



HAL
open science

Les automates dans l'antiquité: sources, fonctions et restitution virtuelle

Jérôme Nicolle

► **To cite this version:**

Jérôme Nicolle. Les automates dans l'antiquité: sources, fonctions et restitution virtuelle. Linguistique. Normandie Université, 2020. Français. NNT : 2020NORMC009 . tel-02997617

HAL Id: tel-02997617

<https://theses.hal.science/tel-02997617>

Submitted on 10 Nov 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Normandie Université

THÈSE

Pour obtenir le diplôme de doctorat
Spécialité LANGUES ET LITTÉRATURES ANCIENNES
Préparée au sein de l'Université de Caen Normandie

Les automates dans l'antiquité : sources, fonctions et restitution virtuelle

Présentée et soutenue par
Jerome NICOLLE

Thèse soutenue publiquement le 15/09/2020
devant le jury composé de

Mme MARIE-THERESE CAM	Professeur des universités, Université de Bretagne Occidentale	Rapporteur du jury
M. GUILLAUME MOREAU	Professeur des universités, École Centrale de Nantes	Rapporteur du jury
M. SIMON RICHIR	Professeur des universités, ENSAM CER Angers	Président du jury
M. PHILIPPE FLEURY	Professeur des universités, Université Caen Normandie	Directeur de thèse
M. OLIVIER LEZORAY	Professeur des universités, Université Caen Normandie	Co-directeur de thèse

Thèse dirigée par PHILIPPE FLEURY et OLIVIER LEZORAY, Equipe de recherche sur les littératures, les imaginaires et les sociétés (Caen)



UNIVERSITÉ
CAEN
NORMANDIE



ERLIS

« En effet, si chaque instrument pouvait, par ordre ou par pressentiment, accomplir son œuvre propre, si, pareilles aux statues légendaires de Dédale ou aux trépieds d'Héphaïstos, qui, au dire du poète, pouvaient d'eux-mêmes entrer dans l'assemblée des dieux, les navettes tissaient d'elles mêmes et les plectres jouaient de la cithare, alors les maîtres d'œuvre n'auraient nul besoin de manœuvres ni les maîtres, d'esclaves »¹.

1. Aristote, *Politique* 1, 4, 3, texte établi et traduit par J. Aubonnet, Paris, Les Belles Lettres, 1960.

Résumé : Les Grecs et les Romains ont développé et décrit un grand nombre d'automates utilisant des systèmes d'écoulement d'eau, la compressibilité de l'air, la force de la vapeur, des systèmes de contrepoids etc. Cependant, la plupart des traités techniques portant sur ce sujet ont aujourd'hui disparu, seuls ceux de Philon de Byzance et d'Héron d'Alexandrie nous sont parvenus. Les travaux de cette thèse pluridisciplinaire s'intéressent, dans un premier temps, à l'analyse des sources anciennes pour restituer virtuellement quelques automates antiques couvrant une période allant du III^e siècle avant J.-C. au I^{er} siècle après J.-C. Les restitutions virtuelles permettent de comprendre le fonctionnement d'un mécanisme et d'étudier différentes hypothèses. Dans un second temps, cette recherche s'intéresse à la reconnaissance de geste comme outil d'interaction. La construction d'une application immersive interactive permet à l'utilisateur d'interagir virtuellement avec les automates de l'Antiquité. Les résultats de cette recherche (hypothèses de restitutions et documentations scientifiques) sont partagées à travers l'application *Roma in tabula* disponible gratuitement.

Mots-clés : Automates, Antiquité, Rome, Grèce, Égypte, Alexandrie, Mécaniciens, Machines, Mécanisme, Histoire des Automates, Mythologie, Musée d'Alexandrie, Ktésibios, Philon de Byzance, Héron d'Alexandrie, Pneumatiques, Mécanique des fluides, Restitution Virtuelle, Reconnaissance de gestes, Interaction, Réalité Virtuelle, Immersion, *Roma in tabula*.

Abstract : Greeks and Romans developed and described a large number of automata using water flow systems, air compressibility, steam force, counterweight systems etc. However, most of the technical treatises on this topic are now gone, only those of Philo of Byzantium and Heron of Alexandria have survived. The work of this pluridisciplinary thesis focuses, firstly, on the analysis of ancient sources to virtually restore some ancient automata covering a period from the 3rd century BC to the 1st century AD. Virtual restitutions make it possible to understand how a mechanism works and to study different hypotheses. In a second step, this research focuses on gesture recognition as an interaction tool. The construction of an interactive immersive application allows the user to interact virtually with automatons of Antiquity. The results of this research (rendering hypotheses and scientific documentation) are shared through the freely available application *Roma in tabula*.

Keywords : Automata, Antiquity, Rome, Greece, Égypt, Alexandria, Mechanics, Machinery, Méchanism, Automata history, Mythology, Alexandria Museum, Ktésibios, Philo of Byzantium, Héro of Alexandria, Pneumatic, Fluids mechanics, Virtual Restitution, Gesture Recognition, Interaction, Virtual Reality, Immersion, *Roma in tabula*.

Remerciements

Je tiens à remercier toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de cette thèse et qui m'ont aidé lors de l'élaboration et de la rédaction de ce manuscrit.

Je tiens à remercier en premier lieu, Philippe Fleury, mon Directeur de thèse, pour m'avoir proposé ce sujet et m'avoir fait confiance tout au long de ces trois années. Son accueil chaleureux m'a vite permis de m'intégrer au sein de l'équipe du CIREVE. Outre l'accompagnement et les conseils qu'il m'a prodigués tout au long de la thèse, je le remercie également pour toutes les missions annexes qu'il m'a confiées et qui ont permis de me construire intellectuellement.

Merci à Olivier Lezoray, d'avoir pris en charge la codirection de la thèse du côté informatique. Ses conseils et sa vision des algorithmes mathématiques m'ont permis d'acquérir des connaissances en apprentissage automatique, connaissances qui m'étaient alors inconnues.

Je voudrais aussi remercier les deux infographistes du CIREVE, Charlie Morineau et Axel Tillier, qui ont su m'apporter l'aide nécessaire pour la modélisation 3D lorsque j'en avais besoin. Un grand merci est à apporter à Nicolas Lefèvre, informaticien et développeur, pour son aide constante lors du développement et du débogage de mes applications. Grâce à lui des dizaines d'heures ont pu être économisées.

Je remercie également Noémie Gautier, ancienne membre du CIREVE, pour m'avoir prodigué bon nombre de conseils tout au long de ma thèse. J'exprime aussi ma reconnaissance envers Karim Sammour, ingénieur d'études, pour tous ces conseils et ses astuces lors de la rédaction de ce manuscrit.

Je remercie chaleureusement Sophie Madeleine, ingénieur de recherche et codirectrice du CIREVE, pour son soutien énergique, pour ses enrichissants conseils qui me permettent de grandir encore un peu plus et pour l'intérêt professionnel qu'elle me porte.

Je remercie également les membres du jury, Simon Richir, Guillaume Moreau et Marie-Thérèse Cam qui usent de leur temps pour examiner mes travaux de thèse. J'attends avec impatience leur avis et leurs critiques pour enrichir mes recherches.

Une dernière reconnaissance est à donner à ceux qui m'ont soutenu, et plus particulièrement ma famille, pour qui ces travaux de thèse comptent beaucoup. En deux mots, je vous dis à tous : mille mercis.

Table des matières

Résumé / Abstract	5
Remerciements	7
Table des matières	9
Table des figures	19
Liste des tableaux	29
Liste des abréviations	31
Introduction	33
Définition du sujet	33
Problématiques	35
Les automates de l'Antiquité	35
La restitution et l'interaction virtuelle	36
Roma in tabula	37
Plan de la thèse	37
I Les automates antiques, des machines pour démontrer et surprendre	39
1 La mécanique ancienne et ses ingénieurs	41
1.1 Les principes de la mécanique ancienne	41
1.1.1 Définition et principes de base	41
1.1.2 La « pneumatique », un genre de la mécanique ancienne	43
1.2 Les automates antiques	46

1.2.1	Étymologie	46
1.2.1.1	Automate	46
1.2.1.2	Thaumaturgie	46
1.2.2	Alexandrie et son Museion : un lieu propice aux innovations techniques et scientifiques	47
1.2.2.1	La fondation d'Alexandrie	47
1.2.2.2	Le Museion, le plus grand centre intellectuel du monde hellénistique	48
1.2.2.3	La Bibliothèque d'Alexandrie	50
1.2.3	La classification des automates chez les Anciens	53
1.3	Les différents thaumaturges et ingénieurs de l'antiquité	54
1.3.1	Introduction	54
1.3.2	Archytas de Tarente - 400 avant J.-C.	54
1.3.3	Ctésibios - 250 avant J.-C.	55
1.3.4	Philon de Byzance - 250 avant J.-C.	57
1.3.5	Archimède - 287-212 avant J.-C.	59
1.3.6	Vitruve - I ^{er} siècle avant J.-C.	61
1.3.7	Héron d'Alexandrie - I ^{er} siècle après J.-C.	61
2	Les sources	67
2.1	Introduction	67
2.2	Les récits mythologiques	67
2.2.1	Les automates dans la littérature mythologique grecque	68
2.2.1.1	Les trépieds d'Héphaïstos	68
2.2.1.2	Les portes animées de l'Olympe	69
2.2.1.3	Les deux chiens gardiens du palais d'Alkinoos	70
2.2.1.4	Les deux servantes, faites d'or, qui assistaient Héphaïstos	70
2.2.1.5	Les soufflets de forge d'Héphaïstos	70
2.2.1.6	Pandore	71
2.2.1.7	Talos, le géant de bronze	72
2.2.1.8	Les taureaux donnés à Aïètès	72
2.2.1.9	Le chien destiné à Zeus	73
2.2.1.10	Les musiciennes en or du temple d'Apollon	73

2.2.1.11	Les chevaux forgés pour le char des Cabires	73
2.2.2	Les automates dans la littérature mythologique latine	74
2.2.2.1	L'aigle fabriqué pour Jupiter [Zeus]	74
2.2.2.2	Pygmalion et Galatée	74
2.3	Les traités techniques de l'antiquité contenant des descriptions d'automates	75
2.3.1	Introduction	75
2.3.2	Les <i>Pneumatiques</i>	76
2.3.2.1	Les <i>Pneumatiques</i> de Philon de Byzance	79
2.3.2.2	Les <i>Pneumatiques</i> d'Héron d'Alexandrie	79
2.3.3	Les <i>Automata</i> d'Héron d'Alexandrie	79
2.3.3.1	Introduction	79
2.3.3.2	Modèle de théâtre automatique à base « mobile »	81
2.3.3.3	Modèle de théâtre automatique à base « fixe »	82
2.3.4	Le <i>De architectura</i> de Vitruve	83
2.4	Les automates tardifs de l'empire byzantin	84
2.4.1	Le <i>traité des automates</i> de l'Arabe Al-Djazari	84
2.5	Les autres sources	85
2.5.1	Les sources iconographiques	85
2.5.2	Les sources archéologiques	85
2.6	Conclusion	86
3	Contextualisation et restitution virtuelle : quelques exemples	87
3.1	Introduction	87
3.2	Héraclès et Ladon	88
3.2.1	Source textuelle	88
3.2.2	Hypothèse de restitution	91
3.2.2.1	Héraclès tirant à l'arc	91
3.2.2.2	Ladon, gardien du jardin des Hespérides	92
3.2.2.3	Mécanisme interne de l'automate	93
3.2.3	Mise en contexte de l'automate	97
3.3	La servante automatique distribuant l'eau et le vin	99
3.3.1	Source textuelle	99
3.3.2	Hypothèse de restitution	101

3.3.2.1	Le corps de la servante automatique	101
3.3.2.2	Le mécanisme interne de l'automate	103
3.3.2.3	Intégration du mécanisme dans le corps de la servante	106
3.3.3	Mise en contexte de l'automate	107
3.4	La chouette et les oiseaux chanteurs	109
3.4.1	Source textuelle	109
3.4.2	Hypothèse de restitution	110
3.4.2.1	Restitution des oiseaux chanteurs	110
3.4.2.2	Restitution de la chouette	110
3.4.2.3	Modélisation de l'automate	112
3.4.2.4	Restitution du mécanisme interne	113
3.4.3	Mise en contexte de l'automate	117
3.5	Les portes automatiques d'un temple miniature	118
3.5.1	Source textuelle	118
3.5.2	Hypothèse de restitution	119
3.5.2.1	Restitution du temple	119
3.5.2.2	Restitution du mécanisme interne	121
3.5.3	Mise en contexte de l'automate	124
3.6	Le théâtre automatique mobile	126
3.6.1	Source textuelle	126
3.6.2	Hypothèse de restitution	128
3.6.2.1	Bacchus et sa panthère	129
3.6.2.2	Niké, déesse personnifiant la Victoire	130
3.6.2.3	Les Bacchantes	132
3.6.2.4	Modélisation de l'automate	133
3.6.2.5	Restitution du mécanisme interne	137
3.6.3	Mise en contexte de l'automate	144
4	Conclusion	145

II	La reconnaissance de gestes : un outil indispensable à l'interaction et l'immersion virtuelle	147
1	Introduction à la reconnaissance de geste : une méthode basée sur l'apprentissage	149
1.1	Introduction	149
1.2	Le <i>Machine Learning</i> (apprentissage automatique)	149
1.2.1	Concepts et algorithmes	149
1.2.1.1	Définition	149
1.2.1.2	Quelques algorithmes utilisés pour apprendre un modèle	151
1.2.2	Le <i>Deep Learning</i> (Apprentissage profond)	152
1.2.2.1	Définition	152
1.2.2.2	Réseaux de neurones convolutifs (CNN)	153
2	Un axe de recherche fortement étudié	155
2.1	Introduction	155
2.1.1	Définition	155
2.1.2	Algorithmes	156
2.2	Problématique recherchée	156
2.3	État de l'art	157
2.3.1	Handcrafted features & Machine Learning	157
2.3.2	Les méthodes basées sur le Deep Learning	159
2.3.3	Les Périphériques utilisés pour l'acquisition des gestes de l'utilisateur	161
2.3.3.1	La Kinect de Microsoft	161
2.3.3.2	Le Leap Motion	163
2.3.3.3	La Webcam Senz3D, équipée de la technologie Intel RealSense	164
2.3.3.4	Les gants de données	164
	Utilisation seule	165
	Utilisation au sein d'une combinaison de capture de mouvements	165
2.3.4	Récapitulatif des différentes méthodes utilisées pour l'acquisition et la reconnaissance des gestes de la main	166

2.4	Méthode retenue	166
2.4.1	Dynamic Hand Gesture Dataset 14-28 Gestures	167
2.4.2	Le CNN à branches parallèles de G. Devineau	168
2.4.2.1	Description de la méthode	168
2.4.2.2	Résultats	170
3	Développement d'une méthode permettant d'interagir virtuellement avec les automates antiques	173
3.1	Intégration du modèle dans une application immersive interactive	173
3.1.1	Introduction	173
3.1.2	Choix du matériel immersif	173
3.1.2.1	L'adoption d'une solution portable	173
3.1.2.2	Le casque immersif Oculus Rift	174
3.1.2.3	Le casque immersif HTC Vive Pro	176
3.1.2.4	Comparatif et conclusion	176
3.1.3	Choix du matériel interactif	177
3.1.3.1	L'acquisition par capteurs infrarouges	178
3.1.3.2	La combinaison Perception Neuron	179
3.1.3.3	Comparatif et conclusion	180
3.1.4	L'application immersive interactive	180
3.1.4.1	Le choix du moteur 3D	180
3.1.4.2	Construction et squelette de l'application	183
3.1.4.3	Intégration de l'environnement 3D	184
3.1.4.4	Réalisation du scénario d'interaction	185
3.1.4.5	Expérimentation et premiers résultats	186
3.2	Développement de la méthode	187
3.2.1	Un développement inspiré de la méthode G. Devineau	187
3.2.2	L'ajout d'une branche parallèle pour la gestion du doigt	188
3.2.3	Calcul de la Loss et réglages des hyper-paramètres	190
3.2.4	Phase de test sur différentes bases de données	190
3.2.4.1	DHG 14/28 Gesture Dataset	190
3.2.4.2	Interaction Gesture Dataset	190
3.3	Résultats	191

3.3.1	Résultats de la méthode	191
3.3.2	Comparaison détaillée avec la méthode de G. Devineau sur DHG	191
3.3.3	Résultats des méthodes sur IGD	192
4	Conclusion	195
III	<i>Roma in tabula</i> : une application interactive qui permet le partage des recherches avec des publics pluriels	197
1	Un outil de médiation et de partage des recherches	201
1.1	La maquette en plâtre de Paul Bigot, objet de recherche scientifique classé monument historique	201
1.2	L'objectif du Plan de Rome pour le partage des recherches	202
1.2.1	Les visites thématiques de la Rome antique	203
1.2.1.1	Les séances en 3D stéréoscopique	203
1.2.1.2	Les mardis du Plan de Rome	203
1.2.1.3	Les visites hors site	203
1.2.2	Les Nocturnes du Plan de Rome	204
1.3	La naissance de l'application	204
2	Présentation de l'application	205
2.1	Descriptif	205
2.1.1	L'utilisation de la réalité augmentée	205
2.1.2	La visite virtuelle interactive	208
2.2	Liste des monuments disponibles	209
2.2.1	La Curie julienne	210
2.2.2	Le temple de Castor et Pollux	211
2.2.3	La basilique julienne	211
2.2.4	La basilique émilienne	212
2.2.5	La basilique de Constantin	213
2.2.6	Le Mausolée d'Auguste	214
2.2.7	Le Mausolée d'Hadrien	215
2.2.8	Le Forum de la Paix	215

2.2.9	Le Forum de Nerva	217
2.2.10	Le Colisée	217
2.3	Une application soumise à une phase de test	219
3	Le musée virtuel des automates	221
3.1	Présentation	221
3.2	Les machines disponibles	221
3.3	Navigation et interaction	222
3.3.1	Les cartels de présentation	223
3.3.2	Les animations	224
3.3.3	La vision des mécanismes internes	224
4	Conclusion	227
	Conclusion générale	229
	Bibliographie	233
	Textes anciens	233
	Études sur les sciences et techniques de l'Antiquité	234
	Reconnaissance de geste et réalité virtuelle	239
	Annexe	247
A	Corpus littéraire	247
A.1	Traité techniques	247
A.1.1	Jeu miniature : Héraclès et Lâdon	247
A.1.2	L'automate de la chouette et des oiseaux chanteurs	249
A.1.3	Les portes automatiques d'un temple miniature	251
A.1.4	La servante automatique distribuant l'eau et le vin	253
A.1.5	Le théâtre automatique à base mobile	256
B	Iconographie	277
B.1	Héraclès et Ladon - Jardin des Hespérides	277

B.2	Servante automatique	290
B.3	Temple miniature	293
B.4	La chouette et les oiseaux chanteurs	295
B.5	Théâtre automatique à base mobile	302
C	Roma in tabula	305
C.1	Installation et téléchargement de l'application	305
C.2	Comment utiliser l'application	306
C.3	<i>Roma in tabula</i> : Rapport de stage de Master 2	307

Table des figures

1	Plan de l'ancienne Alexandrie, d'après M. El-Abbadi, <i>Vie et destin de la bibliothèque d'Alexandrie</i> , Paris, UNESCO, 1992.	49
2	Portrait de Démétrios de Phalère, Kunsthistorisches Museum, Vienne, Autriche (Cliché M. Martin - 2007).	51
3	Archytas de Tarente. Buste provenant de la villa des Papyrus d'Herculanum, aujourd'hui au Musée national archéologique de Naples (Cliché M.L. Nguyen - 2011).	55
4	Gravure sur bois représentant Ctésibios d'Alexandrie et son père, œuvre de G. Rivius, Nuremberg, 1547 (Cliché World History Archive - 2012).	56
5	Schéma explicatif de la pompe de Ctésibios selon Vitruve (Réalisation N. Lefèvre, S. Madeleine et Ph. Fleury - 2005).	57
6	Restitution de l'orgue hydraulique d'après Vitruve et les différentes données archéologiques et iconographiques (Restitution C. Morineau et Ph. Fleury - 2016).	58
7	Les <i>Pneumatiques</i> de Philon. Fragment du manuscrit latin CLM 534 du XIV ^e siècle. Bayerische Staatsbibliothek, Munich, Allemagne (Cliché F.D. Prager - 1974).	59
8	Archimède défendant Syracuse, gravure sur cuivre de 1740, œuvre de E.J. Desrochers, Bibliothèque nationale, Paris, 1951 (Cliché BnF).	60
9	Description des divers mécanismes de l'horloge hydraulique d'Archimède d'après Wiedemann et Hauser, <i>Die Uhr des Archimedes</i> , 1918.	62
10	Portrait d'Héron d'Alexandrie, gravure imaginaire du XVII ^e siècle (Cliché O'Connor - 1999).	63
11	Mécanisme d'ouverture des portes automatiques d'un temple miniature d'après W. Schmidt, Leipzig, Teubner, 1903.	64

12	Mécanisme caché des oiseaux chanteurs et de la chouette d'après W. Schmidt, Leipzig, Teubner, 1903.	64
13	Contrepoids moteur du théâtre automatique mobile d'après W. Schmidt, Leipzig, Teubner, 1903.	65
14	Mécanisme d'ouverture des portes du théâtre automatique fixe d'après W. Schmidt, Leipzig, Teubner, 1903.	65
15	Hypothèse de restitution du trépied automatique d'Héphaïstos par K. Kotsanas, Pyrgos, 2015.	69
16	Fragments de manuscrits latins (CLM 534) des <i>Pneumatiques</i> de Philon de Byzance comportant des schémas réalisés lors de copies (Cliché F.D. Prager - 1974).	86
17	Héraclès archer, revers d'un tétradrachme de Thasos, première moitié du IV ^e siècle avant J.-C., Bibliothèque Nationale de France, Paris, France (Cliché G. Haubold - 2009).	91
18	Statue en marbre d'Héraclès barbu, période Flavienne, 68-98 après J.-C., Metropolitan Museum of Art , New-York, États-Unis (Cliché Metropolitan Museum of Art).	92
19	Sculpture en trois dimensions d'Héraclès et de son arc (Réalisation J. Nicolle).	93
20	Restitution virtuelle d'Héraclès et Ladon et du coffrage de l'automate (Réalisation J. Nicolle).	94
21	Proposition de restitution du mécanisme interne du jeu miniature représentant Héraclès au jardin des Hespérides (Réalisation J. Nicolle).	95
22	Restitution virtuelle du mécanisme interne de l'automate (Réalisation J. Nicolle).	97
23	Restitution de l'automate par K. Kotsanas, Pyrgos, 2015 (Cliché K. Kotsanas).	98
24	Restitution virtuelle d'un romain utilisant l'automate (Réalisation A. Tillier et J. Nicolle).	98

25	a) Servante, portant une <i>stola</i> et un <i>pallium</i> , mosaïque de la villa romaine du Casale, Sicile, Italie, IV ^e siècle après J.-C. (cliché Y. Travert). b) Servante, vêtue d'une tunique, travaillant le sol, fresque murale, Pompéi, Italie, I ^{er} siècle après J.-C. (cliché R. Delort).	102
26	Restitution virtuelle de la Servante (Réalisation J. Nicolle).	103
27	Restitution du mécanisme interne de l'automate (Réalisation J. Nicolle).	104
28	Proposition de restitution du mécanisme interne de la Servante automatique de Philon de Byzance (Réalisation J. Nicolle).	105
29	Intégration du mécanisme dans le corps de la servante (Réalisation J. Nicolle).	106
30	a) Schéma explicatif du fonctionnement de l'automate par K. Kotsanas. b) La Servante automatique de K. Kotsanas, Musée des automates, Olympie, Grèce (cliché Ph. Fleury).	107
31	Intégration de l'automate dans le <i>triclinium</i> d'une riche <i>domus</i> (Réalisation J. Nicolle et C. Morineau).	108
32	Représentation d'oiseaux dans l'Antiquité. a) Statuette de pigeon, Provenance : Allier (France), II ^e siècle après J.-C., British Museum, Londres, Royaume-Unis. b) Lampe à huile décorée avec un oiseau sur une branche, Provenance : Chypre, 40-100 après J.-C., British Museum, Londres, Royaume-Uni.	111
33	Modélisation des oiseaux chanteurs (Réalisation J. Nicolle).	111
34	Représentation de la chouette dans l'Antiquité. a) Aryballe en forme de Chouette, Provenance : Corinthe (Grèce), 640 avant J.-C., Musée du Louvre, Paris, France. b) Lampe à huile romaine décorée d'une chouette, Provenance : Italie, 40-80 après J.-C., British Museum, Londres, Royaume-Uni.	112
35	Modélisation 3D de la chouette par photogrammetrie (Réalisation J. Nicolle).	113
36	Modélisation de l'automate de la chouette et des oiseaux chanteurs. (Réalisation J. Nicolle)	113
37	Proposition de restitution du mécanisme interne de l'automate de la chouette et des oiseaux chanteurs d'Héron d'Alexandrie (Réalisation J. Nicolle).	115
38	Hypothèse de restitution du mécanisme interne de l'automate de la chouette et des oiseaux chanteurs (Réalisation J. Nicolle).	116

39	Intégration de l'automate de la Chouette et des oiseaux chanteurs dans la rue d'un quartier résidentiel de Rome (Réalisation J. Nicolle et N. Lefèvre). 117	
40	Différents plans au sol montrant la disposition des colonnades par rapport au corps central suivant la taille des temples romains (Ref. C. Perrault, <i>Les dix livres d'architecture de Vitruve</i> , Paris, J.B. Coignard, 1683).	120
41	Restitution virtuelle d'un temple prostyle miniature (Réalisation J. Nicolle). 120	
42	Proposition de restitution du mécanisme interne du temple miniature d'Héron d'Alexandrie (Réalisation J. Nicolle).	122
43	Restitution virtuelle du mécanisme interne de l'automate (Réalisation J. Nicolle).	123
44	Hypothèse de restitution de l'automate des portes automatiques du temple miniature par K. Kotsanas, Pyrgos, 2015.	125
45	Mise en situation du temple miniature (Réalisation J. Nicolle).	125
46	a) Bacchus sur un guépard, mosaïque dans la « Maison de Dionysos » (2,70m x 2,65m), 330-300 avant J.-C., Pella, Grèce (cliché S. Madeleine). b) Bacchus tenant d'une main le thyrses et tendant de l'autre un canthare, Bas-relief d'Herculanum, Musée de Naples, Italie (cliché Sailko - 2013). .	129
47	Restitution virtuelle de Bacchus et sa panthère (Réalisation J. Nicolle). .	130
48	Pièce en or. Victoire drapée, debout sur un globe, tenant une couronne de fleurs et un vexillum. Provenance : Italie, 29-27 avant J.-C., British Museum, Londres, Royaume-Uni. (collection en ligne : 1864,1128.230) . .	131
49	Restitution virtuelle d'une Victoire (Réalisation C Morineau).	131
50	Mosaïque représentant Bacchus et une bacchante, Maison de Dionysos, Paphos, Chypre (Cliché S. Madeleine).	132
51	Modélisation d'une bacchante (Réalisation J. Nicolle).	133
52	Mise en scène de l'apothéose de Bacchus. Zoom sur la <i>tholos</i> du théâtre automatique (Réalisation J. Nicolle).	134
53	Restitution virtuelle du théâtre automatique à base mobile d'Héron d'Alexandrie (Réalisation J. Nicolle).	136
54	Proposition de restitution du mécanisme interne du théâtre automatique à base mobile d'Héron d'Alexandrie (Réalisation J. Nicolle).	139
55	Restitution de l'essieu moteur avec ses crapaudines (Réalisation J. Nicolle). 140	

56	Vue générale du mécanisme interne du théâtre automatique à base mobile d'Héron d'Alexandrie (Réalisation J. Nicolle).	141
57	Comparaison des différents modèles du théâtre automatique à base mobile d'Héron d'Alexandrie. a) Version virtuelle de J. Nicolle (2019). b) Version virtuelle de I. Ruffell et al. (2016). c) Version physique de K. Kotsanas (2015).	142
58	Restes archéologiques d'un amphithéâtre des « écoles » d'Alexandrie, Egypte. (Cliché S. Madeleine).	144
59	Schéma illustrant les deux phases du processus de Machine Learning (Réalisation J. Nicolle).	150
60	Graphique illustrant la représentation spatiale de la classification d'un algorithme de Machine Learning (Source : https://medium.com).	151
61	Schéma illustrant une architecture de CNN permettant de classifier le type de véhicules présent dans une image (Source : https://medium.com). . .	153
62	Diagramme représentant les différents algorithmes utilisés dans la reconnaissance des gestes (V.I. Pavlovic, « Visual Interpretation of Hand Gestures for Human-Computer Interaction : A Review », in : <i>IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence</i> , 1997, p.681).	156
63	Exemple de données provenant de capteurs RGB-D comme la Kinect 2 de Microsoft : à gauche on trouve une image 2D en couleurs, une image de profondeur au milieu et le squelette 3D à droite (Cliché M. Devanne). . .	159
64	Les différentes versions de la Kinect de Microsoft.	162
65	Capteur Leap Motion	163
66	Capteur SenZ3D composé de la technologie Intel RealSense	164
67	Gant de données 5dt Glove	165
68	Position des 22 joints du squelette de la main pour DHG (Réalisation Q. De Smedt).	167
69	Méthode proposée par G. Devineau utilisant un CNN à branches parallèles. 169	
70	Pierre Denise (Président de l'Université de Caen Normandie) et Leslie Decker (Comète - Université de Caen Normandie) dans le CAVE du CIREVE lors de son inauguration le jeudi 2 mars 2017. Cliché Charlie Morineau .	174

71	Casque de Réalité virtuelle Oculus Rift CV1 disponible au CIREVE - Cliché Jérôme Nicolle.	175
72	Casque de Réalité virtuelle HTC Vive Pro installé dans la Salle immersive du CIREVE - Cliché Jérôme Nicolle.	177
73	a) Disposition de capteurs infrarouges afin d'analyser les mouvements de l'utilisateur - b) Caméra à capteurs infrarouges Vicon B10 - c) Sphères réfléchissantes - Janvier 2017- Clichés Philippe Fleury / Jérôme Nicolle. .	179
74	Position des 32 capteurs de la combinaison Perception Neuron - 2018- Cliché Sophie Madeleine.	181
75	Organisation hiérarchique de l'application interactive.	183
76	Intégration de l'environnement 3D dans l'application.	184
77	Interaction virtuelle de la servante automatique de Philon de Byzance. Utilisation de l'application virtuelle interactive lors d'une présentation des Nocturnes du Plan de Rome le 4 avril 2018.	187
78	Schéma détaillant l'architecture CNN de notre méthode de reconnaissance des gestes. a) Illustration des différents paramètres d'entrée du modèle : les channels C_i pour chaque coordonnées de points et les channels D_i représentant les doigts. b) Vue générale du réseau de neurones. c) Illustration des branches parallèles permettant d'extraire les caractéristiques. (Réalisation J. Nicolle)	189
79	Principe de réplification des coordonnées afin de restituer un squelette de la main à 22 joints, similaire à celui obtenu par le capteur Intel Real Sense (Réalisation J. Nicolle).	192
80	Principe d'interpolation des coordonnées afin de restituer un squelette de la main à 22 joints, similaire à celui obtenu par le capteur Intel Real Sense (Réalisation J. Nicolle).	193
81	Bannière introductive de l'application <i>Roma in tabula</i>	199
82	Présentation de Ph. Fleury devant la maquette de P.Bigot, classée monument historique.	202
83	Réalité augmentée de la Curie julienne	206
84	Double page d'informations du livret de l'application	207

85	Visite virtuelle interactive de la Curie julienne	209
86	Restitution virtuelle de la Curie - CIREVE 2008	210
87	Restitution virtuelle du temple de Castor et Pollux - CIREVE 2011	211
88	Restitution virtuelle de la basilique julienne - CIREVE 2010	212
89	Restitution virtuelle de la basilique émilienne - CIREVE 2010	213
90	Restitution virtuelle de la basilique de Constantin - CIREVE 2012	214
91	Restitution virtuelle du Mausolée d'Auguste - CIREVE 2008	215
92	Restitution virtuelle du Mausolée d'Hadrien - CIREVE 2016	216
93	Restitution virtuelle du Forum de la Paix - CIREVE 2008	216
94	Restitution virtuelle du Forum de Nerva - CIREVE 2007	217
95	Restitution virtuelle du Colisée - CIREVE 2011	218
96	Sas d'entrée avec portes fermées	222
97	Sas d'entrée avec portes ouvertes	223
98	Inscription du nom du musée en grec sur le mur du fond	224
99	Accès aux documentations par l'interaction du cartel de présentation	225
100	Documentation sur la servante automatique de Philon de Byzance	225
101	Interaction pour le lancement de l'animation	226
102	Vision des mécanismes internes de la servante automatique	226
103	Héraclès dans le jardin des Hespérides, Vase peint athénien à figures rouges du V ^e siècle avant J.-C., British Museum, Londres, Royaume-Uni.	277
104	Héraclès dans le jardin des Hespérides, Gros plan du vase peint athénien à figures rouges du V ^e siècle avant J.-C., British Museum, Londres, Royaume- Uni.	278
105	Héraclès et Ladon gardant l'arbre aux pommes dorées, Assiette romaine en relief, II ^e /III ^e siècle après J.-C., Collections des antiquités de l'Etat, Munich, Allemagne (Cliché M. Cyron - 2013).	279
106	Héraclès combattant Ladon dans le jardin des Hespérides, Vase peint at- tique à figures rouges, 460 avant J.-C., British Museum, Londres, Royaume- Uni.	280

107	Ladon le dragon gardien des Hespérides, Amphore peinte athénienne à figures rouges du V ^e siècle avant J.-C., Musée de l'Ermitage, Saint-Petersbourg, Russie (Cliché Theoi).	281
108	Héraclès, Atlas et le Dragon Hespérien, Cratère peint athénien à figures rouges du V ^e siècle avant J.-C., J. Paul Getty Museum, Los Angeles, États-Unis (Cliché Theoi).	282
109	Nymphe Hespéride et dragon Hespérien, Amphore Campanienne à figures rouges du V ^e siècle avant J.-C., British Museum, Londres, Royaume-Uni (Cliché T. Herondale).	283
110	Héraclès, les Hespérides et le Dragon Hespérien, Mosaique Gréco-romaine du III ^e siècle avant J.-C., Musée national d'archéologie d'Espagne, Madrid, Espagne (Cliché Azoor - 2017).	284
111	Atlas et le Dragon Hespérien, Vase peint laconien à figures noires du VI ^e siècle avant J.-C., Musées du Vatican, Vatican, Italie (Cliché Marsyas - 2005).	285
112	Statue en marbre d'Hercules barbu, période Flavienne, 68-98 après J.-C., Metropolitan Museum of Art , New-York, États-Unis (Cliché Metropolitan Museum of Art).	286
113	Héraclès archer, revers d'un tétradrachme de Thasos, première moitié du IV ^e siècle avant J.-C., Bibliothèque Nationale de France, Paris, France (Cliché G. Haubold - 2009).	287
114	Relief d'Héraclès archer, Thasos (ref. B. Holzmann, <i>La sculpture de Thasos. Corpus des reliefs I. Reliefs à thème divin</i> , Paris, 1994).	288
115	Héraclès sur le fronton est du temple d'Aphaia à Égine, Glyptothèque de Munich, Munich, Allemagne (Cliché B. Saint-Pol - 2007).	289
116	Pompéï, Villa des Mystères (<i>Villa dei Misteri</i>) mégalographie (peinture monumentale) du <i>triclinium</i> (salle à manger) I ^{er} siècle après J.-C. (Cliché Y. Forget - 2012).	290
117	Jeune esclave présentant une boîte à bijoux à sa maîtresse assise, stèle funéraire, vers 430/410 avant J.-C., British Museum, Londres, Royaume-Uni (Cliché M.-L. Nguyen - 2006).	291

118	Servante, vêtue d'une tunique, travaillant le sol, fresque murale, Pompéi, Italie, I ^{er} siècle après J.-C. (cliché R. Delort).	292
119	Chapiteau corinthien selon Vitruve. (ref. Vitruve, <i>De l'architecture, Livre IV</i> , texte traduit et commenté par P. Gros, Paris, Les Belles Lettres, 2003, p.86.)	293
120	Proportion des différents types de colonnes selon Vitruve, (ref C. Perrault, <i>Les dix livres d'architecture de Vitruve</i> , Paris, J.B. Coignard, 1683.).	294
121	Aryballe en forme de chouette, Provenance : Corinthe (Grèce), 640 avant J.-C., Musée du Louvre, Paris, France.	295
122	Pièce en argent, Représentation d'une chouette sur le revers, Provenance : Athènes (Grèce), 450-406 avant J.-C., British Museum, Londres, Royaume-Uni.	296
123	Lampe à huile romaine décorée d'une chouette, Provenance : Italie, 40-80 après J.-C., British Museum, Londres, Royaume-Uni.	297
124	Statuette de pigeon, Provenance : Allier (France), II ^e siècle après J.-C., British Museum, Londres, Royaume-Uni.	298
125	Lampe à huile décorée avec un oiseau sur une branche, Provenance : Chypre, 40 après J.-C., British Museum, Londres, Royaume-Uni.	299
126	Statuette en bronze d'une oie installée sur une fontaine, Provenance : Constantinople, IV ^e siècle après J.-C., British Museum, Londres, Royaume-Uni.	300
127	Poterie athénienne à figures rouges représentant une chouette, Provenance : Attique (Grèce), 475 avant J.-C., British Museum, Royaume-Uni.	301
128	Dionysos sur un guépard, mosaïque dans la « Maison de Dionysos » (2,70m x 2,65m), 330-300 avant J.-C., Pella, Grèce. (Cliché S. Madeleine).	302
129	Dionysos tenant d'une main le thyrsos et tendant de l'autre un canthare, Bas-relief d'Herculanum, Musée de Naples, Naples, Italie (cliché Sailko - 2013).	303
130	Pièce en or. (Face) Tête d'Octave de profil. (Revers) Victoire drapée, debout sur un globe, tenant une couronne de fleurs et un vexillum, Provenance : Italie, 29-27 avant J.-C., British Museum, Londres, Royaume-Uni.	304

131	Niké phainoméride (« à la belle cuisse »), Statue d'argile, Provenance : Nécropole de Myrina (Turquie), 175-125 avant J.-C., Musée du Louvres, Paris, France.	304
132	Commandes de navigation au sein de l'application <i>Roma in tabula</i> sur ordinateur.	306

Les images, où les noms des photographes ne sont pas mentionnés, sont issues des catalogues en ligne des musées (British Museum², Musée du Louvre³).

2. Catalogue en ligne du British Museum :
https://research.britishmuseum.org/research/collection_online/search.aspx (Consulté le 11/12/2019).

3. Catalogue en ligne du Musée du Louvre :
<https://www.louvre.fr/moteur-de-recherche-oeuvres> (consulté le 11/12/2019).

Liste des tableaux

1	Caractéristiques techniques des différentes versions	162
2	Caractéristiques techniques du Leap Motion	163
3	Caractéristiques techniques de la Webcam Senz3D de Creative	164
4	Liste des différentes méthodes utilisées pour la reconnaissance des gestes de la main associées aux types de capteur et aux datasets utilisés.	166
5	Liste des différents gestes présents dans DHG dataset	168
6	Résultats de classification (en %) des différentes méthodes sur DHG dataset pour 14 ou 28 gestes.	171
7	Confusion Matrix pour DHG dataset en utilisant la méthode de G. Devineau.	171
8	Matrice de confusion pour DHG dataset en utilisant la méthode de G. Devineau.	194
9	Matrice de confusion pour DHG dataset en utilisant notre méthode.	194

Liste des abréviations

a.C.	Avant Jésus-Christ
AD	Après Jésus-Christ
AR	Augmented Reality (Réalité augmentée)
BC	Avant Jésus-Christ
CAVE	Cave Automatic Virtual Environment
CIREVE	Centre Interdisciplinaire de Réalité Virtuelle
CNN / ConvNet	Convolutionnal Neural Network
DHG	Dynamic Hand Gesture
ERLIS	Équipe de Recherche sur les Imaginaires, les Littératures et les Sociétés
FC	Fully Connected (Couches entièrement connectées)
IHM	Interface Homme Machine
IMU	Inertial Measurement Unit (Unité de mesure inertielle)
ML	Machine Learning
MLP	Mult Layer Perceptron
MRSH	Maison de Recherche en Sciences Humaines
p.C.	Après Jésus-Christ
ReLU	Rectified linear unit (Unité linéaire rectifiée)
SDK	Software Development Kit
UI	User Interface
VR	Virtual Reality (Réalité Virtuelle)

Introduction

Définition du sujet

Les automates dans l'Antiquité : sources, fonctions et restitution virtuelle.

