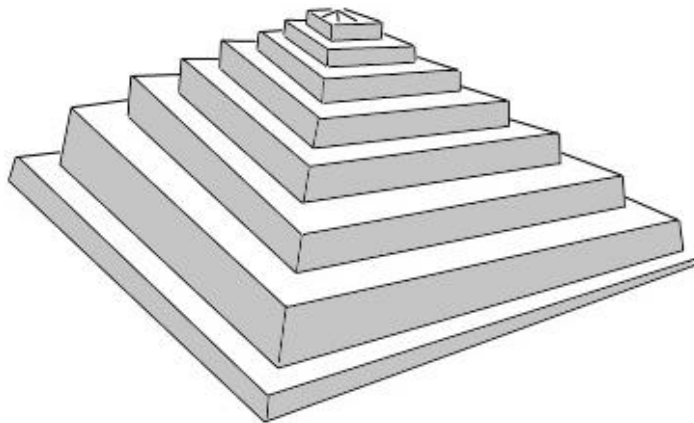
Ce principe utilise une rampe devant une face de la pyramide ; la rampe devient de plus en plus longue au fur et à mesure de l'avancement de la construction.



**Figure 2: rampe devant une face**

Cette théorie présente un inconvénient non négligeable : en effet, la pente des différentes rampes successives doit rester inférieure à un certain angle pour que l'on puisse amener les pierres jusqu'au sommet ; or, l'extrémité de la dernière rampe se trouverait derrière le Nil, fait absurde.

Basé sur le même principe, une théorie propose une rampe faisant le tour de la pyramide :



**Figure 3: rampe sur l'ensemble de la pyramide**

Cette proposition paraît peu vraisemblable dans la mesure où, pour monter un bloc en haut de la pyramide, il faut parcourir une longue distance ; de plus, comment une rampe comme celle-ci pouvait tenir ? D'après les hypothèses, il s'agissait de boue séchée devant être enlevée pour achever la pyramide.

En somme, cette théorie de rampe est peu convaincante. Qu'en est-il de la seconde ?



## 2.2 L'utilisation des machines

Quoi de plus naturel de nos jours pour monter des charges lourde que d'utiliser une machine. Cependant, 2000 ans avant J.C. , les techniques n'étaient pas ce qu'elles sont aujourd'hui. Les historiens et autres archéologues du temps ne pensent même pas que la roue ait été inventée. Comment alors imaginer un système simple pour déplacer des charges ?

Préférant abandonner l'idée de rampe d'accès, certaines personnes voient dans les machines la réponse à cette énigme.

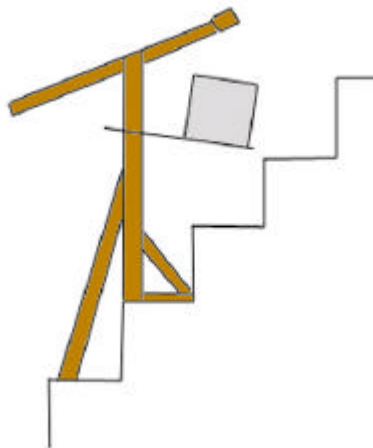


Figure 4: Elévateur de L. Croon

Cette machine proposée par Croon est relativement étrange. Un bras de levier appuyé sur un socle devait soutenir une plateforme sur laquelle était disposé le bloc. Cependant, même en acceptant l'idée que cet élévateur bancal puisse soulever les pierres de calcaire constituant la pyramide, comment expliquer que cette même machine puisse élever les 90 blocs de Granit de la chambre du roi pesant chacun au minimum 12 fois plus que les blocs communs ?

La machine s'appuie cependant sur un texte d'Hérodote qui explique, d'après les récits entretenus par la tradition orale Egyptienne, comment la construction s'est déroulée.



## 2.3 Le récit d'Hérodote

*«Voici comment on construisit cette pyramide, par le système des gradins successifs que l'on appelle tantôt **crossai**<sup>1</sup>,(corbeaux), tantôt **bomides**<sup>2</sup>,(plates-formes). On la construisit d'abord sous cette forme, puis on hissa les pierres de complément à l'aide de machines faites de courtes pièces de bois : on montait la pierre du sol jusqu'à la première plate-forme; là, on la plaçait dans une autre machine installée sur le premier gradin, et on la tirait jusqu'au deuxième gradin, où une troisième machine la prenait. Il y avait autant de machines qu'il y avait de gradins, à moins cependant qu'il n'y en ait eu qu'une seule, facile à déplacer et qu'on transportait d'un gradin à l'autre, sitôt déchargée (ceci pour indiquer les deux procédés que rapporte la tradition). On acheva donc d'abord le sommet de la pyramide, puis les étages au-dessous, l'un après l'autre, et l'on finit par les gradins inférieurs et la base de l'édifice.»*

C'est en se basant sur ce récit laissant place à de nombreuses interprétations que s'appuient certaines parties de la théorie de construction proposée par Pierre Crozat ; c'est ce principe qui nécessite une mise en image.

---

<sup>1</sup> désigne des pierres formant saillie (*Iliade* XII, 258,444) ; pierres saillantes ou corbeaux formant comme un escalier le long d'une construction

<sup>2</sup> estrade, socle, base, piédestal





### 3 Théorie proposée

Il paraît évident qu'une seule théorie ne peut expliquer complètement la construction de cet édifice. Quelle proposition permet alors d'expliquer l'ensemble de la construction ?

La théorie proposée par Pierre Crozat repose sur deux axes majeurs :

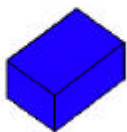
?? un procédé d'accroissement pyramidal

?? la grande galerie est un « ascenseur »

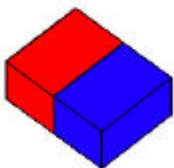
#### 3.1 L'accroissement pyramidal

C'est un principe de construction découlant d'une méthode de construction répétitive. Il est relativement difficile d'expliquer ce principe en deux dimensions et c'est pourquoi le recours aux images de synthèses permet de l'expliquer plus rapidement et simplement. Cependant, nous allons essayer de décrire le principe de manière succincte. La démonstration suivante s'intéresse à une seule face de la pyramide, mais le processus s'établit en même temps sur les quatre faces.

Il s'agit tout d'abord de poser une première pierre servant de base.

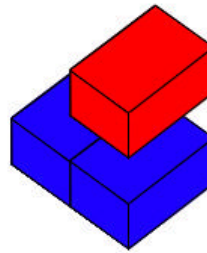
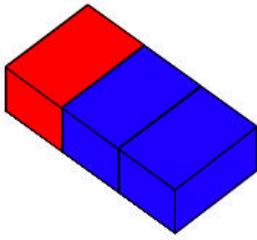


Poser ensuite une deuxième pierre à côté (en rouge).



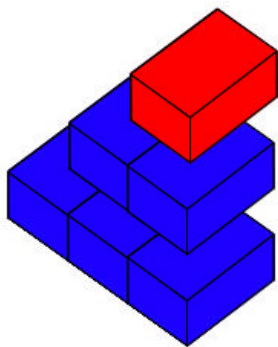
Ajouter encore une pierre (en rouge).

Déplacer cette pierre d'un étage et la décaler.



Il ne reste qu'à répéter le processus en posant à chaque étape une nouvelle pierre, puis si cela est possible, la déplacer d'un étage et la décaler.

On obtient ainsi pour l'itération suivante le modèle ci-dessous où la dernière pierre posée est en rouge :



A partir de cet algorithme d'accrétion, on peut se poser un certain nombre de question. La première qui vient à l'esprit est « comment monter les pierres d'étage en étage ? ». Question que nous aborderons plus loin dans ce document.



### 3.2 L'utilité de la grande galerie

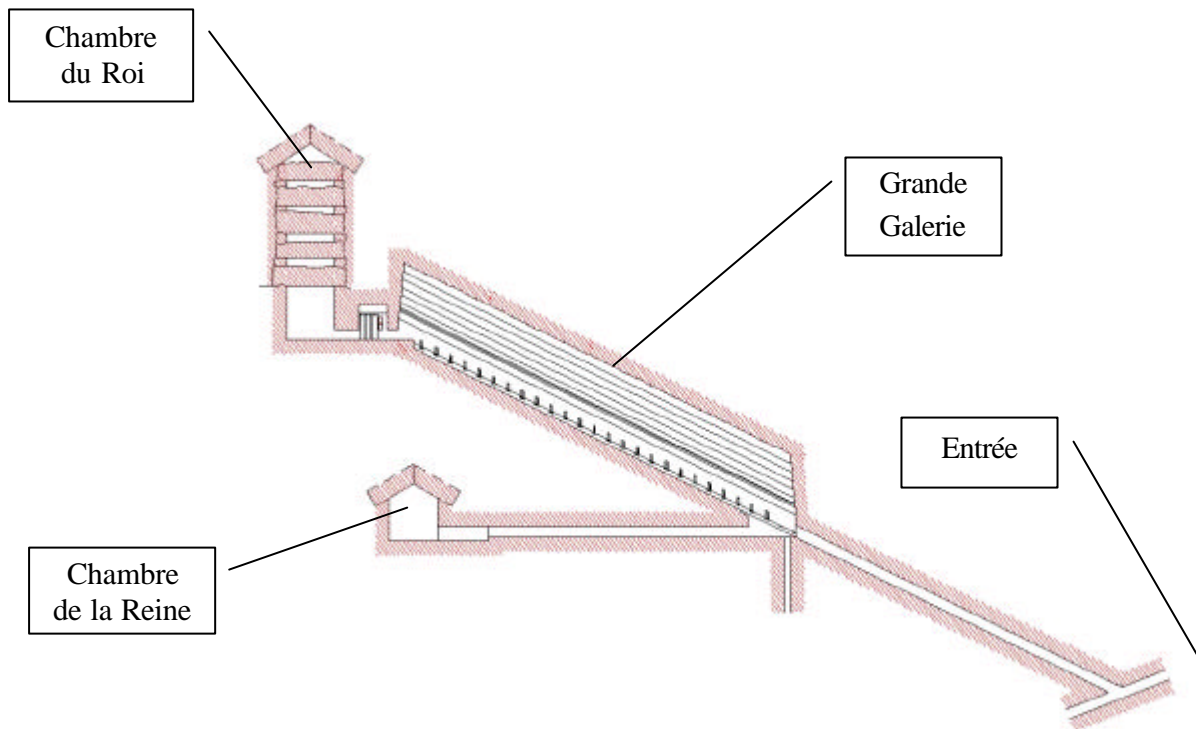


Figure 5: Vue en coupe de la Grande Galerie

La chambre du roi a bénéficié d'un soin de construction particulier. Les blocs au dessus sont en granit et non en calcaire comme le reste de la structure. Mais quel est l'intérêt de placer ces blocs gigantesques en cinq couches au dessus de la chambre du roi ? L'aspect décoratif n'est pas une raison suffisante. En fait, ces blocs servent de chambre de décharge et supportent l'effort exercé par la pyramide, empêchant celle-ci de s'écrouler sur elle-même. Si leur utilité est désormais établie, il reste à déterminer comment ils ont été acheminés jusqu'à leur position définitive. Est-il envisageable d'utiliser une machine pour élever ces blocs d'étage en étage ? Il apparaît que non car leur masse est trop importante. Quel système a donc été utilisé ?



**Figure 6 : Grande Galerie**

La grande galerie de la pyramide de Khéops permet d'accéder à la chambre du roi. Considérée simplement d'un point de vue décoratif par les personnes ayant étudié la pyramide, elle est ici au centre d'un mécanisme permettant de hisser des monolithes de plus de 30 Tonnes depuis le sol jusqu'au dessus de la chambre du roi.

En effet, par l'utilisation de deux systèmes de contrepoids, les gigantesques blocs de granit auraient été hissé jusqu'à leur position actuelle. Ce système ingénieux permet de manière relativement simple de faire glisser les blocs avec peu de ressources humaines et ne manque pas de rappeler le principe de l'ascenseur.

## 4 Le recours au modèle 3D

Les nombreux croquis ou les maquettes réalisées ont permis d'imaginer et construire la théorie ; cependant, ce modèle ne permet pas de prendre en compte certaines spécificités ou contraintes liées aux volumes. C'est aussi pour identifier ces problèmes que l'utilisation de l'image 3D s'impose.

### 4.1 Quand la géométrie s'en mêle

Les premières données à mettre en image concernaient la machine d'Hérodote décrite plus haut dans ce document. Des mesures précises expliquaient la position du bloc à monter par rapport à ceux déjà en place ainsi que les dimensions du bras de levier.

Le schéma suivant montre la première étape permettant de mettre en œuvre l'algorithme de construction évoqué précédemment.

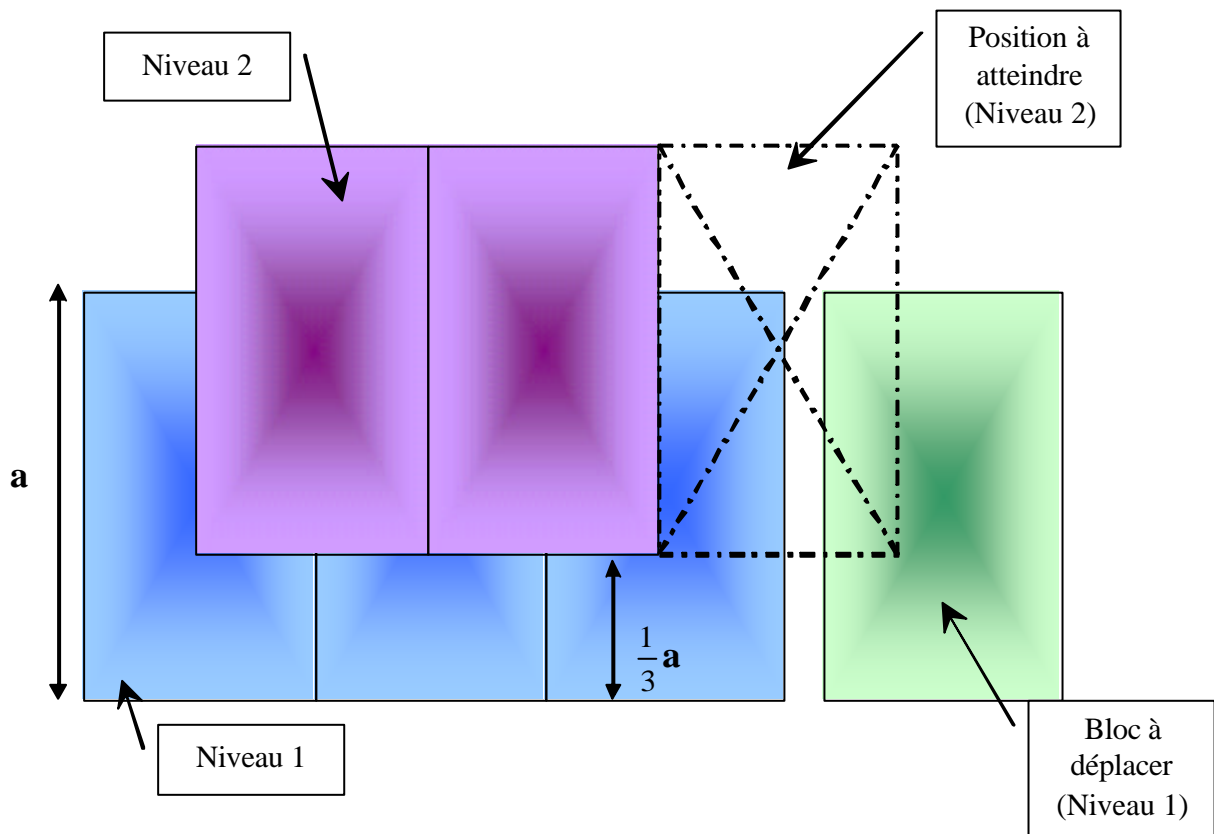


Figure 7 : Principe de déplacement d'un bloc (vue de dessus) - Phase 1

Le bloc à déplacer (en vert) se trouve au niveau 1 et doit se positionner à l'endroit marqué en pointillés. Pour se faire, il doit d'abord être élevé au niveau 2, puis être déplacé dans le plan du niveau 2. La manœuvre paraît facile, mais les mouvements de levage et de déplacement du bloc sont limités par le bras de levier qui le soulève, celui-ci étant posé sur un pivot fixe. Ainsi, la construction de cette machine permet de déceler certaines imperfections dans les données fournies. Le tout est une affaire de géométrie expliquée par le schéma suivant.

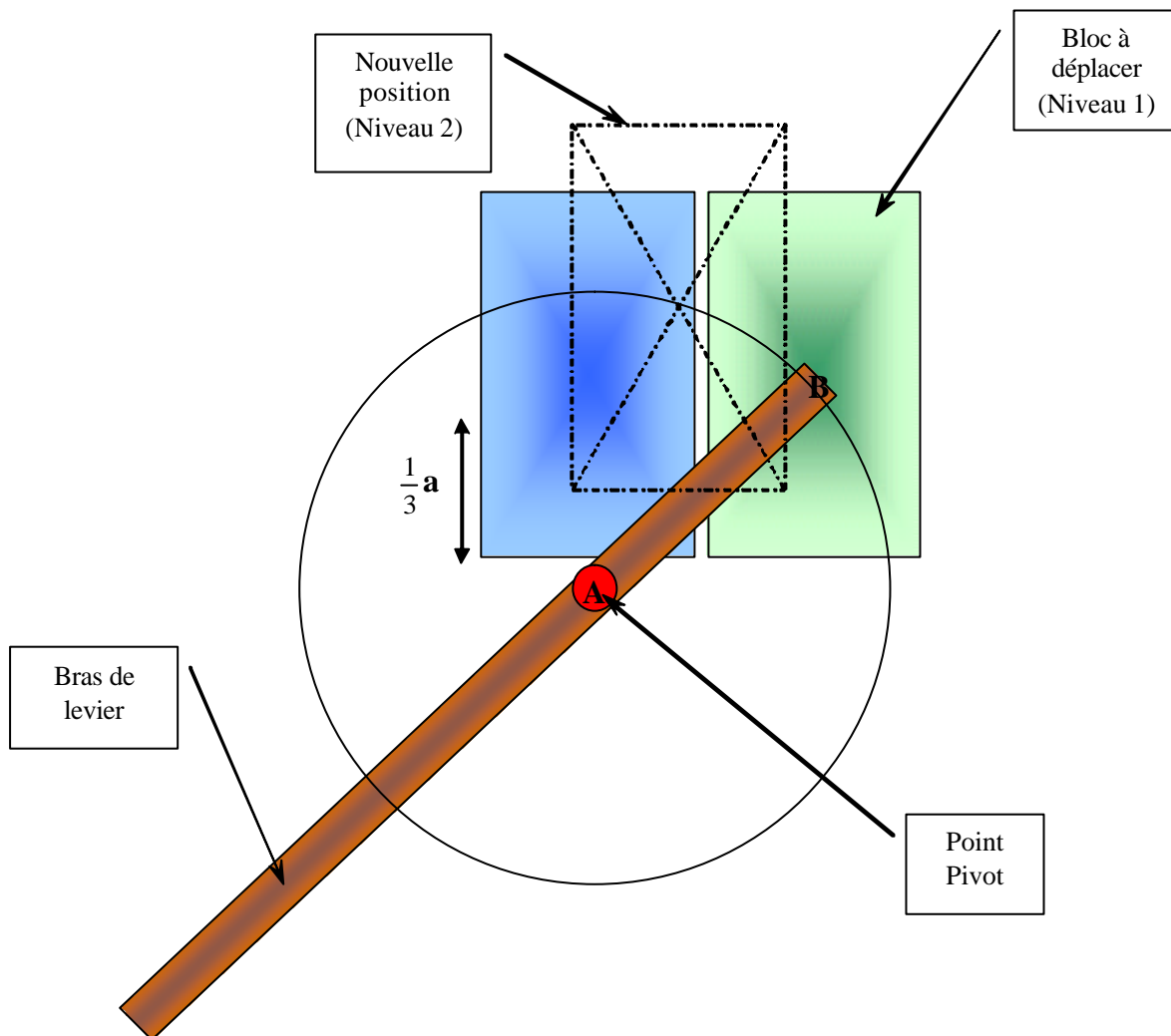


Figure 8 : Utilisation des données fournies pour déplacer un bloc

On remarque que le déplacement du bloc suit un cercle dont le rayon est la distance entre le point pivot et l'extrémité du bras de levier (soit AB). Le fait de faire monter le bloc diminue la taille de AB dans le plan, ajoutant à la difficulté du placement du pivot. Cette constatation en

entraîne une autre : il est impossible de positionner le bloc au tiers du bloc d'en dessous comme dans le schéma précédent.

Ceci nous pousse à réfléchir sur les hypothèses de départ ; au final il reste deux possibilités :

Le bras de levier est plus long

Le bloc n'est pas positionné au tiers du bloc d'en dessous

Dans notre cas, l'hypothèse retenue est que le bloc n'est pas positionné comme on le pensait au début.

La phase finale de placement du bloc intervient quand on arrive au « sommet » de l'escalier formé par les pierres posées précédemment. Le bloc est alors positionné au milieu des deux pierres en dessous de lui comme ci-après :

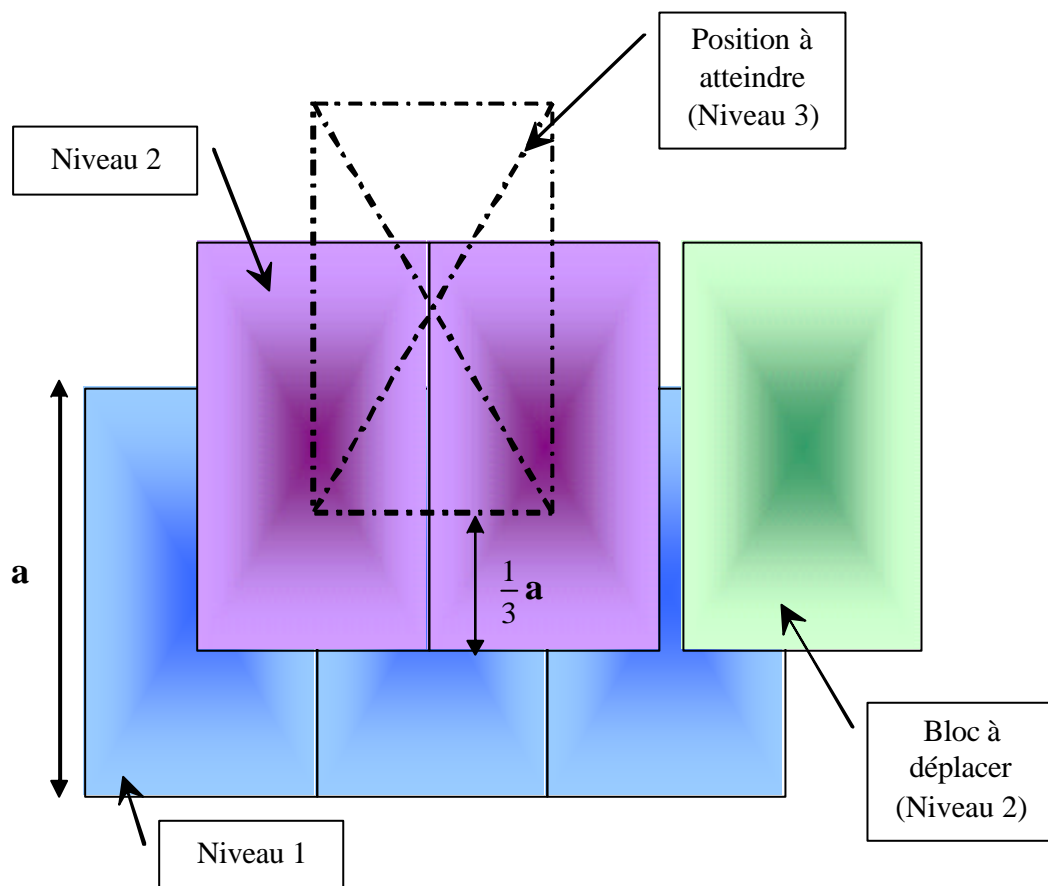


Figure 9 : Principe de déplacement d'un bloc (vue de dessus) - Phase 2

Pour l'heure, s'il est possible de construire la majeure partie de la pyramide, il est impossible d'utiliser les machines pour acheminer les monolithes de la chambre du roi dont la masse est

au moins 12 fois plus importante que les blocs précédemment utilisés. Quelle solution adopter alors ?