Dans le monde moderne, un automate est défini comme étant une machine « qui, par le moyen de dispositifs mécaniques, pneumatiques, hydrauliques, électriques ou électroniques, est capable d'actes imitant ceux des corps animés »⁴. Cette brève définition peut aussi être appliquée aux machines de l'Antiquité. Bien avant l'âge d'or des automates typiques du siècle des Lumières de J. de Vaucanson (devenu célèbre par la production d'automates dont *Le fluteur automate*, *Le joueur de tambourin* et *Le canard digérateur* qui « boit, barbote dans l'eau, croasse comme le canard naturel »⁵), les Grecs et les Romains ont développé et décrit un grand nombre d'automates utilisant des systèmes pneumatiques, des systèmes de contrepoids etc.

Aujourd'hui, les recherches sur les automates de l'Antiquité sont peu développées et très fragmentaires. Soit il s'agit de recherches très générales comme la thèse, soutenue en 2010, de N. Ambrosetti⁶ qui décrit de façon très rapide les différents ingénieurs et les techniques utilisées dans la construction d'automates allant de la période Gréco-romaine à la Renaissance ou comme les quelques pages que B. Gille consacre à la question dans son ouvrage *Les Mécaniciens grecs*⁷ (B. Gille n'est pas un spécialiste de l'Antiquité et il le reconnaît lui-même en introduction). Soit, les recherches se focalisent sur des types de machines précis :

- M. Lebrère, dans sa thèse, s'attarde sur les automates recréant des ambiances sonores et visuelles dans un contexte de rituels⁸.

4. A. Rey, *Dictionnaire Le Petit Robert de la langue française 2020*, Paris, Le Robert, 2019, s.u. Automate.

5. N. de Condorcet, « Eloge de M. de Vaucanson », *Histoire de l'Académie royale des Sciences - année 1782*, Paris, Imprimerie royale, 1785, p.156-168.

6. N. Ambrosetti, *Cultural Roots of Technology : an interdisciplinary study of automated systems from the antiquity to the renaissance*, PhD Thesis, Université de Milan, 2010.

7. B. Gille, *Les Mécaniciens grecs : la naissance de la technologie*, Paris, Seuil, 1980.

8. M. Lebrère, *Bruissement de la nature et murmure des Dieux dans les sanctuaires grecs, de l'époque archaïque à l'époque hellénistique*, PhD Thesis, Université de Toulouse 2, 2013 (toujours en cours).

- I. Ruffell et al., dans le cadre d'un Post-Doctorat pluridisciplinaire débuté en 2016 à l'Université de Glasgow, travaillent sur de nouvelles traductions du traité des *Automates* d'Héron d'Alexandrie et proposent plusieurs hypothèses de restitutions des théâtres automatiques à base mobile et à base fixe⁹.
- J. Carrer, dans le cadre de son mémoire de Master, propose une hypothèse de restitution et un travail de médiation autour de l'automate de la chouette et des oiseaux chanteurs d'Héron d'Alexandrie¹⁰.

D'autres travaux de recherches sont à prendre avec précaution. C'est le cas des restitutions à échelle 1 de l'ingénieur grec K. Kotsanas¹¹. L'ingénieur restitue des automates antiques qui fonctionnent mais se base sur des traductions et privilégie des solutions techniques modernes entraînant l'amélioration des mécanismes internes.

« Les automates de l'Antiquité » sont un sujet de recherche qui demande une réflexion sur trois axes : l'étude des sources, les fonctions attribuées aux machines et la restitution virtuelle.

« **Sources** » : Nos recherches s'appuient sur l'étude des traductions existantes des traités techniques et sur l'analyse des termes grecs quand cela est nécessaire. La mythologie, grecque et latine, possède également de nombreuses références aux automates. L'étude des sources iconographiques et archéologiques s'avère difficile. Les schémas techniques qui étaient réalisés dans les traités sont aujourd'hui perdus. Ils laissent place à des hypothèses de restitution engrangées depuis le Moyen-Age. Le mécanisme d'Anticythère, est un des rares vestiges mécaniques à nous être parvenu. Il n'est pas un automate, mais nous renseigne sur le savoir faire minutieux des ingénieurs antiques en termes de miniaturisation des éléments.

« **Fonctions** » : L'objectif principal de cet axe de recherche est de déterminer les fonctions propres à chaque automate (divertissement, démonstration des principes mécaniques etc.) pour le restituer dans son contexte. Cependant, dans les traités techniques, aucune mention de l'utilisation de l'automate n'est faite, seule la description technique existe.

9. I. Ruffell et al., *Hero of Alexandria and his theatrical Automata*, Post-Doctorat, Université de Glasgow, 2016.

10. J. Carrer, *Etude de la valorisation d'un objet technique antique : l'exemple de l'automate des oiseaux chanteurs et de la chouette d'Héron d'Alexandrie*, Mémoire de Master sous la direction de M.T. Cam, Université de Bretagne Occidentale, 2016.

11. K. Kotsanas, *Les technologies des Grecs de l'Antiquité*, Pyrgos, 2015.

« **Restitution virtuelle** » : Le but ici est d'obtenir un modèle interactif en trois dimensions. Cela est réalisé en trois étapes. La première consiste à modéliser l'automate à partir des sources. Pour cela nous réalisons un schéma du mécanisme avec les cotes quand elles sont indiquées. La deuxième étape permet de créer une méthode qui utilise la reconnaissance des gestes afin d'interagir de manière naturelle avec les automates pour recréer l'émotion que pouvaient engendrer ces machines. La dernière étape regroupe, au sein de la même application immersive interactive, les machines et la reconnaissance des gestes.

Ces travaux de recherche interdisciplinaire regroupent les langues et les littératures anciennes et l'informatique. Ils sont supportés par le CIREVE et le GREYC, qui mettent à disposition leurs matériels, leurs infrastructures et leurs compétences pour l'utilisation de la réalité virtuelle.

Problématiques

Les automates de l'Antiquité

Un grand nombre d'ingénieurs se sont penchés sur l'étude des mécanismes automatiques durant l'antiquité. Cependant peu d'œuvres ont aujourd'hui survécu. Notre étude s'appuie sur une période de recherche qui se situe entre le III^e siècle avant J.-C. et le I^{er} siècle après J.-C. Dans cet intervalle, deux mécaniciens proposent des traités sur le sujet qui nous sont parvenus :

- Philon de Byzance (vers 250 avant J.-C.) - manuscrits en arabe et en grec.
- Héron d'Alexandrie (I^{er} siècle après J.-C.) - manuscrits en grec.

Trois de leurs traités concernent les automates :

1. Les *Pneumatiques*¹² de Philon de Byzance.
2. Les *Pneumatiques*¹³ d'Héron d'Alexandrie.
3. Les *Automates*¹⁴ d'Héron d'Alexandrie.

12. B. Carra de Vaux, *Le livre des appareils pneumatiques et des machines hydrauliques*, Paris, Imprimerie nationale, 1903.

13. G. Argoud et J.Y. Guillaumin, *Les Pneumatiques d'Héron d'Alexandrie*, Saint-Étienne, Publications de l'université de Saint-Étienne, 1997.

14. W. Schmidt, *Heronis Alexandrini opera quae supersunt omnia. Volumen 1. Pneumatica et Automata*, Leipzig, Teubner, 1903.

L'étude de ces traités permet de dresser une liste de cinq automates qui vont être restitués. Chacun dispose d'un système mécanique différent et l'union des cinq fait le catalogue de toutes les différentes techniques antiques utilisées (pneumatique, hydraulique, système de poids et contrepoids etc.). Ainsi sont modélisés :

1. Le jeu miniature d'Héraclès et Ladon (Héron d'Alexandrie).
2. La servante automatique distribuant l'eau et le vin (Philon de Byzance).
3. La fontaine à intermittence de la chouette et des oiseaux chanteurs (Héron d'Alexandrie).
4. Les portes automatiques d'un temple miniature (Héron d'Alexandrie).
5. Le théâtre automatique à base mobile (Héron d'Alexandrie).

Quatre automates d'Héron d'Alexandrie et un de Philon de Byzance sont restitués. Cependant, beaucoup d'automates présentés par Héron sont des améliorations de ceux de Philon.

La restitution et l'interaction virtuelle

Avant de montrer les différents apports que fournit la réalité virtuelle dans le cadre des automates antiques, il est important de donner une définition technique de cette science pour comprendre comment elle fonctionne. P. Fuchs et G. Moreau présentent la réalité virtuelle comme étant « un domaine scientifique et technique exploitant l'informatique et des interfaces comportementales en vue de simuler dans un monde virtuel le comportement d'entités 3D, qui sont en interaction en temps-réel entre elles et avec un ou des utilisateurs en immersion pseudo-naturelle par l'intermédiaire de canaux sensori-moteur »¹⁵.

Pour les automates antiques, la restitution virtuelle apporte plusieurs avantages :

- Elle permet de tester plusieurs hypothèses de modélisation.
- Elle permet l'intégration du modèle dans son contexte et d'obtenir une notion d'échelle.
- Elle permet de juger de la faisabilité de l'objet.
- Elle n'est pas une construction figée et permet les modifications ultérieures.

15. Ph. Fuchs et G. Moreau, *Le traité de la réalité virtuelle*, Paris, Les Presses de l'école des Mines, 2003, p.8.

L'interaction virtuelle ajoute une autre dimension à l'application et rend l'utilisateur acteur pour la manipulation d'objets en temps-réel. Les gestes courants de la vie permettent une interaction naturelle avec l'environnement 3D (attraper, lâcher, verser etc.). Cette interaction offre la possibilité de vérifier l'ergonomie de l'objet pour savoir si l'objet est manipulable.

L'union de la restitution et de l'interaction virtuelle permet de comprendre comment fonctionnaient les automates et de reproduire l'étonnement que suscitaient ces machines.

Roma in tabula

Roma in tabula est une application multi-plateforme qui partage la recherche scientifique de l'équipe « Plan de Rome » au plus grand nombre. Une nouvelle catégorie « Sciences des machines » va permettre de partager les travaux de cette recherche au travers du « musée des automates » :

- Les cinq automates restitués y sont disponibles et interactifs.
- La documentation scientifique est présente.

L'usage de la combinaison de capture de mouvement couplé à un dispositif d'immersion (Casque VR ou salle immersive) est limité pour le grand public. C'est pourquoi l'application *Roma in tabula* est la manière la plus facile et la plus accessible pour tout le monde d'accéder aux résultats de la thèse. L'intégration des travaux au sein du projet « Plan de Rome » permet d'intégrer les automates dans la représentation des systèmes mécaniques de l'Antiquité.

Plan de la thèse

Ce mémoire de thèse est divisé en trois parties :

1. En premier lieu, l'étude et l'analyse des sources anciennes permettent de restituer les mécanismes décrits dans les traités d'automates.
2. L'application immersive interactive ajoute une dimension supplémentaire à la recherche. Naviguer et interagir avec les automates dans leur contexte, comme si nous y étions, permet de retranscrire l'étonnement et l'admiration chez l'utilisateur.
3. Le Musée virtuel des automates au sein de l'application *Roma in tabula* partage les résultats de ces travaux de recherche.

Première partie

Les automates antiques, des machines
pour démontrer et surprendre

1 | La mécanique ancienne et ses ingénieurs

1.1 Les principes de la mécanique ancienne

1.1.1 Définition et principes de base

Pour mettre en contexte nos automates, il est nécessaire de réaliser une brève introduction à la mécanique ancienne. En effet, les ingénieurs comme Philon de Byzance ou Héron d'Alexandrie en sont les représentants principaux pour notre étude. Il s'agit de proposer une définition générale et d'utiliser et réinterpréter des études déjà bien menées et scientifiquement exactes. Pour comprendre la mécanique ancienne on peut se reposer sur la définition que donne Pappus d'Alexandrie dans sa *Collection mathématique* au IV^e siècle après J.-C. :

La théorie mécanique (*theoria mechanikè*), mon fils Hermodore, étant utile aux choses multiples et importantes qui se présentent dans la vie, elle mérite à juste titre la plus grande faveur chez les philosophes (*tôn philosophôn*), et fait l'ambition de tous les mathématiciens (*tôn mathematôn*), parce qu'elle est pour ainsi dire la première qui s'applique aux recherches physiques sur la matière constituant les éléments du Monde. Considérant le repos, la sollicitation des corps et leur mouvement de translation dans l'Univers, cette théorie, organisée au moyen de théorèmes dominés par la matière elle-même, fournit la raison des corps qui se meuvent de par nature, et elle en force d'autres, en des mouvements de sens opposés, à se déplacer contre nature hors des lieux qui leur sont propres.

Les mécaniciens partisans d'Héron disent qu'une partie de la mécanique est rationnelle (*logikon*), l'autre partie appliquée (*cheirurgikon*), et que la partie rationnelle se compose de la géométrie, de l'arithmétique, de l'astronomie et des études physiques; tandis que la partie appliquée comprend l'art de travailler l'airain, l'art de bâtir, l'art de construire en bois, l'art de la peinture et l'exercice manuel de ces arts. On dit que celui qui, après s'être adonné dès son enfance aux sciences que nous venons de mentionner, a acquis de l'expérience dans les arts précités et est, en outre, doué d'un esprit ouvert, sera un excellent inventeur et constructeur d'ouvrages mécaniques. Mais, comme il est impossible qu'un même homme devienne supérieur dans autant d'objets d'études, et apprenne en même temps les arts que nous avons dits, il est

prescrit à celui qui désire exercer les travaux mécaniques de tirer parti des arts mis à sa portée suivant les avantages particuliers qu'ils lui présentent.

Les arts les plus nécessaires aux usages de la vie sont les suivants : l'art des artificiers qui, eux aussi, ont été appelés mécaniciens par les Anciens (car ils enlèvent en hauteur de grands fardeaux, contrairement à la nature de ceux-ci, en les faisant mouvoir par une faible puissance au moyen de machines) ; puis, l'art des fabricants d'engins requis pour la guerre, lesquels sont aussi appelés mécaniciens (car des traits de pierre, de fer et d'autres objets de ce genre sont envoyés sur une grande longueur de trajet par les catapultes dont ils sont les auteurs) ; enfin, à la suite de ces derniers, l'art de ceux qui sont encore une fois appelés particulièrement fabricants de machines (car l'eau est aisément élevée de grande profondeur au moyen des machines d'épuisement qu'ils construisent). Les Anciens appellent aussi mécaniciens les illusionnistes (*tous thaumasiourgous*), dont les uns travaillent avec art au moyen des vents, comme Héron dans les *Pneumatiques*, dont d'autres se proposent d'imiter les mouvements des êtres animés au moyen de cordes à boyaux et de cordes de sparte, comme Héron dans les *Automates* et dans les *Équilibres*, et dont d'autres le font au moyen de corps flottant dans l'eau, comme Archimède dans *Les Corps flottants*, ou à l'aide de machines indiquant les heures au moyen de l'eau, comme Héron dans *Les Vaisseaux renfermant de l'eau* ; ce qui paraît avoir quelque chose de commun avec la science gnomonique. Enfin, on appelle encore mécaniciens ceux qui sont versés dans la fabrication de la sphère et construisent une représentation du ciel à l'aide d'un mouvement uniforme et circulaire de l'eau¹⁶.

Pappus d'Alexandrie nous montre à travers sa définition qu'une partie de la mécanique ancienne est rationnelle et l'autre appliquée. La partie rationnelle est composée de la « géométrie », de « l'arithmétique », de « l'astronomie » et « des sciences physiques », tandis que la partie appliquée est destinée aux « arts » dits « manuels » comme « l'art de bâtir », « l'art de construire », « l'art de manipuler l'airain » ou « l'art des fabricants d'engins ». Pour notre étude il est nécessaire de s'attarder sur ce dernier domaine.

Parmi les fabricants d'engins, Pappus classe les illusionnistes (*thaumasiourgoi*) « dont les uns travaillent avec art au moyen des vents [...], dont d'autres se proposent d'imiter le mouvement des être animés ». Les thaumaturges sont des mécaniciens qui usent de leur art pour construire des machines créant l'émerveillement et l'étonnement. Ces machines utilisaient des systèmes de poids et contrepoids, comme les « théâtres automatiques »

16. Pappus d'Alexandrie, *La Collection mathématique, œuvre traduite pour la première fois du grec en français, avec une introduction et des notes*, 8, Texte traduit par P. Ver Eecke, Desclée de Brouwer et Cie, Paris/Bruges, 1933.

d'Héron d'Alexandrie, ou bien des mécanismes cachés utilisant les « vents » et l'eau comme dans les *Pneumatiques*.

Pappus insiste aussi sur l'aspect utilitaire de la mécanique dans la vie des Anciens. Il nous montre que les Anciens utilisent la mécanique pour « comprendre les causes naturelles du mouvement des corps et, éventuellement, modifier le sens de leur mouvement en allant à l'encontre de la nature »¹⁷.

La définition de Pappus d'Alexandrie est certes postérieure à notre créneau d'étude (du III^e siècle avant J.-C. au I^e siècle après J.-C.), mais les traités mécaniques qui nous sont parvenus aujourd'hui, comme les *Pneumatiques* ou les *Automata* d'Héron d'Alexandrie, viennent la confirmer et l'illustrer. On y découvre aussi que la mécanique antique est un vaste domaine dans lequel beaucoup des sciences théoriques et pratiques sont représentées. Parmi les traités antiques, beaucoup ont disparu et quelques-uns ne sont aujourd'hui connus que par des manuscrits arabes, comme certaines œuvres de Philon de Byzance et d'Héron d'Alexandrie, nos sources principales. Il est alors indispensable de se focaliser sur le domaine de la « Pneumatique » pour comprendre le fonctionnement des systèmes mécaniques antiques propres aux thaumaturges.

1.1.2 La « pneumatique », un genre de la mécanique ancienne

Le terme « pneumatique » est défini par J.Y. Guillaumin et G. Argoud comme étant « un ensemble d'appareils qui utilisent le souffle, *pneuma* en grec, c'est à dire la pression de l'air, de la vapeur et également de l'eau, avec usage de siphons, pour obtenir une réaction ou un mouvement »¹⁸. On regroupe ainsi au sein de cette catégorie des appareils se voulant être utiles comme « la pompe aspirante et refoulante » (dite « pompe à incendie ») et des lampes à huile autonomes, mais aussi des machines qui ont pour rôle de frapper d'étonnement. Cette seconde catégorie est liée à l'art de la thaumaturgie afin d'obtenir par exemple des chants d'oiseaux qui vont étonner, comme l'automate « des oiseaux chanteurs et de la chouette »¹⁹. Héron, dans sa préface du livre I des *Pneumatiques*, donne une définition succincte de ce genre mécanique :

17. J. Carrer, *Étude de la valorisation d'un objet technique antique : l'exemple de l'automate des oiseaux chanteurs et de la chouette d'Héron d'Alexandrie*, Mémoire de Master, Université de Bretagne occidentale, 2016

18. G. Argoud et J.Y. Guillaumin, *Les Pneumatiques d'Héron d'Alexandrie*, Saint-Étienne, Publications de l'université de Saint-Étienne, 1997.

19. *Pneum.* 1, 15.

C'est grâce à la combinaison de l'air, du feu, de l'eau et de la terre, et par l'union de trois de ces éléments ou même des quatre, que sont mises en action des compositions variées, dont les unes subviennent aux nécessités les plus pressantes de la vie humaine, et les autres suscitent l'admiration et l'étonnement²⁰.

Vitruve, dans son livre X du *De architectura*, donne son point de vue sur la pneumatique en limitant les machines à la production de sons :

[...] le type est d'autre part pneumatique quand de l'air vibre sous l'effet à la fois de son émission sous pression et d'un choc, et que des sons se trouvent émis instrumentalement ; [...] Le système, d'autre part, qu'actionne la force de l'air devra ses effets raffinés à une technique accomplie²¹.

Aujourd'hui seulement deux traités de pneumatiques sont conservés, celui de Philon de Byzance au III^e siècle avant J.-C. et celui d'Héron d'Alexandrie au I^{er} siècle après J.-C. Il est certes évident que divers autres mécaniciens ont approfondi le domaine. Philon de Byzance, dans la préface de son traité, annonce : « Je commencerai d'abord par décrire les appareils pneumatiques, et je mentionnerai toutes les constructions connues des savants antérieurs »²². Sans citer de noms, Philon nous fait remarquer qu'avant lui des mécaniciens avaient travaillé sur la pneumatique. Cependant grâce à Vitruve nous apprenons le nom du « père » de la pneumatique, Ctésibios, qui a exercé une grande influence dans ce domaine. On retrouve cette mention dans son livre IX du *De architectura* :

Ces mêmes auteurs ont cherché aussi dans l'utilisation de l'eau un moyen de réaliser des horloges et, en premier lieu, Ctésibios d'Alexandrie, qui découvrit aussi la puissance de l'air ordinaire et la pneumatique. Mais la manière dont ses recherches furent menées mérite d'être connue des amateurs. Ctésibios était né à Alexandrie d'un père barbier. Sa vive intelligence et sa grande activité le mettaient au-dessus de tous les autres, et il trouvait son plaisir, dit-on, en d'ingénieux travaux. C'est ainsi que, voulant suspendre dans la boutique de son père un miroir qui, lorsqu'on désirerait le faire descendre et remonter au plafond, remontât de lui-même au moyen d'une corde, grâce à un poids dissimulé, il réalisa le mécanisme suivant : il fixa sous une poutre un conduit de bois et y disposa des poulies. Par ce conduit, il amena une corde dans un angle de la pièce, où il enfla bout à bout de minces tuyaux, à l'intérieur desquels il fit descendre, à l'aide de la corde, une boule de plomb. Ainsi le poids, en descendant rapidement dans les tuyaux étroits, comprimait

20. *Pneum.* 1, préface.

21. Vitruve, *De architectura*, 10, 1, 1-2, traduction L. Callebaut, Paris, Les Belles Lettres, 1986.

22. B. Carra de Vaux, *Le livre des appareils pneumatiques et des machines hydrauliques*, Paris, Imprimerie Nationale, 1903.

la quantité d'air qui s'y trouvait, et, chassant à l'air libre, par sa descente rapide à travers ce passage resserré, l'air rendu plus dense par compression, il avait provoqué, par cette rencontre soudaine, un son aigu. 4. Ayant donc remarqué que du contact de l'atmosphère et d'un jet d'air comprimé naissaient des sons et des notes de musique, Ctésibius mit à profit ces résultats de début pour construire, le premier, des machines hydrauliques. De même, il conçut des jets d'eau sous pression, des automates et toute sorte de « trucs » amusants, parmi lesquels figurent aussi des mécanismes d'horloges à eau²³.

Le traité le plus ancien que nous ayons est celui de Philon de Byzance. Ce traité est aussi conservé grâce à des manuscrits arabes et des fragments en latins. Cependant B. Carra de Vaux, en 1902, a réalisé une traduction française de ce texte. Une traduction anglaise fut réalisée en 1974 par F.D. Prager à partir des mêmes fragments²⁴. Les *Pneumatiques* d'Héron d'Alexandrie sont aujourd'hui les mieux conservées et celles dont les manuscrits sont les plus nombreux. Héron d'Alexandrie fut un sujet d'étude majeur au Moyen-Âge, si bien que la plupart des manuscrits conservés comportent des schémas d'interprétations qui sont le fruit d'hypothèses de restitutions. Tous les schémas originels ont aujourd'hui disparu. Les *Pneumatiques* d'Héron d'Alexandrie sont répartis en deux Livres. La traduction utilisée dans notre étude est celle de G. Argoud et J.Y. Guillaumin de l'Université de Saint-Étienne. Tous les machines décrites dans ce traité ne sont pas des automates, cependant celles qui le sont ne sont pas regroupées au même endroit :

- Livre I : 12, 15, 16, 17, 21, 29, 30, 31, 37, 38, 39, 41
- Livre II : 3, 4, 5, 10, 15, 21, 32, 34, 35, 36, 37

La plupart des automates construits dans l'Antiquité utilisaient la pneumatique. Mais Héron a écrit un autre traité, les *Automata*, qui fait la description d'automates utilisant des systèmes à poids et contrepoids afin d'être animés : ce sont les théâtres automatiques à base mobile et base fixe.

23. Vitruve, *De architectura* 9, 8, 2-4, texte établi, traduit et commenté par J Soubiran, Paris, Les Belles Lettres, 1969.

24. F.D. Prager, *Pneumatica*, Wiesbaden, L. Reichert, 1974.

1.2 Les automates antiques

1.2.1 Étymologie

1.2.1.1 Automate

Le terme « automate » vient de l'adjectif grec *automatos* « qui agit de soi-même ». Homère, dans l'*Iliade*, utilise ce terme pour désigner des personnes et des objets qui fonctionnent et se déplacent de leur propre chef²⁵. Le mot est composé de *autos*, « soi-même », et d'une formation *-matos* reposant sur le radical **men-* que l'on retrouve dans le verbe défectif **maô* qui signifie « être ardent », « désirer vivement ». A l'époque romaine, chez Vitruve, on retrouve le mot *automatopoetus* (« fabricant d'automates ») lorsqu'il parle des automates de Ctésibius.

Ayant donc remarqué que du contact de l'atmosphère et d'un jet d'air comprimé naissaient des sons et des notes de musique, Ctésibius mit à profit ces résultats de début pour construire, le premier, des machines hydraulique. De même, il conçut des jets d'eau sous pression, des automates et toute sorte de « trucs » amusants (*automatopoetasque machinas*), parmi lesquels figurent aussi des mécanismes d'horloges à eau²⁶.

Dans l'adjectif latin, qui n'est connu que par Vitruve, on retrouve l'adjectif grec *automatos* en composition avec *poiètos*, « créé, fabriqué ». Ce n'est qu'au XVI^e siècle, en France, chez Rabelais que le mot « automate » fait son apparition comme adjectif.

On peut ainsi définir l'automate antique comme étant une machine disposant de mécanismes pneumatiques ou hydrauliques imitant les êtres animés.

1.2.1.2 Thaumaturgie

Le mot « thaumaturgie » vient du grec *taumatourgos* et *thaumatos* et signifie « celui qui fait des tours d'adresse ». La première partie du mot *thauma* signifie « objet d'étonnement ». La seconde, est construite à partir du verbe inusité **ergein* qui signifie « faire, accomplir ». On retrouve le radical **erg-* dans *ergan*, « le travail » et dans *ergazomai*,

25. *Iliade* 2, 408 ; 5, 749-751 ; 8, 393-395.

26. *Ergo Ctesibius, cum animaduertisset ex tactu caeli et expressionibus spiritus <sonitus> uocesque nasci, his principiis usus hydraulicas machinas primus instituit. Item aquarum expressiones automatopoetasque machinas multaque deliciarum genera, in his etiam horologiorum ex aqua comparationes explicuit.* Vitruve, *De architectura* 9, 8, 4, texte établi, traduit et commenté par J. Soubiran, Les Belles Lettres, Paris, 1969.

« faire, réaliser ». Les thaumaturges étaient des opérateurs de merveilles, cela signifie qu’avec leur art, la mécanique, ils apportaient un sentiment d’étonnement et d’émerveillement. À l’époque chrétienne, l’Église catholique désignait comme thaumaturge une personne qui accomplissait des miracles vrais ou simulés.

1.2.2 Alexandrie et son Museion : un lieu propice aux innovations techniques et scientifiques

1.2.2.1 La fondation d’Alexandrie

D’après son biographe romain Arrien (95-175 après J.-C.), l’initiative de fonder Alexandrie revient au seul Alexandre le Grand :

Il arriva à Canope et son navire fit le tour du lac Maréotis [Mariout]. Il débarqua là où se trouve maintenant la ville qui porte son nom. Il lui sembla que l’emplacement convenait admirablement à une fondation urbaine promise à la prospérité. Pris du vif désir de réaliser son projet, il établit lui-même le plan de la cité, il fixa l’endroit où il fallait construire l’agora, le nombre des sanctuaires et leurs titulaires : les dieux grecs, mais aussi Isis, déesse d’Égypte. Il précisa aussi où devait être le rempart de la ville²⁷.

Dès sa construction en 331 avant J.-C., Alexandrie se veut être une mégapole. Aidé de son architecte Dinocratès de Rhodes, Alexandre donne 15 km de remparts à sa ville et 30 m de largeur aux deux rues principales. Les autres rues n’en auront que quinze. La ville est dessinée selon des plans hippodamiens. Durant la période hellénistique, Alexandrie est la plus grande ville du monde grec et dispose d’une population internationale d’environ cinq cent mille habitants. Étant la capitale du pouvoir ptolémaïque, elle exerce un rôle très important dans l’administration de l’Égypte et forme un pôle commercial important du fait de sa position géographique idéale.

Ses monuments les plus importants sont le gymnase, le *discatérion* (tribunal), le *Sôma* (ou *Séma*, tombeau d’Alexandre). Le palais royal couvre un quart de la ville : il forme Néapolis (musée, bibliothèque, théâtre). Le port est séparé en deux par une jetée (Hep-tastade) qui réunit la ville à l’île de Pharos où se dresse le Phare, construit par Sostrate de Cnide. Toutes ses grandes institutions (cf. Figure 1) ont été l’œuvre des rois Ptolémées. L’eau du Nil est distribuée par un réseau serré de canalisations branchées sur un

27. Arrien, *Anabase*, 3,1, 5.

canal. Pour ses besoins en eaux, Alexandrie dispose de nombreuses citernes répartie sur la totalité de la ville.

Alexandre suit les conseils que donne Aristote dans son livre VII de la *Politique* sur l'édification d'une ville idéale.

1.2.2.2 Le Museion, le plus grand centre intellectuel du monde hellénistique

Il convient, dans un premier temps de définir ce qu'est le Musée d'Alexandrie. Contrairement aux musées modernes, le *Museion* n'est pas un « lieu où sont réunies, en vue de leur conservation et de leur présentation au public, des collections d'œuvres d'art, de biens culturels, scientifiques ou techniques »²⁸, mais un centre académique de recherches où les savants étaient logés et défrayés par le roi pour contribuer aux progrès des lettres et des sciences.

Il est installé en 288 avant J.-C. dans le quartier de Brucheion (cf. Figure 1). Le mot *Museion*, en grec ancien, signifie « Palais des Muses ». C'était donc sous la protection des Muses que les savants de l'Antiquité parachevaient leurs découvertes littéraires et scientifiques²⁹. L'équipe pluridisciplinaire qui peuple ce sanctuaire de recherche est composée de trente grammairiens et philologues, vingt-cinq médecins, dix sept philosophes, onze historiens et biographes, onze astronomes, quinze mathématiciens, quatre physiciens mécaniciens et deux géographes³⁰.

Strabon dans sa *Géographie* nous décrit le bâtiment principal du Musée lors de son voyage à Alexandrie en 25-24 avant J.-C. :

Le *Museum* fait partie du palais des rois ; il renferme une promenade, un lieu garni de sièges, pour les conférences, et une grande salle, où les savants qui composent le *Museum* prennent en commun leurs repas. Cette société a des revenus communs ; elle a pour directeur un prêtre, nommé autrefois par les rois, maintenant par l'empereur³¹.

Le Musée contenait une collection importante de livres indépendamment de la Bibliothèque d'Alexandrie. « Il abritait également des chaires de philosophie, d'histoire, de poésie, de géographie, de philologie, de mathématiques, de musique, d'optique et de catop-

28. A. Rey, *Dictionnaire Le Petit Robert de la langue française 2020*, Paris, Le Robert, 2019, s.u Musée

29. L. Canfora, *La véritable histoire de la bibliothèque d'Alexandrie*, Paris, Desjonquères, 1988, p.49.

30. N. Ambrosetti, *Cultural roots of technology : an interdisciplinary study of automated systems from the antiquity to the renaissance*, PhD Thesis, Milan, Université de Milan, 2010, p.49.

31. Strabon, *Géographie*, traduction de B. Laudenbach, Paris, Les Belles Lettres, 2015.

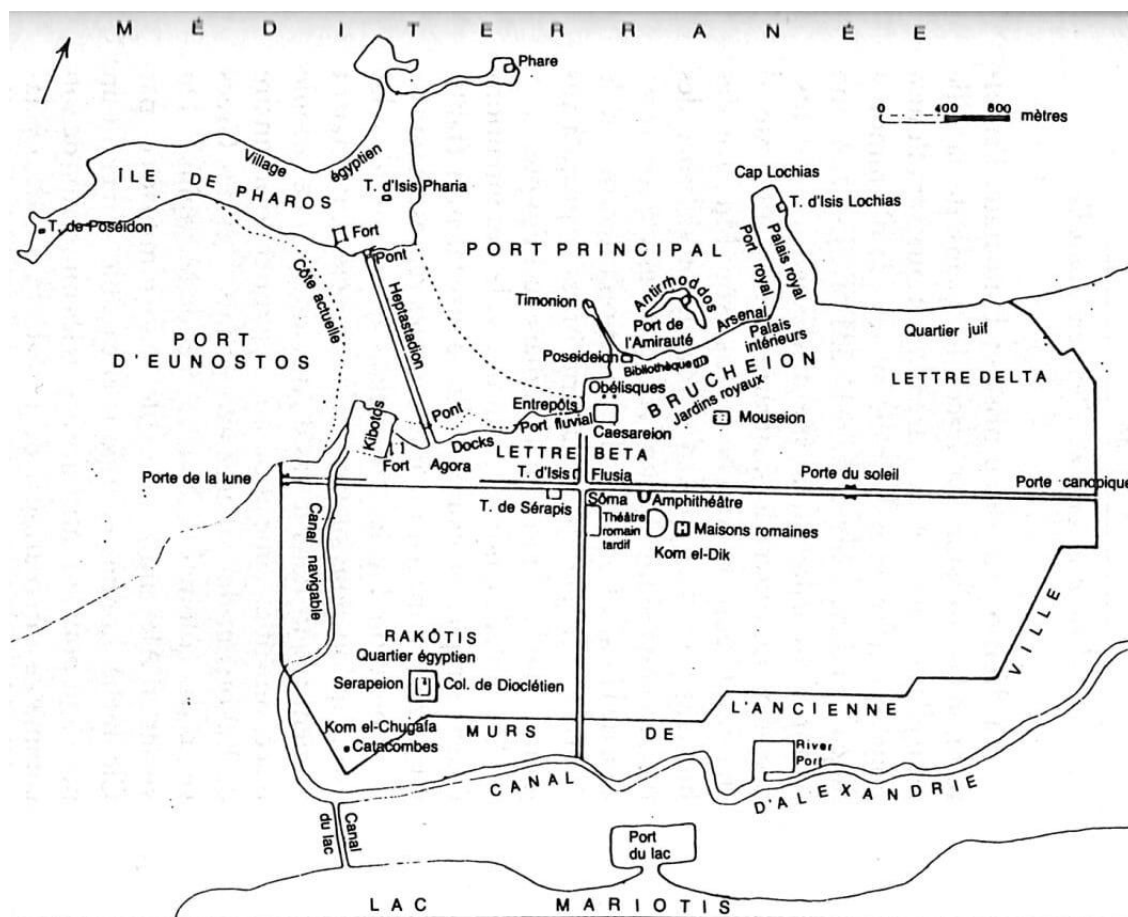


FIGURE 1 – Plan de l'ancienne Alexandrie, d'après M. El-Abbadi, *Vie et destin de la bibliothèque d'Alexandrie*, Paris, UNESCO, 1992.

trique, d'érudition et de critiques littéraires, etc., ainsi qu'un amphithéâtre de dissection, un observatoire astronomique, un jardin de plantes et d'animaux rares »³².

Le musée d'Alexandrie fait de l'Égypte le plus grand centre intellectuel et culturel méditerranéen. Cette institution s'inspira à la fois de l'Académie de Platon³³ et du Lycée d'Aristote³⁴. De nombreux savants y ont étudié tels que Diophante, Apollonius de Perga, Héron d'Alexandrie, Dositée, Archimède, etc...

Le monde scientifique semble assez unanime pour estimer la date de la destruction du Musée, contrairement à celle de la Bibliothèque d'Alexandrie. On pense que le Musée et le *Sérapeum* furent détruits en 391 après J.-C., lorsque Théophile, le fanatique évêque

32. P. Georgiadès, *L'étrange destin de la Bibliothèque d'Alexandrie*, Alexandrie, Publications de l'atelier, 1982, p.16.

33. Platon installe à Athènes un école philosophique en 387 avant J.-C. qui fut appelé Académie. Elle était dirigée par des règles éthiques strictes et avait le fonctionnement d'une université

34. M. El-Abbadi, *Vie et destin de l'ancienne bibliothèque d'Alexandrie*, Paris, UNESCO, 1992, p.75-76 et 84.

d'Alexandrie, exécuta les ordres de Théodose³⁵.

1.2.2.3 La Bibliothèque d'Alexandrie

Pour effectuer leurs recherches, les savants de l'Antiquité disposaient d'un outil de travail important : la Bibliothèque d'Alexandrie. A. Bernard, dans son ouvrage, nous rappelle de l'importance de la bibliothèque :

[...]une université c'est d'abord une bibliothèque, non pas le régime des examens ou le nombre des amphithéâtres. On peut poser toutes les premières pierres qu'on veut, une université ne vit que du jour où elle est pourvue de la bibliothèque nécessaire. Œuvre de longue, de très longue haleine. Les Alexandrins, eux, avaient bien compris ces vérités premières, et ils mirent tous leurs soins à rassembler, classer, fabriquer les livres dont avaient besoin les savants, et à mettre les hommes les plus éminents à la tête de cette bibliothèque³⁶.

Selon L. Canfora, ce que nous appelons aujourd'hui « Bibliothèque d'Alexandrie », était en réalité l'ensemble des rayonnages que contenait le Musée³⁷. Mais selon M. El-Abbaadi, cette même bibliothèque était située à proximité du Musée, dont « elle était administrativement distincte »³⁸.

L'athénien Démétrios de Phalère³⁹ (cf. Figure 2) eut la charge de la création et du développement de cette Bibliothèque à Alexandrie en arborant un dévouement infatigable comme nous le montre *La Lettre d'Aristée* - écrite au II^e siècle avant J.-C. :

Démétrios de Phalère reçut des sommes importantes pour réunir, au complet si possible, tous les ouvrages parus dans le monde entier. En procédant à des achats et à des transcriptions, il réussit à mener à bien, autant qu'il dépendait de lui, le projet du roi. J'étais là quand lui fut posée la question : Combien de dizaines de milliers de volumes y a-t-il au juste ? Il dit : Plus de vingt, ô roi, mais je vais m'occuper d'urgence de ce qui reste à faire pour atteindre cinq cent mille[...]⁴⁰.

Démétrios est considéré comme le premier bibliothécaire⁴¹ de la Bibliothèque, et il fut secondé par de nombreux érudits qui corrigeaient les textes. Sous Ptolémée III Evergète,

35. M. El-Abbaadi, *Vie et destin de l'ancienne bibliothèque d'Alexandrie*, Paris, UNESCO, 1992, p.160.

36. A. Bernard, *Alexandrie la Grande*, Paris, Hachette, 1996, p.118

37. L. Canfora, *La véritable histoire de la Bibliothèque d'Alexandrie*, Paris, Desjonquères, 1988, p.50.

38. M. El-Abbaadi, *Vie et destin de la Bibliothèque d'Alexandrie*, Paris, UNESCO, 1992, p.91.

39. Il est l'élève d'Aristote et ami de Théophraste. Il se fit connaître par ses talents d'orateur.

40. L. Hermann, « Une traduction française inédite de la lettre d'Aristée », *Revue belge de philologie et d'histoire*, tome 44, 1966, p.26.

41. Parmi les bibliothécaires connus on retrouve Démétrios de Phalère, Zénodotos, Callimaque, Eratos-thène, Apollonios de Rhodes puis Aristophane de Byzance et Aristarque. Chacun à sa manière contribuait au développement de la Bibliothèque d'Alexandrie.



FIGURE 2 – Portrait de Démétrios de Phalère, Kunsthistorisches Museum, Vienne, Autriche (Cliché M. Martin - 2007).

les navires faisant escale à Alexandrie avaient pour obligation de laisser à la bibliothèque leurs livres afin qu'ils soient recopiés en intégralité. Les originaux étaient gardés et les copies rendues aux anciens propriétaires. Le reste de la collection était complétée par des achats à Athènes et Rhodes, les deux plus grands marchés aux livres de l'époque hellénistique⁴². La bibliothèque contenait des traductions en Grec d'œuvres provenant de différents pays.

On estime que quatre cent mille volumes ont été renfermés à Alexandrie peu de temps après la fondation de la Bibliothèque et plus de sept cent mille au temps de César⁴³. Avec l'augmentation constante de ces volumes, la Bibliothèque fut rapidement contrainte de transporter une partie de ces volumes, sous le règne de Ptolémée III Evergète, dans le *Serapeum*, fraîchement reconstruit dans le quartier de Rakôtis⁴⁴ (cf Figure 1).