## 4.2 Quand les preuves font défaut

La principale proposition de Pierre Crozat est que la grande galerie a joué un rôle décisif dans l'acheminement des monolithes. Par un système ingénieux de contrepoids dans la grande galerie reliés au monolithe à monter, les bâtisseurs auraient réussi cet exploit. Un certain nombre d'éléments vont dans le sens de cette proposition, mais certains points restent inexplicables car les machines utilisées ont disparus et qu'il n'existe à ce jour aucun écrit expliquant la démarche utilisée alors.

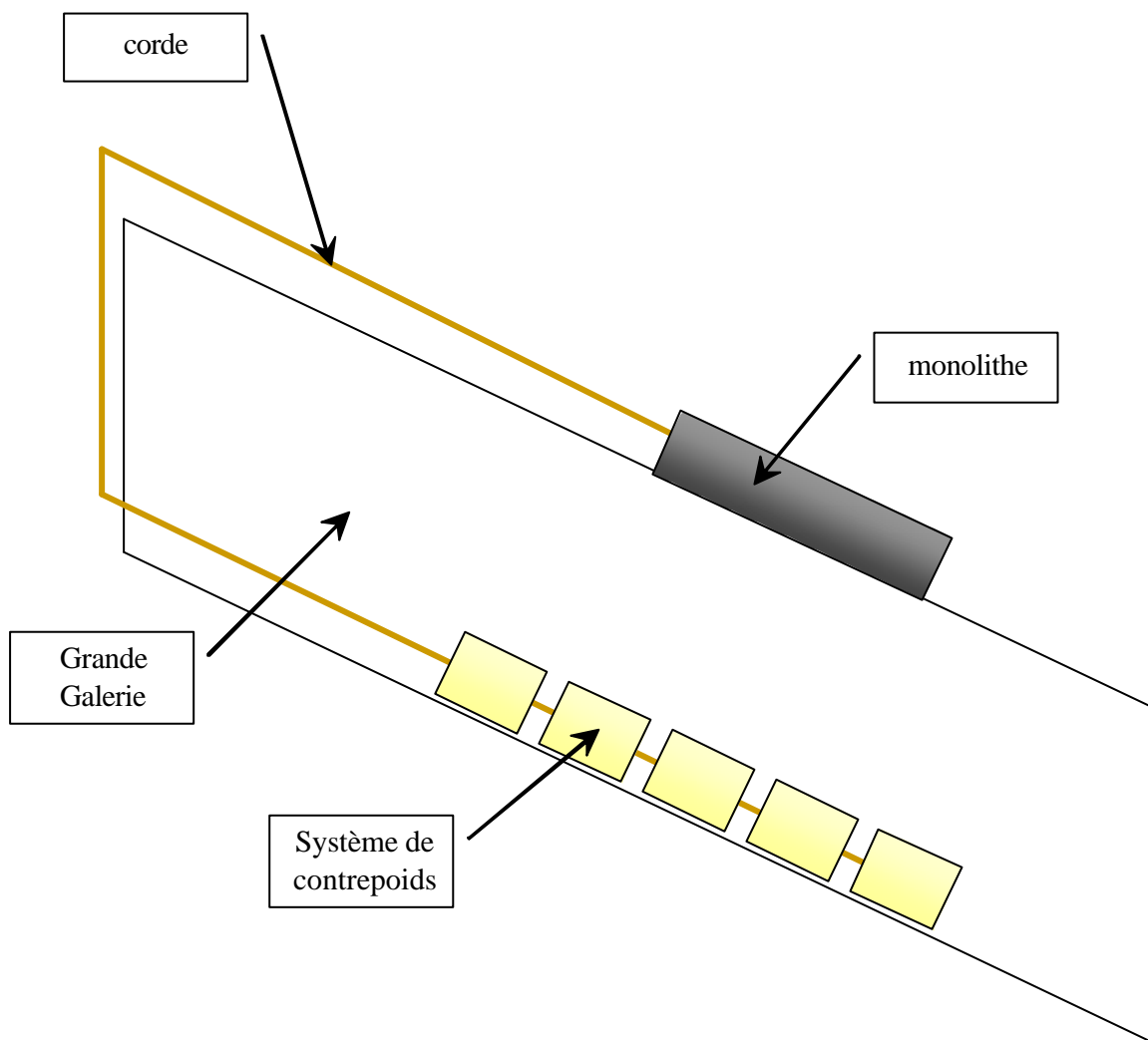
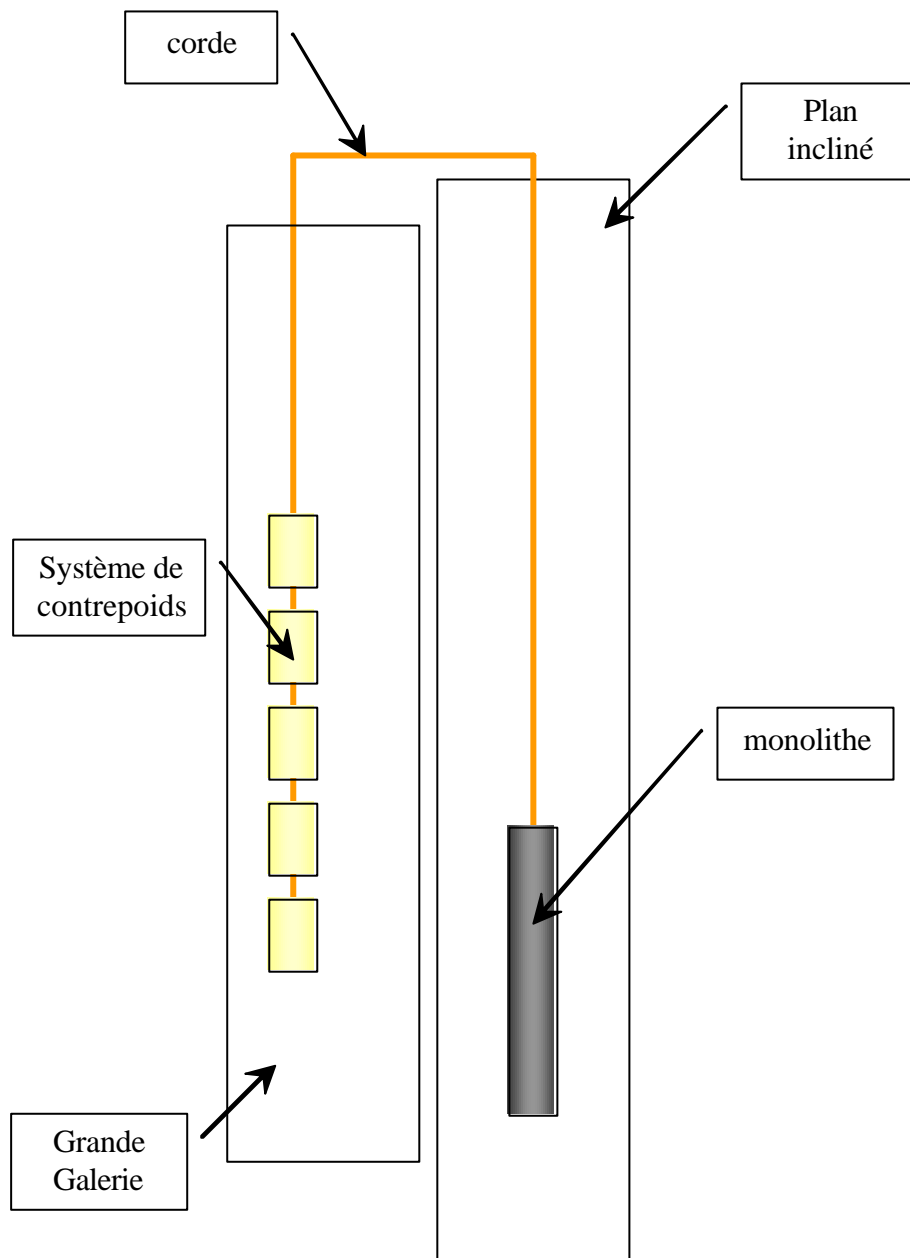


Figure 10 : principe du contrepoids (vue de profil)



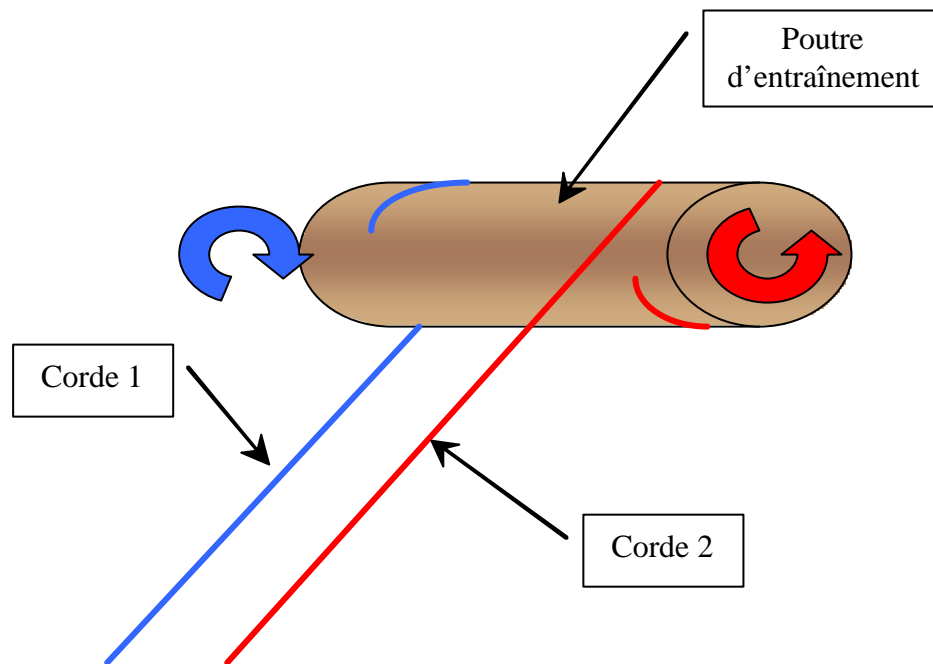
La figure précédente montre la première phase du principe. Le système de contrepoids glisse dans la grande galerie et fait s'élever le monolithe. Cependant, le contrepoids et le monolithe ne sont pas dans le même plan comme le montre le schéma suivant :



**Figure 11 : principe du contrepoids (vue de dessus)**

Bien que ce principe soit simple à mettre en œuvre sur le papier, il reste un certain nombre de questions à se poser pour le passage à la 3D. En premier lieu, le système de corde demande une étude approfondie : comment faire passer les cordes, comment les enrouler et sur quels dispositifs reposent-elles ? Autant de questions qui ne peuvent trouver à coup sur une réponse,

faute de preuve. Que faire alors ? L'imagination vient au secours du manque d'élément (figure 12). Il suffit de se projeter dans la situation et d'imaginer le moyen de résoudre le problème. Bien sur, la solution qui émerge de cette recherche n'est qu'expérimentale et ne s'appuie sur aucun fait réel. Cependant, elle a le mérite d'être plausible et en accord avec les possibilités de l'époque : on utilise deux cordes distinctes qui s'enroulent de manière opposées sur un axe en bois encastré dans les fondations de telle manière que si l'une des cordes s'enroule, l'autre se déroule.



**Figure 12 : système d'enroulement des cordes proposé**

Les questions qui découlent de cette modélisation font avancer la réflexion concernant la construction proprement dite. Pour autant, les solutions choisies ne sont qu'interprétations. Les choix qui sont fait ont un seul but : permettre la création d'images proposant une explication plausible de la construction de la pyramide de Khéops.

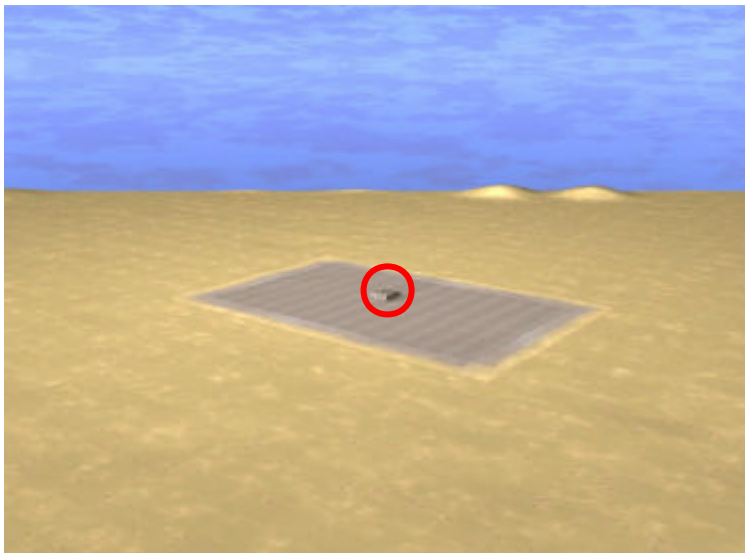
## 5 Aux frontières du réel

La conception d'un modèle 3D pour valider les hypothèses n'est qu'une partie du projet qui m'a été confié. Le but principal reste la création d'images servant d'illustration à un documentaire télévisé. Quels sont les choix opérés dans le rendu de ces images ? Faut-il s'approcher de la réalité pour rendre le discours crédible ? Quelles animations permettront d'explicitier au mieux le mécanisme de construction de la pyramide ?

### 5.1 Animation de la construction

#### 5.1.1 Story-board

Les images étant produites pour un film, il devient nécessaire de les organiser au mieux pour coller à un récit. Cependant, comme aucun script n'a été établi avant d'entamer la phase de production, je ne peux qu'enchaîner les étapes de construction comme on me l'a expliqué. Pour autant, la conception d'un story-board permet de fixer le déroulement des étapes et détermine les futurs choix du montage vidéo. Pour être plus agréable à consulter, ce story-board est directement tiré des scènes 3D produites.

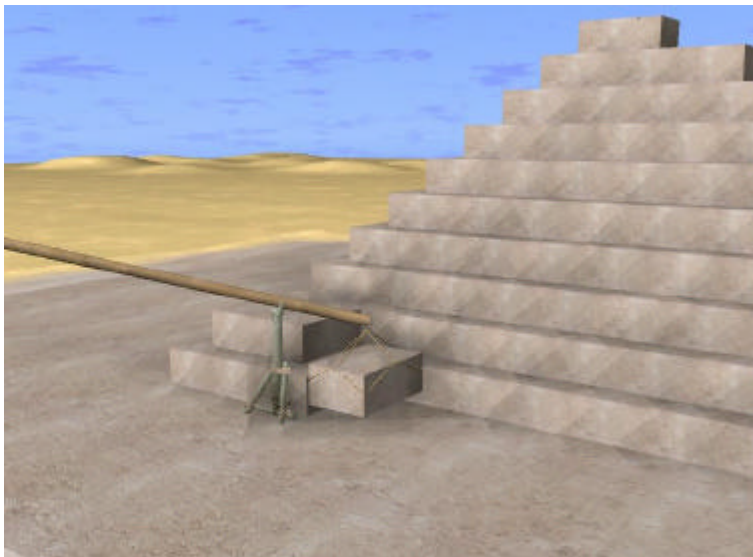
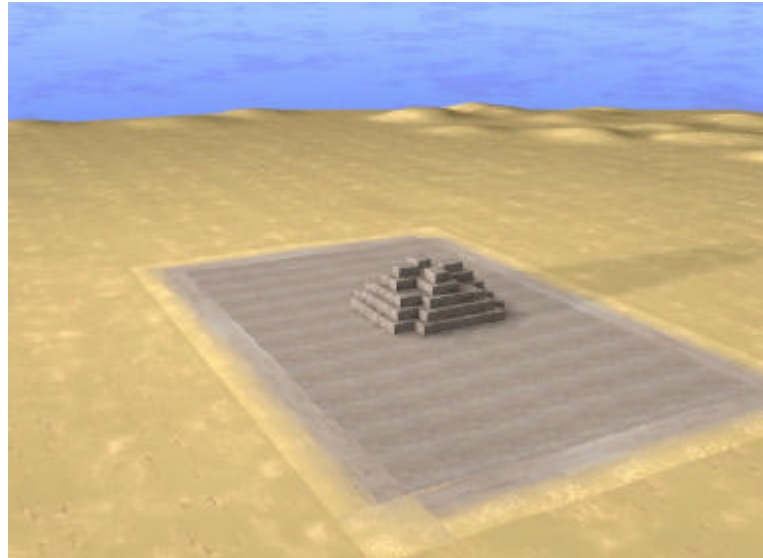


*Plan 1 :*

Plan large, vue éloignée de l'emplacement de construction, lente rotation de la caméra autour du point central (cercle rouge).

**Plan 2 :**

Construction de la pyramide selon l'algorithme de Crozat [Crozat2002]. Zoom lent vers la pyramide et légère rotation vers la gauche.



**Plan 3 :**

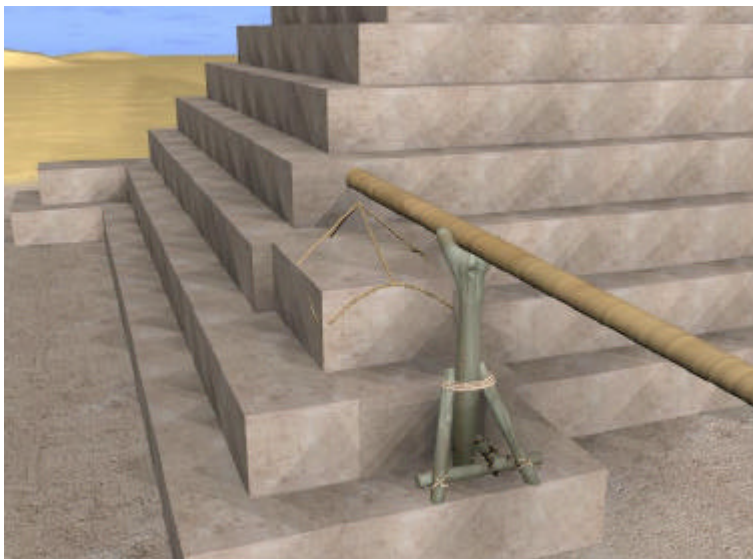
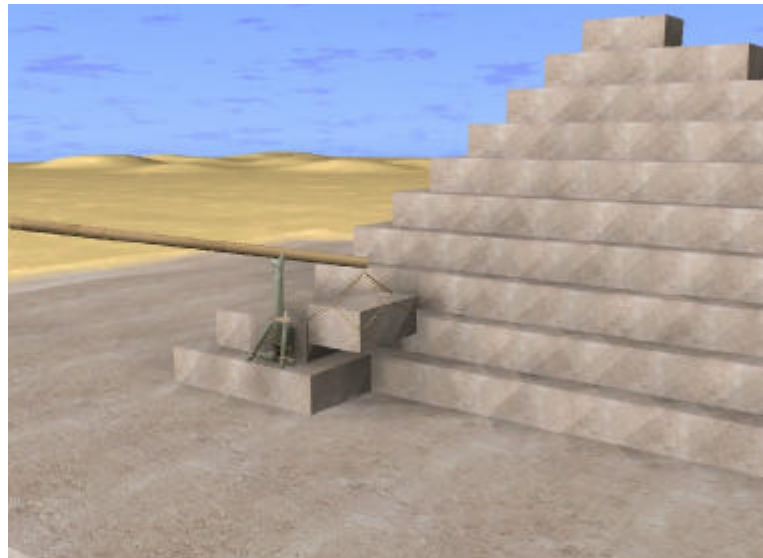
Apparition d'une machine en fondu enchaîné avec le plan 2.

La caméra se fixe et l'animation de la machine commence.

Montée de la pierre au premier étape puis disparition progressive de la machine.

**Plan 4 :**

Réapparition progressive de la machine un étage au dessus, reprise de l'animation de montée du bloc.

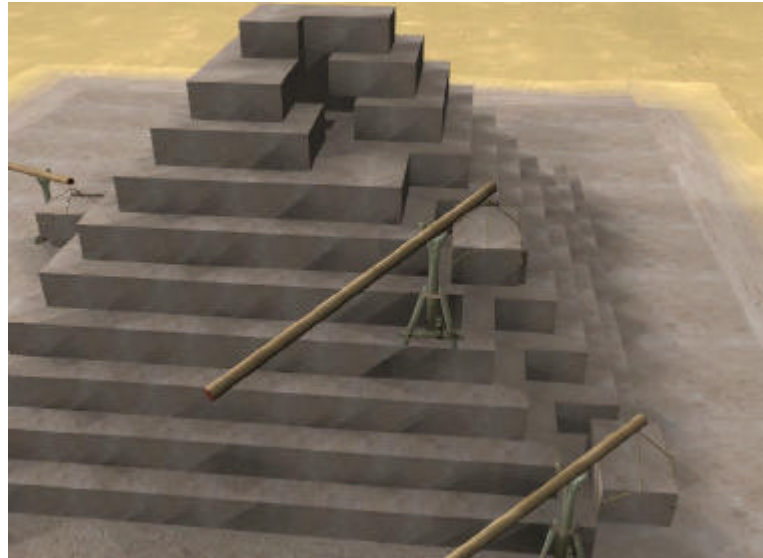


**Plan 5 :**

Fin de l'animation sur un autre point de vue. Dépôt de la pierre à sa place finale.

**Plan 6 :**

Point de vue sur une autre face en construction où deux machines s'activent. Légère rotation vers la droite.



### 5.1.2 Utilisation d'un langage de programmation

La première étape dans cette scène était de construire une partie de la pyramide pour pouvoir y poser les machines. Cette opération se résumant à la création de blocs et au déplacement de ceux-ci vers leur position finale, il paraissait plus simple d'utiliser un script pour générer l'édifice. Cette possibilité est offerte par le logiciel de modélisation 3D utilisé (Maya). Et puisque -nous l'avons indiqué plus haut- la construction résulte d'un algorithme d'accroissement pyramidal, il suffit de l'adapter au langage de script.

C'est donc cette solution qui a été retenue : un script créé à la demande de l'utilisateur une pyramide de  $x$  blocs. L'intérêt étant de pouvoir réutiliser ce script facilement pour illustrer éventuellement d'autres étapes de la construction.

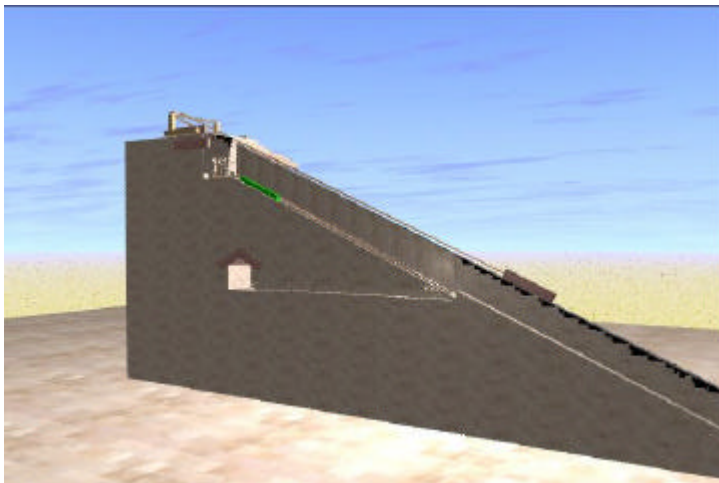
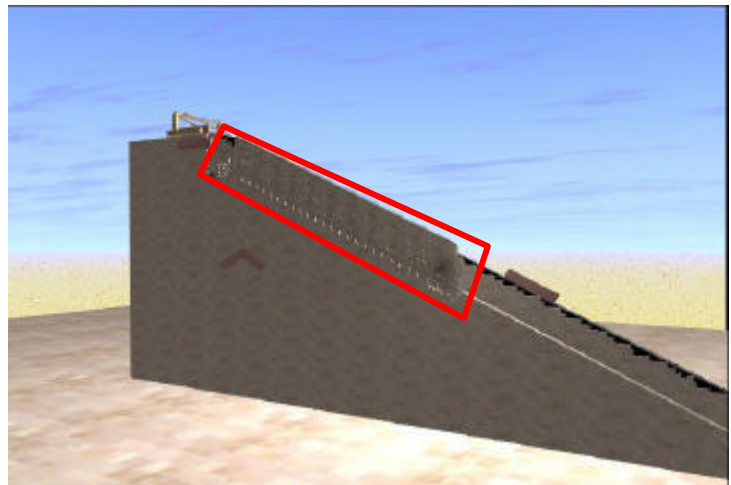
## 5.2 Animation des monolithes

### 5.2.1 Story-board

A l'heure de l'écriture de ce mémoire, cette partie est encore en chantier et ne peut donc pas être abordée complètement. Ce story-board est donc plus un élément de travail qu'une étape finalisée et validée. Les annexes 2 à 5 présentent les documents de travail ayant servi à l'élaboration du modèle 3D.