Grâce aux diverses études menées dans la Bibliothèque d'Alexandrie, différents savants firent des découvertes majeures :

- Aristarque annonçait que la Terre tournait autour du soleil mille huit cent ans avant Copernic

42. M. El-Abbadi, *Vie et destin de la Bibliothèque d'Alexandrie*, Paris, UNESCO, 1992, p.98.

43. Un volume correspond à un rouleau de papyrus. On estime alors que sept cent mille volumes étaient l'équivalent de cent mille livres imprimés modernes

44. M. El-Abbadi, *Vie et destin de la Bibliothèque d'Alexandrie*, Paris, UNESCO, 1992, p.92.

- Eratosthène démontrait que la Terre était une sphère dont il calcula la circonférence : 39 375 km au lieu de 40 075,02. Une prouesse pour l'époque.
- Euclide écrivait ses *Éléments*, le texte fondateur de la géométrie
- Hérophile pratiquait beaucoup de dissections et identifiait le cerveau comme étant le siège de l'intelligence, alors qu'Aristote faisait jouer ce rôle au cœur. Il découvrait aussi le fonctionnement des artères

Malgré ce projet pharaonique qu'est la Bibliothèque d'Alexandrie, elle possède un concurrent direct en la Bibliothèque de Pergame (II^e siècle avant J.-C.). Cette concurrence intense provoque l'émergence de nombreux faussaires dans le bassin méditerranéen.

Selon M. El-Abbadi, la Bibliothèque fut détruite en 47 avant J.-C., lorsque Jules César ordonna à ses troupes de détruire la flotte qui mouillait dans le port d'Alexandrie en créant un incendie qui se propagea à une grande partie de la ville :

Ce désastre survint après que, dans le cadre de la guerre civile romaine, César lancé à la poursuite de Pompée soit arrivé à Alexandrie. Là, il apprit la mort de ce dernier et se trouva mêlé à la guerre civile égyptienne qui opposait Cléopâtre VII à son jeune frère Ptolémée XIII. César, ayant pris le parti de Cléopâtre, se trouva en guerre avec Ptolémée. C'est alors qu'il était en fâcheuse posture militaire qu'il réussit à incendier la flotte d'Alexandrie - pour éviter que son adversaire ne s'en empare - et à occuper l'île de Pharos, rétablissant ainsi ses communications avec le gros de ses forces de Méditerranée⁴⁵.

L. Canfora ne pense pas que l'incendie soit la cause de la disparition de la Bibliothèque. Il affirme que les quarante mille rouleaux détruits sont en fait des copies entreposées au port et destinées à l'exportation du savoir. Il attribue la destruction à la prise d'Alexandrie par l'émir Amrou Ben al-As, lieutenant du calife Omar, le 22 décembre 640 après J.-C. :

[...] il [le calife Omar] aurait répondu à Amrou que l'important était de savoir si les livres étaient en accord avec la pensée d'Allah : si oui, ils étaient redondants ; si non, ils étaient en erreur ... En vertu de ce raisonnement, Amrou aurait fait distribuer les livres à tous les bains d'Alexandrie, où ils auraient servi de combustible pour les étuves. Il aurait fallu six mois pour brûler le tout...⁴⁶

Mis à part ces deux hypothèses très différentes, il semble que la grande fragilité du papyrus soit également une cause importante de la disparition de la Bibliothèque d'Alexan-

45. M. El-Abbadi, *Vie et destin de la Bibliothèque d'Alexandrie*, Paris, UNESCO, 1992, p.146-148.

46. L. Canfora, *La véritable histoire de la Bibliothèque d'Alexandrie*, Paris, Desjonquères, 1988, p.111-112.

drie⁴⁷.

1.2.3 La classification des automates chez les Anciens

Les automates sont des machines utilisées par les ingénieurs antiques dans le but premier de démontrer des principes scientifiques. La plupart de ces automates présentent des prouesses technologiques pour l'époque : miniaturisation des mécanismes, utilisation des forces de l'eau et de l'air, etc. Dans un second temps, les automates étonnent le public qui croit en la réincarnation divine. Le mécanisme d'Anticythère, calculateur de position astronomique antique, bien que non considéré comme un automate, illustre le savoir faire mécanique des Anciens par l'utilisation de petites roues dentées.

47. P. Giorgiades, *L'étrange destin de la bibliothèque d'Alexandrie*, Alexandrie, Publications de l'Atelier, 1982, p.39.

1.3 Les différents thaumaturges et ingénieurs de l'antiquité

1.3.1 Introduction

L'Antiquité recèle des ingénieurs de génie. Pour l'étude des automates, nous allons évoquer les mécaniciens et les thaumaturges ayant vécu entre le III^e siècle avant J.-C. et le I^{er} siècle après J.-C., avec une exception faite pour Archytas de Tarente, reconnu pour ses idées précoces de mécanismes automatiques.

Parmi eux nous retrouvons Ctésibios d'Alexandrie, Philon de Byzance et Archimède pour la période du III^e siècle avant J.-C. Vitruve et Héron d'Alexandrie couvrent respectivement le I^{er} siècle avant J.-C. et le I^{er} siècle après J.-C.

1.3.2 Archytas de Tarente - 400 avant J.-C.

Archytas de Tarente (cf. Figure 3) naît à Tarente en Grande Grèce (Italie) vers 420 avant J.-C. C'est un scientifique de l'école pythagoricienne et il aurait, selon les chercheurs, étudié à Métaponte. Il fut l'ami de Platon qui lui rendit plusieurs fois visite entre 390 et 350 avant J.-C. en Sicile et en Italie. Il fut aussi l'un des personnages les plus importants de Tarente dont il est le stratège à sept reprises jusqu'en 361 avant J.-C.

L'invention la plus remarquable attribuée à ce mathématicien est celle d'un automate volant, une colombe en bois⁴⁸ qu'évoque Aulu-Gelle dans les *Nuits attiques* en se référant à son contemporain Favorinus d'Arles, du II^e siècle après J.-C. :

L'invention dont la tradition attribue au pythagoricien Archytas la construction ne doit pas moins nous étonner, même si elle peut paraître frivole. La plupart des auteurs grecs les plus connus et le philosophe Favorinus, grand amateur d'antiquités, rapportent en effet de la manière la plus formelle qu'une colombe en bois, construite par Archytas, selon certains calculs et principes mécaniques, avait volé. C'est vraisemblablement par un système de contre-poids qu'elle tenait en l'air, et par la pression de l'air enfermé caché à l'intérieur qu'elle avançait. Qu'on me permette sur un fait, ma foi, si peu croyable, de citer Favorinus lui-même : « Archytas de Tarente, à la fois philosophe et

48. <http://kotsanas.com/fr/exh.php?exhibit=2001001> : Proposition de restitution de l'automate d'Archytas de Tarente par Kostas Kotsanas - *Les technologies de la Grèce antique*, Pyrgos, 2015, p.145.



FIGURE 3 – Archytas de Tarente. Buste provenant de la villa des Papyrus d’Herculanum, aujourd’hui au Musée national archéologique de Naples (Cliché M.L. Nguyen - 2011).

mécanicien, fabriqua une colombe en bois qui volait, mais qui, une fois qu’elle s’était posée ne pouvait plus reprendre son essor [...] ⁴⁹.

Archytas exerça une grande influence pour unifier les cités grecques. Il donne sa démission en 360 pour arrêter la politique et consacrer son temps libre à l’étude des sciences et des mathématiques. Il meurt entre 360 et 350 avant J.-C. dans un naufrage sur les côtes de l’Apulie.

1.3.3 Ctésibios - 250 avant J.-C.

Ctésibios d’Alexandrie (cf. Figure 4) est un ingénieur qui a vécu entre 285 et 222 avant J.-C. Sa date de naissance est inconnue des chercheurs. Cependant il est vraisemblable qu’il ait vécu entre ces dates car on estime qu’il a mené ses travaux au Musée d’Alexandrie. Des documents attestent qu’il est l’inventeur d’une corne d’abondance chantante pour une statue de la femme du roi Ptolémée II. On ne connaît que très peu de choses de sa vie, mais on sait qu’il est le fils d’un barbier d’Aspoudia, dans la banlieue d’Alexandrie ⁵⁰, et

49. Aulu-Gelle, *Nuits attiques*, 10, 12, 8.

50. Vitruve, *De Architectura*, 9, 8, 2.

qu'il connaissait des périodes d'extrême pauvreté⁵¹.

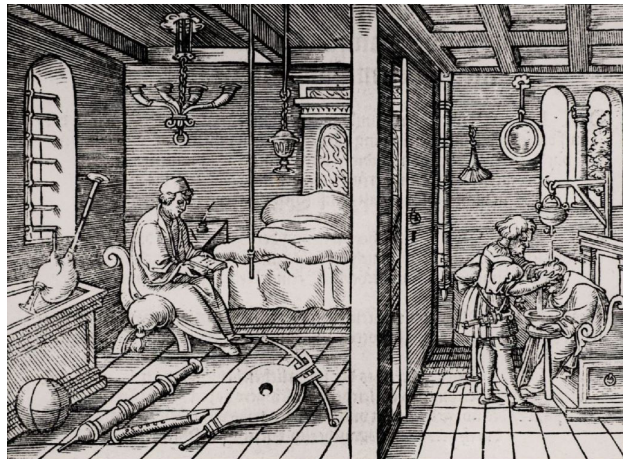


FIGURE 4 – Gravure sur bois représentant Ctésibios d'Alexandrie et son père, œuvre de G. Rivius, Nuremberg, 1547 (Cliché World History Archive - 2012).

La première invention qu'il réalisa était destinée à son père pour l'aider dans son métier. Il s'agit d'un miroir ajustable à l'aide d'une poulie et d'un contrepoids. Plus tard il remarqua que bouger le poids dans le tube provoquait un son lorsque l'air était chassé. En le déplaçant en sens inverse l'air était aspiré. C'est comme cela qu'il comprit que l'air est une substance comprimable et qu'il commença l'étude de la pneumatique et de l'hydraulique⁵². Il découvrit le principe du siphon et mit au point la première pompe aspirante et refoulante^{53 54 55} (cf. Figure 5). La combinaison de la pompe à pistons avec un tube musical, produisait un son continu et donna naissance à l'*Hydraulis* (cf. Figure 6), un orgue hydraulique⁵⁶, premier instrument à clavier de l'histoire.

Il doit sa plus grande renommée au perfectionnement d'une de ses clepsydres. Celle-ci se veut plus précise et plus fiable par l'ajout d'un troisième récipient qui régule le niveau de l'eau. Les trous d'écoulement étaient creusés dans des matériaux nobles et précieux (or et pierres précieuses) pour éviter l'oxydation⁵⁷. L'ajout d'une flèche dans le troisième réservoir permettait d'obtenir l'heure au fur et à mesure que l'eau s'écoulait. Il perfectionne le dispositif par la combinaison d'une règle et d'une roue dentée qui permettait

51. J.A. Meyer, *Dei ex Machinis*, Saint-Ouen, Les éditions du Net, 2015, p.110.

52. Vitruve, *De Architectura*, 9, 8, 3-4.

53. Vitruve, *De Architectura*, 10, 7.

54. A.G. Drachmann, *Ktesibios, Philon and Heron : a study in ancient pneumatics*, PhD Thesis, Copenhague, Université E. Munksgaard, 1948, p.4-7.

55. B. Gille, *Les mécaniciens grecs : la naissance de la technologie*, Paris, Seuil, 1980, p.89-90.

56. Vitruve, *De Architectura*, 10, 8.

57. A.G. Drachmann, *Ktesibios, Philon and Heron : a study in ancient pneumatics*, PhD Thesis, Copenhague, Université E. Munksgaard, 1948, p.16-21.

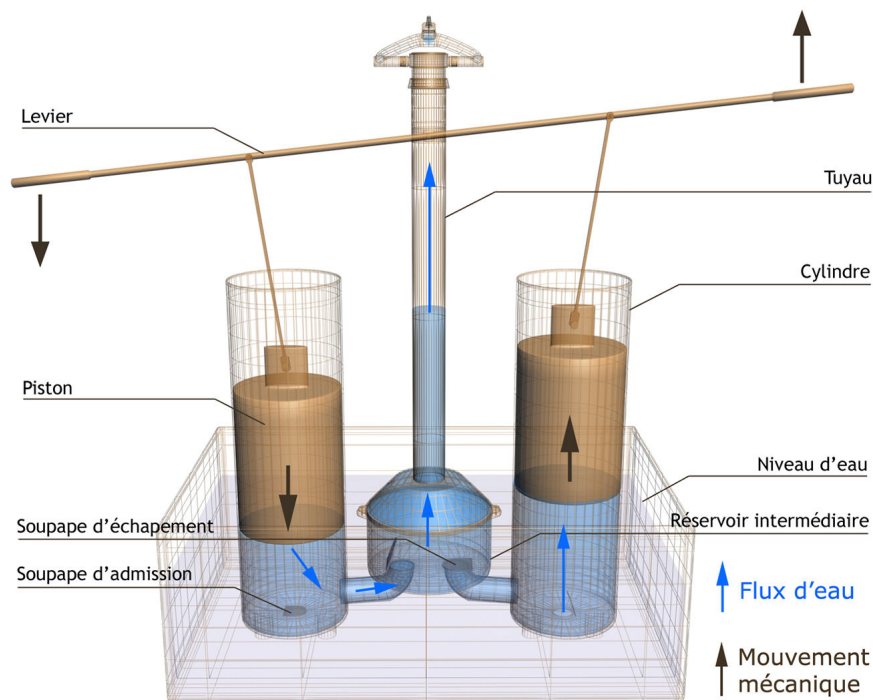


FIGURE 5 – Schéma explicatif de la pompe de Ctésibios selon Vitruve (Réalisation N. Lefèvre, S. Madeleine et Ph. Fleury - 2005).

la rotation d'une aiguille sur un cadran⁵⁸. En utilisant plusieurs roues dentées, Ctésibios pouvait animer des oiseaux chanteurs et divers automates. L'une des clepsydres complexes est décrite par Vitruve⁵⁹.

Le travail de Ctésibios sur les mécanismes pneumatiques - qui lui valut le surnom de *Père de la Pneumatique* et d'*Edison du monde antique*⁶⁰ dans la communauté scientifique - et ses autres ouvrages sont aujourd'hui perdus.

1.3.4 Philon de Byzance - 250 avant J.-C.

Natif de Byzance, il a vécu au milieu du III^e siècle avant J.-C. et commença à étudier la mécanique militaire, en particulier les catapultes, à Rhodes et à Alexandrie⁶¹. D'après les quelques rares sources biographiques à notre disposition, la majeure partie de sa vie se déroule à Alexandrie dans l'enceinte du Musée. Il fait également partie des grands

58. <http://kotsanas.com/fr/exh.php?exhibit=0204004> : Proposition de restitution de la Clepsydre de Ctésibios par Kostas Kotsanas - *Les technologies de la Grèce antique*, Pyrgos, 2015, p.20-21

59. Vitruve, *De Architectura*, 9, 8, 4-8, texte traduit par J. Soubiran, Paris, Les Belles Lettres, 1969.

60. S. Scotchmer, *Innovation and Incentives*, Cambridge, MIT Press, 2006, p.5.

61. N. Ambrosetti, *Cultural roots of technology : an interdisciplinary study of automated systems from the antiquity to the renaissance*, PhD Thesis, Milan, Université de Milan, 2010, p.51.

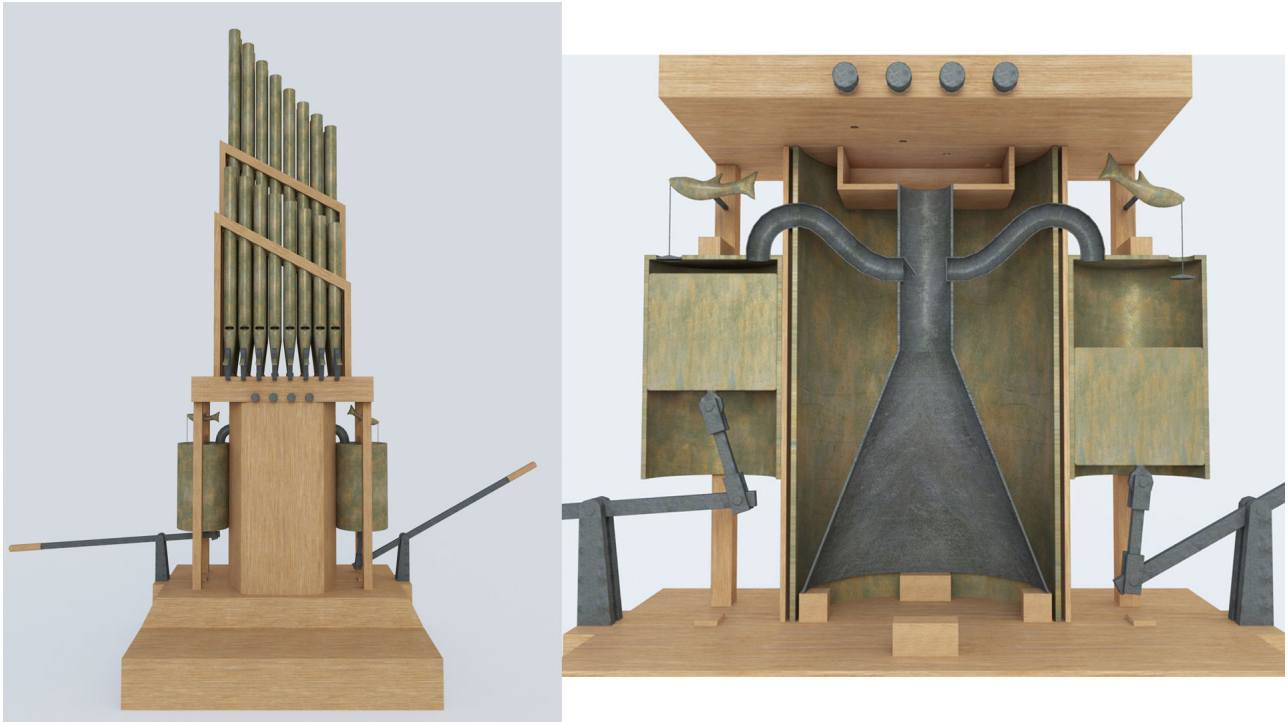


FIGURE 6 – Restitution de l’orgue hydraulique d’après Vitruve et les différentes données archéologiques et iconographiques (Restitution C. Morineau et Ph. Fleury - 2016).

inventeurs que Vitruve mentionne dans son œuvre⁶². Mais certains écrits techniques sont également cités chez Héron d’Alexandrie⁶³ d’après l’étude de B. Carra de Vaux.

Son traité, *La Syntaxe Mécanique* était composé de neuf livres mais seulement quatre sont aujourd’hui disponibles :

- Introduction
- Sur les applications du levier
- Sur l’organisation des ports
- Sur les machines de jet (conservé en grec)
- Sur la pneumatique (conservé en arabe)
- Sur la construction des automates
- Sur les fortifications (conservé en grec)
- Sur la poliorcétique (conservé en grec)
- Sur les stratagèmes

Il est l’inventeur de nombreux automates, dont la quasi-totalité mettent en scène des

62. Vitruve, *De Architectura*, Praef. 14, texte établi et traduit par B. Liou et M. Zuinghedau, Paris, Les Belles Lettres, 2003.

63. Hero Mec., *Automata*, 1, 2.

animaux, qui sont décrits pour la plupart dans son traité des *Pneumatiques*^{64 65}. Il existe quatre manuscrits conservés comportant l'œuvre de Philon (cf. Figure 7). Trois sont en arabes et un est en latin. Le manuscrit latin (CLM 534) est le premier utilisé. Il est publié par V. Rose, traduit en français par M. De Rochas et réédité en allemand par W. Schmidt. Ce manuscrit est très fragmentaire et ne contient pas la totalité du traité du mécanicien. Les trois manuscrits arabes sont complets. Le premier (N954 Marsh 669) est disponible à la bibliothèque d'Oxford et est utilisé par Th. Henri Martin. Les deux autres (2755 et 3713) sont à la bibliothèque Sainte-Sophie. B. Carra de Vaux indique que le manuscrit 3713 est le plus complet et le plus ordonné du traité de Philon. Il reste aujourd'hui la référence pour l'étude des *Pneumatiques*.

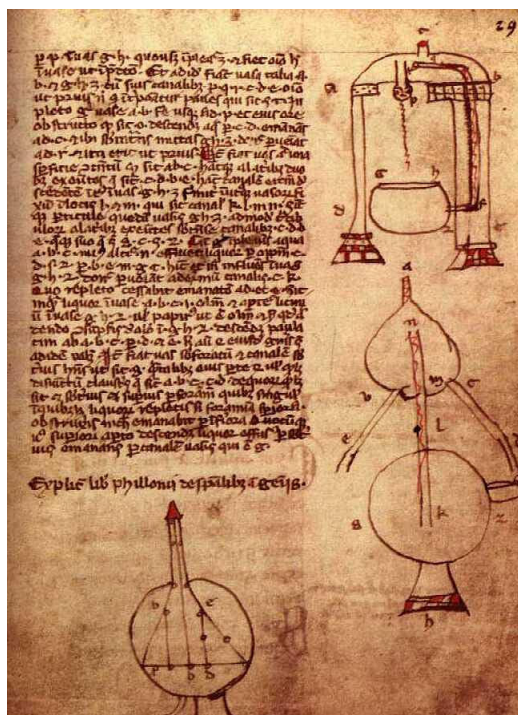


FIGURE 7 – Les *Pneumatiques* de Philon. Fragment du manuscrit latin CLM 534 du XIV^e siècle. Bayerische Staatsbibliothek, Munich, Allemagne (Cliché F.D. Prager - 1974).

1.3.5 Archimède - 287-212 avant J.-C.

La vie d'Archimède (cf. Figure 9) est peu connue. Elle était écrite par Héraclides, mais ses travaux ont aujourd'hui disparu. Les éléments biographiques que nous avons proviennent de Polybe (202-126 avant J.-C.), Diodore de Sicile (90 - 21 avant J.-C.),

64. F.D. Prager, *Pneumatica*, Wiesbaden, L. Reichert, 1974.

65. B. Carra de Vaux, *Le Livre des appareils pneumatiques et des machines hydrauliques*, Paris, Imprimerie nationale, 1903.

Tite-Live (59 avant J.-C. - 17 après J.-C.) et Plutarque (46 - 125 après J.-C.). Il serait né à Syracuse en 287 avant J.-C. Il fut éduqué par son père astronome, Phidias. Il termina ses études au Musée d'Alexandrie aux cotés d'Eratosthène.



FIGURE 8 – Archimède défendant Syracuse, gravure sur cuivre de 1740, œuvre de E.J. Desrochers, Bibliothèque nationale, Paris, 1951 (Cliché BnF).

Il participa à la défense de la ville de Syracuse en tant qu'ingénieur pendant la seconde *Guerre Punique*⁶⁶, en inventant diverses machines de guerre. Il est reconnu comme un génie de l'Antiquité, et est considéré de nos jours comme l'un des plus grands mathématiciens de tous les temps : « ceux qui le louent sont plus nombreux que ceux qui le lisent et ceux qui l'admirent sont plus nombreux que ceux qui le comprennent »⁶⁷. Il meurt lors de la prise de Syracuse en 212 avant J.-C.

La vie d'Archimède fut marquée par deux disciplines, les mathématiques et la mécanique. Il construit de nombreux automates dont les traités techniques ont aujourd'hui disparu. Le premier d'entre eux est le *Planétaire* qui est construit avec une haute précision mécanique. Claudien le décrit ainsi dans une de ses épigrammes :

Un vieillard de Syracuse vient par son art de transporter sur la terre l'ordre qui régit le ciel, l'harmonie de la nature et les lois des dieux. Un moteur secret, renfermé dans cette sphère, dirige tous ces astres et fait tourner régulièrement cette machine qui semble animée. Un faux zodiaque y parcourt son cercle

66. La deuxième Guerre Punique, (218-202 avant J.-C.) est la deuxième des trois conflits qui opposent Rome à Carthage, conflit au cours duquel les habitants de Syracuse se sont alliés aux Carthaginois, après avoir été les alliés de Rome pendant près d'un demi-siècle.

67. A. Taquet, *Elementa geometriae planae ac solidae* (1665), Whitefish, Kessinger Publishing, 2009.

annuel, et chaque mois ramène le disque dissimulé de Diane. Un art audacieux s'applaudit d'imprimer le mouvement au monde qu'il a créé, et le génie d'un homme gouverne à son gré les astres⁶⁸.

L'automate le plus connu d'Archimède reste son *horloge hydraulique*⁶⁹. Pour cet automate il existe trois copies d'un manuscrit arabe qui sont conservées à Paris, Londres et New York⁷⁰. Ces textes décrivent comment réaliser les divers mécanismes qui composent l'horloge et expliquent le fonctionnement du marquage de l'heure et des automates décoratifs.

1.3.6 Vitruve - I^{er} siècle avant J.-C.

Vitruve est un architecte romain qui vécut au I^{er} siècle avant J.-C. Son traité *De Architectura* nous renseigne sur les techniques de construction de l'Antiquité. Dans l'antiquité romaine, l'architecture est un vaste domaine qui comprend la construction, le génie chimique, le génie des matériaux, la mécanique et le génie militaire. Son traité est dédié à l'empereur Auguste. Selon Vitruve, l'architecture est une imitation de la nature. Pour étudier les automates, il est intéressant d'examiner ce traité de Vitruve. Il décrit plusieurs machines utilisées dans l'Antiquité romaine, notamment des cadrans solaires et des horloges hydrauliques, et il mentionne l'utilisation d'une Éolipile (la première « machine à vapeur ») dans une expérience visant à démontrer la nature des mouvements du vent. En décrivant le fonctionnement d'une horloge hydraulique, Vitruve cite les travaux de Ctésibios, qui sont aujourd'hui perdus⁷¹.

1.3.7 Héron d'Alexandrie - I^{er} siècle après J.-C.

Héron d'Alexandrie (cf. Figure 10) est le troisième des grands ingénieurs et inventeurs de l'école d'Alexandrie après Ctésibios et Philon de Byzance. Parmi les mécaniciens décrits ci-dessus, Héron d'Alexandrie est celui dont il nous reste le plus grand nombre de traités techniques, mais aussi celui dont la vie pose le plus d'interrogations.

D'après Otto Neugebauer, Héron a vécu au cours du I^e siècle après J.-C. après la mention dans sa *Dioptrica* d'une éclipse de Lune, un événement qui est survenu le 13

68. Claudien, *Épigrammes*, 18.

69. <http://kotsanas.com/fr/exh.php?exhibit=0204006> : Proposition de restitution de l'horloge hydraulique d'Archimède par Kostas Kotsanas - *Les technologies de la Grèce antique*, Pyrgos, 2015, p.22-23

70. J.A. Meyer, *Dei ex Machinis*, Saint-Ouen, Les Éditions du Net, 2015, p.151-153.

71. Vitruve, *De Architectura*, 9, 8, 2.

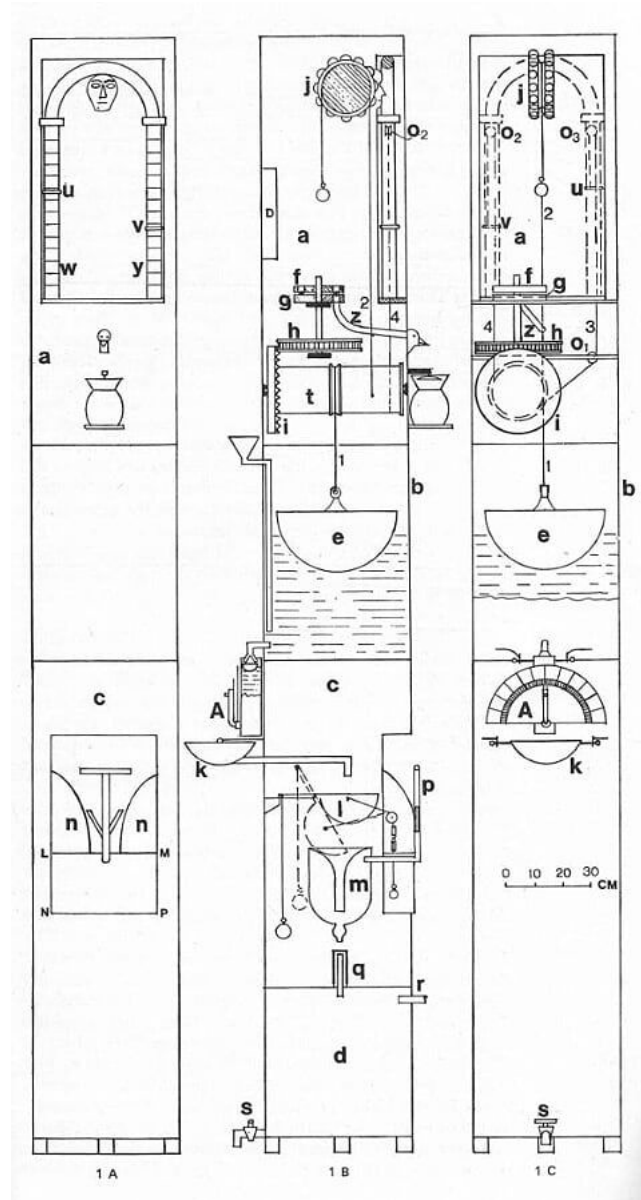


FIGURE 9 – Description des divers mécanismes de l'horloge hydraulique d'Archimède d'après Wiedemann et Hauser, *Die Uhr des Archimedes*, 1918.

mars de l'an 62 après J.-C⁷². L'édition la plus complète de ses œuvres est celle publiée par les éditions Teubner en 1903 en cinq volumes à Leipzig⁷³. Ainsi sont présentés les traités suivants :

- *Pneumatica* : machines utilisant l'air, l'eau ou la vapeur.
- *Automata* : mécanismes réalisés pour le théâtre automatique à base de poids et contrepoids.
- *Mechanica* : machines pour soulever et transporter des charges lourdes.

72. A.G. Drachmann, *Ktesibios, Philon and Heron : a study in ancient pneumatics*, PhD Thesis, Copenhagen, Université E. Munksgaard, 1948, p.75-76.

73. W. Schmidt, *Heronis Alexandrini opera quae supersunt omnia*, Leipzig, B.G. Teubner, 1903.



FIGURE 10 – Portrait d'Héron d'Alexandrie, gravure imaginaire du XVII^e siècle (Cliché O'Connor - 1999).

- *Metrica* : formules qui permettent de calculer la surface et le volume de divers objets.
- *Dioptrica* : outils et procédures qui permettent la mesure des longueurs.
- *Belopoeica* : machines de guerre.
- *Catoptrica* : usage des miroirs et propagation de la lumière.

Les traités qui nous intéressent pour l'étude des automates sont *Pneumatica* et *Automata*. Les *Pneumatiques* vont nous permettre de comprendre comment fonctionne le dispositif d'ouverture automatique d'un petit temple miniature (cf. Figure 11) mais également divers automates mettant en scène des animaux grâce aux mouvements de l'air et de l'eau, comme les fontaines sifflantes à intermittence (cf. Figure 12).

Dans ces *Automata*, Héron réalise une mise en scène plus ou moins élaborée avec des scènes fixes et mobiles.

Le théâtre à base mobile occupe le Livre I de son traité. Il met en scène l'Apothéose de Bacchus⁷⁴ (cf. Figure 13).

Pour son théâtre à base fixe, il décide de raconter la Légende de Nautilus⁷⁵, une pièce en cinq actes (cf. Figure 14). La construction de cet automate est détaillée dans le Livre II du traité.

74. Hero Mec., *Automata*, 1, 1-19.

75. Hero Mec., *Automata*, 2, 20-30.

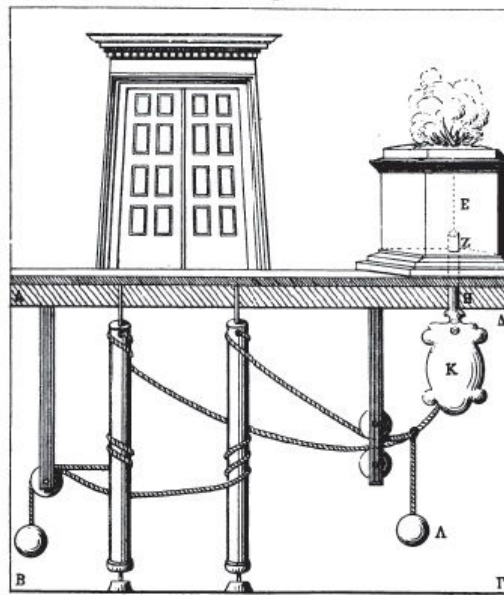


FIGURE 11 – Mécanisme d'ouverture des portes automatiques d'un temple miniature d'après W. Schmidt, Leipzig, Teubner, 1903.

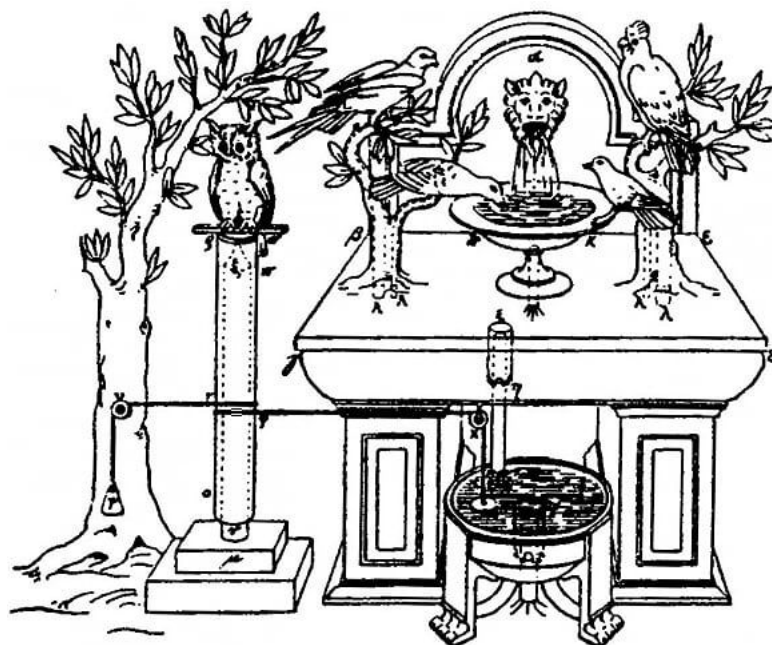


FIGURE 12 – Mécanisme caché des oiseaux chanteurs et de la chouette d'après W. Schmidt, Leipzig, Teubner, 1903.

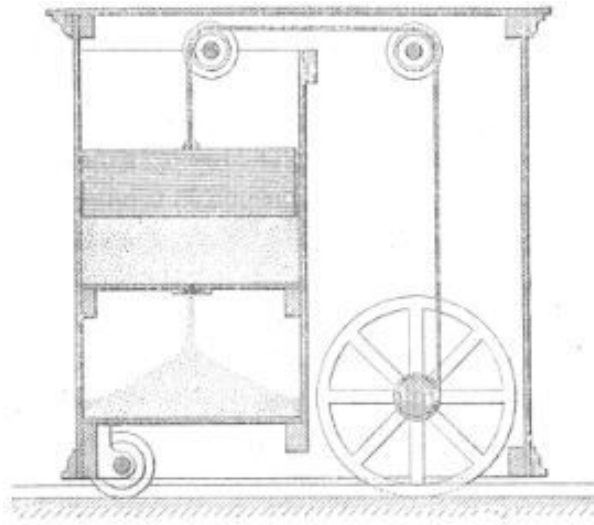


FIGURE 13 – Contrepoids moteur du théâtre automatique mobile d'après W. Schmidt, Leipzig, Teubner, 1903.

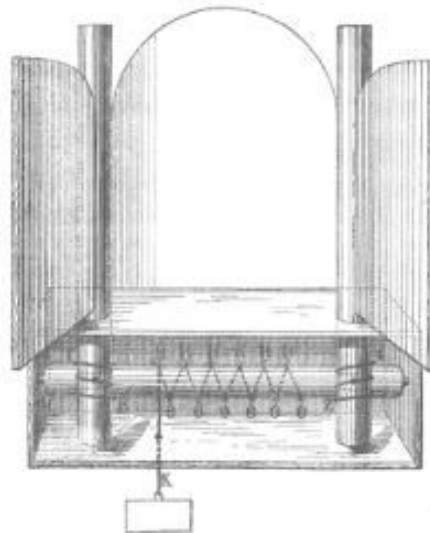


FIGURE 14 – Mécanisme d'ouverture des portes du théâtre automatique fixe d'après W. Schmidt, Leipzig, Teubner, 1903.

2 | Les sources

2.1 Introduction

Avant toute restitution et pour connaître les dimensions exactes, ainsi que les formes et les matériaux de chaque machine, il est indispensable d'effectuer ce que l'on appelle une analyse des sources anciennes. Cette analyse se déroule en trois étapes : tout d'abord il convient de rechercher les sources littéraires latines et grecques. L'étude de ces textes doit s'effectuer sur plusieurs traductions (voir même dans certains cas réaliser sa propre version) pour valider les termes employés et éviter toute erreur d'interprétation qui fausserait la restitution. Cette analyse littéraire est ensuite secondée par une recherche iconographique. Il s'agit de composer une banque d'images issues de représentations d'époque sur les monnaies, les mosaïques, les peintures ou les bas-reliefs. Enfin la troisième étape est d'étudier les sources archéologiques comme les mécanismes retrouvés ou les traces laissés par ces mécanismes.

Cet investissement conséquent permet d'aboutir à des plans techniques qui permettent de restituer la machine en 3D (voir 4D si on ajoute le son à la modélisation) et de valider ou non l'hypothèse que le chercheur décide de proposer. Dans le cadre des automates antiques, les principales sources utilisées sont littéraires. Les autres sont très limitées voire inexistantes.

Dans notre étude nous allons commencer par exposer les mythes grecs et latins qui nous renseignent déjà sur des principes de machines qui effectuent des mouvements de leurs propres chefs. Une étude des traités techniques antiques est ensuite réalisée. Pour terminer cette analyse des sources, une recherche iconographique et archéologique est pratiquée.

2.2 Les récits mythologiques

Les récits mythiques, qu'ils soient grecs ou latins, nous renseignent déjà sur l'importance de l'utilisation d'objets ou créatures animées. *L'Illiade* et *l'Odyssée*, ainsi que *Les*

Métamorphoses d'Ovide, par exemple, mettent en scène des automates au service des dieux voire parfois des hommes.

Chaque allusion à des « machines automatiques » est listée ci-dessous et catégorisée en fonction de la langue (grec et latin) et par ordre chronologique.

2.2.1 Les automates dans la littérature mythologique grecque

2.2.1.1 Les trépieds d'Héphaïstos

Le premier objet insolite animé nous est présenté dans l'*Iliade* par Homère. Il s'agit de trépieds forgés par Héphaïstos qui, selon le mythe, ont la volonté de se rendre de leur propre chef à l'assemblée des Dieux pour ensuite revenir sur leurs pas :

Elle [Thétis] le trouve, tout suant, roulant autour de ses soufflets, affairé. Il [Héphaïstos] est en train de fabriquer des trépieds - vingt en tout - qui doivent se dresser tout autour de la grand salle, le long de ses beaux murs bien droits. A la base de chacun d'eux, il a mis des roulettes en or, afin qu'ils puissent, d'eux-mêmes, entrer dans l'assemblée des dieux, puis s'en revenir au logis - une merveille à voir ! Ils sont presque terminés ; les anses ouvragées, seules, ne sont pas encore en place ; il y travaille, il en forge les attaches⁷⁶.

Cette existence des trépieds automatiques est aussi relevée par Eustathe de Thessalonique, érudit byzantin du XII^e siècle après J.-C. :

Il était en effet merveilleux que les trépieds se déplacent d'eux-mêmes, comme s'il s'agissait d'objets disposant de leur propre mouvement et avançant grâce à des roues installées à leur base, des poulies, qui, comme il convient, auraient été insérées dans les pieds des chaudrons, de sorte qu'ils puissent entrer là où se tenait le rassemblement des dieux, l'assemblée des Olympiens, puis retourner à leur point de départ, chez eux, à la manière d'êtres animés (*empsukhôn*). Tels sont supposés être les objets fabriqués par Héphaïstos. Il faut savoir en effet que le poète dépeint ces trépieds animés d'une manière merveilleuse, se mouvant par eux-mêmes, comme s'ils se déplaçaient grâce aux petites roues sur lesquelles ils reposent⁷⁷.