#### *Plan 1 :*

Vue sur une coupe de la pyramide en construction. La caméra s'approche de la Grande Galerie (en rouge)

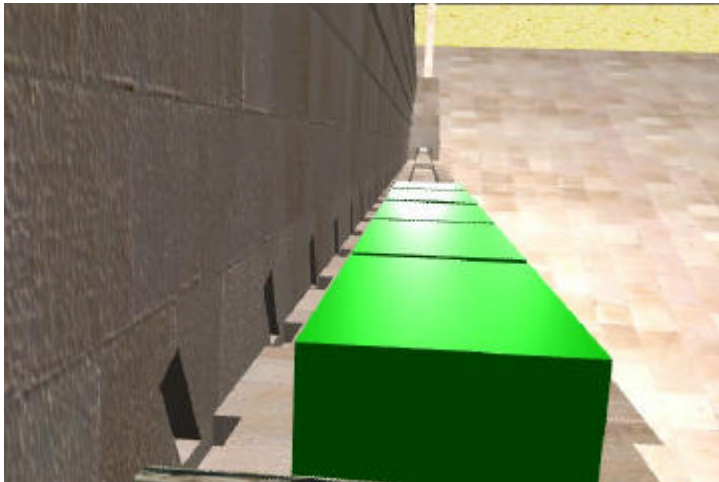
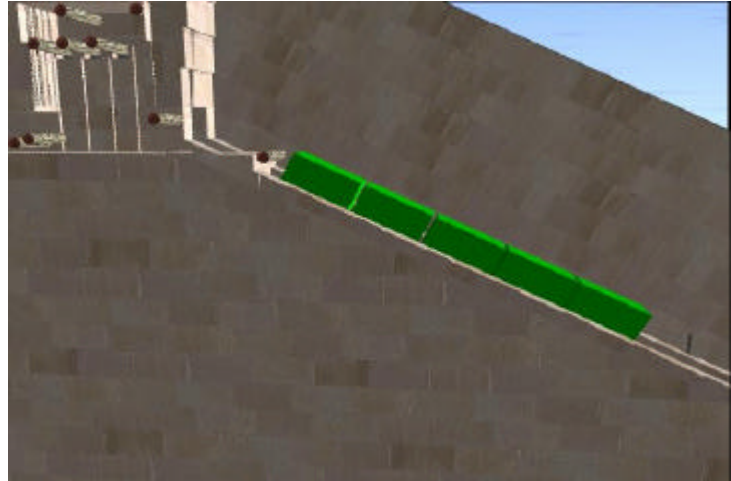


#### *Plan 2 :*

Fondu enchaîné de la même vue où l'on fait disparaître les cloisons de telle manière que l'on puisse voir les parties internes de la pyramide

**Plan 3 :**

La caméra s'approche du haut de la Grande Galerie. Elle effectue une rotation pour atteindre la position du plan suivant.

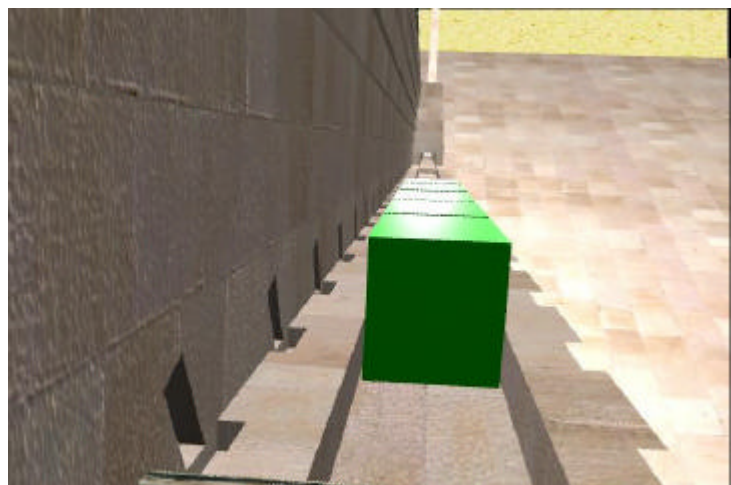


**Plan 4 :**

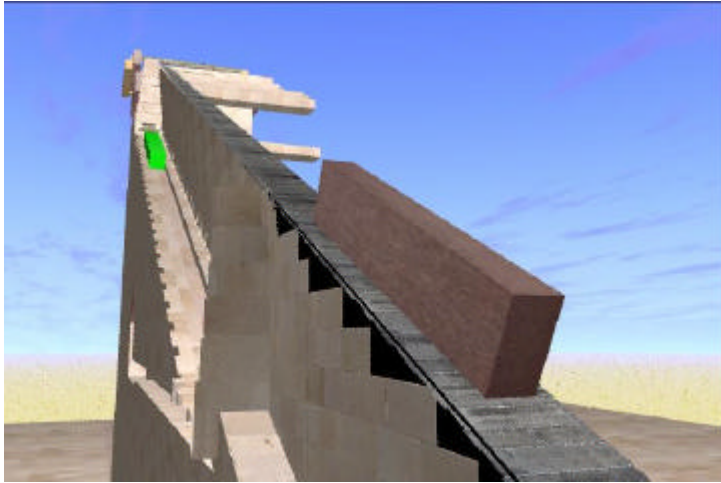
La caméra s'arrête et fixe le contre poids (en vert)

**Plan 5 :**

Le contre poids est lâché, la caméra observe sa descente pendant un cours moment.





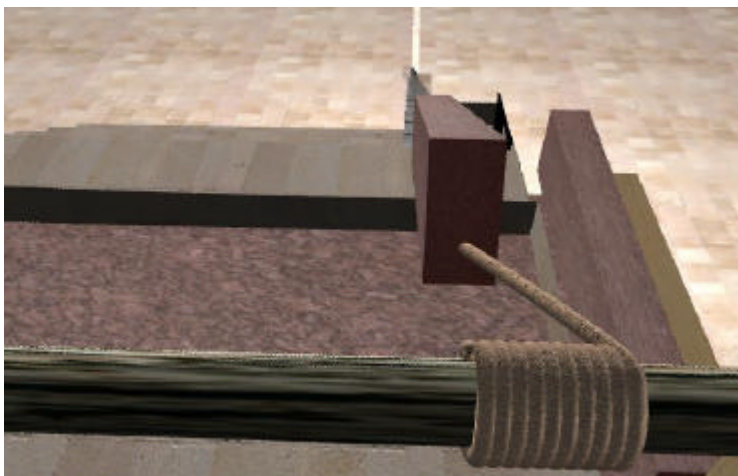
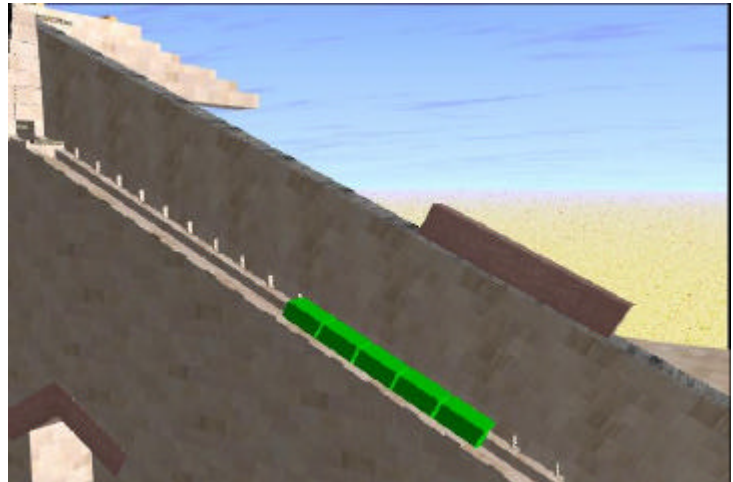


**Plan 6 :**

Changement de point de vue : la caméra se positionne derrière le monolithe à élever. On voit en arrière plan le contrepoids descendre.

**Plan 7 :**

Poursuite du monolithe avec la caméra. On voit se croiser le contrepoids et le monolithe.

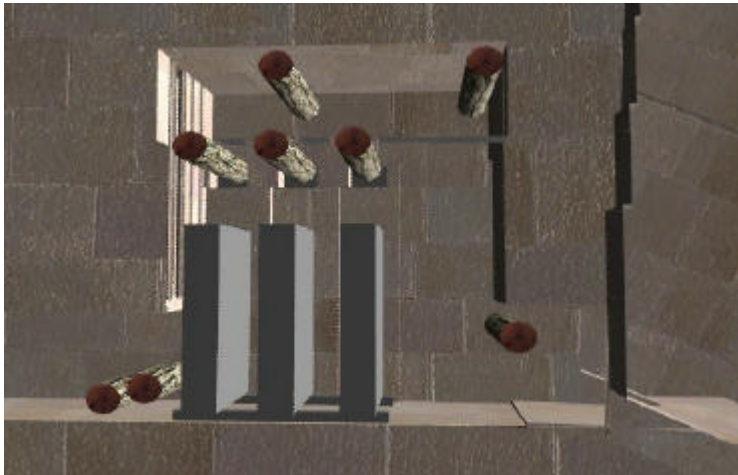
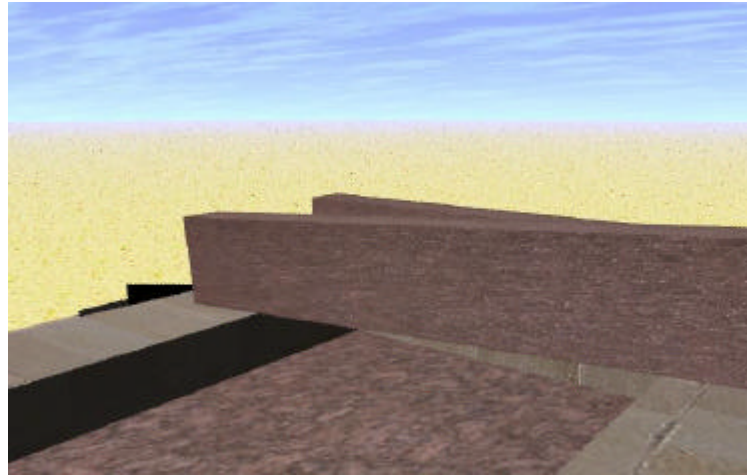


**Plan 8 :**

Changement de vue : la caméra est au sommet de l'ascenseur et fixe la montée du monolithe sur les derniers mètres. On voit la corde s'enrouler

***Plan 9 :***

La caméra pivote pour voir le monolithe prendre position au dessus de la chambre du Roi.

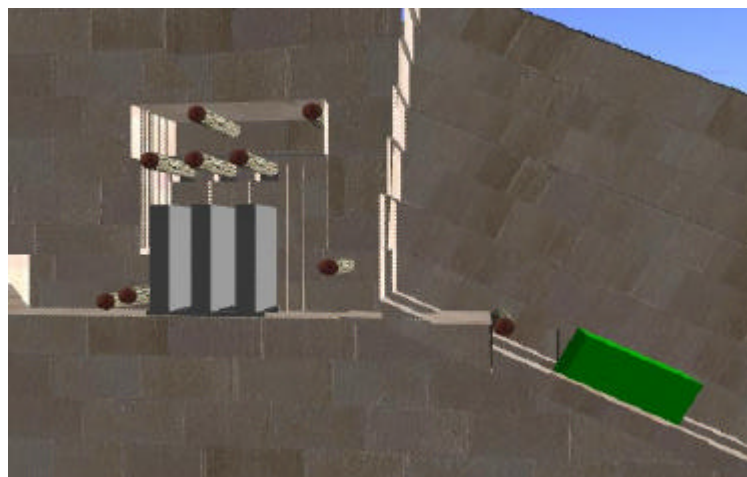


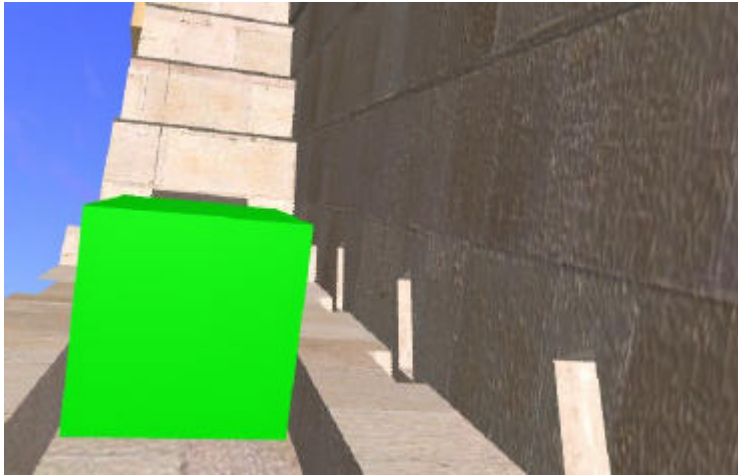
***Plan 10 :***

Changement de vue : la caméra regarde le sas d'entrée menant à la chambre du roi : on observe le mécanisme des herses qui sont levées.

***Plan 11 :***

Elargissement du plan : les herses sont abaissées et on voit un bloc du contrepoids monter d'un cran dans la Grande Galerie.





*Plan 12 :*

Changement de point de vue : la caméra est derrière le bloc élevé et observe son mouvement.

### **5.2.2 Difficultés rencontrées**

Les difficultés jalonnent de projet. La première de toute est de découvrir une méthode permettant d'obtenir le résultat que l'on attend. Mais plus particulièrement, c'est l'enroulement des cordes qui a été un véritable défi. En effet, les cordages sont des corps mous et réagissant dans le monde réel d'une manière que l'on a du mal à reproduire en image de synthèse. Ainsi, la solution ne fut pas immédiate, mais le fruit de recherches et d'abandon de méthodes trouvées.

Une autre grande difficulté est l'animation des scènes. Du fait qu'aucun scénario n'ait été établi, il est difficile de régler les animations pour qu'elles collent à un discours n'existant pas encore. La liberté laissée est donc toute relative puisqu'il faut se projeter dans l'exposé à venir et éviter les incohérences.

La plus grande difficulté reste l'aspect pluridisciplinaire du projet : il a fallu modéliser des objets 3D, les animer, les texturer, préparer les textures sous un programme de retouche d'images, choisir et positionner les éclairages et les caméras, fabriquer un script de génération d'objets géométriques et utiliser des effets spéciaux dans la générations de certains éléments. Autant dire que la maîtrise de tous ces aspects reste encore aujourd'hui imparfaite.

### **5.3 Approche du réalisme**

L'utilisation des images de synthèses n'a pas pour vocation unique d'expliquer les phases de construction. Au-delà de l'aspect « compréhension du système », elles sont destinées au grand public. Pour éviter une démonstration technique ennuyeuse, il est nécessaire de se rapprocher des images dites « naturelles ». Tenter d'obtenir un résultat réaliste est une gageure. Le travail ne se limite plus à la modélisation d'objets géométriques, mais s'élargit au travail des textures et de la lumière. Il apparaît alors très vite que ce sont des métiers à part entière s'intégrant dans la chaîne de production d'images numériques. A mon niveau, il est possible d'égaliser les dernières productions hollywoodiennes à la mode. Cette base étant acquise, quel niveau de réalisme peut être atteint avec les moyens mis à disposition ?

#### **5.3.1 Effets spéciaux ponctuels**

Le logiciel d'imagerie 3D utilisé (Maya) permet de créer un certain nombre d'objets particuliers comme des brins d'herbe, des chutes d'eau, des néons fluorescents, etc. L'un de ces effets réalistes a été utilisé dans la génération des cordes liant des pièces constituant les machines de bois. Ainsi, l'illusion produite par cet effet évoque des cordages réels. L'inconvénient majeur à l'utilisation de cet effet est que le temps de calcul des images est allongé (parfois multiplié par 5 !) pour quelques effets produits. Ceci devient un inconvénient majeur si un seul ordinateur est sollicité par le calcul du résultat. La multiplication des sources de calcul permet de dépasser ce problème, mais nécessite une grande organisation pour que le travail soit efficace. De plus, l'utilisation de ces effets ne peut être faite qu'en petite quantité, sous peine de transformer le calcul en une histoire sans fin. Quel autre procédé permettra alors d'approcher le réalisme voulu dans un temps raisonnable ?

#### **5.3.2 Choix des textures**

Maya permet de créer des matériaux qui sont appliqués sur des objets. La composition d'un matériau peut être multiple : il est possible d'utiliser une photographie comme matériau en lui appliquant toute sorte de filtres. Ainsi, la création d'un seul matériau peut découler d'une organisation de filtres, photographies et autres effets mathématiques. Mais si la création



d'arborescences complexes est possible, elle n'est pas moins difficile. L'obtention de matériaux réalistes est le fruit d'une longue recherche et d'essais souvent ratés.

Il est aussi fréquent de positionner plusieurs textures sur un même objet, comme un sol sablonneux contenant une carrière de pierres. Cette technique de positionnement très précis s'appelle le mapping. La figure en annexes 1 montre un graphe de mapping utilisé pour la situation décrite.

Certaines textures prédéterminées permettent de créer de véritables environnements. L'utilisation de l'une d'elles a permis de créer le ciel, le soleil et les nuages propres aux scènes extérieures. Basé sur la notion mathématique de fractales<sup>1</sup>, les nuages sont disposés de manière éparse sur le ciel et peuvent être animés en fonction du temps. Ceci est un procédé peu coûteux en calcul et très efficace dans l'approche réaliste souhaitée.

---

<sup>1</sup> Ici, répétition d'un motif géométrique à l'infini, quel que soit le niveau de zoom appliqué à une partie de ce motif.



## 6 Conclusion

Un rapide retour en arrière sur le travail effectué montre combien l'expérience a été profitable. Le gain de connaissances et de savoir faire est évidente : utiliser un même environnement de travail pendant quatre mois conduit à mieux appréhender les fonctionnalités d'un logiciel aussi vaste.

Pour autant, la maîtrise de l'ensemble paraît impossible car chaque étape de production nécessite des qualités différentes. Il me semble donc qu'une spécialisation dans l'une de ces étapes est plus souhaitable pour produire un travail de qualité.

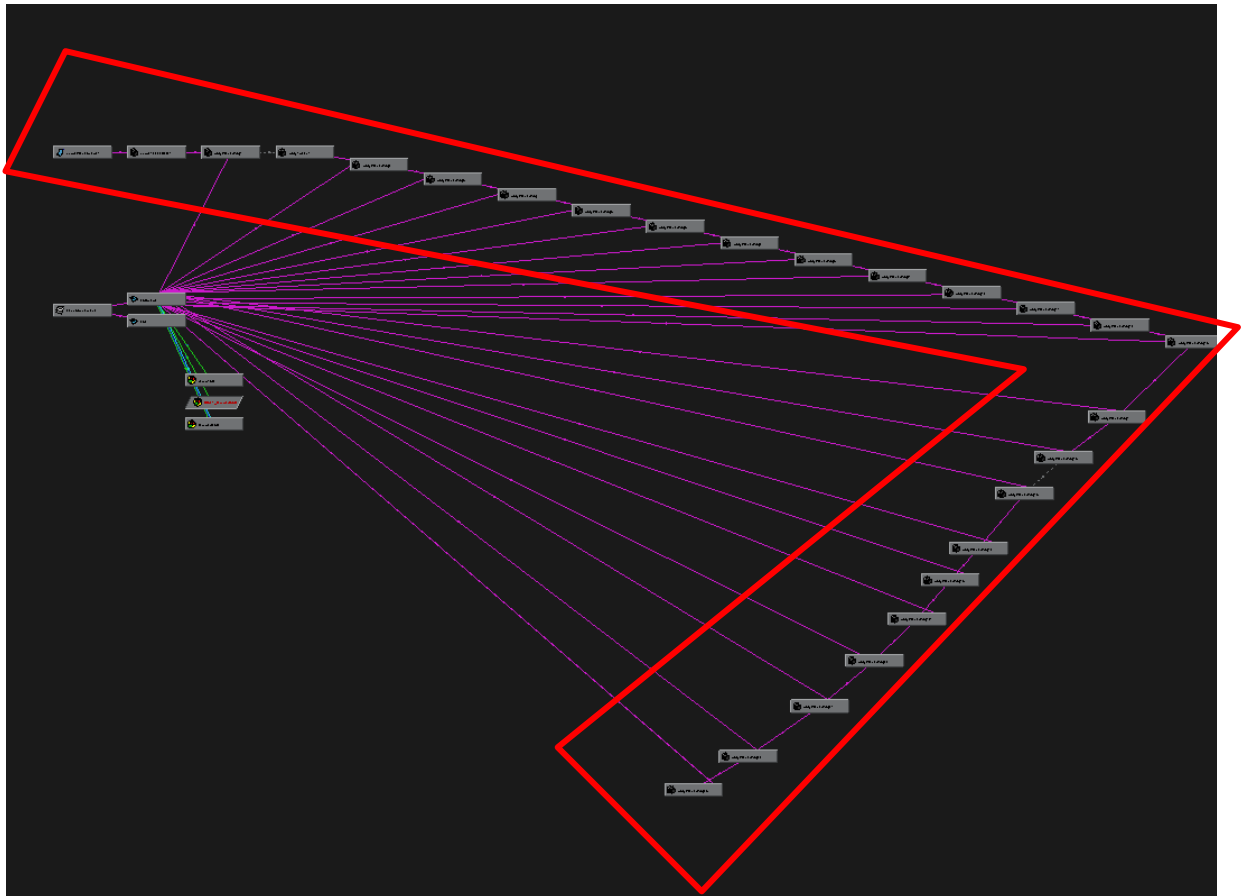
Un seul regret vient entamer ce tableau idyllique : le fait de n'avoir pas été immergé dans un milieu où des spécialistes auraient pu m'apporter leurs « trucs ». Les connaissances viennent donc de recherches sur le net ou d'expérimentations.

Quand au résultat, il me force à rester très modeste et je regarderai désormais d'un autre œil les productions que j'ai qualifiées hier de « moyennes ».