A. Marcinkowski et J. Wilgaux, dans leur article *Automates et créatures artificielles d'Héphaïstos : entre science et fiction*, étudient les créations du dieu Héphaïstos ainsi que

76. Homère, *Iliade*, 18, 372-379, texte établi et traduit par P. Mazon, Paris, Les Belles Lettres, 1995.

77. Eustathe, *Commentaire de l'Iliade*, 18, 473-477, texte traduit par J. Wilgaux dans A. Marcinkowski et J. Wilgaux, « Automates et créatures artificielles d'Héphaïstos : entre science et fiction », *Techniques & Culture*, 37, Paris, EHESS, 2004.

leurs finalités et arrivent à la conclusion que ces « objets animés » étaient forgés dans le but de soulager son infirmité :

« Les trépieds, par exemple, ne se mettent pas à marcher comme par magie, mais se déplacent grâce aux roues ajoutées par le dieu, c'est-à-dire grâce à la mise en place d'une mécanique. Il faut reconnaître que l'impuissance des Modernes à rendre compte de l'intrusion de la technique dans les mythes a facilité l'application de l'étiquette magie à tout événement extraordinaire. En fait, l'impression donnée dans l'Iliade est que l'infirmité du dieu n'est pas la contrepartie de son art, mais qu'elle rend nécessaire la création d'assistants autonomes, donc d'automates, aptes à l'aider dans son travail éprouvant et à lui permettre de se déplacer »⁷⁸.

K. Kotsanas a imaginé des trépieds en s'inspirant des technologies utilisées par les ingénieurs d'Alexandrie au II^e siècle avant J.-C. : ils conjuguent un système central de contrepoids avec des cordes enroulées autour des essieux des deux roues motrices⁷⁹.



FIGURE 15 – Hypothèse de restitution du trépied automatique d'Héphaïstos par K. Kotsanas, Pyrgos, 2015.

2.2.1.2 Les portes animées de l'Olympe

Toujours dans l'*Iliade*, Homère décrit par deux fois un objet destiné à l'usage des dieux : les portes automatiques de l'Olympe.

78. A. Marcinkowski et J. Wilgaux, « Automates et créatures artificielles d'Héphaïstos : entre science et fiction », *Techniques & Culture*, 37, Paris, EHESS, 2004.

79. K. Kotsanas, *Les inventions des Grecs de l'Antiquité*, Pyrgos, 2015, p.70.

Ces portes gardent l'Olympe de l'intrusion de l'homme en ne s'ouvrant d'elles-mêmes que pour les dieux. La première description apparaît au chant V :

D'elles-mêmes, les portes gémissent, ces portes que gardent les Heures, à qui l'entrée est commise de l'Olympe et du vaste ciel, avec le soin d'écartier ou de replacer tour à tour une très épaisse nuée⁸⁰.

Puis plus tard, au chant XVIII, Homère reprend la description des portes automatiques de l'Olympe :

[...] et voici que, d'elles-mêmes, gémissent les portes célestes, que gardent les Heures, les Heures à qui l'entrée est commise de l'Olympe et du vaste ciel, avec le soin d'écartier ou de replacer une très épaisse nuée⁸¹.

2.2.1.3 Les deux chiens gardiens du palais d'Alkinoos

Alkinoos avait demandé à Héphaïstos de forger deux chiens en argent et or pour garder sa sublime demeure. Ces gardiens ont la jeunesse éternelle et ne peuvent périr. Il s'agit là d'une description d'Homère dans l'*Odyssée* :

D'autre part, enfin, il y avait de part et d'autre des chiens en argent plaqués d'or qu'Héphaïstos avait forgés par ses pensées savantes qui gardaient la maison du magnanime Alkinoos, qui ne sont pas périssables et à la jeunesse éternelle⁸².

2.2.1.4 Les deux servantes, faites d'or, qui assistaient Héphaïstos

Pour soulager son infirmité⁸³ Héphaïstos forge deux servantes en or pour l'assister dans les tâches les plus délicates :

Deux servantes s'évertuent à l'étayer. Elles sont en or, mais elles ont l'aspect de vierges vivantes. Dans leur coeur est une raison ; elles ont aussi voix et force ; par la grâce des Immortels, elles savent travailler. Elles s'affairent, pour étayer leur seigneur⁸⁴.

2.2.1.5 Les soufflets de forge d'Héphaïstos

Homère continue de décrire des objets animés par Héphaïstos comme les soufflets de forge, qui semblent travailler de manière autonome sous le commandement du dieu :

80. Homère, *Iliade*, 5, 749-752, texte établi et traduit par P. Mazon, Paris, Les Belles Lettres, 1937.

81. Homère, *Iliade*, 18, 393-397, texte établi et traduit par P. Mazon, Paris, Les Belles Lettres, 1961.

82. Homère, *Odyssée*, 7, 91-94, texte traduit par V. Bérard, Paris, Les Belles Lettres, 2003.

83. A. Marcinkowski et J. Wilgaux, « Automates et créatures artificielles d'Héphaïstos : entre science et fiction », *Techniques & Culture*, 37, Paris, EHESS, 2004.

84. Homère, *Iliade*, 18, 417-421, texte établi et traduit par P. Mazon, Paris, Les Belles Lettres, 1995.

Il [Héphaïstos] dit, et, la laissant, se dirige vers ses soufflets. Il les tourne vers le feu et les invite à travailler. Et les soufflets - vingt en tout - de souffler dans les fournaies. Ils lancent un souffle ardent et divers, au service de l'ouvrier, qu'il veuille aller vite ou non, suivant ce qu'exigent Héphaïstos et les progrès de son travail⁸⁵.

2.2.1.6 Pandore

Le mythe de Pandore est certainement le plus connu de tous. En effet à une époque la Terre est peuplée uniquement d'hommes. Héphaïstos, sous l'ordre de Zeus, façonna une silhouette féminine à base d'argile et d'eau. Chacun des dieux reçut l'ordre d'apporter une part à la création. Chaque présent divin la rendait fatale aux hommes. Ainsi Minerve lui apprend les arts manuels, Vénus lui donne la beauté et la séduction et Mercure lui enseigne l'art du mensonge. Ainsi Zeus lui donne la vie et la nomme Pandore « celle qui est le don de tous les Dieux ». C'est ainsi que fut créée la première femme mortelle. Ce mythe est décrit chez Hésiode dans *Les travaux et les jours* :

En achevant ces mots, le père des dieux et des hommes sourit et commanda à l'illustre Vulcain de composer sans délais un corps, en mélangeant de la terre avec l'eau, de lui communiquer la force et la voix humaine, d'en former une vierge douée d'une beauté ravissante et semblable aux déesses immortelles ; il ordonna à Minerve de lui apprendre les travaux des femmes et l'art de façonner un merveilleux tissu, à Vénus à la parure d'or de répandre sur sa tête la grâce enchanteresse, de lui inspirer les violents désirs et les soucis dévorants, à Mercure, messager des dieux et meurtrier d'Argus, de remplir son esprit d'impudence et de perfidie. Tels furent les ordres de Jupiter, et les dieux obéirent à ce roi, fils de Saturne. Aussitôt l'illustre Vulcain, soumis à ses volontés, façonna avec de la terre une image semblable à une chaste vierge ; la déesse aux yeux bleus, Minerve, l'orna d'une ceinture et de riches vêtements ; les divines Grâces et l'auguste Persuasion lui attachèrent des colliers d'or, et les Heures à la belle chevelure la couronnèrent des fleurs du printemps. Minerve entoura tout son corps d'une magnifique parure. Enfin le meurtrier d'Argus, docile au maître du tonnerre, lui inspira l'art du mensonge, les discours séduisants et le caractère perfide. Ce héraut des dieux lui donna un nom et l'appela Pandore, parce que chacun des habitants de l'Olympe lui avait fait un présent pour la rendre funeste aux hommes industrieux⁸⁶.

Une autre mention de Pandore apparaît chez Hygin :

85. Homère, *Iliade*, 18, 468-473, texte établi et traduit par P. Mazon, Paris, Les Belles Lettres, 1995.

86. Hésiode, *Les travaux et les jours*, 60-64, texte traduit par P. Mazon, Paris, Les Belles Lettres, 2004.

A la suite de ce geste Jupiter ne voulut pas être en reste vis-à-vis des mortels et leur confia une femme que façonna Vulcain et que la faveur des Dieux combla de tous les bienfaits ; aussi l'appela-t-on Pandore⁸⁷.

2.2.1.7 Talos, le géant de bronze

Ce mythe est raconté dans *La Bibliothèque* d'Apollodore. Talos est un géant de bronze chargé de garder l'île de Crète. Pour monter la garde il effectue trois fois le tour de l'île dans la journée.

Ils [les Argonautes] repartent et sont empêchés d'aborder en Crète par Talos. Selon les uns, il appartenait à la race de bronze, selon d'autres, il avait été donné à Minos par Héphaïstos. C'était un homme en bronze, ou bien, selon d'autres, un taureau. Il avait une veine unique qui allait de son cou à ses chevilles, et à l'extrémité de la veine était enfoncé un clou en bronze. Ce Talos faisait trois fois par jour le tour de l'île au pas de course pour monter la garde. Aussi quand cette fois-ci il aperçut l'Argo qui se dirigeait vers l'île, se mit-il, à lui jeter des pierres. Mais il succomba aux ruses de Médée. Selon certains, Médée l'aurait rendu fou avec des drogues, selon quelques autres, elle lui aurait promis de le rendre immortel et lui aurait enlevé le clou, si bien qu'il serait mort en se vidant de son humeur⁸⁸.

2.2.1.8 Les taureaux donnés à Aiètès

Dans la mythologie, Aiètès, roi de Colchide, est le fils d'Hélios (le « soleil ») et de l'Océanide Persée. L'automate présenté s'inscrit dans le cadre du mythe de Jason et de la toison d'or. Le roi promet à Jason de lui fournir cette toison s'il arrive à dompter ses taureaux. Il s'agit de deux taureaux métalliques forgés par Héphaïstos et donnés par le dieu à Aiètès. Ils sont faits de bronze et crachent du feu. *La Bibliothèque* d'Apollodore nous décrit précisément ces animaux d'acier :

Aiètès promet de la lui donner [la toison] si, à lui tout seul, il mettait sous le joug les taureaux aux pieds d'airain. C'était deux taureaux sauvages d'une taille énorme, qu'il avait chez lui et qui étaient un cadeau d'Héphaïstos. Leurs sabots étaient de bronze et leur gueule soufflait du feu.⁸⁹

Une autre mention de ces taureaux est faite par Nonnos de Panapolis :

87. Hygin, *L'Astronomie*, 2, 15, 3, texte établi et traduit par A. Le Boeuffe, Paris, Les Belles Lettres, 1983.

88. Apollodore, *La Bibliothèque*, 139-142, texte établi et traduit par J.C. Carrière et B. Massonie, Paris, Diffusé par Les Belles Lettres, Annales littéraires de l'Université de Besançon, 1991.

89. Apollodore, *La Bibliothèque*, 126-132, texte établi et traduit par J.C. Carrière et B. Massonie, Paris, Diffusé par Les Belles Lettres, Annales littéraires de l'Université de Besançon, 1991.

[...] de même que pour Aiètès, le puissant souverain des Colques, il [Héphaïstos] modela l'attelage d'une paire de taureaux aux sabots d'airain auquel il fabriqua des rênes brûlantes et un timon incandescent⁹⁰.

2.2.1.9 Le chien destiné à Zeus

Ce mythe est mentionné par Apollodore et nous apprend que Zeus possédait un chien, forgé par Héphaïstos :

Il existait aussi pour ce chien un arrêt du destin, selon lequel il attraperait tout ce qu'il poursuivrait. Dans ces conditions, lorsque le renard fut poursuivi par le chien, Zeus les changea en pierre l'un et l'autre.⁹¹

2.2.1.10 Les musiciennes en or du temple d'Apollon

Pausanias nous indique que Pindare avait observé des musiciennes en or chanter suspendues à la sortie du temple d'Apollon à Delphes. Cependant il affirme ne pas être d'accord avec lui et qu'il s'agit seulement du fruit de son imagination :

Au surplus, je ne crois ni que ce temple fût l'ouvrage de Vulcain, ni qu'il y eût des chanteuses en or ; comme le dit Pindare en ces termes : Des musiciennes en or chantaient suspendues à la sortie du temple. Je pense qu'il a imaginé cela d'après les Sirènes d'Homère. On n'est point d'accord sur la manière dont ce temple fut détruit ; les uns veulent en effet qu'il ait été englouti par la terre ; suivant d'autres, il fut mis en fusion par le feu⁹².

2.2.1.11 Les chevaux forgés pour le char des Cabires

Comme pour les taureaux d'Aiètès, les chevaux d'airain sont façonnés par Héphaïstos et crachent une flamme. Ces chevaux servent d'attelage au char des Cabires. Dans la mythologie grecque, les Cabires sont les fils d'Héphaïstos. Nonnos de Panopolis nous décrit la scène :

Leur char est en acier. Ses deux chevaux font sonner la poussière en la martelant de leurs sabots d'airain et vomissent de leur gosier un hennissement assoiffé : c'est leur père qui a forgé avec un art inimitable ces bêtes qui soufflent entre les dents une flamme menaçante, de même que pour Aiètès, le

90. Nonnos de Panopolis, *Les Dionysiaques*, 29, 197-210, texte établi et traduit par F. Vian, Paris, Les Belles Lettres, 1950.

91. Apollodore, *La Bibliothèque*, 58-60, texte établi et traduit par J.C. Carrière et B. Massonie, Paris, Diffusé par Les Belles Lettres, Annales littéraires de l'Université de Besançon, 1991.

92. Pausanias, *Description de la Grèce*, 10, 5, 12, texte traduit par M. Clavier, Paris, Société royale académique des Sciences, 1821.

puissant souverain des Colques, il [Héphaïstos] modela l'attelage d'une paire de taureaux aux sabots d'airain auquel il fabriqua des rênes brûlantes et un timon incandescent⁹³.

2.2.2 Les automates dans la littérature mythologique latine

2.2.2.1 L'aigle fabriqué pour Jupiter [Zeus]

L'aigle que Jupiter utilisa pour punir et manger le foie de Prométhée chaque jour est issu du travail de Vulcain [Héphaïstos]. Hygin nous raconte la punition de Prométhée et l'utilisation par Jupiter de L'aigle :

Quant à Prométhée, Jupiter l'attacha avec une chaîne de fer sur une montagne de Scythie, nommée Caucase ; il y est enchaîné pour trente mille ans selon Eschyle, auteur tragique. De plus, il lui envoya un aigle qui sans cesse devait ronger son foie renaissant chaque nuit. Cet aigle d'après certains récits, était né de Typhon et d'Echidna, d'après d'autres de la Terre et du Tartare ; d'après la plupart, il fut façonné des mains de Vulcain et Jupiter, dit-on, lui donna la vie⁹⁴.

2.2.2.2 Pygmalion et Galatée

Le mythe de Pygmalion part du même principe que celui de Pandore. Pygmalion réalisa en ivoire une jeune femme dont il tomba éperdument amoureux. Lors de la fête à Venus à Chypre, il supplia Vénus par la prière de donner vie à son œuvre. Quelques jours plus tard, lorsqu'il embrasse sa création, celle-ci vient à la vie. Il remercie la déesse qui assiste à leur mariage, fruit de sa création. Une description est fournie par Ovide :

[...] Cependant, grâce à une habileté merveilleuse, il [Pygmalion] réussit à sculpter dans l'ivoire blanc comme la neige un corps de femme d'une telle beauté que la nature n'en peut créer de semblable et il devient amoureux de son œuvre. C'est une vierge qui a toutes les apparences de la réalité ; on dirait qu'elle est vivante et que, sans la pudeur qui la retient, elle voudrait se mouvoir ; tant l'art se dissimule à force d'art. Émerveillé, Pygmalion s'enflamme pour cette image ; souvent il approche ses mains du chef-d'œuvre pour s'assurer si c'est là de la chair ou de l'ivoire et il ne peut encore convenir que ce soit de l'ivoire. Il donne des baisers à sa statue et il s'imagine qu'elle les rend ; il lui parle, il la serre dans ses bras ; il se figure que la chair cède au contact de

93. Nonnos de Panopolis, *Les Dionysiaques*, 29, 197-210, texte établi et traduit par F. Vian, Paris, Les Belles Lettres, 1950.

94. Hygin, *L'Astronomie*, 2, 15, 3, texte établi et traduit par A. Le Boeuffe, Paris, Les Belles Lettres, 1983.

ses doigts et il craint qu'ils ne laissent une empreinte livide sur les membres qu'ils ont pressés ; tantôt il caresse la bien-aimée, tantôt il lui apporte ces cadeaux qui plaisent aux jeunes filles [...]. Le jour était venu où Chypre toute entière célébrait avec éclat la fête de Vénus [...]; alors, après avoir déposé une offrande, Pygmalion, debout devant l'autel, dit d'une voix timide : « O dieux, si vous pouvez tout accorder, donnez-moi pour épouse, je vous en supplie, (il n'ose pas dire : la vierge d'ivoire) une femme semblable à la vierge d'ivoire ». Vénus, parée d'or, qui assistait elle-même à sa fête, comprit ce que signifiait cette prière ; présageant les dispositions favorables de la déesse, trois fois la flamme se ralluma et dressa sa crête dans les airs. De retour chez lui, l'artiste va vers la statue de la jeune fille ; penché sur le lit il lui donne un baiser ; il croit sentir que ce corps est tiède. De nouveau il en approche sa bouche, tandis que ses mains tâtent la poitrine ; à ce contact, l'ivoire s'attendrit ; il perd sa dureté, il fléchit sous les doigts ; il cède ; [...]. L'amant reste saisi ; il hésite à se réjouir, il craint de se tromper ; sa main palpe encore l'objet de ses désirs ; c'était bien un corps vivant ; il sent les veines palpiter au contact de son pouce. Alors le héros de Paphos adresse à Vénus de longues actions de grâces ; sa bouche presse enfin une bouche véritable ; la jeune fille a senti les baisers qu'il lui donne et elle a rougi [...]. La déesse assiste à leur mariage, qui est son œuvre⁹⁵.

2.3 Les traités techniques de l'antiquité contenant des descriptions d'automates

2.3.1 Introduction

Durant l'Antiquité, des ingénieurs mécaniciens travaillent sur la pneumatique et la science des automates et rédigent des traités. Les seules œuvres qui nous sont parvenues, pour certaines de façon fragmentaire, sont celles de Philon de Byzance et d'Héron d'Alexandrie. En étudiant ces textes, on s'aperçoit que chaque savant avait son influence. Philon et Vitruve par exemple nous parlent de Ctésibios, dont il nous reste plus rien aujourd'hui.

95. Ovide, *Les Métamorphoses*, 10, 243-297, texte établi et traduit par G. Lafaye, Paris, Les Belles Lettres, 2002.

2.3.2 Les *Pneumatiques*

Nous parlons des *Pneumatiques* comme étant une des références pour l'étude des automates antiques. Cependant ces traités techniques ne sont apparus qu'en 1870 dans le monde scientifique moderne avec la traduction en latin d'un fragment de l'œuvre de Philon de Byzance par V. Rose dans ses *Anecdota graeca et graecolatina*⁹⁶ à partir d'une version du texte en arabe.

Pour la première traduction française de cette œuvre, il faut attendre 1882 avec A. De Rochas d'Aiglun⁹⁷ qui l'édite avec une désignation plus correcte de *Fragment des Pneumatiques de Philon de Byzance* dans la *Science des philosophes et l'art des thaumaturges*.

En 1899, W. Schmidt publie une réédition des *Pneumatiques* latines avec une traduction allemande et l'ajout de figures plus explicites que ses prédécesseurs à la fin du premier volume de son édition des œuvres d'Héron d'Alexandrie⁹⁸.

Il faut attendre 1854 pour la découverte de deux autres fragments importants des ouvrages de Philon de Byzance qui se trouvaient dans un manuscrit arabe de la bibliothèque bodléienne d'Oxford (N° 954, Marsh 669). Ce manuscrit contient tout un livre de 24 articles, sous le titre de *Pneumatiques de Philon*. C'est Th. H. Martin lors de son étude sur *Les Recherches sur la vie et les ouvrages de Héron*[d'Alexandrie]⁹⁹ qui a remarqué le titre général du manuscrit :

Cela est ce qu'a extrait Héron du livre de Philon et d'Archimède les Grecs, sur la traction des fardeaux, les [horloges] à balles, les [conduites d'] eau, les chambres [à flotteurs] et autres choses analogues.

Le Baron B. Carra de Vaux, dans l'introduction de son édition des *Pneumatiques*¹⁰⁰ de Philon de Byzance, décrit ainsi le manuscrit d'Oxford¹⁰¹ :

— Fol. 1, le titre général.

96. V. Rose, *Anecdota graeca et graecolatina : Mitteilungen aus Handschriften zur Geschichte der griechischen Wissenschaft*, Berlin, F.Duemmler, 1870.

97. A. De Rochas d'Aiglun, *La science des philosophes et l'art des thaumaturges dans l'antiquité*, Paris, Dorbon-Airé, 1912.

98. W. Schmidt, *Heronis Alexandrini Opera quae supersunt omnia*, Leipzig, B.G. Teubner, 1899.

99. Th. H. Martin, *Recherches sur la vie et les ouvrages d'Héron d'Alexandrie, disciple de Ctésibius, et sur tous les ouvrages mathématiques grecs, conservés ou perdus, publiés ou inédits, qui ont été attribués à un auteur nommé Héron*, Paris, Imprimerie impériale, 1854.

100. B. Carra de Vaux, *Le livre des appareils pneumatiques et des machines hydrauliques par Philon de Byzance ; édité d'après les versions arabes d'Oxford et de Constantinople*, Paris, Imprimerie nationale, 1903, p.29.

101. Intitulé *Recueil anonyme d'Oxford* par le Baron B. Carra de Vaux.

- Fol. 2 à 6, sous le titre : *Premier recueil d'appareils et de machines* , 2 pompes et un vase à 4 liquides.
- Fol. 6 à 18, sous le titre : *Livre des roues qui se meuvent d'elles-mêmes*, un recueil d'appareils à mouvement perpétuel.
- Fol. 19 à 21, un fragment sur les clepsydes, construction des horloges à balles et à bec de corbeau.
- Fol. 22 à 25, un autre fragment sur les clepsydes.
- Fol. 26 à 48, Le Recueil anonyme.
- Fol. 49 à 92, Le livre des *Pneumatiques* de Philon.
- Fol. 93, blanc.
- Fol. 94, trois lignes déplacées.
- Fol. 95, le début d'un traité des clepsydes attribué à Archimède, et dédié, comme l'œuvre de Philon, à Ariston.

Voici ce que dit B. Carra de Vaux de la composition de ce manuscrit et de sa date approximative : « Ce manuscrit est donc, comme composition générale, fort dérangé. D'autre part, les figures y sont mauvaises, abstraction faite de quelques détails d'ornementation pittoresques, et elles manquent même dans toute une partie de l'oeuvre de Philon, du N^o 42 au N^o 54 de notre édition. Avec cela, le texte n'est pas fort mauvais, et les mots difficiles ou techniques y sont relativement bien écrits. Le manuscrit n'est pas daté. Il doit être postérieur à l'an 755 de l'hégire, à cause d'une note où est reproduit l'alphabet magique du livre de Bédi ez-Zaman. Ce livre est je suppose celui de Constantinople. Le manuscrit d'Oxford n'a pas un cachet de haute antiquité¹⁰² ».

Il existe deux autres manuscrits (N^o 2755 et N^o 3713), d'une plus grande valeur pour la traduction, disponibles à la Bibliothèque de Sainte-Sophie d'Istanbul.

Le manuscrit 2755 est un recueil de mécanique assez similaire à celui d'Oxford, mais beaucoup plus ordonné et dont chaque partie est plus complète :

- Les *Mécaniques* de Héron d'Alexandrie.
- Le *Livre des roues qui se meuvent d'elles-mêmes*.
- Un *Traité sur les orgues*.
- Un autre *Traité sur les orgues*.

102. B. Carra de Vaux, *Le livre des appareils pneumatiques et des machines hydrauliques par Philon de Byzance ; édité d'après les versions arabes d'Oxford et de Constantinople*, Paris, Imprimerie nationale, 1903, p.29.

— Les *Pneumatiques* de Philon de Byzance.

Le manuscrit 3713 ne renferme que les *Pneumatiques* de Philon de Byzance. Il est le plus ancien et le meilleur. Cependant les deux manuscrits ne sont pas datés. Le Baron B. Carra de Vaux a fondé son édition des *Pneumatiques* sur le manuscrit N° 3713.

W. Schmidt présente un total de 100 manuscrits qui renferment les *Pneumatiques* d'Héron d'Alexandrie. Ces manuscrits sont presque tous issus de la Renaissance, ce qui montre l'intérêt que portaient les ingénieurs de l'époque pour les travaux du mécanicien.

W. Schmidt catégorise les *Pneumatiques* en deux recensions :

- une « ancienne » (Die « ältere Recension », p.3).
- une « récente » (Die « jüngere Recension », p.44).

Le manuscrit le plus important de la recension ancienne est le *Marcianus* 516, f. 162-196^r désigné par le sigle **A** par W. Schmidt (qui date du XIII^e siècle). Ce manuscrit est offert à l'église Saint-Marc par le cardinal Bessarion¹⁰³. 12 autres manuscrits sont présentés par W. Schmidt dans la recension ancienne, et parmi eux, celui désigné par la lettre **G**, le *Gudianus gr.* 13 (Woffenbüttel, Herzog August Bibliothek) qui a appartenu à M. Macigni, ingénieur mathématicien vénitien du XVI^e siècle. Ce manuscrit, très illustré, témoigne des nombreuses hypothèses de restitutions présentées par les ingénieurs durant la Renaissance.

Dans la recension récente, W. Schmidt présente les quatre manuscrits qui regroupent des figures intéressantes :

- le *Vaticanus Barberinianus gr.* I 162, f. 106^r-163^r (daté de 1499), désigné par la lettre **B**.
- le *Constantinopolitanus* 19, f. 156^r-238^v (XV^e siècle), désigné par la lettre **C**.
- le *Parisinus gr.* 2515 (XVI^e siècle), désigné par la lettre **P**.
- le *Parisinus lat.* 10261 (XV^e siècle), désigné par la lettre **L**.

Héron d'Alexandrie a une certaine originalité par rapport à Philon de Byzance. En général Philon est un peu plus simple que Héron et ses appareils sont plus primitifs ; sa rédaction est plus sobre et plus brève. Les *Pneumatiques* de Philon de Byzance répondent bien à ce que nous dit Vitruve de l'œuvre de Ctésibios (on aperçoit l'influence peu éloignée de cet homme).

103. H. Omont, *Inventaire des manuscrits grecs et latins donnés à Saint-Marc de Venise par le cardinal Bessarion (1468)*, Paris, Revue des Bibliothèques, 1894, p.159.

2.3.2.1 Les *Pneumatiques* de Philon de Byzance

Un bon nombre de machines sont décrites dans ce traité. On remarque que Philon utilise et améliore des mécanismes de clepsydres et automates créés par Ctésibios. Certains mécanismes sont présents dans le but de démontrer et d'autres dans le but d'amuser l'auditoire.

Ainsi les appareils pneumatiques 30, 31, 32, 33, 34, 35, 40, 41, 42, 57, 58 et 59 de Philon de Byzance peuvent être décrits comme étant des « automates ».

2.3.2.2 Les *Pneumatiques* d'Héron d'Alexandrie

Comme l'a fait Philon avec son prédécesseur Ctésibios, Héron récupère et personnalise les machines de Philon comme le souligne B. Carra de Vaux et G. Argoud. Héron indique au début de son traité, utiliser et moderniser des machines transmises par les « anciens » sans les citer :

L'étude de la pneumatique ayant suscité l'intérêt des anciens, philosophes et mécaniciens, dont les premiers ont déduit les propriétés de l'air suivant les règles du raisonnement, et les seconds par l'action des choses sensibles, nous pensons nécessaire de mettre en ordre nous aussi ce qui a été transmis par les anciens, tout en y ajoutant nos propres découvertes¹⁰⁴.

Héron décrit en deux livres des mécanismes pneumatiques qui peuvent être utilisés dans divers usages, notamment les fontaines à intermittence. Héron est érudit en matière de mise en scène mécanique.

On peut considérer comme « automates » les mécanismes suivants présents dans les *Pneumatiques* d'Héron d'Alexandrie :

- Livre I, 12, 15, 16, 17, 21, 29, 30, 31, 37, 38, 39, 41.
- Livre II, 3, 4, 5, 10, 15, 21, 32, 34, 35, 36, 37.

2.3.3 Les *Automata* d'Héron d'Alexandrie

2.3.3.1 Introduction

Le traité grec *Herônos Alexandreôs Automatopoiika* tient une place importante dans l'histoire du théâtre antique. Il existe plusieurs éditions de ce traité. La première est

104. Pneum, 1, introduction (traduction G. Argoud et J.Y. Guillaumin).

celle de B. Baldi en 1589¹⁰⁵. Vient ensuite, un siècle plus tard, en 1693, l'édition de M. Thévenot¹⁰⁶ qui est la plus complète à cette époque. La dernière version à paraître est celle de W. Schmidt en 1903¹⁰⁷. Les différentes versions, qu'elles soient italiennes, françaises ou allemandes, sont le fruit d'une étude de nombreux manuscrits répartis dans les principales bibliothèques d'Europe. En France, la bibliothèque de Paris dispose de sept copies du traité. Les sept manuscrits, numérotés de P1 à P7, sont tous relatifs aux *Automata* d'Héron d'Alexandrie et sont rangés par ordre chronologique :

- P1 = 2428 (*Olim* 2169, *Trichetianus*) - XV^e siècle.
- P2 = 2430 (*Olim* 2169₃, *Regius*) - XVI^e siècle.
- P3 = 2432 (*Olim* 2722, *Regius*) - XVI^e siècle.
- P4 = 2434 (*Olim* 1637, *Colbertinus* et 2723 *Regius*) - XVI^e siècle.
- P5 = 2519 (*Olim* 3195, *Mazarineus*) - XVI^e siècle.
- P6 = 2520 (*Olim* 4083, *Colbertinus* et 3192 *Regius*) - XVI^e siècle.
- P7 = 11 suppl. grec (*Olim inter Salmasii libros notris*) - XVI^e siècle.

Une note annexée à la préface des *Mathematicii veteres* de Thévenot nous indique que le texte publié dans cette édition est issue des manuscrits 2169, 2722 et 3195, qui dans le catalogue actuel renvoient à P1 = 2428, P3 = 2432 et P5 = 2519. Les manuscrits P1, P2 et P6 sont les seuls à contenir des figures. Toutes les copies, quelque soit le manuscrit, renferment un titre unique : *Herónos Alexandreeôs peri Automatopoiêtikôn*.

Les sept manuscrits parisiens, ainsi que celui de la bibliothèque du Vatican suivi par Baldi, sont issus d'un original unique. Une lacune est d'ailleurs visible dans toutes les copies dans l'édition des *Mathematicii veteres* à la page 266 ligne 24.

Th. Henri Martin¹⁰⁸ affirme que l'opuscule grec est complet, ce que Baldi avant lui confirmait aussi. Cette œuvre d'Héron d'Alexandrie est divisée en deux parties. Une partie destinée aux « théâtres automatiques à base mobile » et l'autre destinée aux « théâtres automatiques à base fixe ». Ces deux familles d'automates ont un cœur commun, composé

105. B. Baldi, *Erone Alessandrino degli automati ovvero macchine semoventi*, Milan, Ristompe anastatische, 1962.

106. M. Thévenot, *Veterum mathematicorum Athenæi, Bitonis, Apollodori, Heronis, Philonis et aliorum opera, græce et latine pleraque nunc primum edita. Ex manuscriptis codicibus Bibliothecæ regię*, Paris, Typographia regia, 1693.

107. W. Schmidt, *Heronis Alexandrini Opera quae supersunt omnia*, Leipzig, Teubner, 1903.

108. Th. H. Martin, *Recherches sur la vie et les ouvrages d'Héron d'Alexandrie, disciple de Ctésibius, et sur tous les ouvrages mathématiques grecs, conservés ou perdus, publiés ou inédits, qui ont été attribués à un auteur nommé Héron*, Paris, Imprimerie impériale, 1854.

d'un moteur actionné par la descente d'un contrepoids¹⁰⁹. Héron cite deux de ses prédécesseurs, Archimède et Philon de Byzance pour expliquer qu'il ne répétera pas leurs travaux sur les automates. Pour son théâtre automatique à base fixe, Héron adapte, comme Philon avant lui, la légende de Nauplius. Ainsi il reconnaît dans son œuvre « mainte variété de mise en scène ingénieusement agencée ». Il signale tout de même des lacunes, qu'il considère comme « aisément réparables à l'aide de moyens connus ». V. Prou nous rappelle que « chez les ingénieurs de l'Antiquité, une stricte impartialité à l'égard des prédécesseurs ou des rivaux en matière d'invention paraît avoir été une règle de conduite professionnelle »¹¹⁰.

Tous les théâtres d'automates sont agencés de la même manière ; ils ne diffèrent entre eux que par les sujets de représentation. Chaque animation est le fruit d'un mouvement de corde tiré par le contrepoids moteur.

2.3.3.2 Modèle de théâtre automatique à base « mobile »

Le théâtre automatique à base mobile a pour but d'émerveiller et de divertir le public présent au spectacle. En effet au début de la représentation, le théâtre se met en marche jusqu'à un point donné, s'anime et réalise sa scénographie, puis de nouveau il reprend sa place initiale. Ce théâtre n'est pas construit en très grandes dimensions. Héron nous explique que la faible taille de l'ouvrage permet « d'ôter la suspicion de présence d'un opérateur à l'intérieur ». Ce décor met en scène l'apothéose de Bacchus. Huit moments clés sont nécessaires pour étonner le spectateur :

1. Le théâtre se met en marche jusqu'à un point déterminé où il s'arrête.
2. L'autel (situé en avant de Bacchus) s'allume et du lait ou de l'eau jaillit de son thyrses, tandis que sa coupe verse du vin sur la panthère.
3. Les quatre faces du soubassement se ceignent de couronnes.
4. Au bruit des tambours et cymbales, les bacchantes dansent en rond autour de l'édicule.
5. Le bruit ayant cessé, Bacchus et la victoire font ensemble volte-face.

109. Vitruve, *De l'Architecture*, 9, 8, texte établi et traduit par J. Soubiran, Paris, Les Belles Lettres, 1969.

110. V. Prou, *Les théâtres d'automates en Grèce au II^e siècle avant l'ère chrétienne d'après les Αυτοματωποικα d'Héron d'Alexandrie*, Paris, Imprimerie nationale, 1884, p.121-122.

6. L'autel situé derrière le dieu se trouve alors amené en avant et s'allume à son tour avec un nouvel épanchement du thyrses et de la coupe ainsi qu'une nouvelle danse des bacchantes.
7. La danse achevée, le théâtre revient à sa position première.
8. Fin de l'apothéose de Bacchus.

Ces deux séries d'effets automatiques qui sont à la fois identiques et réciproques, sont agencés par le mécanisme interne du contrepoids moteur. Cela suppose donc que le public assistant à la représentation, soit placé dans un cercle rapproché, c'est ce que laisse entendre Héron :

Montrer de près et dans tous les sens, au public, les multiples détails, d'un attrayant spectacle, tel fût sans doute, l'objet du théâtre mobile, limité, comme on vient de le voir, à une scène unique¹¹¹.

2.3.3.3 Modèle de théâtre automatique à base « fixe »

Ce modèle de théâtre automatique d'Héron d'Alexandrie est le plus connu et le plus complexe mécaniquement. Il s'agit d'une représentation scénique en cinq actes, séparés à huit clos par autant de changements de décors. Au début, les portes du théâtre s'ouvrent ; on aperçoit douze personnages animés, regroupés en trois groupes, qui scient et coupent le bois. Ils s'agit de Grecs qui travaillent à la construction de navires. Même le bruit des coups de marteau est retransmis, comme si de véritables ouvriers en étaient à l'origine. Au bout d'un laps de temps défini par un système de cordage enroulé autour d'un essieu, la scène se ferme et s'ouvre de nouveau. Un décor différent apparaît. Cette scène représente le lancement des navires, suivi d'un nouveau tableau qui montre le défilé des navires sur une mer d'huile. Sur les côtés on peut remarquer la présence de dauphins qui sautent et plongent. Toujours après un laps de temps connu, le décor change et la mer devient houleuse et les navires filent toutes voiles rentrées. Nauplius apparaît brandissant une torche, et Minerve est présente à ses côtés. Le décor suivant montre le naufrage de la flotte sur des rochers. Ajax tombe à l'eau et est contraint à la nage. Un coup de tonnerre se fait entendre (un mécanisme est caché dans la base du théâtre) et la foudre le frappe. Il disparaît. Alors la scène se referme une dernière fois en mettant fin à la représentation.

111. Hero Mec., *Automata*, 1, 1.

Pour résumer cette représentation scénique en cinq actes, nous pouvons définir un récapitulatif en huit périodes :

1. Ouverture des portes du théâtre.
2. Scène 1 : Les grecs travaillent à la construction des navires.
3. La scène se ferme puis s'ouvre à nouveau [1^{er} entracte]¹¹².
4. Scène 2 : Lancement des navires [2^e entracte].
5. Scène 3 : Défilé des navires [3^e entracte].
6. Scène 4 : Apparition de Minerve et Nauplius [4^e entracte].
7. Scène 5 : Naufrage de la flotte et apparition d'Ajax.
8. Fermeture des portes de la scène et fin de la représentation.

Ce système de représentation en cinq actes d'une pièce de théâtre ressemble fortement aux représentations théâtrales modernes.

2.3.4 Le *De architectura* de Vitruve

Le *De architectura* est le traité d'architecture de Vitruve, publié en latin vers 25 avant J.-C., et dédié à l'empereur Auguste. Pour l'étude des automates antiques, il est essentiel d'étudier ce traité qui fait un état de l'art des connaissances mécaniques au I^{er} siècle avant J.-C. Héron d'Alexandrie étant postérieur à Vitruve, celui-ci ne peut pas le connaître et le citer. Cependant Vitruve mentionne les créations automatiques de Ctésibios et de Philon de Byzance. En faisant référence seulement aux machines utilitaires, il fait l'impasse sur les machines dédiées à l'amusement du public par choix :

J'ai retenu, parmi ces inventions, celles que j'ai estimées particulièrement utiles et nécessaires, et j'ai cru devoir parler, dans le livre précédent, des horloges, dans celui-ci des systèmes d'élévation de l'eau. Quant aux autres inventions qui répondent, non pas à une nécessité, mais à une recherche d'amusement, ceux que passionne cette ingéniosité pourront le découvrir dans les commentaires de Ctésibios lui-même¹¹³.

Lorsqu'il parle de Ctésibios, il décrit les horloges à eau et les débuts de l'hydraulique :

112. On appelle ici entracte, la liaison de deux scènes par la fermeture et l'ouverture des portes du théâtre

113. Vitruve, *De l'Architecture*, 10, 7, 5, texte établi et traduit par L. Callebaut, Paris, Les Belles Lettres, 2003.

Ces mêmes auteurs ont cherché aussi dans l'utilisation de l'eau un moyen de réaliser des horloges, et, en premier lieu, Ctésibius d'Alexandrie, qui découvrit aussi la puissance de l'air ordinaire et la pneumatique¹¹⁴

2.4 Les automates tardifs de l'empire byzantin

2.4.1 Le *traité des automates* de l'Arabe Al-Djazari

L'étude de ce traité du XII^e siècle après J.-C. permet de montrer que bien après l'Antiquité les mêmes principes de mécanismes sont repris et améliorés.

L'inventeur et ingénieur Al-Jazarī a vécu au XII^e siècle (1136-1206) dans une région située sur le territoire actuel de la Turquie. Au service du Sultan Nasir al-Din Mahmoud, ce savant arabo-musulman publie le traité *Combiner la science avec le travail profitable en mécanique* (souvent traduit par *Le livre de la connaissance des procédés mécaniques*). Il décrit ses propres inventions et leurs systèmes mécaniques. Certains de ces automates sont conçus avec un but utilitaire (médical par exemple, pour mesurer la quantité de sang prélevée lors d'une saignée), d'autres avec l'unique but de divertir.

Il invente et réalise, entre autres choses :

- une horloge automatisée hydraulique en forme d'éléphant à taille réelle.
- un calculateur analogique (ancêtre de la machine à calculer).
- de nombreux automates, dont un orchestre actionné par une clepsydre.
- une fontaine ornée de paons et servants humanoïdes, offrant aux hôtes savons et serviettes pour se laver les mains.

Le traité d'Al-Jazarī est reconnu dans le monde comme étant le plus complet sur la science des automates. Il existe différents manuscrits contenant cette œuvre :

- Ms. Ar. 2477, Paris, Bibliothèque nationale de France.
- Ms. Ar. 5101, Paris, Bibliothèque nationale de France.
- Ms. Frazer 186, Oxford, Bodleian University Library.
- Ms. Graves 27, Oxford, Bodleian University Library, f. 2a-98a.
- Ms. 4187, Dublin, Chester Beatty Library.
- Ms. Or. 117, Leiden, Universiteitsbibliotheek.
- Ms. Or. 656, Leiden, Universiteitsbibliotheek.