## 7 Annexes

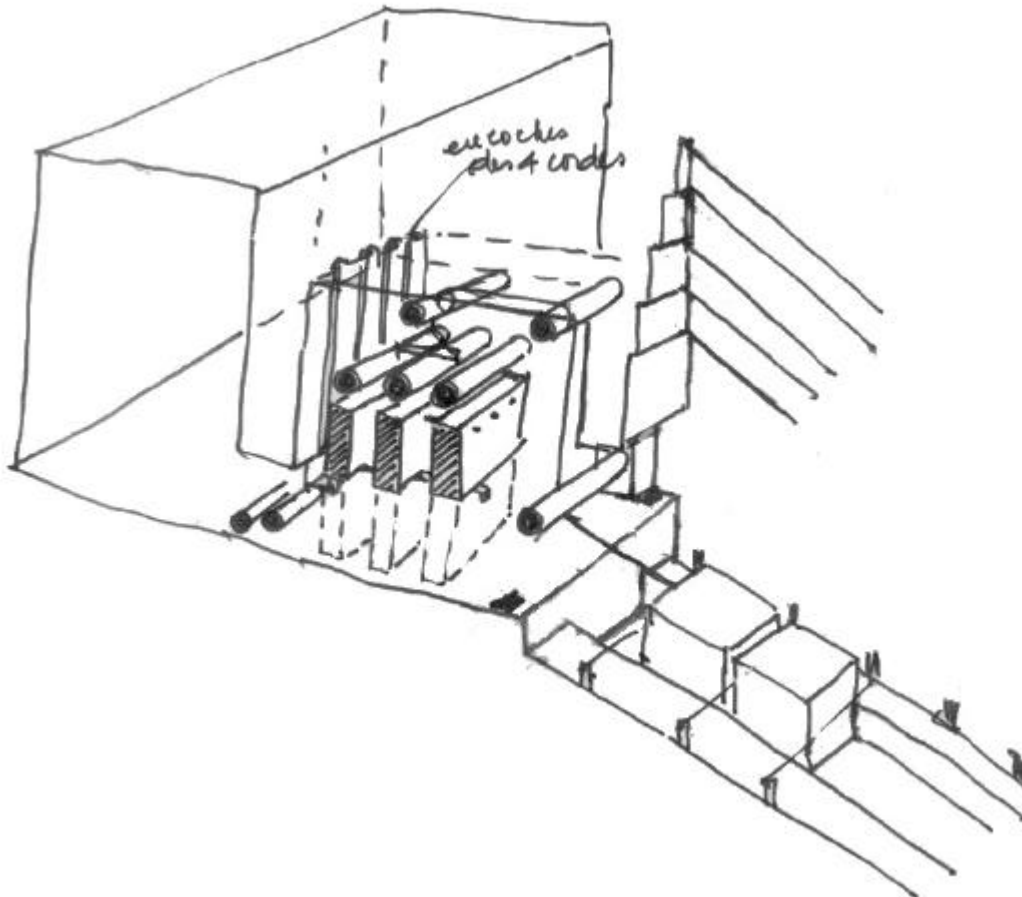
### 7.1 Annexe 1 : Graphe de mapping



Ce mapping décrit un sol sablonneux contenant une carrière de pierres. Chaque rectangle dans la zone rouge décrit un changement de position des textures utilisées. Ainsi, le nombre de manipulations faites pour décrire un environnement très simple s'avère important. Il suffit de projeter ce résultat sur des objets plus complexes comme la Grande Galerie pour entrevoir l'énormité de la tâche.

## 7.2 Annexe 2 : Schémas de travail (1)

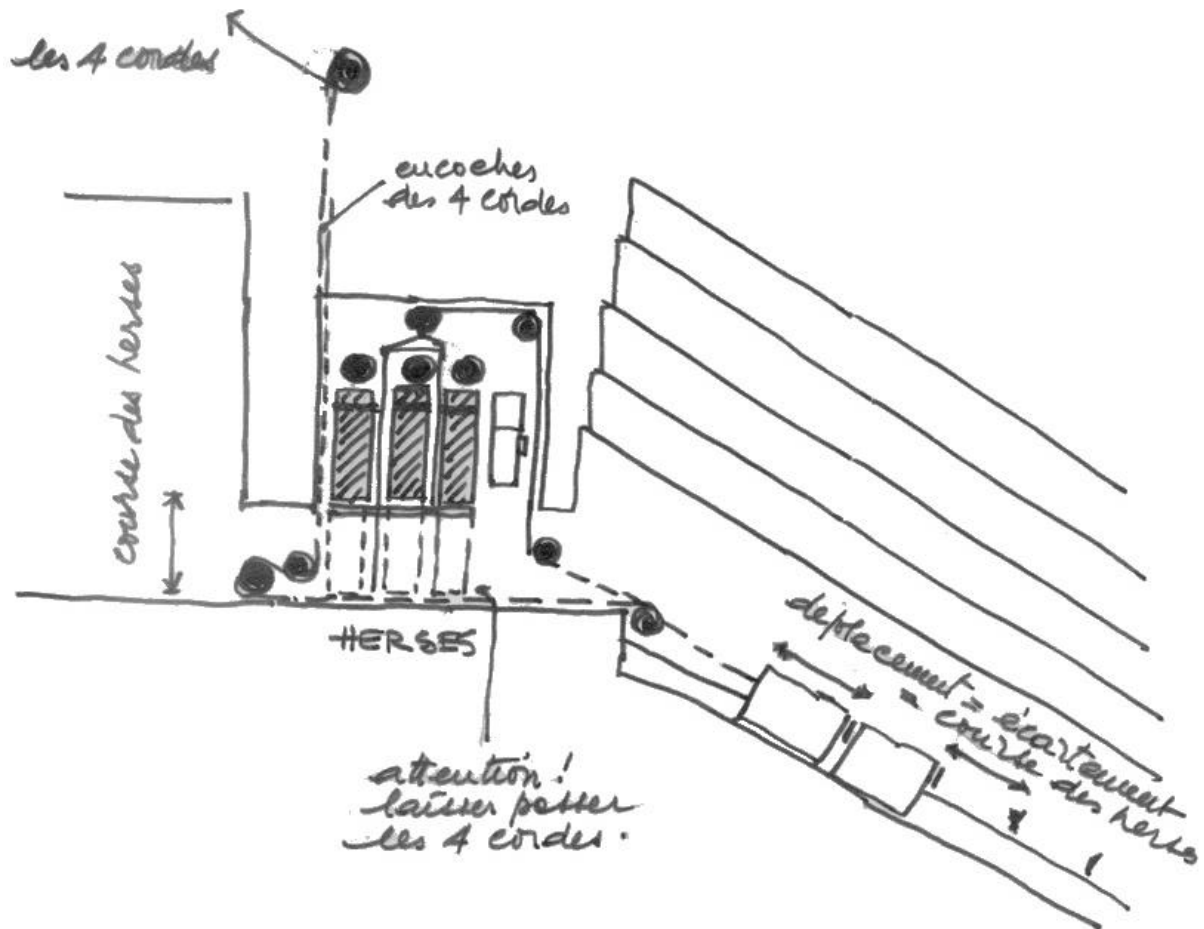
De nombreux schémas ou croquis ont été produits pour expliquer les étapes de construction ou certains mécanismes particuliers. Ils sont la source de référence pour le travail de reconstruction 3D effectué.



Ce schéma présente une vue de biais de l'antichambre placée entre la Grande Galerie et la chambre du Roi. Ce dessin de travail indique la position des structures et le principe de la remontée des blocs de la grande galerie.

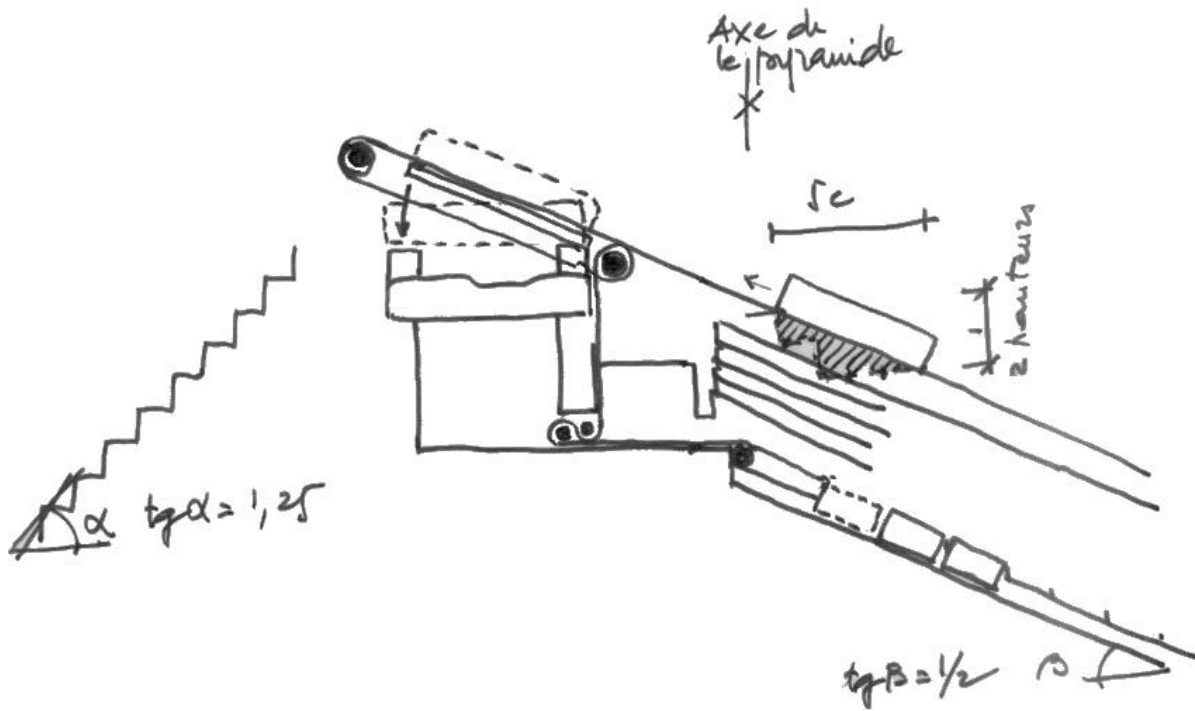


### 7.3 Annexe 3 : Schémas de travail (2)

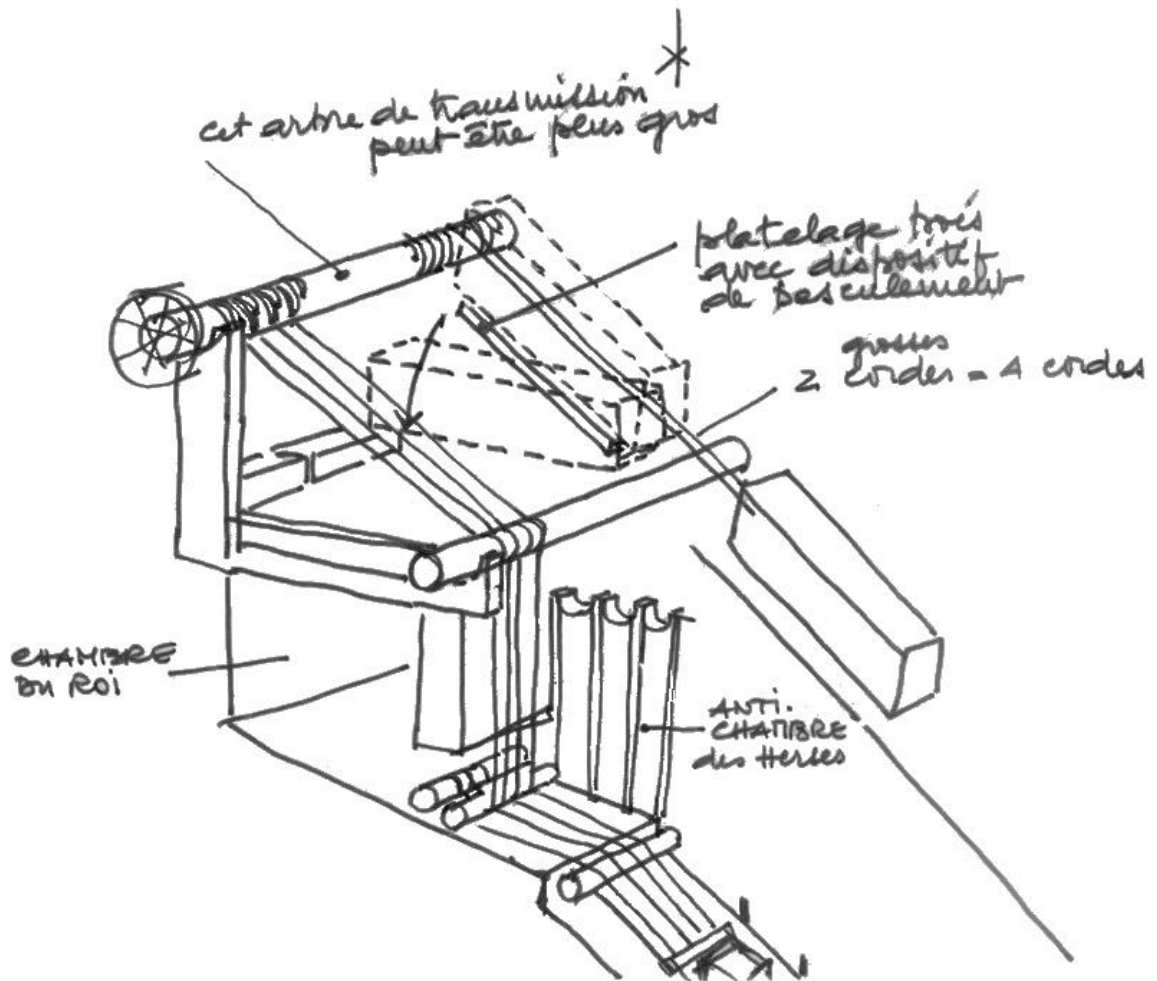


Cette coupe de la pyramide amène son lot d'informations. Le mécanisme des cordes est particulièrement mis en évidence ici.