114. Vitruve, *De l'Architecture*, 9, 8, 2, texte établi et traduit par J. Soubiran, Paris, Les Belles Lettres, 1969.

- Ms. Or. 1025, Leiden, Universiteitsbibliotheek.
- Ms. Or. 1026, Leiden, Universiteitsbibliotheek.
- Ms. A. 3606, Istanbul, Topkapi Saray.
- Ms. A. 3472, Istanbul, Topkapi Saray.

2.5 Les autres sources

2.5.1 Les sources iconographiques

Il faut recentrer la recherche iconographique aux automates des traités techniques des différents ingénieurs. En effet les représentations des objets et créatures animées mythiques sont à écarter. Bien que nombreuse cette iconographie des différents mythes ne nous renseigne pas sur la représentation réelle des automates. Cette étude des mythes nous montre simplement que depuis longtemps, les auteurs sont friands de machines animées remplaçant l'homme dans différentes tâches répétitives et dans les divertissements. Le concept de robot est ainsi bien présent chez les Anciens comme nous le montre cette citation d'Aristote :

En effet, si chaque instrument pouvait, par ordre ou par pressentiment, accomplir son œuvre propre, si, pareilles aux statues légendaires de Dédale ou aux trépieds d'Héphaïstos, qui, au dire du poète, pouvaient d'eux-mêmes entrer dans l'assemblée des dieux, les navettes tissaient d'elles mêmes et les plectres jouaient de la cithare, alors les maîtres d'œuvre n'auraient nul besoin de manœuvres ni les maîtres, d'esclaves¹¹⁵.

Avec cette contrainte, les sources iconographiques représentant des automates sont inexistantes aujourd'hui. Nous disposons seulement de croquis réalisés lors de copies des divers manuscrits à partir du XI^e siècle (cf. Figure 16).

2.5.2 Les sources archéologiques

Les automates antiques ont des mécanismes et une structure métallique (or, argent ou cuivre) si bien qu'une fois désuets, ils sont recyclés et les métaux fondus. A cause de cette construction métallique et de la faible quantité de fabrication, les automates étant réservés à l'élite, les restes archéologiques sont inexistantes.

115. Aristote, *Politique* 1, 4, 3, texte établi et traduit par J. Aubonnet, Paris, Les Belles Lettres, 1960.

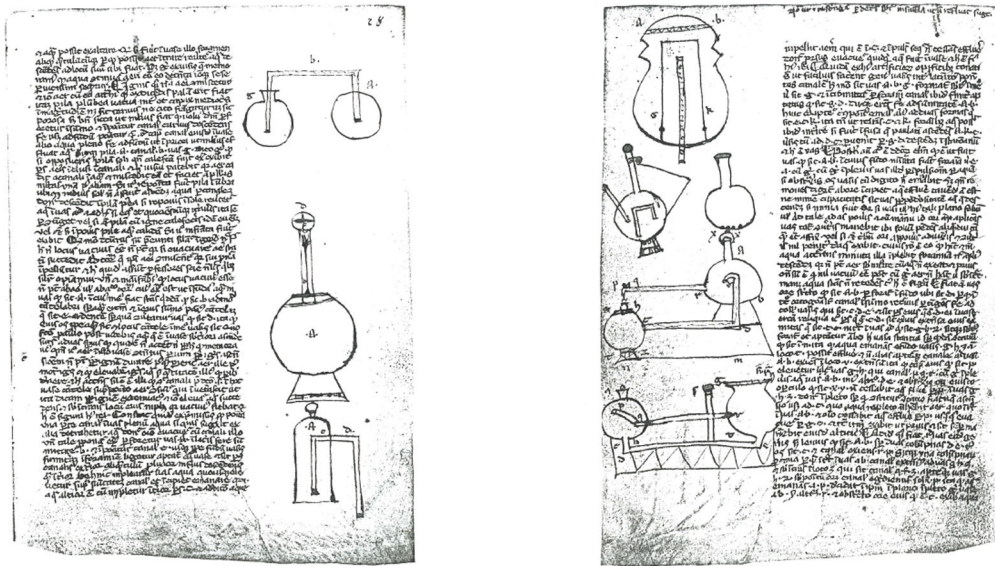


FIGURE 16 – Fragments de manuscrits latins (CLM 534) des *Pneumatiques* de Philon de Byzance comportant des schémas réalisés lors de copies (Cliché F.D. Prager - 1974).

2.6 Conclusion

L'étude des sources anciennes pour les automates antiques n'est pas évidente du fait de l'absence de sources iconographiques et archéologiques. Pour établir une restitution 3D, 4D voire 5D de chaque machine, il faut se référer seulement aux sources textuelles à disposition, qui certes sont tout de même assez détaillées. L'élaboration du plan est la partie qui demande le plus de temps et celle qui nécessite le plus d'attention car elle sera responsable de l'échec ou de la validation de l'hypothèse de restitution. Bien souvent les matériaux de construction sont manquants dans la description des mécanismes, et il faut définir et mettre en contexte l'automate pour les déduire. L'étude des textes antiques permet de comprendre aussi comment les mécanismes s'animent afin de restituer virtuellement et le plus fidèlement possible l'animation de l'appareil. La dernière étape consiste à réaliser un scénario d'utilisation de la machine pour amener une couche d'interactivité à la maquette virtuelle. C'est à ce moment que l'étape de modélisation est effective.

3 | Contextualisation et restitution virtuelle : quelques exemples

3.1 Introduction

Nous l'avons vu, peu de traités techniques antiques décrivant des mécanismes automatiques sont aujourd'hui disponibles. Seuls ceux de Philon de Byzance et de Héron d'Alexandrie nous sont parvenus par des copies grecques et arabes ainsi que par des fragments en latin. Le traité des *Pneumatiques* d'Héron d'Alexandrie regroupe toutes les avancées technologiques sur le mouvement et la compression des fluides sur une période allant du III^e siècle avant J.-C. au I^e siècle après J.-C. Toutes les machines décrites au sein de cet ouvrage ne sont pas des automates, mais sont issues du même mode de fonctionnement.

Parmi les automates de Philon et d'Héron, nous avons choisi d'en restituer cinq : un jeu miniature mettant en scène un des douze travaux d'Héraclès (Héron), une servante automatique distribuant de l'eau et du vin (Philon), la fontaine automatique de la chouette et des oiseaux chanteurs (Héron), un temple miniature où les portes s'ouvrent automatiquement lorsqu'un feu est allumé sur l'autel (Héron) et un théâtre automatique à base mobile illustrant l'apothéose de Bacchus (Héron).

Tout au long de ce chapitre, chaque automate est présenté de la manière suivante :

1. Présentation du texte antique.
2. Présentation d'un schéma du mécanisme.
3. Hypothèse de restitution 3D.
4. Description du mécanisme.
5. Mise en contexte de l'automate.

3.2 Héraclès et Ladon

3.2.1 Source textuelle

Cet automate est décrit dans le paragraphe 41 du livre 1 des *Pneumatiques* d'Héron d'Alexandrie. Comme l'indiquent G. Argoud et J.Y. Guillaumin, il s'agit d'un jeu miniature, où la manette est représentée par une pomme posée sur une base qui déclenche un mécanisme caché. Cet automate ne possède pas d'équivalent dans l'œuvre du mécanicien. Voici la description du mécanisme :

Étant donné une base sur laquelle est placé un petit arbre autour duquel est enroulé un dragon, avec à côté Héraclès tirant à l'arc, et une pomme posée sur la base, si de la main l'on soulève un peu la pomme de la base, Héraclès tirera sa flèche contre le dragon, et le dragon sifflera.

Soit la base en question étanche de toutes parts AB [cf. Figure 21], pourvue d'un diaphragme $\Gamma\Delta$; qu'au diaphragme soit fixé un petit cône tronqué creux EZ, ayant son petit cercle Z ouvert sur le fond, dont il est distant de manière à permettre juste à l'eau de passer. A ce cône tronqué on en ajustera soigneusement un autre Θ , relié par une petite chaîne passant à travers un trou à la pomme K posée sur la base. Héraclès tiendra un petit arc en corne, dont la corde est tendue et à la distance convenable de sa main droite. A l'intérieur de cette main droite, en face du dragon, soit une main semblable en tout point à la main extérieure, excepté qu'elle doit être petite et pourvue d'une détente. De l'extrémité de cette détente part une petite chaîne ou une corde qui, traversant la base, va à une poulie reposant sur le diaphragme, et encore à la petite chaîne reliée au cône et à la pomme.

Ainsi donc, bandons l'arc et, en plaçant la corde dans la main, fermons la détente, de sorte que la corde soit tendue et que la pomme soit tirée vers le bas. La corde doit passer dans le corps et dans le bras à l'intérieur de l'Héraclès. On fera monter du diaphragme au-dessus de la base un petit tube, de ceux dont on se sert pour siffler ; que ce tube soit sous le petit arbre ou près de ce petit arbre. On remplira d'eau le vase $A\Delta$. Et soit le petit arbre ΛM , le petit arc $N\Xi$, la corde $O\Pi$, la main qui reçoit $P\Sigma$, la détente $T\Upsilon$, la corde ΦX , la poulie autour de laquelle vient la corde, X, et le sifflet $\Psi\Omega$. Si donc on soulève la pomme K, on soulèvera en même temps le cône Θ , on tendra la corde $\Upsilon\Phi X$, et on lâchera la main, de sorte que la flèche partira. Et l'eau du vase $A\Delta$, entraînée dans le compartiment $B\Gamma$, chassera par le tuyau l'air contenu dans le compartiment et produira un sifflement. Si l'on repose la pomme, le cône, en venant s'adapter à l'autre, fermera l'écoulement, de sorte que le sifflement cessera. Disposons donc à nouveau la flèche et ce qui

va avec elle, et laissons. Quand le vase ΓΒ sera rempli, on le videra grâce à un goulot muni d'un petit robinet ; et nous remplirons de nouveau ΑΔ comme précédemment.¹¹⁶

L'automate illustre le conflit mythologique entre le demi dieu Héraclès et un dragon. Ce mythe fait partie du onzième des douze travaux d'Héraclès (Hercules) consistant à ramener les pommes d'or du jardin des Hespérides. Un résumé en est donné par P. Grimal dans le *Dictionnaire de la Mythologie grecque et romaine* :

Lors du mariage d'Héra avec Zeus, la Terre, Gaia, avait donné en présent de noces à la déesse des pommes d'or, qu'Héra avait trouvé si belles qu'elle les avait fait planter dans son jardin, auprès du mont Atlas. Et, comme les filles d'Atlas avaient coutume de venir piller ce jardin, elle avait placé les pommes et l'arbre merveilleux qui les portait sous la surveillance d'un gardien, un dragon immortel, à cent têtes, né de Typhon et d'Echidna. Elle avait aussi mis là pour les garder trois Nymphes du soir, les Hespérides, qui s'appelaient Aeglé, Erythie et Hesperaréthousa, c'est à dire : « la Brillante », la « Rouge » et « l'Aréthuse du Couchant », dont les noms rappellent les teintes du ciel lorsque le Soleil disparaît à l'Occident. Ce sont ces pommes d'or qu'Eurysthée enjoignit à Héraclès de lui apporter.

Le jardin des Hespérides est situé tantôt à l'Ouest de la Lybie, tantôt au pied du mont Atlas, tantôt, encore, chez les Hyperboréens.

Le premier souci d'Héraclès fut de s'informer du chemin qui conduisait au pays des Hespérides. Pour cela, il partit vers le Nord, à travers la Macédoine. Il rencontra d'abord en chemin Cycnos, le fils d'Arès, qu'il défit sur les bords de l'Echédoros. Puis il gagna l'Illyrie jusqu'aux rives de l'Eridan, où il rencontra les nymphes du fleuve, filles de Thémis et de Zeus, qui vivaient dans une caverne. Il les interrogea et elles lui révélèrent que le dieu marin Nérée saurait seul le renseigner sur le pays qu'il cherchait. Elles le conduisirent en présence de Nérée pendant le sommeil de celui-ci, et bien que le dieu prit toutes sortes de formes, Héraclès l'attacha solidement et ne consentit à le délivrer que lorsqu'il lui eut dit où se trouvait le jardin des Hespérides. A partir de ce moment, l'itinéraire d'Héraclès devient peu intelligible. [...] Héraclès continua son chemin et parvint enfin chez les Hyperboréens. Il alla alors trouver le géant Atlas, qui portait le ciel sur ses épaules. Il lui offrit de le soulager de son fardeau pendant que le géant irait cueillir trois pommes d'or dans le jardin des Hespérides tout voisin. Atlas y consentit volontiers ; mais, quand il revint, il déclara à Héraclès qu'il irait lui-même porter les pommes à Eurysthée, pendant qu'Héraclès continuerait de soutenir la voûte céleste. Le héros fit semblant d'y consentir. Il demanda seulement à Atlas de le soulager un instant, le temps de glisser un coussin sur ses épaules. Sans méfiance, At-

116. *Pneumatiques*, 1, 41 (trad. G.Argoud / J.Y. Guillaumin)

las accepta. Mais, une fois libéré, Héraclès saisit les pommes, qu'Atlas avait posées à terre, et s'enfuit.

Selon d'autres traditions, Héraclès n'eut pas besoin du secours d'Atlas ; il tua le dragon des Hespérides, ou bien encore l'endormit, et s'empara lui-même des fruits d'or. On raconte aussi que, de désespoir d'avoir perdu les pommes dont elles avaient la garde, les Hespérides furent transformées en arbres : un ormeau, un peuplier et un saule, sous lesquels, plus tard, les argonautes se mirent à l'ombre. Le dragon fut transporté au Ciel, où il devient la constellation du serpent.

Quoi qu'il en soit, une fois en possession des pommes d'or, Héraclès revint les porter fidèlement à Eurysthée. Mais celui-ci, quand il les eut, ne sut pas qu'en faire et les rendit au héros, qui les donna à Athéna. La déesse les reporta dans le jardin des Hespérides, car la loi divine interdisait que ces fruits fussent ailleurs que dans le jardin des dieux¹¹⁷.

Héron d'Alexandrie, lors de la conception de son automate, décide de représenter Héraclès tuant un dragon enroulé autour d'un arbre. Il est évident qu'il parle du dragon du jardin des Hespérides qui protège l'arbre aux pommes d'or. Chez les Grecs, le mot « dragon » vient de *drakon* qui lui-même est issu du verbe *derkomai* qui signifie « voir, percer du regard ». Le dragon est souvent apparenté à un groupe de créatures mythologiques ressemblant à des serpents. Dans les différents mythes, l'emploi des dragons par les dieux, permet de garder un endroit, un trésor ou des lieux sacrés. Dans les textes grecs, *drakon* fait référence au gardien et au serpent de grande taille. Aucune comparaison n'est à faire avec des dragons d'époque moderne qui sont représentés avec des ailes et crachant du feu. Dans l'antiquité, le dragon ne possède ni ailes, ni pattes.

Le dragon du jardin des Hespérides se nomme Ladon. Il est le *drakon* immortel chargé par Héra de garder les pommes d'or. Son apparence varie selon les auteurs mais tout le monde le décrit comme étant un serpent géant. Hygin nous indique qu'il est le fils de Typhon et d'Echidna. Après sa mort, Ladon est placé dans le ciel par Héra et devient la constellation du serpent.

La représentation du mythe des pommes d'or du jardin des Hespérides par Héron permet à un spectateur de se mettre à la place d'Héraclès tuant Ladon, par l'action du mécanisme interne qui est entraîné par le « vol » d'une pomme d'or. Le dragon se met alors à siffler de douleur.

117. P. Grimal, *Dictionnaire de la Mythologie grecque et romaine*, Paris, Presses universitaires de France, 1951, p.195-196.

3.2.2 Hypothèse de restitution

La réalisation 3D de l'automate d'Héraclès et Ladon s'est faite en quatre étapes :

1. Restitution virtuelle d'Héraclès tirant à l'arc.
2. Restitution virtuelle de Ladon gardant les pommes d'or.
3. Restitution du mécanisme interne.
4. Mise en contexte de l'automate.

3.2.2.1 Héraclès tirant à l'arc

Dans le but d'obtenir une restitution plus réaliste de l'automate, une étude iconographique sur la représentation d'Héraclès dans l'antiquité a été effectuée¹¹⁸. La plupart des sources nous montre un Héraclès musclé et nu, disposant d'une barbe assez fournie. Il est également coiffé d'une peau de lion, référence au premier défi le confrontant au Lion de Némée. Comme le montre ce revers de tétradrachme de Thasos (cf. Figure 17), lorsqu'il utilise son arc, Héraclès pose un genou à terre. La restitution virtuelle (cf. Figure 18) est basée sur une statue en marbre de période flavienne (cf. Figure 19).



FIGURE 17 – Héraclès archer, revers d'un tétradrachme de Thasos, première moitié du IV^e siècle avant J.-C., Bibliothèque Nationale de France, Paris, France (Cliché G. Haubold - 2009).

118. Les représentations iconographiques d'Héraclès au jardin des Hespérides sont données en annexe



FIGURE 18 – Statue en marbre d’Héraclès barbu, période Flaviennne, 68-98 après J.-C., Metropolitan Museum of Art , New-York, États-Unis (Cliché Metropolitan Museum of Art).

3.2.2.2 Ladon, gardien du jardin des Hespérides

Ladon est chargé de la garde des pommes d’or du jardin des Hespérides par la Déesse Héra. Par conséquent il doit être positionné aux alentours du pommier sacré, voir même, enroulé autour du tronc, comme nous le rappelle Héron d’Alexandrie dans son texte. Ici, nous avons fait le choix de le représenter sous la forme d’un serpent géant ayant une seule tête au détriment de la centaine décrite par Aristophane¹¹⁹.

Ce *drakon* est ensuite enroulé autour du tronc de l’arbre, et sa tête est dirigée dans la direction d’Héraclès (cf. Figure 20).

119. Aristophane, *Les Grenouilles*, 475, Texte établi par V. Coulon et traduit par H. Van Daele, Paris, Les Belles Lettres, 2012.



FIGURE 19 – Sculpture en trois dimensions d’Héraclès et de son arc (Réalisation J. Nicolle).

3.2.2.3 Mécanisme interne de l’automate

Le fonctionnement du mécanisme interne de l’automate est décrit sur le plan dessiné à partir du traité d’Héron d’Alexandrie (cf. Figure 21). Nous allons voir point par point les différents éléments qui composent la machine.

Tout le système mécanique de l’automate repose sur une base étanche. Cette base, nommée AB par Héron, est séparée en son milieu par un diaphragme. Il s’agit d’une paroi étanche qui permet de diviser la structure en deux réservoirs identiques. Le haut de la base dispose d’un bouchon de remplissage, tandis que le bas du réservoir inférieur possède un robinet de vidange.

Une ouvertue est réalisée au centre du diaphragme et un « cône tronqué creux » y est fixé. La petite ouverture, notée Z, du cône est orientée vers le fond du réservoir. Il reste juste assez de place pour laisser l’eau s’écouler. Dans ce cône est inséré un autre



FIGURE 20 – Restitution virtuelle d'Héraclès et Ladon et du coffrage de l'automate (Réalisation J. Nicolle).

cône, cette fois ci plein. Ce deuxième cône permet de boucher le premier réservoir afin de permettre à l'eau d'y rester. Ce système d'emboîtement de cônes est similaire à celui de nos éviers actuels, où le bouchon nous permet de garder l'eau en place.

Dans l'alignement des cônes, on pose une pomme dorée sur la base de l'automate à l'extérieur. Nous prendrons soin de percer un petit trou en dessous pour pouvoir relier la pomme aux cônes. La pomme servira alors de déclencheur. Une petite chaîne en cuivre relie la pomme à l'extrémité supérieure du cône. Le fait de soulever la pomme entraîne le cône, qui permet à l'eau de s'écouler dans le second réservoir.

Sous la représentation d'Héraclès, et sur le diaphragme, nous installons une petite poulie qui permet d'ajuster une cordelette. Cette corde relie la détente de l'arc du héros et le cône. La corde se tend lorsque nous l'attachons à la détente de l'arc. Cette corde, qui se trouve cachée à l'intérieur de la sculpture, sort au niveau de la main d'Héraclès. Pour éviter qu'elle ne s'échappe à l'intérieur une boucle est formée (cf. Figure 21). C'est cette boucle qui permet de tendre l'arc et la corde. Maintenant, lorsque nous soulevons la pomme, le bouchon formé par le cône supérieur se lève et tire la cordelette. Cette action permet de libérer la détente de l'arc qui lance sa flèche.

Une dimension supplémentaire est ajoutée avec la présence du son dans l'automate. Un

HÉRACLÈS ET LADON

Héron d'Alexandrie - 1er siècle p.C.

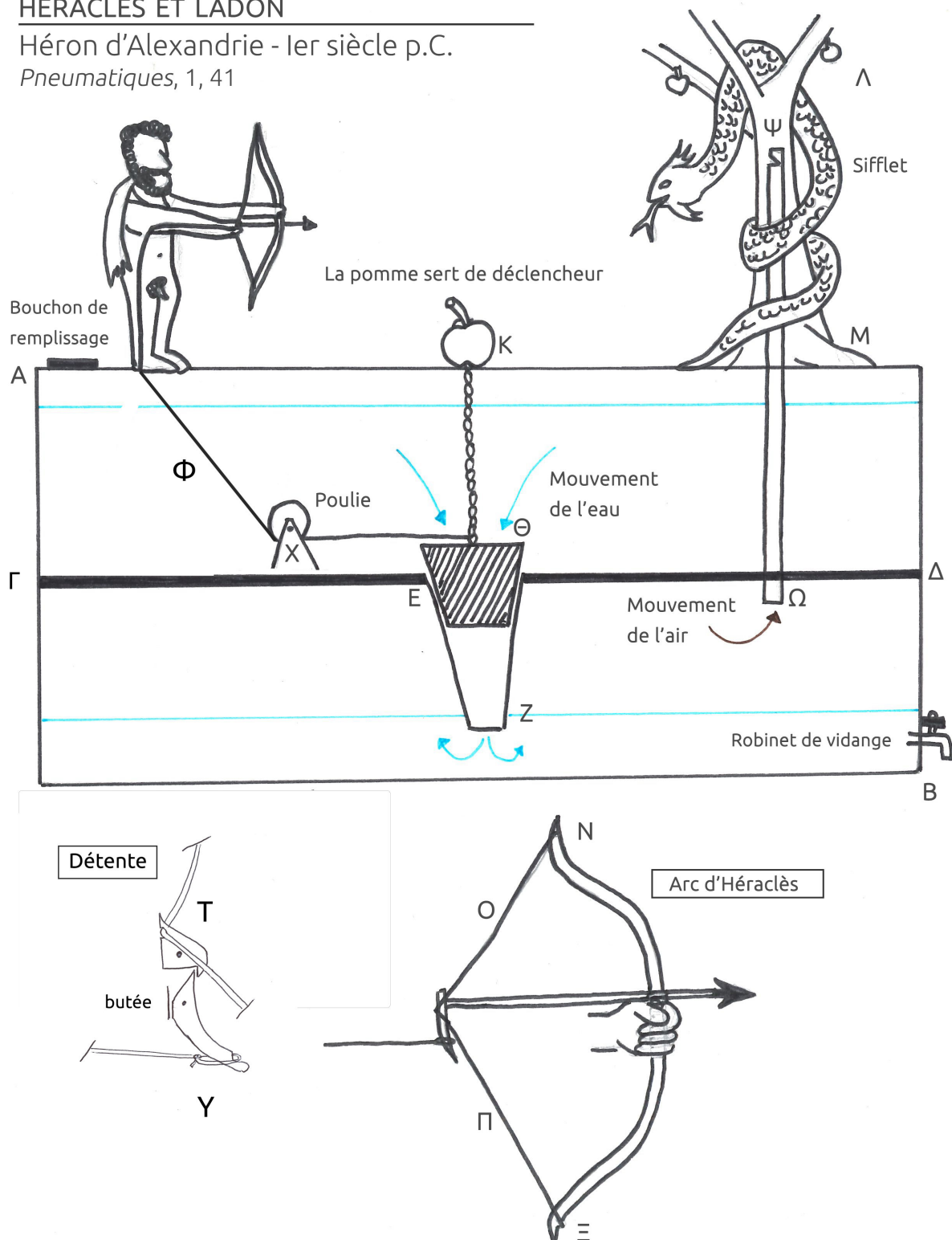
Pneumatiques, 1, 41

FIGURE 21 – Proposition de restitution du mécanisme interne du jeu miniature représentant Héraclès au jardin des Hespérides (Réalisation J. Nicolle).

tuyau creux est installé, caché à l'intérieur de l'arbre, et qui descend jusqu'au deuxième réservoir. Il permet, lors du mouvement de l'eau, de faire échapper l'air contenu dans le réservoir. Un petit sifflet est disposé au sommet de ce tuyau. L'air s'écoulant à travers permet de restituer le sifflement de douleur du *drakon*.

Pour mieux comprendre comment fonctionne le mécanisme interne de l'automate, nous pouvons décomposer son animation en plusieurs étapes :

1. Enlever le bouchon de remplissage et remplir le réservoir.
2. Soulever la Pomme pour entraîner le mécanisme :
 - (a) Le cône se soulève.
 - (b) L'eau s'écoule dans le deuxième réservoir.
 - (c) La corde se tire et libère la détente.
 - (d) L'arc libère sa flèche.
 - (e) L'air du deuxième réservoir est chassé à travers le tuyau par l'eau.
 - (f) Le dragon se met à siffler.
3. Vider le deuxième réservoir à l'aide du robinet.
4. Retendre la corde et accrocher la détente.
5. Recommencer.

Tous les événements qui se déroulent dans la deuxième étape se produisent de manière parallèle et dans le même laps de temps.

La restitution virtuelle de l'automate peut être comparée à celle de K. Kotsanas (cf. Figure 23), qui dans le cadre son musée l'a lui aussi restitué¹²⁰. Le fonctionnement du mécanisme de K. Kotsanas est relativement similaire à notre hypothèse de restitution. Cependant deux différences majeures sont à rapporter :

- La première se situe au niveau de la petite statue d'Héraclès où la corde est visible du spectateur. Dans le traité d'Héron d'Alexandrie, il est écrit que « la corde doit passer dans le corps et dans le bras à l'intérieur de l'Héraklès » pour être dissimulée du public. Pour K. Kotsanas, il s'agit d'un choix. Les partis pris sur ses restitutions permettent de montrer au public les connaissances techniques qu'avaient les grecs durant l'Antiquité.

120. K. Kotsanas, *Les inventions des Grecs dans l'Antiquité*, Pyrgos, 2015, p.58.

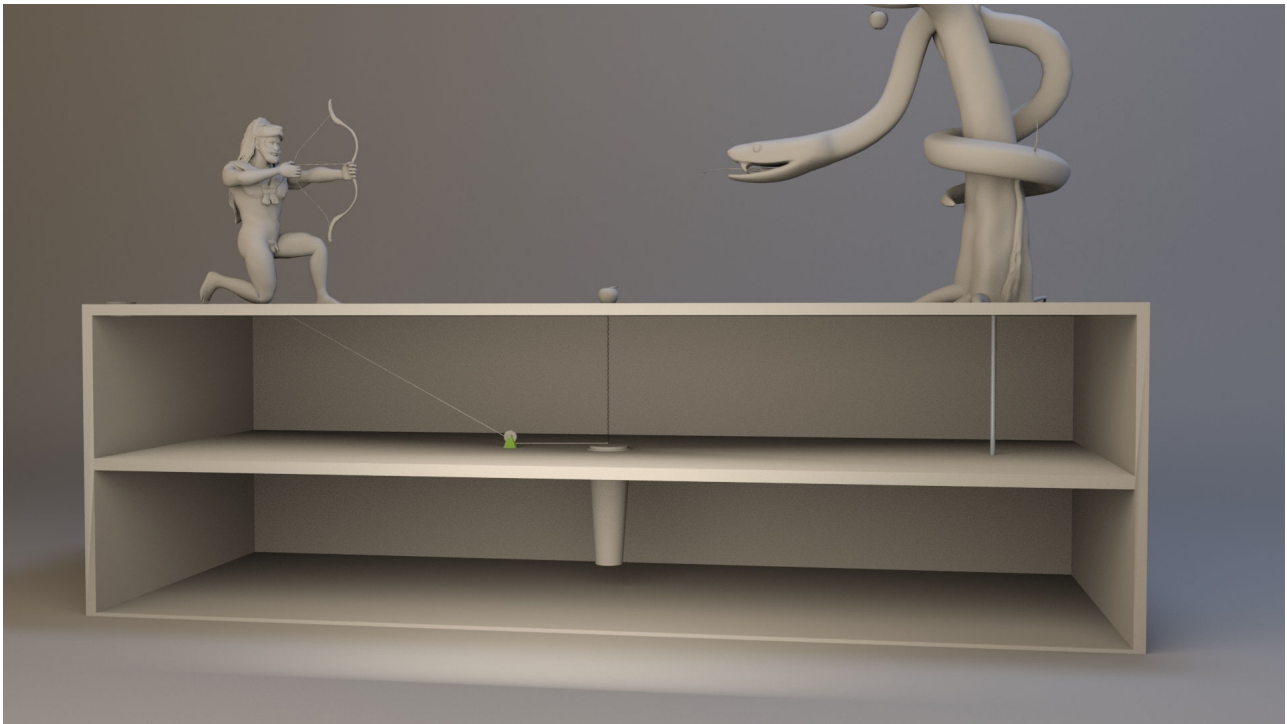


FIGURE 22 – Restitution virtuelle du mécanisme interne de l’automate (Réalisation J. Nicolle).

- La deuxième se situe dans la partie basse de l’automate avec la présence d’un troisième réservoir relié au deuxième par un siphon confiné. Dans un but purement pratique, K. Kotsanas a installé ce troisième réservoir (de taille plus importante) afin de vidanger le deuxième réservoir sans l’intervention de l’homme. Le siphon et le réservoir ne sont pas mentionnés dans le paragraphe 41 des *Pneumatiques*. Seul un goulot muni d’un robinet permet de vidanger le second réservoir.

3.2.3 Mise en contexte de l’automate

Cet automate, par son aspect ludique, est destiné à deux choses distinctes. Dans un premier temps, cette machine divertit le public qui la manipule. Ce divertissement permet au spectateur d’appréhender le récit du mythe d’Héraclès au jardin des Hespérides. Ensuite, elle offre une démonstration technique sur la science des pneumatiques, science qui met en mouvement les fluides et l’air dans un environnement clos étanche.

Pour manipuler cet automate, le spectateur peut le poser sur une table et s’asseoir devant (cf. Figure 24)¹²¹. Il faut cependant disposer près de soi d’un récipient vide pour

121. Ici le choix c’est porté sur la présence d’un romain en tunique, restitué en trois dimensions. Ce travail de restitution est mené par l’équipe plan de Rome pour apporter de l’animation et de la vie à son



FIGURE 23 – Restitution de l'automate par K. Kotsanas, Pyrgos, 2015 (Cliché K. Kotsanas).

vider l'automate et remplir le réservoir.

L'avantage de cet automate est sa petite taille. Il peut ainsi être transporté et utilisé dans n'importe quel endroit.



FIGURE 24 – Restitution virtuelle d'un romain utilisant l'automate (Réalisation A. Tillier et J. Nicolle).

3.3 La servante automatique distribuant l'eau et le vin

3.3.1 Source textuelle

L'automate de la servante automatique distribuant de l'eau et du vin est décrit dans le paragraphe 30 des *Pneumatiques* de Philon de Byzance. Cependant aucun texte grec n'est aujourd'hui disponible pour ce traité, seules des versions arabes sont accessibles¹²². La traduction qui suit est donnée par le B. Carra de Vaux dans *Le livre des appareils pneumatiques et des machines hydrauliques* :

Description d'un autre vase plus merveilleux que celui-là. - C'est une fontaine à intermittence ayant la forme d'une servante qui tient en main une aiguière. Quand on place dans la paume de sa main gauche une coupe à boire, elle verse du nébîd en la quantité que l'on veut ; ensuite elle verse l'eau qu'on mélange à ce nébîd.

Vous faites une servante de cuivre ou d'argent, représentée debout. De sa tête à sa poitrine vous pratiquez un réservoir séparé par une cloison en deux moitiés. Dans chaque réservoir est un tuyau à air, et dans chacun un tuyau à liquide qui s'en va vers l'aiguière. Le tuyau du réservoir à nébîd se dirige droit vers l'aiguière et le tuyau du réservoir d'eau, qui est long, est dans le ventre de la servante, tournant autour du réservoir. Les tuyaux à air s'ouvrent en bas du réservoir, du côté du ventre de la servante. La main gauche tient, à l'épaule, sur deux tourillons. A l'intérieur de la figure est une crosse, tournée en bas, pareille à la serpette à émonder les arbres ; sur cette crosse sont deux verges, semblables à deux robinets, et toutes deux forment clef. Elles ont deux fentes ou deux trous à leurs extrémités. Ces extrémités entrent exactement dans celles du tuyau à air et elles y tournent à frottement doux. Le bas de la crosse qui ressemble à la serpette est un peu alourdi. Il tend naturellement vers le bas et il élève la main gauche ; celle-ci s'élève à l'extérieur, en tirant les deux petits tuyaux qui forment clef. Leurs deux trous s'écartent des deux trous des tuyaux à air. Ceux-ci sont bouchés, et les liquides ne s'écoulent pas des deux orifices dans l'aiguière.

Toute cette construction est à l'intérieur de la servante. L'eau et le nébîd se déversent de la tête de la servante et coulent facilement ; le crâne constitue un couvercle très étanche. La main droite reste à sa place, ne se mouvant pas, et l'aiguière non plus ne se meut pas. Les deux trous font communiquer les deux réservoirs avec l'aiguière, comme nous l'avons dit.

Voici la description de la servante : α et β (cf. Figure 28) sont les marques

122. B. Carra de Vaux, *Le livre des appareils pneumatiques et des machines hydrauliques*, Paris, Imprimerie nationale, 1903.

des deux réservoirs ; celles des tuyaux à air γ et δ ; celles des deux tuyaux à liquide qui s'en vont à l'aiguière ϵ et ζ ; celle des tourillons de la main est η ; celle de la crosse θ ; les deux clefs sont marquées ι et κ .

Il y a dans la figure un trou qui ouvre sur l'extérieur, et le couvercle est fermé pendant l'opération, afin que l'air soit aspiré, autrement l'appareil ne fonctionnerait pas.

Après avoir achevé ce que nous venons de décrire, prenez une coupe de la capacité d'un ritl ou d'un demi-ritl, ou de la capacité que vous voudrez, en rapport avec les dimensions que vous aurez données aux orifices. Il convient de diviser le mélange dans la proportion du tiers, soit $2/3$ de nébîd et $1/3$ d'eau. La capacité de la coupe sera en conséquence. La coupe est alourdie en bas par un poids convenable.

Quand on la place dans la paume de la main gauche, elle l'abaisse ; la crosse se meut ; les tuyaux qui forment clef se lèvent, le trou d'air qui correspond au nébîd précédant l'autre, de façon qu'il parvienne plus vite à sa place dans le tuyau à air ; le trou correspondant à l'eau ne parvient à la sienne que lorsque la coupe est déjà alourdie de nébîd et lorsque celui-ci y est déjà versé presque en entier. Alors la main s'incline davantage et la clef du nébîd dépasse la sienne par en dessus ; son tuyau se bouche et il n'en sort plus rien ; puis l'eau commence à couler.

Quand la figure a versé ce qu'elle a à verser, prenez-lui la coupe. La main revient à sa place en bouchant les deux trous d'air, et il ne sort plus rien de l'aiguière.

Si on replace la coupe dans la main de la servante, après l'avoir vidée, la main redescend et le nébîd puis l'eau recommencent à couler dans la coupe. Ainsi de suite, tant qu'il y a du nébîd et de l'eau.

Voilà ce que nous voulions expliquer au sujet de cette fontaine à intermittence faite à l'image d'une servante. Comprenez ce que nous avons décrit. Voici la figure.¹²³

Avant de comprendre comment le mécanisme fonctionne, il est utile de préciser qu'il est camouflé à l'intérieur du corps de la servante pour être masqué du public. Le texte nous apprend que l'automate est entièrement construit de cuivre ou d'argent, et que la servante est représentée debout, avec une aiguière¹²⁴ dans sa main droite. Il nous indique aussi que la coupe est alourdie par un lest à sa base et que le mélange distribué est de deux tiers de vin¹²⁵ et d'un tiers d'eau. Dans l'Antiquité, le vin se stocke dans un état

123. *Pneumatiques*, 30 (trad. B. Carra de Vaux)

124. Ancien vase à eau, muni d'une anse et d'un bec.

125. La copie arabe du manuscrit, dont est issue cette traduction, utilise le mot *nébîd* pour désigner le vin. Le *nébîd* est utilisé par les copistes arabes pour remplacer le vin antique et utiliser une boisson de leur culture. Dans les anciennes anecdotes de l'islam, le *nébîd* était un spiritueux fabriqué avec des dattes et du raisin sec.

très concentré. Il est nécessaire de le diluer avec de l'eau pour qu'il soit buvable. Ce qui explique la présence des deux réservoirs dans la servante.

Le fait que la servante doive servir à chaque fois deux tiers de vin puis un tiers d'eau sans que la coupe ne déborde jamais est bien ce qui fait la magie de cet automate. Le mélange n'est pas préparé à l'avance dans le réservoir. Ce devait être assez étonnant pour les invités de voir d'abord le vin couler, puis l'eau, le tout depuis le même contenant. Dans une logique anthropomorphique, nous pouvons aussi croire que la servante fait preuve d'intelligence puisqu'elle ne laisse jamais la coupe déborder.

L'unité pour mesurer la contenance de la coupe est une unité arabe ancienne, le *rotle*. F. Kenanah, Maître de conférence à l'Université de Caen et membre de l'ERLIS, l'équipe de recherche sur les littératures, les imaginaires et les sociétés, nous a aidé à comprendre et à convertir cette unité dans des mesures plus actuelles. Anciennement, le *rotle* (écrit *ritl* ou *rotl*) se mesurait, selon les régions et les écoles du *fiqh* (jurisprudence), par rapport au dirham. Ainsi 1 *ritl* est égal à 130 dirham soit 406,25 grammes en Irak, 1875 grammes en région syrienne et 449,28 en Egypte. Internationalement, cette unité de mesure correspond à 0,45359 kg. Ce terme de *ritl* (ou *rotl*) est connu aujourd'hui comme le *pound*. Pour notre restitution qui se situe dans le cadre du Musée d'Alexandrie, nous avons choisi l'unité égyptienne qui correspond à 449,28 grammes.

3.3.2 Hypothèse de restitution

Trois étapes sont nécessaires pour restituer en 3D la servante automatique distribuant l'eau et le vin :

1. Restitution virtuelle du corps de la servante.
2. Restitution virtuelle du mécanisme interne.
3. Intégration du mécanisme dans le corps de la servante.

3.3.2.1 Le corps de la servante automatique

Les différentes sources iconographiques (disponibles en Annexe B.2) nous montrent que, dans l'Antiquité, les servantes sont généralement vêtues d'une tunique et coiffées d'un chignon. La mode vestimentaire de ces servantes peut changer suivant les propriétaires et les époques. Ainsi il n'est pas rare de trouver des servantes bien habillées (cf. Figure 25a).

Pour notre restitution, nous avons choisi de représenter une servante habillée d'une simple tunique et disposant d'un chignon sur la tête, comme nous le présente une fresque murale de Pompéï (cf. Figure 25b). L'utilisation d'une simple tunique pour la tenue de la servante permet de l'intégrer dans le contexte du Plan de Rome virtuel. La mise en contexte de la servante dans la Rome de Constantin justifie le fait de ne pas avoir utilisé une représentation de l'époque de Philon. La machine ayant une taille humaine, la restitution (cf. Figure 26) représente une femme d'une taille d'1m60¹²⁶.



FIGURE 25 – a) Servante, portant une *stola* et un *pallium*, mosaïque de la villa romaine du Casale, Sicile, Italie, IV^e siècle après J.-C. (cliché Y. Travert). b) Servante, vêtue d'une tunique, travaillant le sol, fresque murale, Pompéï, Italie, I^{er} siècle après J.-C. (cliché R. Delort).

Comme nous l'apprend le texte, la servante est réalisée en cuivre ou en argent. Nous avons fait le choix de la restituer en cuivre. Pour couler une statue avec un corps creux en cuivre, les romains utilisent la technique de la cire perdue. Cette technique est un procédé de moulage qui permet d'obtenir une sculpture en métal à partir d'un modèle en cire. Cette cire permet de construire le moule et elle sera ensuite fondue lorsque le sculpteur coulera le métal liquide. Il ne reste plus qu'à détruire le moule pour sortir la sculpture¹²⁷.

126. Une étude menée sur des ossements retrouvés à Pompéï montre que l'homme romain moyen mesurait, au premier siècle de notre ère, environ 1,64 m.

E. Lazer, *Resurrecting Pompeii*, Londres, Routledge, 2009, p. 155-156.

127. Pour plus de détails, le Musée du Louvre propose une vidéo qui explique et illustre les différentes étapes de ce procédé :

<https://www.louvre.fr/clefanalyses/la-technique-de-la-fonte-la-cire-perdue> (Consulté le 20/11/2019).



FIGURE 26 – Restitution virtuelle de la Servante (Réalisation J. Nicolle).

3.3.2.2 Le mécanisme interne de l'automate

Le texte est difficile à comprendre à la première lecture, c'est pourquoi un plan du mécanisme (cf. Figure 28) est construit et permet de reconstituer le fonctionnement de la machine.

Quand on pose la coupe alourdie sur la main gauche de la servante, le bras gauche se baisse. Ce bras est relié à une crosse par deux tourillons. En mécanique, un tourillon est une partie cylindrique autour de laquelle une pièce reçoit un mouvement de rotation. Un des tourillons (A) est fixe et sert d'axe de rotation à la crosse. L'autre (B) permet de relier le bras à la crosse (C) par une tige (D). Cette crosse est semblable à une serpe à émonder les arbres et est alourdie à sa base, servant ainsi de contrepoids au mécanisme pour maintenir le bras en place. Quand le bras s'abaisse, cela tire sur l'extrémité de la crosse, le tourillon qui n'est pas fixe agit comme un levier et le mécanisme se met en marche.

Deux tuyaux (E, F) sortent du réservoir, l'un pour le vin, et l'autre pour l'eau. Deux tiges pleines (H, G) forment l'extrémité de la crosse et sont imbriquées dans ces deux tuyaux. Quand le mécanisme s'actionne, les tiges coulissent dans les tuyaux grâce à des joints de cuir. Ceux-ci permettent un fonctionnement silencieux de l'automate, ainsi les

convives utilisant la servante ne soupçonnent pas la présence d'un mécanisme à l'intérieur. Sur chacune des tiges pleines, une fente est présente. La tige qui entre en contact avec le tuyau du vin (G) est la plus longue. La fente située à l'extrémité est deux fois plus longue que celle présente sur l'autre tige (H). Lorsque la fente est au niveau du tuyau, elle permet à l'air d'y entrer durant un certain laps de temps. Quand la fente a achevé sa traversée du tuyau, la tige pleine bouche l'entrée et le passage de l'air s'interrompt.

Le réservoir dimensionné de la tête à sa poitrine est scindé en deux parties égales servant de réserve pour le vin et l'eau. La tête est un couvercle étanche et offre la possibilité de remplir les réservoirs. L'air entre dans le réservoir par les deux tuyaux. Il prend la place du vide et chasse le liquide (vin et eau) qui s'écoule vers l'aiguière par deux tuyaux cachés dans l'avant-bras de la servante. Les deux fentes sont de dimensions inégales afin de respecter le ratio deux tiers de vin et un tiers d'eau.

Quand l'écoulement des liquides est terminé, le convive reprend sa coupe. Le contre-poids présent dans la courbure de la crosse permet au bras de reprendre sa position initiale. C'est ainsi que fonctionne le mécanisme caché de la servante automatique (cf. Figure 27).

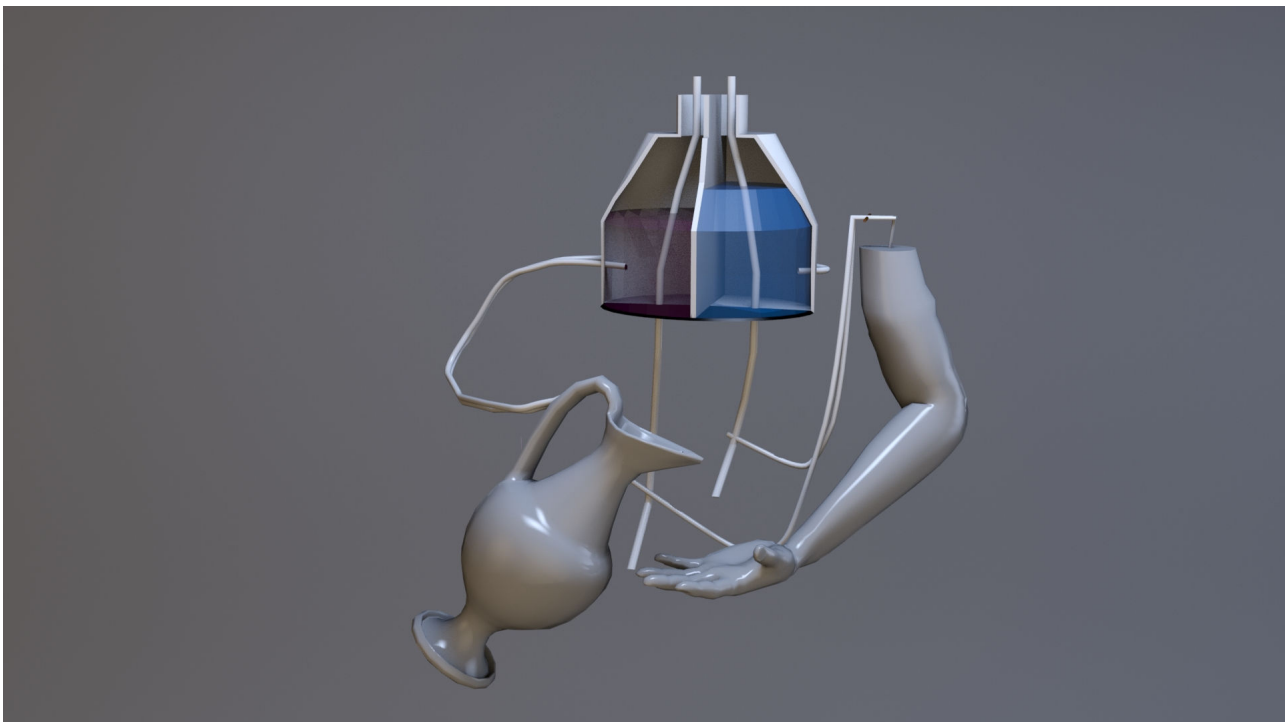


FIGURE 27 – Restitution du mécanisme interne de l'automate (Réalisation J. Nicolle).

SERVANTE AUTOMATIQUE

Philon de byzance 250 a.C.
Pneumatiques, 30

DÉTAIL DU MÉCANISME INTERNE
 1^{ÈRE} HYPOTHÈSE

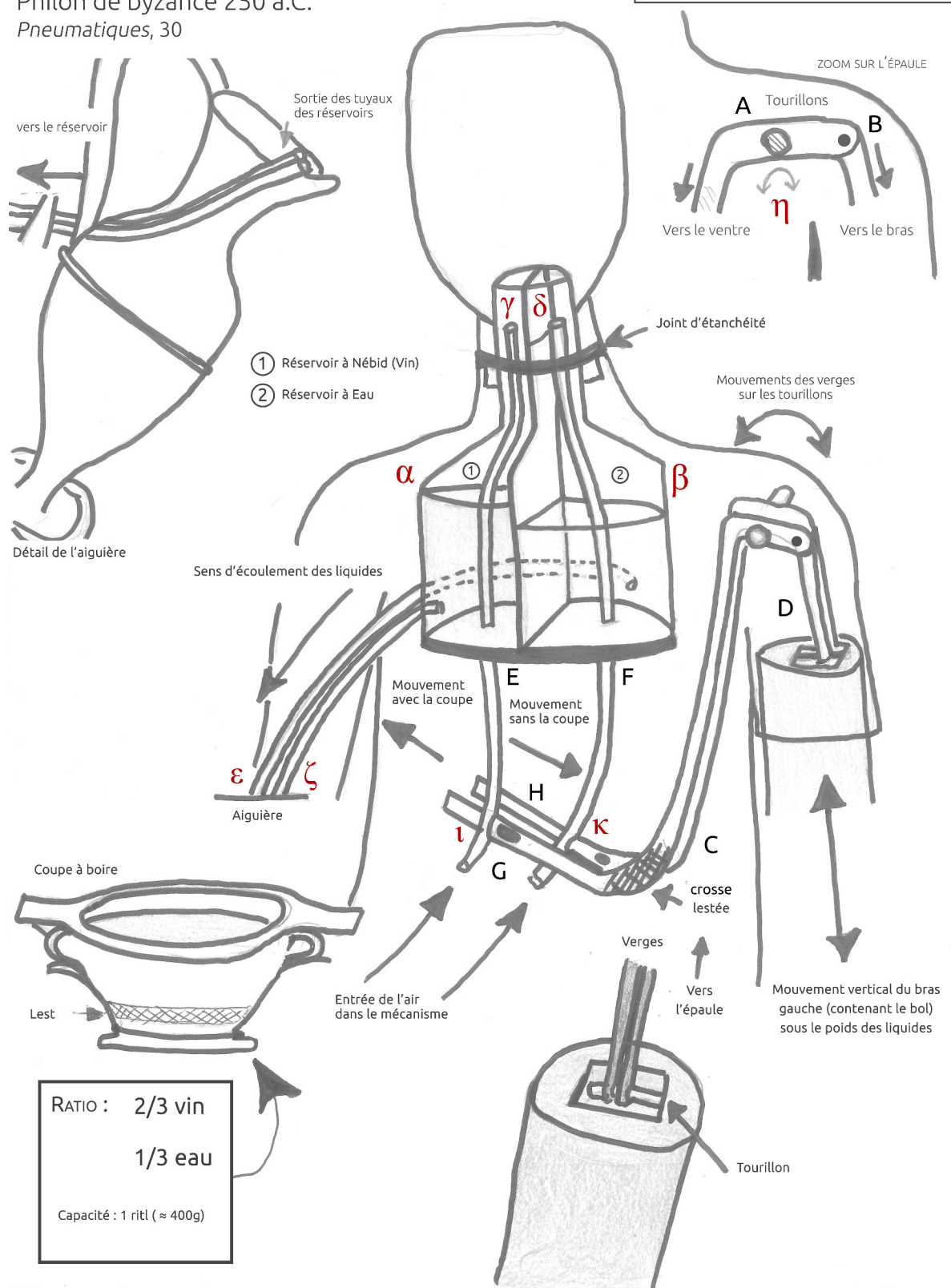


FIGURE 28 – Proposition de restitution du mécanisme interne de la Servante automatique de Philon de Byzance (Réalisation J. Nicolle).

3.3.2.3 Intégration du mécanisme dans le corps de la servante

Comme nous l'annonce Philon de Byzance au début de sa description, la servante automatique possède un mécanisme caché au niveau de sa poitrine. C'est pourquoi, suite à la restitution du mécanisme, nous l'avons intégré dans le corps de la servante précédemment modélisée (cf. Figure 29).

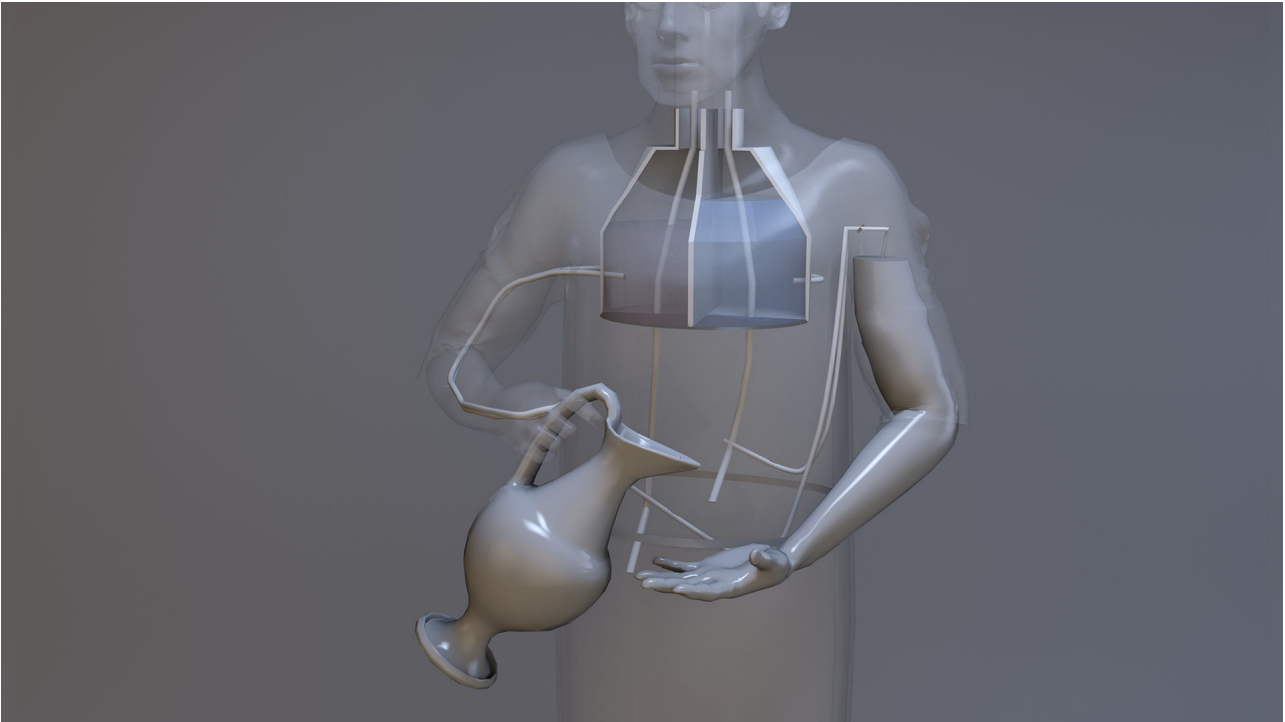


FIGURE 29 – Intégration du mécanisme dans le corps de la servante (Réalisation J. Nicolle).

La restitution de cet automate peut être comparée à celle réalisée par K. Kotsanas (cf. Figure 30)¹²⁸. K. Kotsanas a restitué un automate qui fonctionne, mais il n'a pas intégralement respecté le texte de Philon de Byzance :

1. Aucune crosse n'est présente dans l'automate. Son système fonctionne avec des tuyaux imbriqués qui coulissent entre eux. Or, dans le texte, il est bien question de la présence d'une crosse pour l'entrée de l'air dans le mécanisme.
2. Il utilise un ressort pour que le bras puisse retourner à sa position initiale. Or nous savons, d'après le texte, qu'une crosse alourdie à sa base sert de contrepoids pour que le bras retourne à sa place.

128. K. Kotsanas, *Les inventions des Grecs dans l'Antiquité*, Pyrgos, 2015, p.52-53.

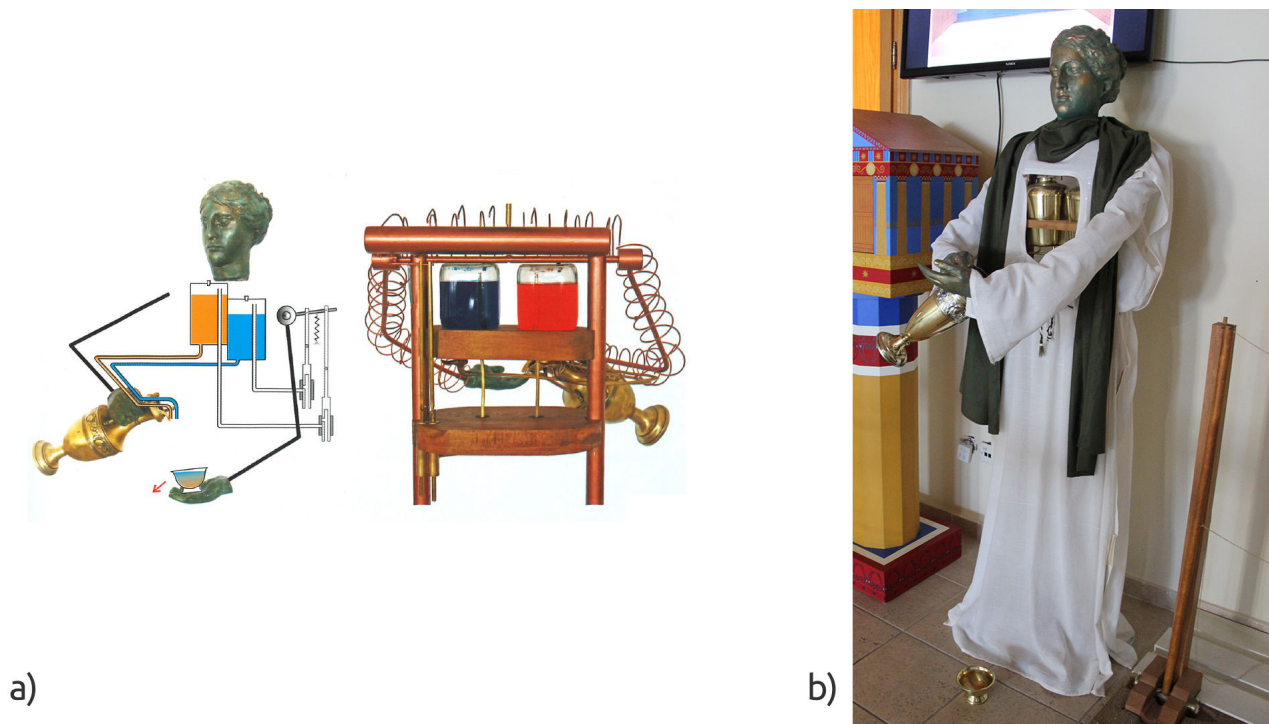


FIGURE 30 – a) Schéma explicatif du fonctionnement de l'automate par K. Kotsanas. b) La Servante automatique de K. Kotsanas, Musée des automates, Olympie, Grèce (cliché Ph. Fleury).

3.3.3 Mise en contexte de l'automate

La servante automatique de Philon de Byzance est un automate destiné à un public issu des classes aisées du monde hellénistique. Sa structure et ses mécanismes internes, fabriqués avec des matériaux nobles, en sont le témoignage. La servante, machine issue de la thaumaturgie, est utilisée principalement pour émerveiller les convives lors des banquets et des repas. Elle peut remplacer les esclaves dans la distribution du vin. Nous avons imaginé que cet automate était encore connu et construit à l'époque impériale romaine et nous avons choisi de le placer dos au mur dans le *triclinium* d'une riche *domus* (cf. Figure 31), à côté d'une table sur laquelle est disposé une aiguière d'eau et une de vin, permettant le remplissage des réservoirs internes. L'utilisation d'une telle machine pour distribuer l'eau et le vin, permet aussi au maître des lieux d'exposer sa fortune en possédant des objets à la pointe de la technologie pour l'époque antique.

Une présentation et une démonstration virtuelle de l'automate dans son contexte a été réalisée le 4 avril 2018 lors d'une Nocturne du Plan de Rome intitulée *Les automates antiques*. Elle est diffusée sur la plateforme YouTube¹²⁹.

129. Nocturne du Plan de Rome : *Les automates antiques*, Ph. Fleury, J. Nicolle, 2018



FIGURE 31 – Intégration de l'automate dans le *triclinium* d'une riche *domus* (Réalisation J. Nicolle et C. Morineau).

3.4 La chouette et les oiseaux chanteurs

3.4.1 Source textuelle

L'automate de la chouette et des oiseaux chanteurs est une fontaine à intermittence animée qui est décrite dans le livre 1 des *Pneumatiques* de Héron d'Alexandrie. Sa construction est la suivante :

Ainsi donc, les sons se produisent à travers les tuyaux ; et il y a une différence dans les bruits produits selon que l'on a des tuyaux plus minces $<$ ou plus épais $>$, ou plus étirés en longueur ou plus courts, et selon que la partie immergée dans l'eau est plus ou moins grande ; et ainsi, grâce à un tel procédé, on produit dans sa variété le chant de plusieurs oiseaux. On construit donc, soit sur une fontaine soit dans une grotte, ou partout où il y a de l'eau qui coule, plusieurs oiseaux et à côté d'eux une chouette qui se tournera automatiquement vers les oiseaux puis du côté opposé ; quand elle s'est détournée, les oiseaux chantent, quand elle se tourne vers eux ils cessent de chanter ; et cela se répète. Voici comment on réalise cette construction.

Soit A (cf. Figure 37) un jet d'eau qui coule toujours ; plaçons en dessous un vase étanche $B\Gamma\Delta E$ muni d'un siphon confiné ou d'un siphon recourbé ZH , et d'un entonnoir ΘK qui s'insère dans le vase, et dont le tube ne doit être éloigné du fond que de manière à laisser un passage à l'eau. Il doit y avoir aussi plusieurs petit tuyaux, comme on l'a dit, qui sont les tuyaux A. Il se produira donc que, pendant que le vase $B\Gamma\Delta E$ se remplira, l'air qu'il contient sera expulsé et produira le chant des oiseaux, et que, une fois plein, quand il se videra par le siphon cavalier HZ , ils ne chanteront plus.

Donc, pour que la chouette se tourne vers les oiseaux puis dans le sens opposé, comme on l'a dit précédemment, on fait d'avance la construction qui va être indiquée. Soit, fixé sur une base M , un axe tourné $N\Xi$, et ajustons-lui un tube $O\Pi$, qui puisse tourner librement autour de lui ; à ce tube, adaptons solidement un petit disque $P\Sigma$, sur lequel sera placée la chouette, qui lui sera solidement fixée. et autour du tube $O\Pi$, deux chaînes $T\Upsilon$ et ΦX , enroulées en sens contraire et passant par deux poulies ; à $T\Upsilon$ est suspendu un poids Ψ , et l'extrémité de ΦX est attachée à un vase vide Ω placé au-dessus du siphon ZH , ou siphon confiné. Il se produira donc que, pendant que le vase $B\Gamma\Delta E$ se videra, le liquide passera dans le vase Ω et fera tourner en même temps le tube $O\Pi$ et la chouette, de sorte qu'elle regardera vers les oiseaux, tandis que le vase $B\Gamma\Delta E$ une fois vide, Ω aussi se videra par un siphon confiné ou par un siphon recourbé qu'il contient, de sorte que le poids Ψ , reprenant le dessus, fera se détourner la chouette, au moment où le vase $B\Gamma\Delta E$ se remplira et où

de nouveau les oiseaux chanteront ¹³⁰.

Philon propose un appareil pneumatique faisant siffler des oiseaux ¹³¹. Héron reprend le concept et l'améliore afin de présenter cet automate de la chouette et des oiseaux chanteurs.

Cette machine présente un mécanisme continuellement alimenté en eau qui réalise un spectacle automatique perpétuel d'oiseaux qui sifflent, lorsque la chouette se retourne, et qui s'arrêtent lorsqu'elle ne les regarde plus. Ce système utilise les mouvements de l'eau à travers différents récipients pour gérer les flux d'air qui serviront à faire chanter les oiseaux.

Cette fontaine animée doit disposer d'une source d'eau continue pour fonctionner. On en déduit deux principales utilisations : au travers d'une fontaine de rue ou alors pour animer un sanctuaire dédié à la nature (dans des grottes par exemple).

3.4.2 Hypothèse de restitution

La restitution virtuelle de cet automate nécessite quatre étapes de modélisation :

1. Modélisation 3D des oiseaux chanteurs.
2. Photogrammétrie de la statuette de la chouette.
3. Assemblage de l'automate.
4. Restitution du mécanisme interne de la fontaine.

3.4.2.1 Restitution des oiseaux chanteurs

La sculpture numérique de l'oiseau (cf. Figure 33) est réalisée avec le logiciel ZBrush en adéquation avec les différents visuels obtenus lors de la recherche iconographique (cf. Figure 32). Pour les besoins de notre automate, nous devons reconstituer une branche sur laquelle sont posés des oiseaux. C'est pour cela, que l'oiseau est sculpté en position « posé ».

3.4.2.2 Restitution de la chouette

Pour réaliser la modélisation 3D de la chouette, des recherches iconographiques ont été menées au Musée du Louvre et au British Museum (cf. Figure 34) afin d'obtenir un

130. *Pneumatiques*, 1, 16 (trad. G.Argoud / J.Y. Guillaumin)

131. Philon, *Pneumatiques*, 60.



a)



b)

FIGURE 32 – Représentation d'oiseaux dans l'Antiquité. a) Statuette de pigeon, Provenance : Allier (France), II^e siècle après J.-C., British Museum, Londres, Royaume-Unis. b) Lampe à huile décorée avec un oiseau sur une branche, Provenance : Chypre, 40-100 après J.-C., British Museum, Londres, Royaume-Uni.



FIGURE 33 – Modélisation des oiseaux chanteurs (Réalisation J. Nicolle).

visuel permettant d'appuyer la restitution.

J'avais en ma possession une statuette représentant la chouette d'Athena. En la com-

parant à l'iconographie obtenue, nous avons observé qu'elle ressemblait fortement aux diverses représentations antiques des chouettes. Une photogrammetrie de l'objet a été entreprise et a permis d'obtenir un modèle 3D très détaillé et fidèle à la statuette (cf. Figure 35).



a)



b)

FIGURE 34 – Représentation de la chouette dans l'Antiquité. a) Aryballe en forme de Chouette, Provenance : Corinthe (Grèce), 640 avant J.-C., Musée du Louvre, Paris, France. b) Lampe à huile romaine décorée d'une chouette, Provenance : Italie, 40-80 après J.-C., British Museum, Londres, Royaume-Uni.

3.4.2.3 Modélisation de l'automate

Le texte nous stipule que l'automate doit être installé sous une fontaine, ou dans une grotte, pour obtenir un accès à une eau qui s'écoule continuellement. Nous avons choisi la première solution, plus simple à intégrer dans le modèle de Rome. Nous réalisons donc une fontaine, où la base permet de cacher le mécanisme aux yeux des passants. Les oiseaux sont positionnés sur des arbres et la chouette est installée sur le côté comme l'énonce le traité antique. Ainsi nous obtenons une fontaine agréablement bien ornée (cf. Figure 36).



FIGURE 35 – Modélisation 3D de la chouette par photogrammetrie (Réalisation J. Nicolle).



FIGURE 36 – Modélisation de l'automate de la chouette et des oiseaux chanteurs. (Réalisation J. Nicolle)

3.4.2.4 Restitution du mécanisme interne

La Figure 37 montre le plan technique du mécanisme que nous avons restitué à partir du texte d'Héron d'Alexandrie. Son fonctionnement est très simple et se répète tant que

le jet d'eau de la fontaine coule.

Tout d'abord, pour construire cet automate, le technicien doit s'assurer de trouver une source d'eau continue. Une fois en place, l'eau coule au sein d'un récipient en forme d'entonnoir, muni à sa base d'un tuyau qui le relie à un réservoir caché. Les sculptures des oiseaux chanteurs sont installées sur des arbres. On veille à camoufler, à l'intérieur des troncs, des tuyaux (A) munis de sifflets qui vont retranscrire le chant d'un groupe d'oiseaux.

L'eau qui s'écoule dans le réservoir hermétique, va chasser l'air qui se faufile dans les tuyaux. Les oiseaux chantent. Ce n'est qu'une fois le niveau supérieur du siphon atteint que l'eau s'écoule vers le seau qui est suspendu à une poulie. Ce seau fait la balance avec un contrepoids autour d'un axe qui permet la rotation de la chouette. Lorsque le seau devient plus lourd que ce contrepoids, il descend avec le poids de l'eau et entraîne la chaîne qui fait tourner la chouette. La chouette fait maintenant face aux oiseaux qui arrêtent de chanter par l'absence de mouvement d'air (l'eau s'étant enfuit vers le réservoir inférieur).

Le seau se vide par un siphon et permet à l'eau de rejoindre les égouts par un trou caché dans la base de la fontaine. Le seau devient plus léger, et le contrepoids reprend sa place, entraînant la rotation de l'axe de la chouette. L'eau remplit de nouveau le réservoir hermétique, et chasse l'air. Les oiseaux se remettent à chanter. Cela permet à l'automate d'avoir une animation cyclique.

L'animation de ce mécanisme peut être décomposée en sept étapes clés qui se répètent sans arrêt :

1. L'eau de la fontaine coule dans le récipient en forme d'entonnoir.
2. Cet eau descend par le tuyau et commence à remplir le réservoir.
3. Le niveau d'eau monte dans le réservoir. L'eau, en prenant place, chasse l'air au travers des tuyaux des arbres, qui sont munis de sifflets. Les oiseaux se mettent à gazouiller. Pendant ce temps, la chouette est toujours dos aux oiseaux.
4. Lorsque le niveau est assez haut, l'eau s'écoule par le siphon. Les oiseaux s'arrêtent de chanter.
5. L'eau remplit le seau qui est suspendu à la poulie. Il devient plus lourd que le contrepoids et il descend en entraînant la chaîne qui fait tourner l'axe de la chouette.

6. La chouette se retrouve face aux oiseaux qui ne chantent plus.
7. L'eau du seau s'écoule vers les égouts. Le seau redevient plus léger. Le contrepoids descend. La chouette se retourne. L'eau recommence à remplir le réservoir et les oiseaux se remettent à chanter.

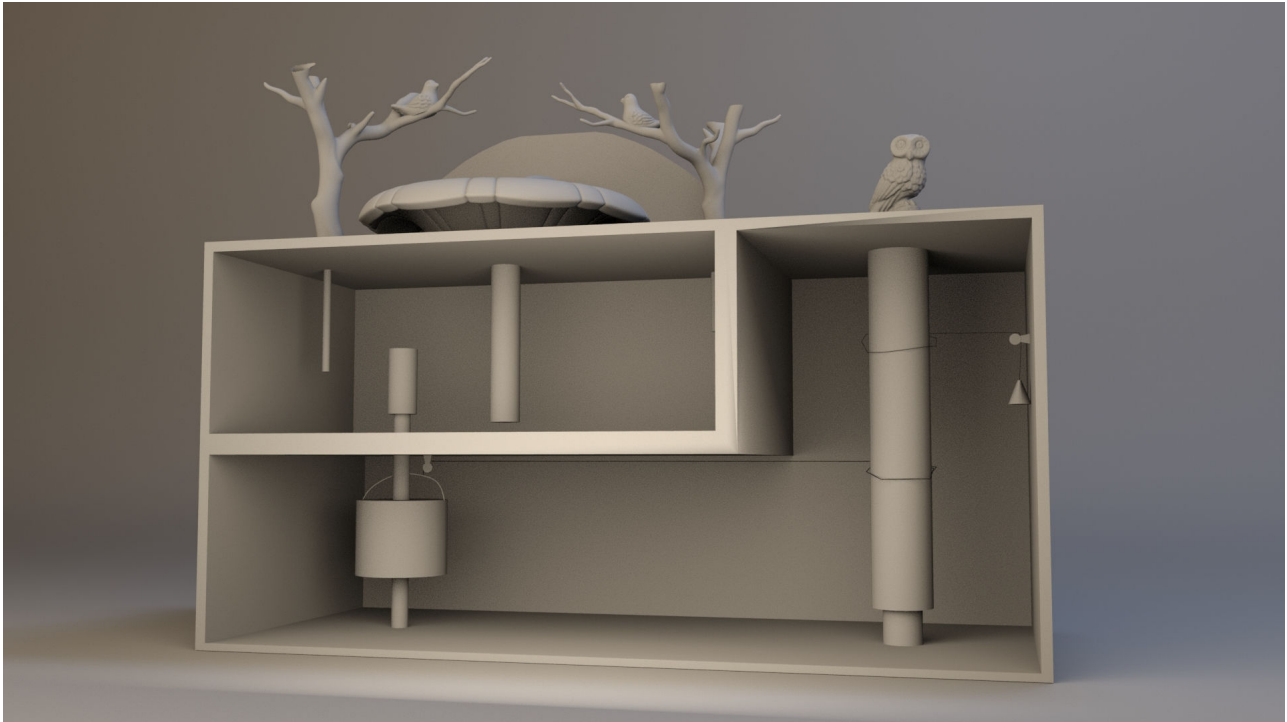


FIGURE 38 – Hypothèse de restitution du mécanisme interne de l'automate de la chouette et des oiseaux chanteurs (Réalisation J. Nicolle).

3.4.3 Mise en contexte de l'automate

La fontaine animée de la chouette et des oiseaux chanteurs est le seul automate présenté qui ne propose pas d'interaction humaine. En effet, le mécanisme fonctionne de manière indépendante si la source d'eau courante n'est pas interrompue.

L'automate peut aussi bien être utilisé dans les sanctuaires (le sifflement intermittent des oiseaux permet de sonoriser un lieu sacré dédié à la nature), que dans les rues d'une ville en l'installant à l'intérieur des fontaines publiques. Cette deuxième option est représentée sur la Figure 39. Dans cette image, nous avons installé la fontaine de la chouette et des oiseaux chanteurs dans une rue résidentielle de Rome, au pied d'une *domus*. Son animation pouvait égayer les passants (ou bien, au contraire, énerver les résidents avec ce sifflement intermittent continu ...).



FIGURE 39 – Intégration de l'automate de la Chouette et des oiseaux chanteurs dans la rue d'un quartier résidentiel de Rome (Réalisation J. Nicolle et N. Lefèvre).

3.5 Les portes automatiques d'un temple miniature

3.5.1 Source textuelle

Cet automate, présenté dans le livre I des *Pneumatiques* d'Héron d'Alexandrie, décrit un mécanisme permettant de faire ouvrir les portes d'un petit temple lorsqu'un feu est allumé sur l'autel. Voici sa description :

Construction d'un petit temple, de façon que le feu du sacrifice fasse s'ouvrir les portes toutes seules et qu'elles se referment quand le feu s'éteint.

Soit le petit temple en question sur la base $AB\Gamma\Delta$ (cf. Figure 42), sur laquelle se trouve le petit autel $E\Delta$; à travers le petit autel, on fera passer le tube HZ , dont l'ouverture Z sera à l'intérieur de l'autel, tandis que l'ouverture H s'ouvrira dans la sphère Θ , à peu de distance de son centre. La sphère sera aussi soudée au tube HZ . Il y aura aussi dans la sphère un siphon recourbé $K\Lambda M$. Les gonds des portes seront prolongés dans leur partie inférieure et tourneront librement dans des crapaudines ménagées dans la base $AB\Gamma\Delta$. Aux gonds on fixera deux petites chaînes qui, réunies en une seule, passeront par une poulie pour aller à un vase creux $N\Xi$ qui est suspendu. D'autres petites chaînes, enroulées autour des gonds en sens inverse des premières et réunies en unes, passeront par une poulie et seront attachées à un poids de plomb dont la descente fera fermer les portes. Le siphon $K\Lambda M$ aura sa branche extérieure dans le vase suspendu. Par un trou Π , on versera de l'eau dans la sphère pour la remplir à moitié, trou que l'on refermera ensuite.

Voici ce qui se passera alors : quand le feu produira de la chaleur, l'air du petit autel sera chauffé et passera dans un espace plus grand. Cet air, passant dans la sphère par le tube HZ , chassera par le siphon $K\Lambda M$ le liquide qui s'y trouve pour l'envoyer dans le vase suspendu, et ce dernier, en descendant avec son poids, entraînera les petites chaînes et ouvrira les portes. Puis quand le feu sera éteint, l'air raréfié s'échappera de la sphère par les interstices de sa paroi¹³², et le siphon recourbé attirera le liquide du vase suspendu de sorte qu'il viendra remplir l'espace vide des interstices séparés. L'extrémité du siphon sera en effet plongée dans l'eau du vase suspendu. quand le vase sera vide, le poids suspendu descendra et fera ouvrir à nouveau les portes. Certains, à la place de l'eau, utilisent du mercure, parce qu'il est plus lourd que l'eau et qu'il n'est pas complètement évaporé par la chaleur¹³³.

L'automate qui est décrit ci-dessus, montre le procédé de fabrication d'un mécanisme permettant l'ouverture des portes d'un petit temple miniature lorsqu'un feu de sacrifice

132. Nous ne suivons pas ici la traduction de G. Argoud et J.Y. Guillaumin. Nous comprenons : « l'air rétracté s'échappera de l'intérieur de la sphère par l'ouverture ».

133. *Pneumatiques*, 1, 38 (trad. G.Argoud / J.Y. Guillaumin)

est allumé sur l'autel. Cette maquette permet de présenter le fonctionnement de ce mécanisme et de démontrer toutes les capacités et les émotions que peut fournir ce genre d'installation cachée. Pour le croyant qui est installé devant le temple, le fait de voir s'ouvrir les portes lorsqu'un feu est allumé sur l'autel, permet de renforcer ses croyances. Pour lui, le temple semble possédé d'une présence divine. C'est peut-être donc à destination des prêtres des temples, qu'est destiné ce genre de mécanisme caché. Pour eux, cela permettrait de fortifier les croyances au sein de la population, en proposant une expérience divine unique.

On ne sait pas aujourd'hui si un tel mécanisme était utilisé sur les portes des temples de l'Antiquité. Cependant, la démonstration d'Héron d'Alexandrie permet de poser les bases de sa construction à plus grande échelle.

3.5.2 Hypothèse de restitution

La restitution virtuelle d'un temple miniature et de son mécanisme nécessite deux étapes :

1. En premier lieu nous devons modéliser le temple ainsi que sa base.
2. Ensuite nous devons restituer et intégrer le mécanisme au sein du temple.

3.5.2.1 Restitution du temple

Avant de commencer la restitution du temple, il est nécessaire de connaître le style du temple que nous voulons modéliser. Ces travaux de thèse sont réalisés en collaboration avec l'équipe « Plan de Rome ». Cette équipe travaille depuis vingt ans sur la restitution virtuelle de la ville de Rome en 320 après J.-C. Pour rester dans le thème de Rome, nous avons décidé de restituer un temple prostyle (cf. Figure 40). Il s'agit d'un petit temple disposant d'une colonnade de quatre colonnes. Aucune de ces colonnes n'est installée autour du *naos*. Cela va nous permettre de mieux apercevoir les portes et donc de mieux ressentir l'effet étonnant de cet automate.

C'est sur ce plan qu'est basée l'architecture de notre temple. La réalisation des colonnes et des chapiteaux corinthiens est effectuée selon les instructions et les schémas que nous donne Vitruve dans son *De Architectura*¹³⁴ (cf. Annexes).

134. Vitruve, *De Architectura*, 4, 1, 11.

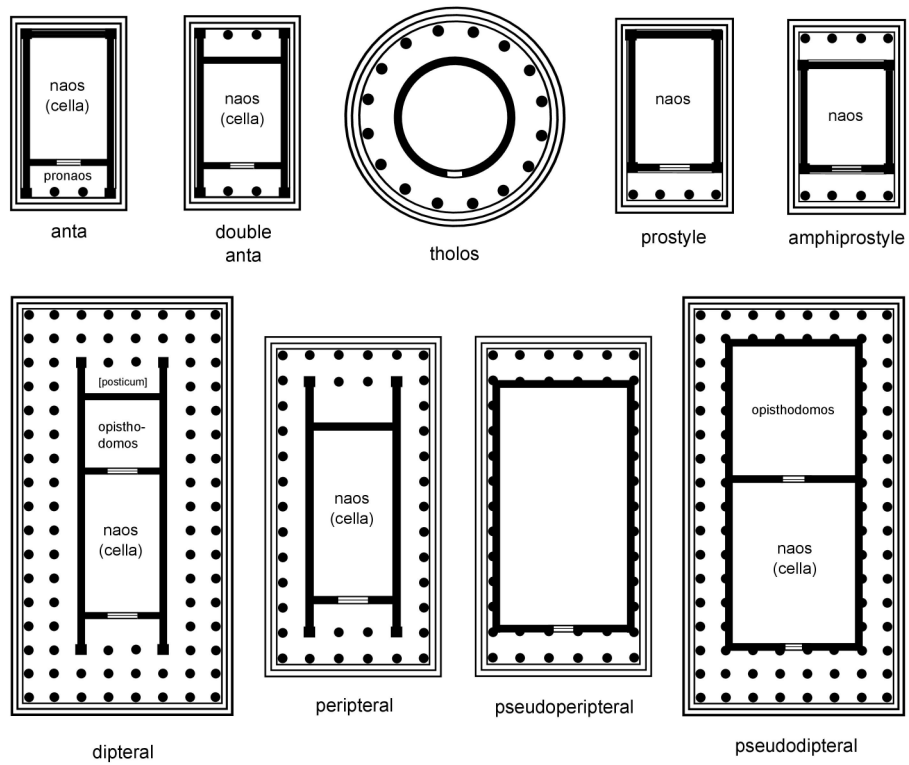


FIGURE 40 – Différents plans au sol montrant la disposition des colonnades par rapport au corps central suivant la taille des temples romains (Ref. C. Perrault, *Les dix livres d'architecture de Vitruve*, Paris, J.B. Coignard, 1683).