### 7.4 Annexe 4 : Schémas de travail (3)



## 7.5 Annexe 5 : Schémas de travail (4)



## 7.6 Annexe 6 : Script de construction d'une pyramide

Ce script est présenté en annexes uniquement à des fins de reprise du travail effectué et n'apporte rien à la lecture de ce mémoire.

```
global proc pyra(int $nbTours, int $frequence)
{
  // $nbTours: nombre de tours de pose à effectuer (correspond au nombre de bloc par face
total à poser)
  // $frequence: fréquence d'apparition des blocs pendant l'animation (exprimé en frame)
  // mettre la fréquence à 0 pour annuler le mode animation

  // constantes d'initialisation
  float $LargeurBloc=1.05;
  float $LongueurBloc=1.575;
  float $HauteurBloc=0.656;
  float $BlocDemi=$LargeurBloc/2; // largeur d'un demi bloc
  float $BlocTiers=$LongueurBloc/3; // tiers de la longueur d'un bloc

  int $temps=$frequence; // initialisation pour placer la première clé d'animation

  int $nbBlocAPoserParFace=1;
  int $nbBlocPosesParFace=0;

  int $nbBlocParEnveloppe=5; // utiliser pour créer les différentes enveloppes de pyramide
  int $nbEnveloppe=0; // détermine le numéro de l'enveloppe en cours de développement

  // creation de la base de la pyramide
  polyCube -w $LargeurBloc -h $HauteurBloc -d $LongueurBloc -sx 2 -sy 1 -sz 3 -ax 0 1 0 -tx 1
-ch 1;
  rotate -r -os 0 90 0;
  move -r -0.525 ($HauteurBloc/2) 0.788;

  polyCube -w $LargeurBloc -h $HauteurBloc -d $LongueurBloc -sx 2 -sy 1 -sz 3 -ax 0 1 0 -tx 1
-ch 1;
  move -r 0.787 ($HauteurBloc/2) 0.525;

  polyCube -w $LargeurBloc -h $HauteurBloc -d $LongueurBloc -sx 2 -sy 1 -sz 3 -ax 0 1 0 -tx 1
-ch 1;
  rotate -r -os 0 90 0;
  move -r 0.525 ($HauteurBloc/2) -0.787;

  polyCube -w $LargeurBloc -h $HauteurBloc -d $LongueurBloc -sx 2 -sy 1 -sz 3 -ax 0 1 0 -tx 1
-ch 1;
  move -r -0.788 ($HauteurBloc/2) -0.525;

  for ($i=0;$i < $nbTours;$i++)
  {
    // creation du nom des blocs de ce tour
    string $nom = "Bloc_" + $i;

    // CAS DU BLOC N°1 ////////////////////////////////////////
    string $nomCube = $nom + "_A";
    // creation du premier cube
    polyCube -w $LargeurBloc -h $HauteurBloc -d $LongueurBloc -sx 2 -sy 1 -sz 3 -ax 0 1 0 -
tx 1 -ch 1 -n $nomCube;
    // placement du bloc
    move -r (-0.788+($nbBlocAPoserParFace-1)*$LargeurBloc)-($nbBlocPosesParFace*$BlocDemi)-
($nbEnveloppe*$LongueurBloc) (($HauteurBloc/2)+($nbBlocPosesParFace*$HauteurBloc)) (2.1-
($BlocTiers*$nbBlocPosesParFace)+($nbEnveloppe*$LongueurBloc));

    // animation des blocs dans le temps
    // le bloc est visible par défaut: on met une clé pour qu'il le devienne à la frame
$temps
    setKeyframe -t $temps -at visibility $nomCube;

    // creation de l'état initial de visibilité: le bloc doit être invisible dès le début
    string $attribut = $nomCube + ".visibility" ;
```



```

setAttr $attribut off;
setKeyframe -t 0 -at visibility $nomCube;

// incrémentation du temps pour suivre la fréquence spécifiée
$timeps+=$frequence;

// CAS DU BLOC N°2 //////////////////////////////////////
$nomCube = $nom + "_B";
// creation du deuxieme cube
polyCube -w $LargeurBloc -h $HauteurBloc -d $LongueurBloc -sx 2 -sy 1 -sz 3 -ax 0 1 0 -
tx 1 -ch 1 -n $nomCube;
// rotation du bloc
rotate -r -os 0 90 0;
// placement du bloc
move -r (2.1-($BlocTiers*$nbBlocPosesParFace)+($nbEnveloppe*$LongueurBloc))
(($HauteurBloc/2)+($nbBlocPosesParFace*$HauteurBloc)) (0.788-(( $nbBlocAPoserParFace-
1)*$LargeurBloc)+($nbBlocPosesParFace*$BlocDemi)+($nbEnveloppe*$LongueurBloc));

// animation des blocs dans le temps
// le bloc est visible par défaut: on met une clé pour qu'il le devienne à la frame
$timeps
setKeyframe -t $timeps -at visibility $nomCube;

// creation de l'état initial de visibilité: le bloc doit être invisible dès le début
$attribut = $nomCube + ".visibility" ;
setAttr $attribut off;
setKeyframe -t 0 -at visibility $nomCube;

// incrémentation du temps pour suivre la fréquence spécifiée
$timeps+=$frequence;

// CAS DU BLOC N°3 //////////////////////////////////////
$nomCube = $nom + "_C";
// creation du troisieme cube
polyCube -w $LargeurBloc -h $HauteurBloc -d $LongueurBloc -sx 2 -sy 1 -sz 3 -ax 0 1 0 -
tx 1 -ch 1 -n $nomCube;
// placement du bloc
move -r (0.788-(( $nbBlocAPoserParFace-
1)*$LargeurBloc)+($nbBlocPosesParFace*$BlocDemi)+($nbEnveloppe*$LongueurBloc))
(($HauteurBloc/2)+($nbBlocPosesParFace*$HauteurBloc)) (-2.1+($BlocTiers*$nbBlocPosesParFace)-
($nbEnveloppe*$LongueurBloc));

// animation des blocs dans le temps
// le bloc est visible par défaut: on met une clé pour qu'il le devienne à la frame
$timeps
setKeyframe -t $timeps -at visibility $nomCube;

// creation de l'état initial de visibilité: le bloc doit être invisible dès le début
$attribut = $nomCube + ".visibility" ;
setAttr $attribut off;
setKeyframe -t 0 -at visibility $nomCube;

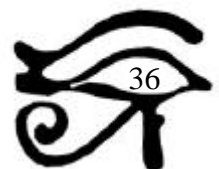
// incrémentation du temps pour suivre la fréquence spécifiée
$timeps+=$frequence;

// CAS DU BLOC N°4 //////////////////////////////////////
$nomCube = $nom + "_D";
// creation du quatrieme cube
polyCube -w $LargeurBloc -h $HauteurBloc -d $LongueurBloc -sx 2 -sy 1 -sz 3 -ax 0 1 0 -
tx 1 -ch 1 -n $nomCube;
// rotation du bloc
rotate -r -os 0 90 0;
// placement du bloc
move -r (-2.1+($BlocTiers*$nbBlocPosesParFace)-($nbEnveloppe*$LongueurBloc))
(($HauteurBloc/2)+($nbBlocPosesParFace*$HauteurBloc)) (-0.788+(( $nbBlocAPoserParFace-
1)*$LargeurBloc)-($nbBlocPosesParFace*$BlocDemi)-($nbEnveloppe*$LongueurBloc));

// animation des blocs dans le temps
// le bloc est visible par défaut: on met une clé pour qu'il le devienne à la frame
$timeps
setKeyframe -t $timeps -at visibility $nomCube;

// creation de l'état initial de visibilité: le bloc doit être invisible dès le début

```



```

$attribut = $nomCube + ".visibility" ;
setAttr $attribut off;
setKeyframe -t 0 -at visibility $nomCube;

// incrémentation du temps pour suivre la fréquence spécifiée
$temps+=$frequence;

// DANS TOUS LES CAS //////////////////////////////////////
// le nombre de blocs posés par face augmente
$nbBlocPosesParFace++;

// a-t-on posé tous les blocs devant être posés pour chaque face?
if($nbBlocPosesParFace>=$nbBlocAposerParFace)
{
    $nbBlocAposerParFace++; // il faut de plus en plus de bloc pour creer la pyramide
    $nbBlocPosesParFace=0;
}

// a-t-on fini de construire une enveloppe?
if($nbBlocAposerParFace>=$nbBlocParEnveloppe)
{
    $nbBlocParEnveloppe+=3; // trois blocs de base de plus pour la nouvelle enveloppe
    $nbEnveloppe++;
    $nbBlocAposerParFace=1;
}
}
}

```

## 8 Bibliographie

Système constructif des pyramides (1987) – Pierre Crozat

ISBN 2-88382-065-1

Le principe de la pyramide Egyptienne (1981) – Eric Guerrier

ISBN 2-221-00612-7

Le secret des bâtisseurs des grandes pyramides (1977) – Georges Goyon

ISBN 2-85704-003-2



## 9 Webographie

[www.alias.com](http://www.alias.com)

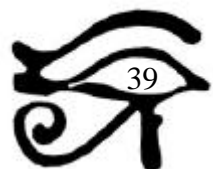
Site de la société conceptrice du logiciel de modélisation 3D « Maya » utilisé dans la conception des structures 3D, des matériaux et le rendu des images de ce projet.

[www.highend3d.com](http://www.highend3d.com)

Ressources concernant les logiciels 3D, en particulier les forums d'entraides aux utilisateurs de Maya, souvent utilisé dans la recherche d'informations.

[www.3dlinks.com](http://www.3dlinks.com)

De même que le site précédent, ce site a été souvent utilisé dans la recherche d'informations.





## Table des illustrations

FIGURE 1: VUE AERIENNE DU PLATEAU DE GIZET .....	4
FIGURE 2: RAMPE DEVANT UNE FACE.....	5
FIGURE 3: RAMPE SUR L'ENSEMBLE DE LA PYRAMIDE.....	5
FIGURE 4: ELEVATEUR DE L. CROON.....	6
FIGURE 5: VUE EN COUPE DE LA GRANDE GALERIE.....	10
FIGURE 6 : GRANDE GALERIE.....	11
FIGURE 7 : PRINCIPE DE DEPLACEMENT D'UN BLOC (VUE DE DESSUS) - PHASE 1 .....	12
FIGURE 8 : UTILISATION DES DONNEES FOURNIES POUR DEPLACER UN BLOC.....	13
FIGURE 9 : PRINCIPE DE DEPLACEMENT D'UN BLOC (VUE DE DESSUS) - PHASE 2 .....	14
FIGURE 10 : PRINCIPE DU CONTREPOIDS (VUE DE PROFIL).....	15
FIGURE 11 : PRINCIPE DU CONTREPOIDS (VUE DE DESSUS).....	16
FIGURE 12 : SYSTEME D'ENROULEMENT DES CORDES PROPOSE.....	17