FIGURE 41 – Restitution virtuelle d'un temple prostyle miniature (Réalisation J. Nicolle).

L'autel est modélisé et intégré aux marches d'accès du temple. Sur le fronton sont disposées trois Victoires en acrotères. Tout le temple repose sur une base rectangulaire qui accueillera le mécanisme de l'automate (cf. Figure 43).

3.5.2.2 Restitution du mécanisme interne

L'étude du texte d'Héron d'Alexandrie permet de comprendre comment le mécanisme fonctionne et quels sont les éléments qui le constituent. Un schéma technique illustrant les propos du mécanicien nous permet de visualiser les différents composants et leurs interactions (cf. Figure 42).

Nous avons choisi de restituer les différentes parties du mécanisme en cuivre, bien que le texte ne le mentionne pas. Les propriétés du cuivre sont idéales pour ce genre de construction. En effet, le cuivre reste un matériau facile à manipuler et sa température de fusion n'est pas très élevée. De plus, il possède deux propriétés essentielles à ce projet : une forte résistance à la corrosion et une conductibilité thermique.

Le temple lui, peut être réalisé en bois ou en métal. On veillera cependant à le peindre afin qu'il ressemble à n'importe quel temple de la ville. Cela accentue le degré d'émotion.

Le mécanisme est intégré à la base rectangulaire du temple (cf. Figure 43). Les portes sont attachées à des tiges maintenues au sol par des crapaudines. Autour de ses tiges sont enroulées des cordes qui sont reliées au contrepoids et à un petit seau. La liaison entre le réservoir d'eau, de forme circulaire, et le seau suspendu est réalisée par un siphon recourbé. L'autel est relié au réservoir d'eau par un tuyau communiquant.

Le fonctionnement de ce mécanisme est en réalité simple à comprendre. Dans un premier temps, la personne qui interagit avec cet automate doit simuler l'allumage d'un feu de sacrifice sur l'autel du temple miniature. Pour cela, il dépose des petites brindilles sur le dessus de l'autel construit en cuivre, où il va allumer un feu. Ce feu va permettre de chauffer l'air emprisonné au sein de l'autel.

Lorsque l'on chauffe de l'air, celui-ci prend du volume. L'air chauffé, migre donc vers le réservoir d'eau au travers du tuyau communiquant. Le réservoir, rempli d'eau à sa moitié, est de forme cylindrique. Un siphon recourbé fait la liaison entre lui et le seau suspendu. L'air chaud qui entre dans le réservoir, monte en pression et est à la recherche de place. Il chasse l'eau qui s'écoule par le siphon.

Le seau est suspendu à une poulie par deux cordes qui sont enroulées autour des tiges

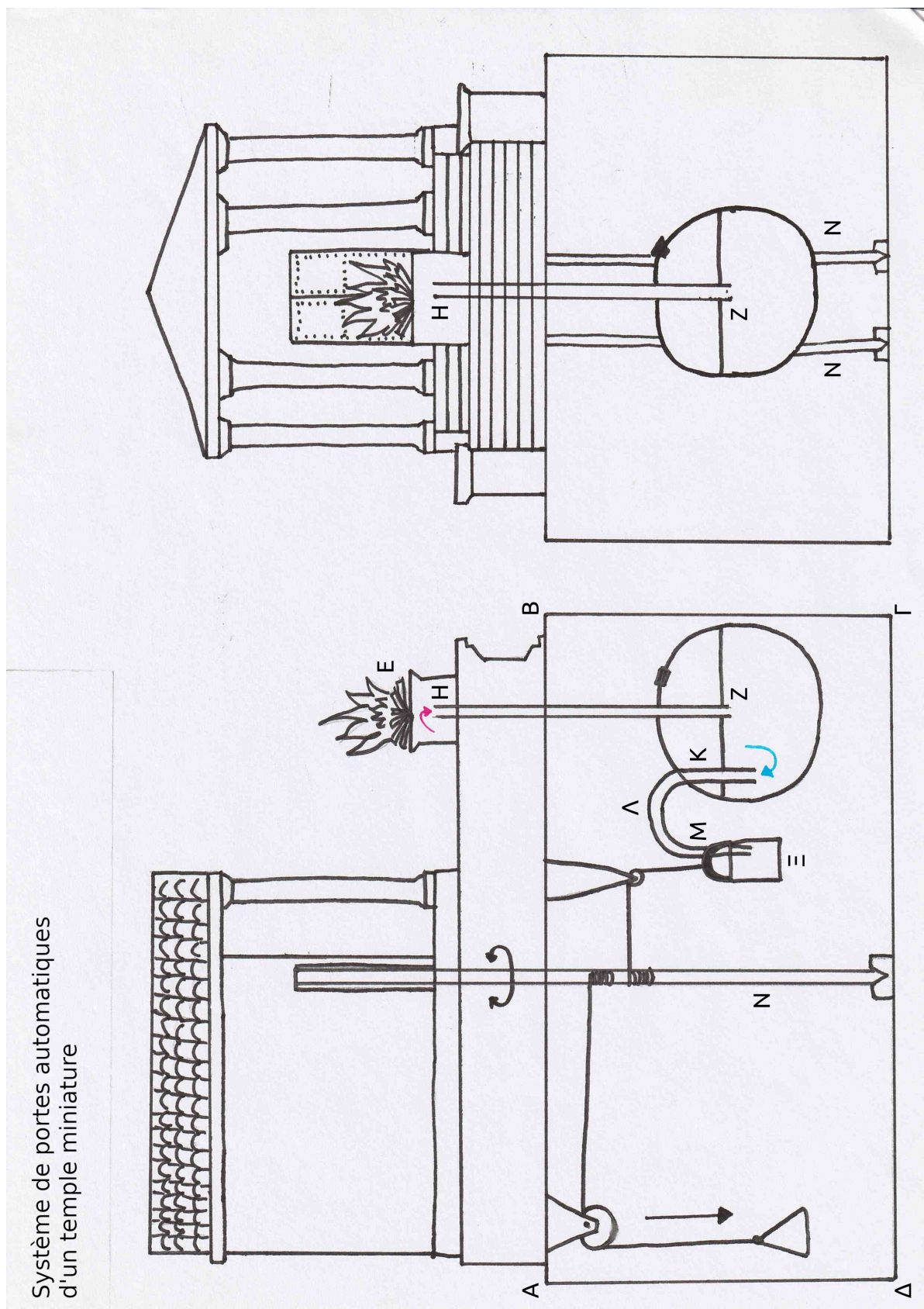


FIGURE 42 – Proposition de restitution du mécanisme interne du temple miniature d'Héron d'Alexandrie (Réalisation J. Nicolle).

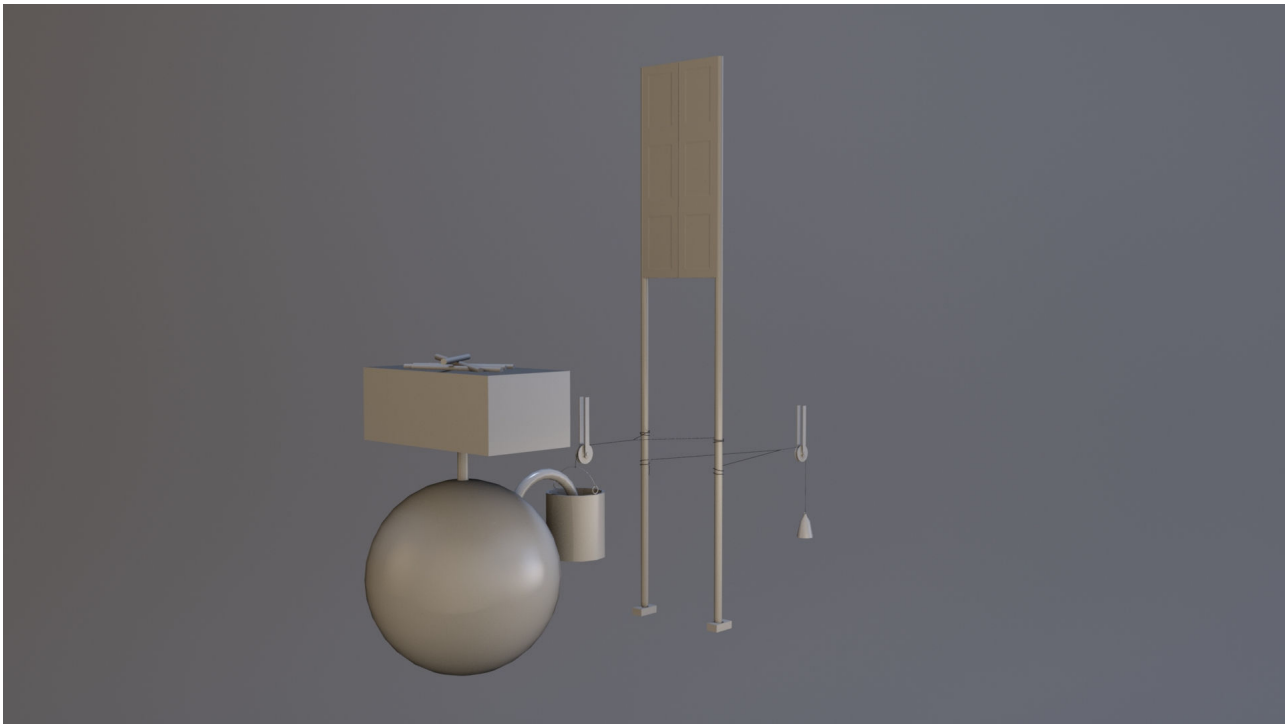


FIGURE 43 – Restitution virtuelle du mécanisme interne de l'automate (Réalisation J. Nicolle).

des portes. Un contrepoids est disposé à l'opposé du seau. Ce contrepoids est lui aussi relié aux tiges par deux cordes. Le contrepoids possède une masse plus importante que le seau vide. Lorsque le seau est vide, le mécanisme n'est pas animé et les portes sont maintenues fermées par le contrepoids.

L'eau s'écoulant par le siphon remplit le seau. Celui-ci voit sa masse augmenter, et n'est alors plus en équilibre avec le contrepoids. Le seau s'abaisse entraînant avec lui les cordes qui font tourner les tiges des portes. Les portes s'ouvrent. Lorsque le feu s'éteint, l'air refroidit et se comprime. Son volume diminue en regagnant l'autel, et l'eau aspiré revient à sa place dans le réservoir. Le seau se vide et devient plus léger que le contrepoids. Le contrepoids redescend et son mouvement entraîne la fermeture des portes du temple miniature.

Pour résumer, le fonctionnement du mécanisme des portes automatiques peut être divisé en dix étapes clés :

1. On allume le feu en déposant des petites brindilles sur l'autel.
2. L'air chaud présent dans l'autel prend du volume en montant en pression. Il migre au sein du réservoir d'eau par le tuyau communiquant.
3. En entrant dans le réservoir, l'air chaud chasse l'eau au travers du siphon recourbé.

4. L'eau passe dans un petit seau suspendu par une poulie.
5. Sous le poids de l'eau, le seau devient plus lourd que le contrepoids. En descendant, il tire sur la corde qui entraîne l'ouverture des portes.
6. Le feu s'éteint.
7. L'air refroidit et se comprime. Il reprend sa place au sein de l'autel.
8. En se comprimant, l'air aspire l'eau par le siphon recourbé. Le seau se vide, et l'eau reprend sa place dans le réservoir. Le seau devient plus léger que le contrepoids.
9. Le contrepoids revient à sa position initiale et referme les portes du temple, en tirant sur la corde.
10. L'automate est à nouveau opérationnel.

K. Kotsanas propose une hypothèse de restitution de cet automate dans le cadre de son musée (cf. Figure 44)¹³⁵. Mis à part le choix du type de temple, la restitution de K. Kotsanas est semblable à la nôtre. Sa base ouverte permet de faire comprendre à son public comment fonctionne l'automate. Il n'essaie pas de transmettre l'émotion que pouvait véhiculer ce type de machine, il essaie seulement d'expliquer son fonctionnement. Le choix du cuivre comme matériau est aussi retenu par K. Kotsanas.

3.5.3 Mise en contexte de l'automate

La Figure 45 permet de juger de l'échelle de l'automate. Le temple miniature pouvait alors être déposé sur une table afin qu'une personne puisse l'utiliser assise sans problème. Pour interagir avec lui, nous devons avoir près de nous des petites brindilles et un moyen d'allumer un feu (torche, bougie, lampe à huile, etc.). Avec ces éléments, l'utilisateur peut allumer le feu sur l'autel et voir les portes s'ouvrir toutes seules.

Le mécanisme doit impérativement être caché si nous voulons transmettre de l'émotion à l'ouverture des portes. Il faut pouvoir ressentir ce sentiment magique. Il est alors bon d'admirer la réaction des personnes face à cette ouverture automatiques des portes. La plupart des personnes sont étonnées, et un sentiment d'incarnation divine semble le plus pertinent à envisager.

La deuxième utilisation est réservée aux techniciens. L'usage d'une maquette permet de démontrer des nouveaux procédés techniques et d'envisager leurs constructions à plus

135. K. Kotsanas, *Les inventions des Grecs dans l'Antiquité*, Pyrgos, p.57, 2015.



FIGURE 44 – Hypothèse de restitution de l'automate des portes automatiques du temple miniature par K. Kotsanas, Pyrgos, 2015.

grande échelle. Cependant dans le cadre de ce type d'automate, nous ne savons pas si des portes automatiques ont été construites sur de véritables temples.



FIGURE 45 – Mise en situation du temple miniature (Réalisation J. Nicolle).

3.6 Le théâtre automatique mobile

3.6.1 Source textuelle

La description complexe du mécanisme du théâtre automatique à base mobile est décrit dans le traité des *Automates* d'Héron d'Alexandrie. Aujourd'hui, nous pouvons retrouver ce texte dans le volume 1 de l'édition publiée par W. Schmidt en 1903¹³⁶.

Le mécanicien thaumaturge décrit, au sein de son traité, deux types de théâtre automatiques :

1. Un théâtre automatique à base mobile qui illustre l'apothéose de Bacchus (Dionysos).
2. Un théâtre automatique à base fixe qui raconte la légende de Nauplius en cinq actes.

Le système mécanique du théâtre automatique à base mobile est décrit dans les paragraphes 1 à 19, tandis que celui du théâtre automatique à base fixe y est décrit dans les paragraphes 20 à 30. Le texte grec concernant le théâtre automatique à base mobile est disponible en Annexe A.1.5 page 256 avec la traduction en allemand de W. Schmidt. Cette traduction servira de base pour restituer en trois dimensions le mécanisme de ce théâtre.

Le premier paragraphe permet à Héron de poser les bases de son traité. Il nous informe qu'il va décrire deux types de théâtres automatiques, un mobile et un fixe.

Dans le deuxième paragraphe, il préconise l'usage d'un sol en bois qui soit le plus plat possible. Ce sol droit permet à la structure de se mouvoir tout en évitant les frottements et les obstacles. La construction des cordes, qui permettent d'animer le mécanisme, est détaillée. Elles ne doivent pas s'étirer ni se comprimer. Héron présente le contrepoids qui est l'élément le plus imposant et important de la structure. Son théâtre automatique à base mobile doit être le plus léger possible. Son contrepoids repose sur des graines de mil ou de moutarde. Ses graines sont remplacées par du sable sec pour le deuxième type de théâtre. Afin que l'appareil apparaisse comme quelque chose de nouveau, Héron évite de reproduire des représentations théâtrales imaginées par ses prédécesseurs.

136. W. Schmidt, *Heronis Alexandrini opera quae supersunt omnia. Volumen 1. Pneumatica et Automata*, Leipzig, Teubner, 1903.

Le troisième paragraphe fait la liste de tous les composants dont nous avons besoin pour construire un tel mécanisme et restituer l'animation de l'apothéose de Bacchus. Le premier élément est la présentation et la construction d'un piédestal qui va accueillir l'essieu moteur et le système des cymbales. Toutes les dimensions sont présentes et énoncées en coudées. Au dessus de cette structure rectangulaire, quatre colonnes et un architrave entourent la boîte qui dissimule le contrepoids. Un plancher de bois sur l'architrave permet de placer un petit *tholos*. Ce temple rond à six colonnes accueille Bacchus en son centre. La divinité est représentée avec un thyrses dans sa main gauche et une coupe dans sa main droite. Une panthère est allongée à ses pieds. Sur le sommet du temple, Niké, déesse de la Victoire, est exposée ailes déployées et munie d'une couronne de fleurs. Autour de ce temple, six Bacchantes sont placées au niveau de chaque colonne. Deux autels sont disposés de part et d'autre de Bacchus.

Dans le quatrième paragraphe, l'animation de l'apothéose de Bacchus est présentée et découpée en cinq périodes :

1. Le théâtre avance sur quelques mètres et s'arrête.
2. L'autel devant Bacchus s'allume. Les bacchantes dansent en tournant autour du temple. Les guirlandes de fleurs tombent de l'architrave et Bacchus donne une libation de lait (par le tuyau creux du thyrses) et de vin (coupe).
3. Les cymbales retentissent et au même moment Bacchus et Niké tournent à 180 degrés. Le deuxième autel se retrouvant maintenant en face de Bacchus s'allume. Le dieu effectue une nouvelle libation et les Bacchantes, une nouvelle danse.
4. Le son des cymbales et les Bacchantes s'arrêtent
5. Le théâtre revient en position initiale.

Les paragraphes cinq et six décrivent la construction de l'essieu moteur installé au sein du piédestal. Héron explique comment effectuer un aller et retour avec un temps d'attente, pour laisser le spectacle se jouer avant le retour en position de départ.

Dans un premier temps, le théâtre se déplace en ligne droite. Mais Héron propose des solutions pour d'autres formes de déplacements. Ainsi aux paragraphes six et huit, il décrit des mécanismes permettant d'effectuer un mouvement circulaire à la structure. Dans les paragraphes neuf et dix, le caisson se déplace sur une piste rectangulaire. Quant au onzième paragraphe, le mécanisme qui est décrit permet d'effectuer des mouvements arbitraires.

L'allumage des feux des autels est présenté au paragraphe douze, tandis que le mécanisme permettant à Bacchus d'effectuer des libations est décrit au paragraphe treize. La construction des cymbales permettant de sonoriser l'automate est décrite avec précision dans le paragraphe quatorze. Son installation doit se faire au sein du piédestal et être dissimulée de la vision du public.

La présence de guirlandes de fleurs, cachées sous l'architrave, permet d'ajouter un mécanisme automatique de plus à notre construction. Elles sont alourdies de plombs permettant de descendre plus vite lors de leur activation. La construction des plaques retenantes est exposée dans le paragraphe quinze.

Les derniers paragraphes exposent des méthodes permettant de camoufler les différents mécanismes qui composent l'automate.

3.6.2 Hypothèse de restitution

La modélisation en trois dimensions de cet automate nécessite quatre étapes pour aboutir à un théâtre animé fonctionnel :

1. La première étape consiste à modéliser Bacchus, muni de son thyrses, et sa panthère.
2. Deuxièmement, nous devons restituer Niké, la personnification de la Victoire, ailes déployées.
3. Pour illustrer l'apothéose de Bacchus, une modélisation des bacchantes est réalisée.
4. Pour terminer nous devons restituer les différents mécanismes qui composent l'automate.

3.6.2.1 Bacchus et sa panthère

Héron d'Alexandrie utilise pour son théâtre un Bacchus¹³⁷, tenant dans sa main gauche son thyrses, et dans sa main droite une coupe. Ce sceptre creux, en forme de pomme de pin, ainsi que la coupe, permettent à la statue de faire des libations. Le mécanicien indique que le dieu est accompagné d'une panthère qui est couchée à ses pieds, et qu'il porte une couronne de vigne dans les cheveux.

La Figure 46b représente Bacchus sur un bas-relief retrouvé à Herculaneum. Cette sculpture illustre les propos d'Héron quant à la représentation du Dieu : thyrses et coupe dans les mains, couronne de vigne, traits efféminés et panthère allongée au pieds. Des éléments importants sur la sculpture nous renseignent sur la carrure et le style vestimentaire de Bacchus, éléments qui sont sous-entendus chez Héron d'Alexandrie. Ainsi nous apprenons que le dieu possède un corps frêle, presque enfantin, et qu'il dispose d'un simple voile pour s'habiller. La panthère est allongée à ses pieds avec les pattes en avant, signe de soumission. Avec tous ces éléments, nous pouvons restituer virtuellement Bacchus et sa panthère afin de le positionner au milieu de la *tholos* (cf. Figure 47).



a)



b)

FIGURE 46 – a) Bacchus sur un guépard, mosaïque dans la « Maison de Dionysos » (2,70m x 2,65m), 330-300 avant J.-C., Pella, Grèce (cliché S. Madeleine). b) Bacchus tenant d'une main le thyrses et tendant de l'autre un canthare, Bas-relief d'Herculaneum, Musée de Naples, Italie (cliché Sailko - 2013).

137. Dieu du vin, il est l'équivalent de Dionysos chez les Grecs.



FIGURE 47 – Restitution virtuelle de Bacchus et sa panthère (Réalisation J. Nicolle).

3.6.2.2 Niké, déesse personnifiant la Victoire

Héron présente une autre divinité importante dans son théâtre automatique à base mobile. Il fait la description de Niké, une déesse personnifiant la Victoire qui est décrite comme une femme ailée tenant dans sa main une couronne de fleurs. Il la place au sommet du temple de son théâtre et la positionne de manière à ce qu'elle soit orientée de la même manière que Bacchus.

L'équipe du « Plan de Rome » a déjà travaillé sur la restitution en trois dimensions de la Victoire¹³⁸. Pour notre automate, nous allons utiliser le modèle qu'a modélisé C. Morineau (cf. Figure 49). Ce modèle est réalisé à partir d'un revers de pièce d'or qui représente en détail une Victoire, debout sur un globe, tenant une couronne de fleurs et un *vexillum*, sorte d'étendard disposant d'une pièce d'étoffe carrée.

138. Une grande statue d'une Victoire habille le fond de la Curie julienne : http://www.unicaen.fr/cireve/rome/pdr_virtuel.php?fichier=curia (Consulté le 22/11/2019)



FIGURE 48 – Pièce en or. Victoire drapée, debout sur un globe, tenant une couronne de fleurs et un vexillum. Provenance : Italie, 29-27 avant J.-C., British Museum, Londres, Royaume-Uni. (collection en ligne : 1864,1128.230)



FIGURE 49 – Restitution virtuelle d'une Victoire (Réalisation C Morineau).

3.6.2.3 Les Bacchantes

Dans la mythologie, les bacchantes sont des femmes servant les mystères du dieu Bacchus. Elles sont généralement peu vêtues, une simple tunique laissant apparaître un sein, où bien totalement nues. L'étude iconographique vient appuyer ces indications, comme le montre une mosaïque de la Maison de Dionysos à Chypre (cf. Figure 50).



FIGURE 50 – Mosaïque représentant Bacchus et une bacchante, Maison de Dionysos, Paphos, Chypre (Cliché S. Madeleine).

La restitution d'une bacchante (cf. Figure 51) est réalisée sur la base d'une femme moyenne d'1,6 m¹³⁹. La position des bras est très aléatoire et ne ressemble à aucune danse. En effet les bacchantes sont reconnues comme entrant dans un état second lors de leur culte dionysiaque¹⁴⁰. Elles effectuent des petits bonds en levant les bras et en poussant des cris. Une fois la pose définie, notre modèle est habillé d'une tunique légère laissant apparaître un sein.

139. Une étude menée sur des ossements retrouvés à Pompéi montre que l'homme romain moyen mesurait, au premier siècle de notre ère, environ 1,64 m.

E. Lazer, *Resurrecting Pompeii*, Londres, Routledge, 2009, p. 155-156.

140. Lucien de Samosate, *Oeuvres complètes*, texte traduit par E. Chambry, Paris, Editions Robert Laffont, 2015, p.52.



FIGURE 51 – Modélisation d’une bacchante (Réalisation J. Nicolle).

3.6.2.4 Modélisation de l’automate

L’élément principal de l’automate est le petit temple qui reçoit Bacchus (cf. Figure 52). Le texte nous apprend qu’il s’agit d’une *tholos*, petit temple de forme circulaire, à six colonnes. Les colonnes corinthiennes supporte le toit de tuiles qui accueille la Victoire en son sommet. Au centre du temple, nous retrouvons Bacchus et sa panthère. Deux autels sont présents de chaque côté. Dans chacun d’entre eux se trouve une petite lampe à huile qui permet d’embraser les copeaux de bois qui sont présents sur le dessus.

Héron ne précise pas explicitement le nombre de bacchantes¹⁴¹ qui composent son automate. Cependant, il nous indique qu’elles doivent être placées devant chaque colonne, ce qui nous ramène à un nombre de six femmes. Elles sont fixées à un cercle qui entoure la *tholos* permettant de les faire danser durant la représentation.

La Figure 56 présente un point de vue global du théâtre automatique à base mobile d’Héron d’Alexandrie. Elle nous montre la restitution du bloc contrepoids qui supporte le petit temple où a lieu l’apothéose de Bacchus.

Le bloc rectangulaire du bas de l’automate est décrit précisément par Héron d’Alexandrie. Les dimensions, exprimées en coudées et en travées par le mécanicien, sont de 1

141. Les bacchantes sont des femmes ou des prêtresses qui célébraient, souvent par la danse, les mystères et les fêtes de Bacchus.



FIGURE 52 – Mise en scène de l’apothéose de Bacchus. Zoom sur la *tholos* du théâtre automatique (Réalisation J. Nicolle).

coudée (46 cm) de longueur, 4 travées de largeur (31 cm) et 3 travées de hauteur (23 cm). Cette structure en bois accueille l’essieu moteur et ses deux roues. Une troisième roue permet de stabiliser l’ensemble de la machine. Le texte indique également que les roues doivent être invisibles des spectateurs.

L’ossature du milieu est composée de deux éléments :

- Un bloc qui accueille le contrepoids, moteur du système mécanique de l’automate. De forme rectangulaire allongée, il laisse un petit bout de corde dépasser, permettant à l’opérateur de lancer le spectacle. Les graines utilisées sont des graines de moutarde ou de millet, plus légères que le sable fin présent dans le théâtre automatique à base fixe.
- Quatre grosses colonnes qui soutiennent la base rectangulaire du petit *tholos*. Les colonnes ont un diamètre de 2 travées (15,5 cm) et une hauteur de 8 travées (62 cm). Nous avons choisi d’utiliser un ordre plus simple pour les chapiteaux afin que l’œil soit attiré dans un premier temps par le temple miniature.

La base rectangulaire qui soutient le temple est construite en bois. Tout autour une cache est réalisée afin de dissimuler des guirlandes de fleurs qui tomberont lors de la danse des bacchantes. Ces guirlandes sont alourdies de billes de plomb pour faciliter la descente.

Elles sont retenues par des planches de bois qui sont bloquées par un loquet.

Le théâtre automatique mesure approximativement 1,30 m de hauteur, personne ne peut donc entrer à l'intérieur pour manipuler l'automate.

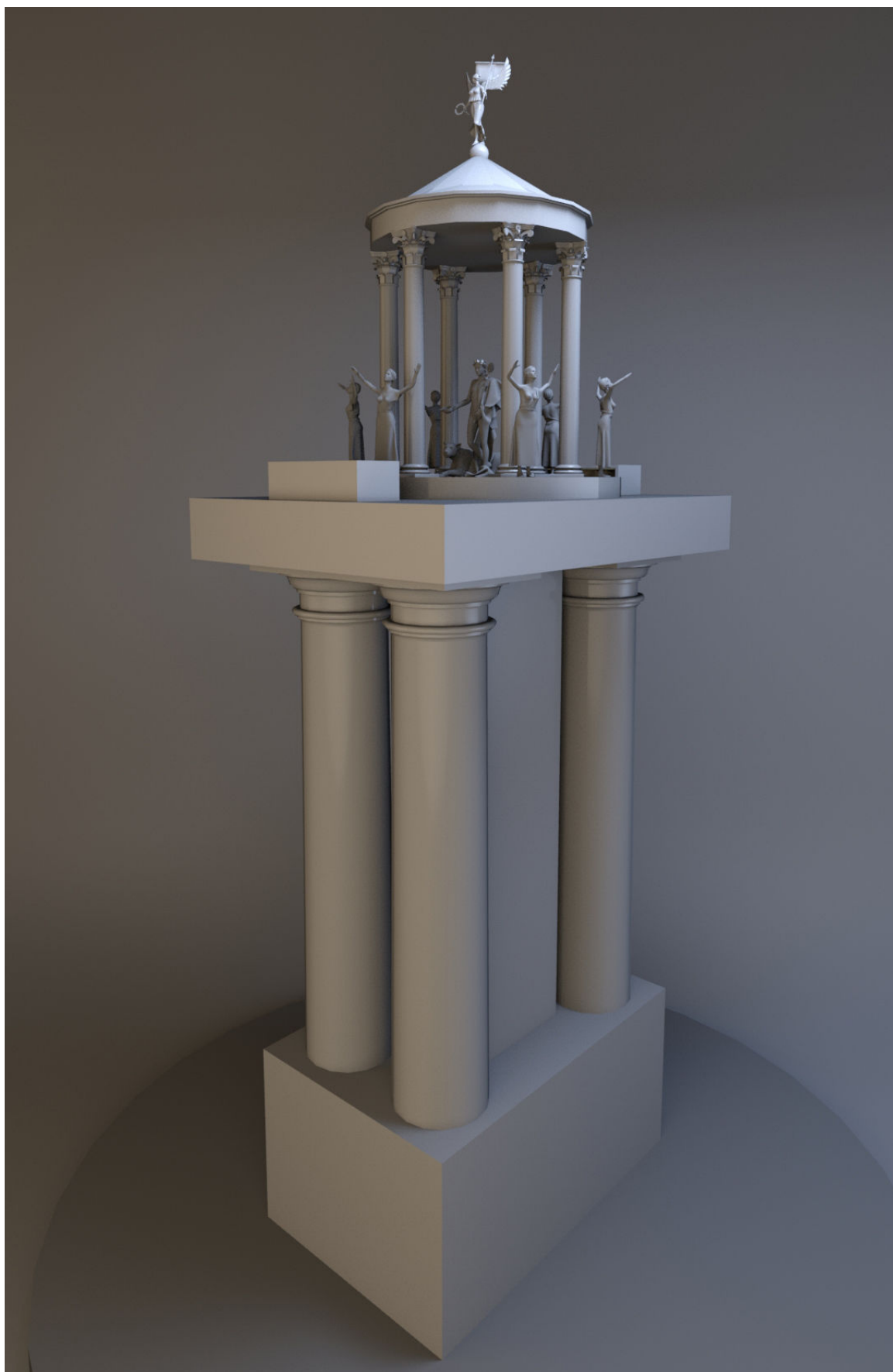


FIGURE 53 – Restitution virtuelle du théâtre automatique à base mobile d'Héron d'Alexandrie (Réalisation J. Nicolle).

3.6.2.5 Restitution du mécanisme interne

Le théâtre automatique à base mobile est l'automate le plus complexe que nous avons restitué. Il utilise plusieurs principes mécaniques différents : usage de la pneumatique, système de cordage pré-programmé et contrepoids-moteur. Nous allons décrire une à une les différentes parties de la machine afin de mieux comprendre comment elle fonctionne. La figure 54 propose un schéma des différents mécanismes du théâtre et pose les bases du travail de restitution. La figure 56 montre la modélisation en trois dimensions du mécanisme interne du théâtre automatique à base mobile.

L'élément central de cet automate est l'essieu-moteur. Il joue un rôle prépondérant dans l'animation de la machine. Héron précise dans son traité que les roues de cet essieu doivent être invisibles des yeux des spectateurs afin de faire croître l'étonnement chez eux. Cet essieu (cf. Figure 55) dispose de deux roues munies d'une surface rugueuse pour obtenir le plus d'adhérence possible. La surface centrale de l'essieu, de forme cylindrique et plus épaisse, accueille l'enroulement de la corde. La corde est enroulée de manière très spécifique afin de proposer trois animations de durée similaire :

1. Pour déplacer le théâtre, on enroule la corde autour de l'essieu.
2. Ensuite, le théâtre est fixe et l'essieu ne tourne plus. Pour cela nous allons effectuer des « vagues » avec la corde et la coller sur l'essieu de manière à ce que le contrepoids les décolle facilement sans le faire tourner.
3. Pour le retour de la machine en position initiale, il suffit d'enrouler la corde de manière contraire à l'aller.

Le contrepoids fait office de chef d'orchestre de l'automate. C'est lui qui permet d'animer les différents mécanismes et de faire avancer le théâtre. Il est situé dans la partie médiane de la machine, où les grandes colonnes sont présentes. Il est camouflé à l'intérieur du caisson de bois situé au milieu. Pour activer l'automate, l'opérateur doit tirer sur une cordelette afin de libérer les graines de millet (ou de moutarde) et de faire descendre le contrepoids. Deux cordes sont reliées à lui :

1. La première est attachée à l'essieu-moteur à l'aide de plusieurs poulies et permet de faire avancer et reculer le théâtre automatique de façon rectiligne.
2. La seconde est attachée à un cylindre de bois qui tourne sur son axe lorsque nous le sollicitons.

Ce cylindre de bois est une sorte de grosse poulie qui reçoit les différents cordages de différentes longueurs pour lancer à un instant T chaque animation : nous parlons ici d'un système de cordage pré-programmé. En effet, lorsque le cylindre tournera par l'action du contrepoids, cela entraînera le déclenchement de plusieurs mécanismes par l'action des cordes. Les différentes tailles de cordes vont permettre d'activer des animations à des moments bien précis.

La première animation qui est déclenchée est l'allumage du feu de l'autel situé devant la représentation de Bacchus. Dans l'autel, une lampe à huile est dissimulée pour allumer les copeaux de bois secs déposés sur le dessus. Cette lampe est allumée par l'opérateur en coulisses, afin de garder le tout secret. Une trappe retient la flamme à l'intérieur de l'autel et évite que les copeaux ne s'embrasent aussitôt. Elle est reliée à une petite chaîne¹⁴² qui est attachée à une corde fixée au cylindre de bois. Le mouvement circulaire du cylindre tire sur la corde et actionne l'ouverture de la trappe. La flamme est libérée et le feu s'allume (cf. Figure 54).

Au même moment Bacchus effectue une libation. De son thyrses jaillit de l'eau (ou du lait) et de sa coupe du vin. Pour cela des réservoirs sont dissimulés dans le toit du temple et sont reliés à Bacchus par des tuyaux camouflés à l'intérieur d'une colonne. Une vanne permet de laisser couler les liquides. Elle est ouverte lorsque la corde est tirée par le cylindre de bois.

L'apparition des guirlandes de fleurs se fait d'une manière très simple. Elles sont retenues par un cadre de planches de bois. Chaque planche retient sa voisine et un loquet bloque la dernière. Ce loquet qui est relié à une corde permet de libérer les planches qui sont attachées à des charnières (cf. Figure 54). Lorsque Bacchus effectue ses libations, les trappes en bois s'ouvrent et les guirlandes fleuries apparaissent.

Les six bacchantes sont fixées sur un cylindre autour du petit temple. Autour de ce cylindre est attachée une corde pour le faire tourner. L'animation de cette pièce de bois va simuler la danse de ces femmes. La corde est actionnée par le mouvement circulaire du système de cordage pré-programmé (le cylindre de bois vu précédemment). Ainsi nous observons la danse circulaire des prêtresses de Bacchus.

Bacchus et la Victoire effectuent ensuite une rotation de 180 degrés. Pour cela, des cordes sont enroulées sur des axes de bois camouflés sous les sculptures. Comme pour les

142. La petite chaîne permet d'éviter la rupture de la corde à cause de la flamme.

THÉÂTRE AUTOMATIQUE À BASE MOBILE
 Héron d'Alexandrie, *Automata*, 1-19 (I^{er} siècle après J.-C.)

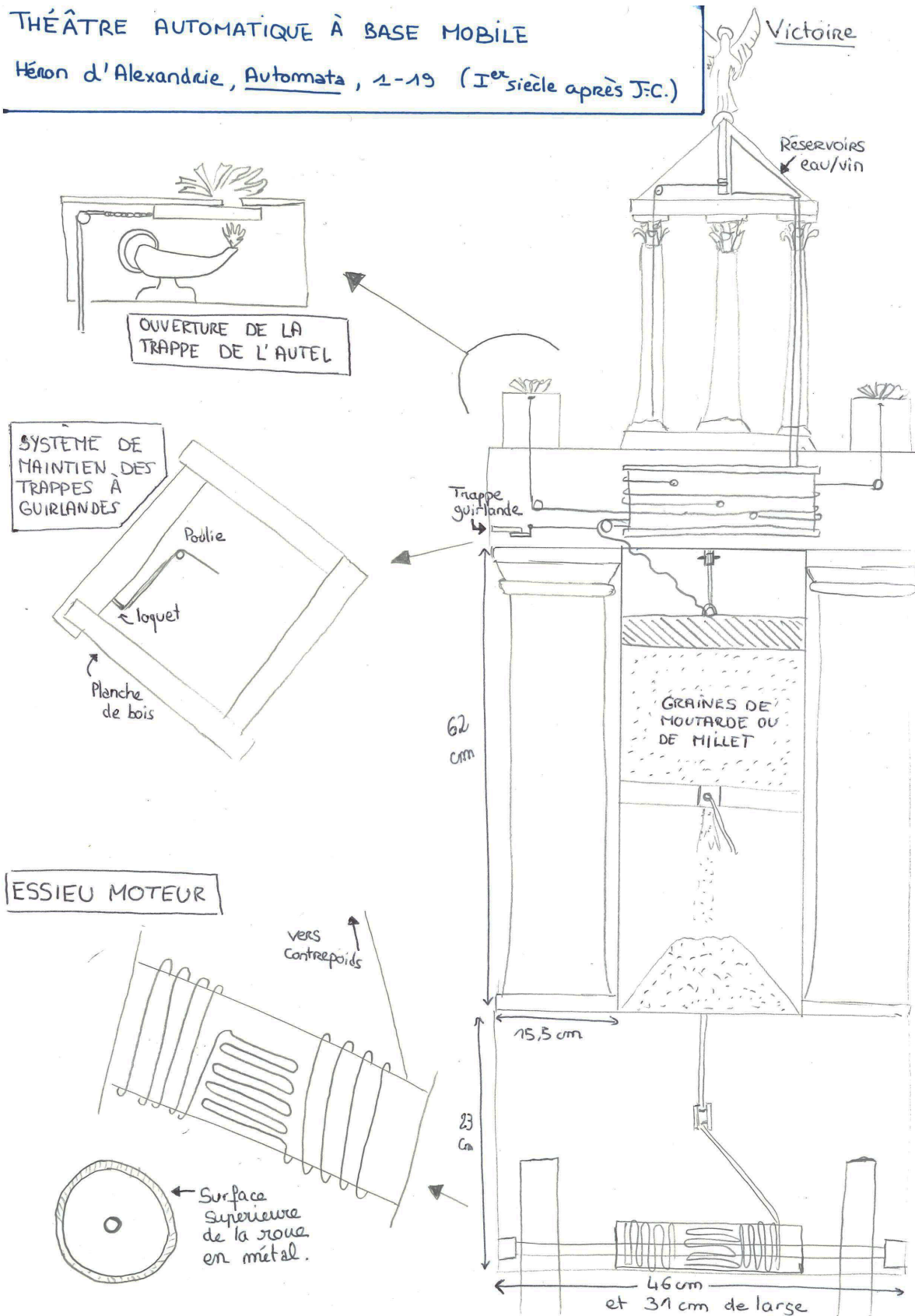


FIGURE 54 – Proposition de restitution du mécanisme interne du théâtre automatique à base mobile d'Héron d'Alexandrie (Réalisation J. Nicolle).

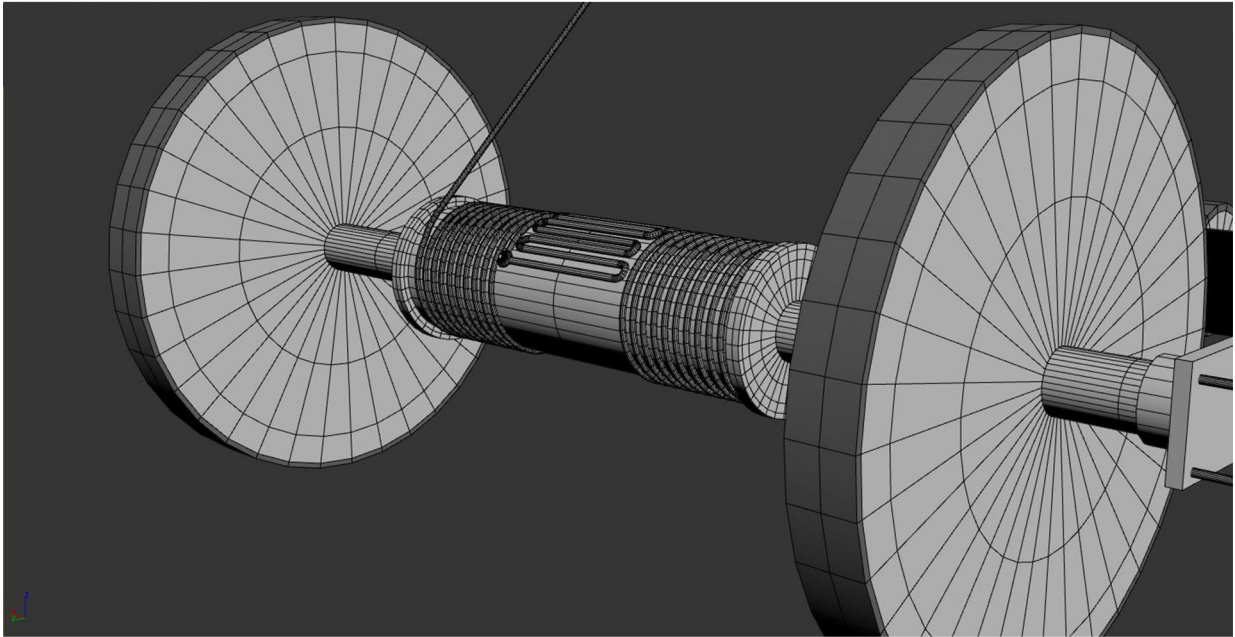


FIGURE 55 – Restitution de l'essieu moteur avec ses crapaudines (Réalisation J. Nicolle).

tuyaux, la corde reliée à la Victoire est dissimulée dans une colonne du temple. Bacchus reprend ses libations, les bacchantes dansent de nouveau et le second autel s'allume.

Le contrepoids arrive à la fin de son mouvement vertical et tire sur les derniers centimètres de corde de l'essieu-moteur pour effectuer le retour à la position initiale de l'automate.

Pour résumer, le fonctionnement du mécanisme peut être divisé en huit étapes :

1. Le théâtre se met en marche jusqu'à un point déterminé où il s'arrête.
2. L'autel (situé en avant de Bacchus) s'allume et du lait ou de l'eau jaillit de son thyrses, tandis que sa coupe verse du vin sur la panthère.
3. Les quatre faces du soubassement se ceignent de couronnes.
4. Au bruit des tambours et cymbales, les bacchantes dansent en rond autour de l'édicule.
5. Le bruit ayant cessé, Bacchus et la victoire font ensemble volte-face.
6. L'autel situé derrière le dieu se trouve alors amené en avant et s'allume à son tour avec un nouvel épanchement du thyrses et de la coupe ainsi qu'une nouvelle danse des bacchantes.
7. La danse achevée, le théâtre revient à sa position première.



FIGURE 56 – Vue générale du mécanisme interne du théâtre automatique à base mobile d'Héron d'Alexandrie (Réalisation J. Nicolle).

8. Fin de l'apothéose de Bacchus.

Notre restitution du théâtre automatique à base mobile n'est pas inédite. Aujourd'hui deux versions existent : un modèle virtuel a été réalisé en 2016 dans le cadre d'un Post-doctorat sur le théâtre d'automates d'Héron d'Alexandrie à l'Université de Glasgow¹⁴³, et un autre modèle, physique cette fois-ci, est construit par K. Kotsanas dans le cadre de son musée des automates à Olympie¹⁴⁴ (Cf. Figure 57).

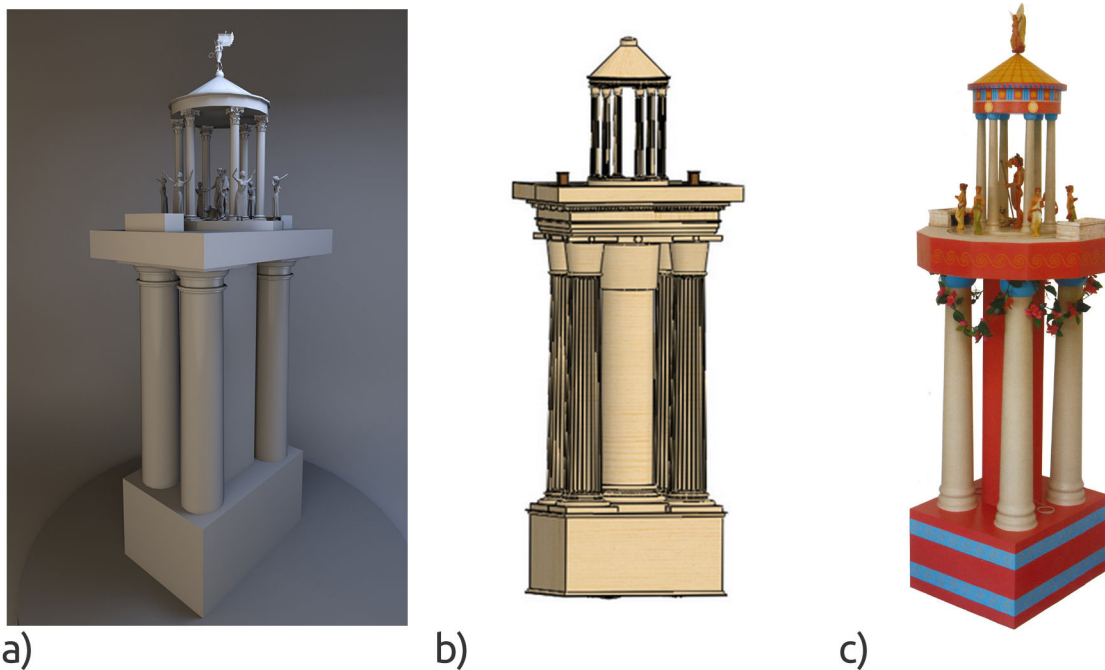


FIGURE 57 – Comparaison des différents modèles du théâtre automatique à base mobile d'Héron d'Alexandrie. a) Version virtuelle de J. Nicolle (2019). b) Version virtuelle de I. Ruffell et al. (2016). c) Version physique de K. Kotsanas (2015).

I. Ruffell et al. présentent une étude poussée sur la restitution virtuelle des théâtres automatiques d'Héron d'Alexandrie. Depuis 2016, ils travaillent sur de nouvelles traductions du traité et proposent plusieurs restitutions du théâtre automatique à base mobile. Chaque élément présenté par le mécanicien est restitué de façon précise, grâce à l'utilisation de la CAO¹⁴⁵ avec le logiciel Solidworks. Les mécanisme restitué est fonctionnel et est similaire à celui décrit par Héron. Cependant l'usage d'autels cylindriques ne me semble pas être le meilleur compromis pour intégrer la lampe à huile. Un autel rectangu-

143. Un modèle virtuel de l'automate est disponible sur le site internet du projet *Hero of Alexandria and his Theatrical automata* de l'Université de Glasgow :

<https://automata.arts.gla.ac.uk/models.php> (Consulté le 20/11/2019).

Ce projet est porté par I. Ruffell, E. McGookin, D. Keenan-Jones et F. Grillo.

144. K. Kotsanas, *Les inventions des Grecs de l'Antiquité*, Pyrgos, 2015, p.76-79.

145. Conception assistée par ordinateur.

laire permet d'ajouter plus facilement le mécanisme de la trappe de la flamme ainsi que d'user de l'espace disponible dans de meilleures conditions.

Le modèle de K. Kotsanas est réellement fonctionnel et est assez similaire à notre modèle restitué. Cependant, quelques différences sont apparentes. K. Kotsanas utilise un système d'essieu moteur à deux roues indépendantes pour effectuer des trajectoires programmées rectilignes et circulaires. Notre modèle utilise un essieu moteur constitué d'une seule pièce qui ne permet qu'une trajectoire droite d'avant en arrière. Cela se justifie par l'utilisation d'un amphithéâtre d'école alexandrine comme lieu de représentation (cf. Partie 3.6.3 page 144). Il propose également un soubassement du *tholos* de forme octogonale, quand Héron d'Alexandrie parle d'un bloc de forme rectangulaire dissimulant les quatre guirlandes fleuries. Le reste du mécanisme semble être en concordance avec ce que dit Héron dans son traité.

3.6.3 Mise en contexte de l'automate

L'automate du théâtre mobile d'Héron d'Alexandrie permettait d'étonner et d'émerveiller l'auditoire. En effet, comme le décrit le mécanicien : « la petitesse de l'ouvrage permet d'ôter les doutes quant à la présence d'un opérateur à l'intérieur ». De ce fait, cela devait certainement procurer beaucoup d'émotions de voir un tel automate bouger et s'animer de lui-même. Héron décrit plusieurs systèmes de navigation pour l'essieu moteur dans son traité : trajectoires courbes, lignes droites etc. Cependant il semble s'attarder sur l'usage de la ligne droite comme trajectoire pour son automate. Cela nous donne un indice important pour le lieu qu'utilise le mécanicien pour faire ses démonstrations. Son automate pouvait être présenté au sein d'un amphithéâtre des « écoles » d'Alexandrie (cf. Figure 58) pour toucher un bon nombre de personnes. Ce type d'amphithéâtre était certainement utilisé dans le cadre du Musée d'Alexandrie¹⁴⁶. La faible largeur de l'espace central permet à l'automate de faire seulement un aller et retour comme le recommande Héron. On veillera à installer une surface plane en bois favorisant le glissement. Plusieurs dizaines de personnes pourront ainsi assister à la représentation.



FIGURE 58 – Restes archéologiques d'un amphithéâtre des « écoles » d'Alexandrie, Alexandrie, Égypte. (Cliché S. Madeleine).

146. Une description du Musée d'Alexandrie est faite dans la partie 1.2.2.

4 | Conclusion

Analyser les sources anciennes permet d'entreprendre la restitution virtuelle des automates antiques. Les différents schémas des mécanismes sont réalisés grâce à l'étude des termes techniques mentionnés par les ingénieurs. De nombreux mécaniciens et thaumaturges talentueux ont peuplé leurs traités de machines à fonctionnement automatique. Cependant peu d'entre-eux nous sont aujourd'hui parvenus.

Le choix des restitutions s'est porté sur cinq machines antiques qui utilisent plus ou moins les mêmes procédés techniques à des degrés de complexité différents. Ces machines sont imaginées et développées par Philon de Byzance et Héron d'Alexandrie entre le III^e siècle avant J.-C. et le I^{er} siècle après J.-C. dans leurs traités des *Pneumatiques* et des *Automates*.

Le but de ces automates est de divertir tout en démontrant des principes mécaniques nouveaux. L'usage des techniques pneumatiques permet d'utiliser la force du mouvement de l'eau et de la compressibilité de l'air, tandis que l'usage d'un contrepoids moteur permet la programmation d'animations plus ou moins complexes. Le Musée d'Alexandrie, centre des innovations techniques durant l'Antiquité, permet à ces ingénieurs de participer au développement de la mécanique.

La réalisation d'une application immersive permettra de mettre en interaction les automates restitués. Interagir de manière naturelle et en totale immersion fera renaître les sentiments magiques que pouvaient procurer ces automates dans l'Antiquité. Nous allons ainsi immerger l'utilisateur dans le monde hellénistique, à échelle humaine, pour qu'il puisse juger de lui-même de l'authenticité des modèles 3D présentés.

Deuxième partie

La reconnaissance de gestes : un outil
indispensable à l'interaction et
l'immersion virtuelle

1 | Introduction à la reconnaissance de geste : une méthode basée sur l'apprentissage

1.1 Introduction

Le domaine des sciences du numérique offre chaque année de nouvelles techniques pour interagir virtuellement avec des environnements immersifs. L'usage de l'intelligence artificielle dans ce domaine permet à présent d'utiliser de méthodes plus performantes pour la détection et la classification des gestes de l'utilisateur. Cette reconnaissance des gestes permet d'interagir avec un modèle virtuel par l'utilisation de gestes usuels du quotidien : ramasser, prendre un objet, fermer ou ouvrir la main, marcher, s'asseoir, etc. Pour reconnaître un geste, on peut utiliser différentes méthodes qui sont toutes issues de l'apprentissage automatique, un sous domaine de l'intelligence artificielle.

Ce chapitre permet d'introduire cette notion d'apprentissage automatique et d'en apprendre plus sur les algorithmes qui sont utilisés dans les méthodes les plus employées dans la littérature.

1.2 Le *Machine Learning* (apprentissage automatique)

1.2.1 Concepts et algorithmes

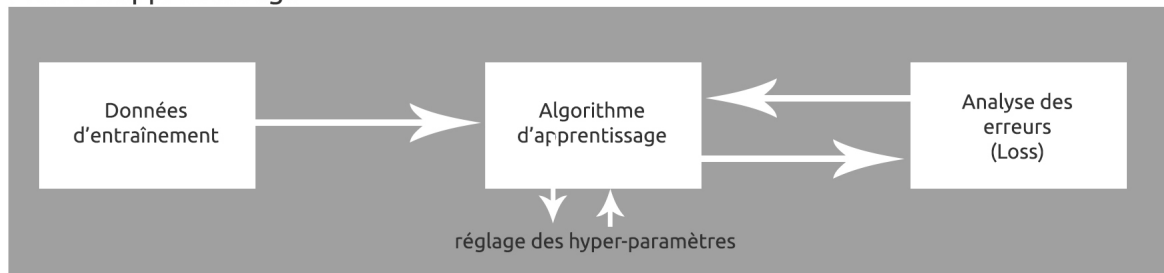
1.2.1.1 Définition

Le Machine Learning, ou apprentissage automatique, est une sous-classe de méthodes de l'intelligence artificielle qui permet à des ordinateurs d'apprendre sans être explicitement programmés. C'est une technologie qui est née au milieu des années 1950 avec l'algorithme du Perceptron, aujourd'hui mondialement connu. Ces méthodes, par le biais d'algorithmes, apprennent et s'améliorent d'elles-mêmes dès qu'elles se trouvent exposées à de nouvelles données.

Le site du Bigdata, site et magazine sur l'intelligence artificielle, donne une brève défi-

inition du Machine Learning : « Concrètement, il s'agit d'une science moderne permettant de découvrir des patterns et d'effectuer des prédictions à partir de données en se basant sur des statistiques, sur du forage de données, sur la reconnaissance de patterns et sur les analyses prédictives »¹⁴⁷.

Phase d'apprentissage



Phase de test

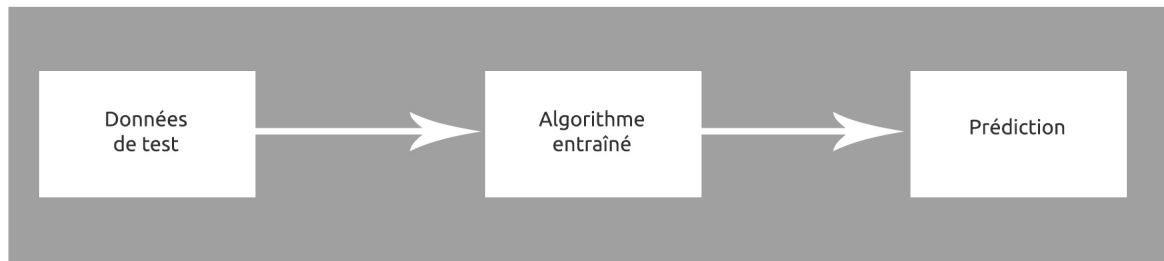


FIGURE 59 – Schéma illustrant les deux phases du processus de Machine Learning (Réalisation J. Nicolle).

Le fonctionnement d'une méthode d'apprentissage automatique se déroule en deux phases distinctes : la phase d'apprentissage et la phase de test (cf. Figure 59). Durant la première phase, des données sont transmises à un algorithme d'apprentissage qui réalisera des prédictions sur celles-ci. Ensuite un aller et retour entre l'algorithme et une fonction d'analyse des erreurs (Loss) permet de corriger les éventuelles erreurs de prédictions : c'est la phase d'apprentissage. Elle permet de configurer les hyper-paramètres de l'algorithme.

La phase de test reprend la méthode entraînée durant la phase précédente. Des données de test inconnues vont alors servir de point d'entrée à l'algorithme. L'efficacité de la méthode est éprouvée et calculée lors des prédictions effectuées durant cette phase de test.

La figure 60 représente sous la forme d'un graphique un exemple de classification effectuée par un algorithme de Machine Learning. La courbe de couleur verte définit une

147. <https://www.lebigdata.fr/machine-learning-et-big-data>

sorte de frontière de séparation qui permet à la méthode de classer en deux catégories (rouge et bleue) des éléments issus des données fournies en entrées. L'intérêt du Machine Learning est qu'il permet de déterminer automatiquement cette frontière à partir des données selon un critère d'erreur.

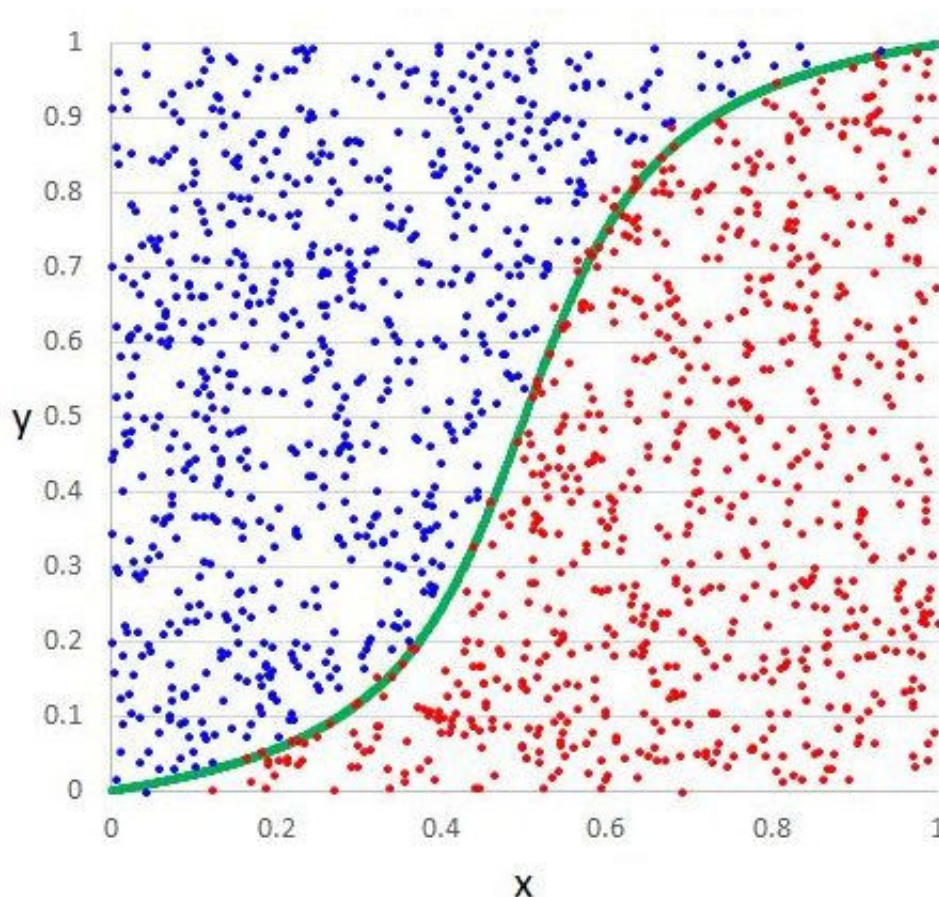


FIGURE 60 – Graphique illustrant la représentation spatiale de la classification d'un algorithme de Machine Learning (Source : <https://medium.com>).

1.2.1.2 Quelques algorithmes utilisés pour apprendre un modèle

Nous présentons quelques algorithmes d'apprentissage supervisé : les données d'apprentissage ont un label associé (leur classe) et l'algorithme doit apprendre à prédire cette classe à partir des données.

La méthode des k plus proches voisins (k-NN) : Il s'agit d'une méthode d'apprentissage supervisé dédiée à la classification. Cet algorithme figure parmi les plus simples en apprentissage artificiel. Le principe de K-NN peut s'identifier à l'analogie « dis moi qui sont tes voisins, je te dirais qui tu es... ». En effet, l'algorithme va

trouver la classe dominante des k points les plus proches en fonction de la distance paramétrée pour effectuer une prédiction.

Les Machines à Vecteurs de Support (SVM) sont des algorithmes de classifications binaires. Les SVM expriment la frontière de décision entre deux classes à partir d'exemples de la base d'apprentissage (les vecteurs supports) qui sont ceux permettant de définir la frontière de séparation de marge minimale.

Les Random Forests (RF) appartiennent à la famille des agrégations de modèles, qui sont des cas particuliers de bagging (bootstrap aggregating) appliqué aux arbres de décisions. Le principe des méthodes de Bagging, et donc en particulier des forêts aléatoires c'est de faire la moyenne des prévisions de plusieurs modèles indépendants pour réduire la variance et donc l'erreur de prévision. Cet algorithme est très performant pour la prédiction.

Les réseaux de neurones sont inspirés des neurones du système nerveux humain qui sont combinés afin de former un réseau. Ils permettent de trouver des patterns complexes dans les données. Ces réseaux de neurones apprennent une tâche spécifique en fonction des données d'entraînement.

1.2.2 Le *Deep Learning* (Apprentissage profond)

1.2.2.1 Définition

« L'apprentissage profond (Deep Learning) peut être défini comme le développement d'algorithmes d'apprentissage automatique permettant d'apprendre de multiples niveaux de représentation et/ou d'abstraction des données. Ces techniques ont abordé de nombreuses tâches d'intelligence artificielle (reconnaissance de la parole, traduction automatique, reconnaissance et suivi d'objets...) et ont permis d'améliorer de manière sensible les meilleurs résultats jusqu'alors obtenus. »¹⁴⁸ Cette brève définition de l'apprentissage profond est donnée par A. Cornuéjols dans son ouvrage *Apprentissage automatique* en introduction de son chapitre 10. Elle synthétise bien le concept du Deep Learning. Différents types de réseaux de neurones existent. Nous allons, pour la reconnaissance de gestes, utiliser les réseaux de neurones convolutifs.

148. A. Cornuéjols, L. Miclet, V. Barra, *Apprentissage artificiel*, Paris, Ed. Eyrolles, 2018, p. 303.

1.2.2.2 Réseaux de neurones convolutifs (CNN)

Le réseau de neurones convolutif est un algorithme d'apprentissage profond ayant une méthodologie similaire à celle des méthodes traditionnelles d'apprentissage automatique : il utilise des caractéristiques issues des données d'entrées puis entraîne un classifieur dessus. Contrairement aux techniques d'apprentissage automatique, les réseaux de neurones convolutifs apprennent les caractéristiques de chaque donnée. C'est ici que réside leur force : les réseaux font tout le travail d'extraction de caractéristiques automatiquement, contrairement aux techniques d'apprentissage supervisé classiques. Aujourd'hui, ces réseaux, appelés CNN ou ConvNet, sont les plus performants pour la classification d'images.

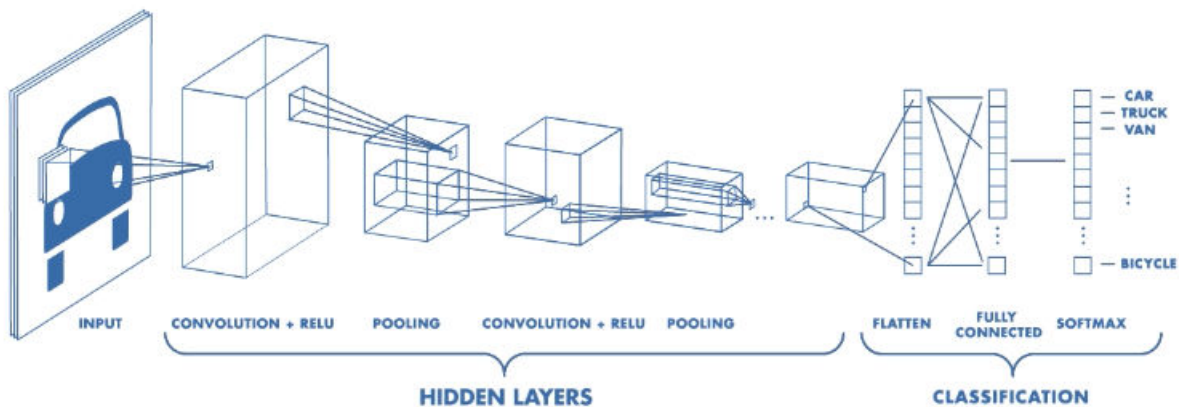


FIGURE 61 – Schéma illustrant une architecture de CNN permettant de classifier le type de véhicules présent dans une image (Source : <https://medium.com>).

Une architecture de CNN est agencée en différentes « couches » traitant successivement l'information. La Figure 61 illustre le procédé de classification d'une image en utilisant le CNN et ses différentes couches.

Les couches de convolutions sont les composantes clés des Réseaux CNN et permettent d'extraire des caractéristiques spécifiques présentes dans les données d'entrées. Pour extraire une caractéristique, un filtrage par convolution est réalisé. Ces couches de convolution reçoivent donc en entrées plusieurs canaux d'une image et calculent la convolution de chacune d'entre elles avec un ou plusieurs filtres. Les filtres correspondent aux caractéristiques que l'on souhaite retrouver dans les données d'entrées. Ils seront appris automatiquement par le réseau.

Les couches de pooling sont généralement placées entre deux couches de convolutions pour réduire le sur-apprentissage. Le pooling réduit la taille d'une donnée intermédiaire, réduisant ainsi la quantité de paramètres et de calcul dans le réseau.

L'unité linéaire rectifiée (ReLU) est une fonction qui augmente les propriétés de l'ensemble du réseau sans affecter les champs récepteurs de la couche de convolution. A chaque fois qu'il y a une valeur négative dans une donnée, on la remplace par un 0. Ainsi, on permet au CNN de rester en bonne santé (mathématiquement parlant) en empêchant les valeurs apprises de rester coincées autour de 0 ou de tendre vers l'infini.

Les couches entièrement connectées (FC) : Après plusieurs couches de convolution et de pooling, le raisonnement dans le réseau neuronal se fait via des couches entièrement connectées. Les neurones dans une couche entièrement connectée ont des connexions vers toutes les sorties de la couche précédente .

La fonction de perte (LOSS) spécifie comment l'entraînement du réseau pénalise l'écart entre le signal prédit (la classe trouvée par le réseau pour une donnée) et réel. Elle est normalement la dernière couche dans le réseau.

Chaque architecture CNN nécessite de définir manuellement une longue liste de paramètres pour lui permettre d'obtenir les résultats les plus optimaux et qui ne peuvent pas être appris seul par l'algorithme. Pour les couches de convolutions, il est nécessaire de définir le nombre de caractéristiques et la taille du filtre. Pour celles de Pooling, la taille de la fenêtre et le pas doivent aussi être mentionnées au départ. Enfin, pour chaque couche entièrement connectée, un nombre de neurones cachés doit être initialisé. Cependant, bien d'autres paramètres existent pour la configuration d'un réseau de neurones convolutif. Avec tant de combinaisons et permutations envisageables, seulement une petite fraction des configurations possibles ont été testées jusqu'à présent. Les architectures CNN restent aujourd'hui parmi les méthodes Deep Learning les plus performantes pour la classification des images. Dans notre étude chaque geste sera alors transformé en matrice et envoyé à un réseaux de neurones convolutif pour y être classé.

2 | Un axe de recherche fortement étudié

2.1 Introduction

2.1.1 Définition

La reconnaissance des gestes est un sujet de recherche en informatique ayant pour objectif de reconnaître et d'interpréter les gestes humains au moyen d'algorithmes d'apprentissage artificiel. Avant de développer les différentes méthodes qui existent dans la littérature, il est essentiel de définir ce qu'est un geste.

Kurtenbach et Hulteen définissent le geste comme étant « [...] un mouvement du corps qui contient des informations. Dire au revoir est un geste. Appuyer sur une touche du clavier n'est pas un geste car le mouvement d'un doigt n'est ni observé ni significatif, il importe uniquement de savoir quelle touche a été enfoncée »¹⁴⁹.

Malgré les multiples gestes que peut effectuer le corps humain, la reconnaissance des gestes repose aujourd'hui presque essentiellement sur le visage et les mains de l'utilisateur. C'est notamment le cas des smartphones et des tablettes qui peuvent disposer d'une reconnaissance faciale et une interaction logicielle basée sur le mouvement et la combinaison des différents doigts de la main.

La reconnaissance des gestes est donc une forme de communication non-verbale permettant d'interagir sur diverses applications. Cela part de l'industrie avec une étude sur l'ergonomie des gestes effectués par l'ouvrier et va jusqu'au domaine médical où le chirurgien apprendra virtuellement les gestes qu'il devra effectuer au bloc opératoire. Cette pluridisciplinarité d'utilisation en fait un domaine de recherche très développé et de nombreuses méthodes existent pour détecter de façon précise les différents gestes que l'homme est amené à effectuer.

149. G. Kurtenbach et E.A. Hulteen, « Gestures in Human-Computer Communication », *The Art of Human-Computer Interface Design*, New York, Addison-Wesley Publishing Company, 1990.

2.1.2 Algorithmes

Il existe différentes manières d'interpréter un geste selon le type de données d'entrée. Cependant, la plupart des techniques reposent sur des pointeurs clés représentés dans un système de coordonnées 3D.

Certains auteurs distinguent deux approches différentes de la reconnaissance des gestes : un modèle 3D et une apparence (à partir d'information couleur et de profondeur - RGBD)¹⁵⁰. La méthode la plus avancée utilise les informations 3D des éléments clés des parties du corps afin d'obtenir plusieurs paramètres importants, tels que la position de la paume ou les angles des articulations. D'autre part, les systèmes basés sur l'apparence utilisent des images ou des vidéos pour une interprétation directe.

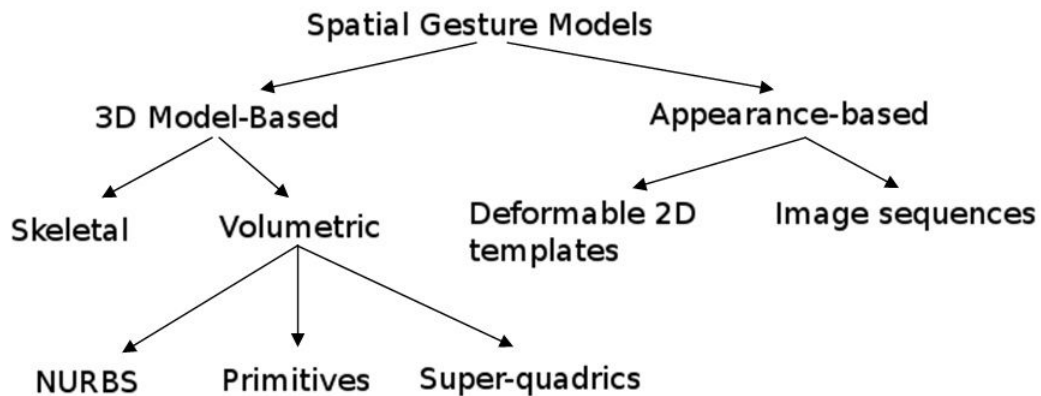


FIGURE 62 – Diagramme représentant les différents algorithmes utilisés dans la reconnaissance des gestes (V.I. Pavlovic, « Visual Interpretation of Hand Gestures for Human-Computer Interaction : A Review », in : *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 1997, p.681).

2.2 Problématique recherchée

L'application immersive interactive développée dans le cadre des automates antiques nécessite une interaction et une reconnaissance des gestes de la main en temps réel. Pour cela, les modèles basés sur le squelette de la main proposent des algorithmes assez rapides permettant d'agir en temps réel sur la reconnaissance et la classification des gestes de l'utilisateur. Seules les positions de chaque joint de la main sont nécessaires, il n'y a

150. V. Pavlovic, R. Sharma, Th. Huang, « Visual Interpretation of Hand Gestures for Human-Computer Interaction ; A Review », *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1997.

donc pas d'objet en trois dimensions à traiter à chaque étape. Ce sont donc ces modèles d'algorithmes que nous allons utiliser pour notre étude.

L'état de l'art permettra de lister et de comparer les différentes méthodes et interfaces d'acquisition reposant sur la reconnaissance des gestes issus d'un squelette de la main. Une autre partie permettra aussi de découvrir et comparer les différents datasets utilisés par les chercheurs pour perfectionner leurs algorithmes.

2.3 État de l'art

Dans la littérature, il existe deux classes de méthodes pour reconnaître les gestes :

1. Celles extrayant des caractéristiques statiques ou temporelles décrivant le mouvement de la main. Celles-ci sont conçues « à la main » (handcrafted features) par les chercheurs et exploitées par des algorithmes d'apprentissage.
2. Celles de Deep Learning qui apprennent conjointement les caractéristiques et la discrimination des gestes.

2.3.1 Handcrafted features & Machine Learning

Diverses représentations des données du squelette, développées « à la main » par les chercheurs, peuvent être utilisées pour la classification. Ces représentations décrivent souvent des attributs et des contraintes physiques, ou des propriétés et des corrélations des données facilement interprétables, avec une emphase sur les caractéristiques géométriques et statistiques. Certaines caractéristiques couramment utilisées sont les positions des joints du squelette, l'orientation des articulations, la distance et les angles entre les joints, la présence de symétrie dans le squelette et plus généralement d'autres caractéristiques qui impliquent une métrique compréhensible par l'homme calculée à partir des données du squelette.

Dans son étude, M. Devanne¹⁵¹ propose de représenter les séquences d'articulations du squelette comme étant des trajectoires dans un espace en plusieurs dimensions. Il calcule les similarités entre les différentes formes de trajectoires avec le k -Nearest Neighbor (k -NN) pour atteindre la séquence de classification.

151. M. Devanne, H. Wannous, S. Berretti, P. Pala, M. Daoudi et A. Del Bimbo, « 3-d human action recognition by shape analysis of motion trajectories on riemannian manifold », *IEEE transactions on cybernetics*, 45, 2015, 1340–1352.

De Smedt ¹⁵² présente sa méthode qui utilise trois descripteurs pour la reconnaissance des gestes de la main :

1. Shape of Connected Joints (SoCJ) : Ce descripteur propose de représenter la forme de la main en utilisant le squelette. Cette représentation crée neuf tuples de cinq dimensions qui utilisent les 22 joints de la main ; cinq d'entre eux reproduisent les doigts.
2. Histogram of Hand Directions (HoHD) : Cette caractéristique permet la construction d'un histogramme qui décrit la direction du geste.
3. Histogram of Wrist Rotation (HoWR) : La rotation du poignet est un élément important pour quelques gestes. C'est pourquoi ce descripteur permet de prendre en compte cette rotation et la détecte.

Pour la classification finale il utilise des Fisher Vectors (FV).

Cipitelli ¹⁵³ utilise lui un SVM multi-classe (Support Vector Machine) pour pouvoir classifier des caractéristiques d'activités en fonction des caractéristiques de posture.

Xing, dans son article *A brief survey on sequence classification* ¹⁵⁴, nous indique que dans la littérature d'autres classifieurs sont fréquemment utilisés dans les différents algorithmes. Voici les principaux :

- Dynamic Time Warping (DTW) algorithm,
- Les méthodes discrètes basées sur la distance,
- Les modèles cachés de Markov (HMM),
- Conditional Random Fields (CRF),
- k -Nearest Neighbors (k-NN).

Ces différentes méthodes ne reposant pas sur le Deep Learning peuvent être utilisées dans la classification des gestes basés sur une représentation du squelette de la main. Cependant des méthodes plus performantes existent et utilisent l'apprentissage profond.

152. Q. De Smedt, H. Wannous, J.-P. Vandeborre, J. Guerry, B. Le Saux et D. Filliat, « Shrec'17 track : 3d hand gesture recognition using a depth and skeletal dataset », *10th Eurographics Workshop on 3D Object Retrieval*, 2017.

153. E. Cipitelli, S. Gasparrini, E. Gambi et S. Spinsante, « A human activity recognition system using skeleton data from rgbd sensors », *Computational intelligence and neuroscience*, 21, 2016.

154. Z. Xing, J. Pei et E. Keogh, « A brief survey on sequence classification », *ACM Sigkdd Explorations Newsletter*, 12, 2010, p.40-48.

2.3.2 Les méthodes basées sur le Deep Learning

Les méthodes de Deep Learning sont, dans l'état de l'art, utilisées pour la réalisation de différentes tâches¹⁵⁵ comme :

- La reconnaissance vocale,
- La reconnaissance d'image,
- Le traitement du langage.

Le CNN¹⁵⁶, composé de couches de convolutions et de pooling est utilisé dans les méthodes comme étant un extracteur de caractéristiques et un classifieur.

Y. LeCun¹⁵⁷, un des initiateurs de l'utilisation de ces réseaux, nous explique que la principale stratégie de ces réseaux de neurones à convolutions est de les entraîner sur des images¹⁵⁸. Le CNN compare alors les images fragments par fragments. Ces fragments recherchés sont appelés des caractéristiques. La détection des similitudes est bien meilleure par le CNN que par une comparaison entière d'images.



FIGURE 63 – Exemple de données provenant de capteurs RGB-D comme la Kinect 2 de Microsoft : à gauche on trouve une image 2D en couleurs, une image de profondeur au milieu et le squelette 3D à droite (Cliché M. Devanne).

La reconnaissance des gestes de la main peut être réalisée en utilisant des CNNs d'image. C'est le cas, par exemple, de Strezoski¹⁵⁹ qui présente des réseaux de neurones à convolutions qui sont appliqués sur des séquences d'images RGB. En effet la représentation de la main est transformée en image et est passé à travers le réseau afin d'obtenir

155. I. Goodfellow, Y. Bengio et A. Courville, *Deep learning*, Cambridge, MITpress, 2016.

156. Réseau de neurones à convolution (Convolutional Neurons Network).

157. Y. LeCun, L. Bottou, Y. Bengio et P. Haffner, « Gradient-based learning applied to document recognition », *Proceedings of the IEEE*, 86(11), 1998, 2278–2324.

158. Il s'agit d'une combinaison d'image RGB et de son image de profondeur correspondante.

159. G. Strezoski, D. Stojanovski, I. Dimitrovski et G. Madjarov, « Hand gesture recognition using deep convolutional neural network », *ICT Innovations*, 9 2016.

une classification.

Une autre méthode utilise ces réseaux CNNs avec des séquences d'images RGB-D, mais avec une architecture un peu différente. En effet, Molchanov¹⁶⁰ propose de classifier les gestes de la main en utilisant deux réseaux de neurones à convolutions (un en haute résolution et l'autre en basse résolution).

Enfin, J. Guerry¹⁶¹ présente une autre approche de Deep Learning pour la reconnaissance des gestes de la main sur le dataset DHG 14-28. Elle consiste à concaténer les canaux Rouge, Bleu, Vert et celui de la Profondeur de chaque image RGB-D. Ensuite un réseau de classification VGG pré-entraîné (Visual Geometry Group) est appliqué sur des séquences de 5 images concaténées consécutives pour classifier les différents gestes.

Ces méthodes permettent effectivement de procéder à une reconnaissance des gestes de la main, en utilisant les données provenant du canal de profondeur d'une image RGB-D. Cependant aucune donnée issue du squelette n'est utilisée pour reconstruire la forme de la main. Des études plus performantes proposent l'utilisation de ce type de données pour la classification.

P. Wang¹⁶² utilise les différents joints d'un squelette en trois dimensions et les projette sur des plans en deux dimensions. Les images ainsi formées servent d'éléments d'entrée aux réseaux de neurones convolutifs.

S. Song¹⁶³ propose une nouvelle méthode en combinant un réseau de neurones LSTM (Long Short-Term Memory) pour la reconnaissance d'actions depuis un squelette, avec un mécanisme d'attention spatio-temporel.

Un nouveau cadre général est introduit par Y. Zheng : le MC-DCNN (Multi-Channels Deep Convolution Neural Network)¹⁶⁴ pour des séquences à classifier. La différence majeure entre ces réseaux MC-DCNN et les autres réseaux d'apprentissage profond est la structure agnostique du squelette.

160. P. Molchanov, S. Gupta, K. Kim et J. Kautz, « Hand gesture recognition with 3d convolutional neural networks », *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition workshops*, 2015, p.1–7.

161. Q. De Smedt, H. Wannous, J.-P. Vandeborre, J. Guerry, B. Le Saux et D. Filliat, « Shrec'17 track : 3d hand gesture recognition using a depth and skeletal dataset », *10th Eurographics Workshop on 3D Object Retrieval*, 2017.

162. P. Wang, Z. Li, Y. Hou et W. Li, « Action recognition based on joint trajectory maps using convolutional neural networks », *Proceedings of the 2016 ACM on Multimedia Conference*, 2016, p.102–106.

163. S. Song, C. Lan, J. Xing, W. Zeng et J. Liu, « An end-to-end spatio-temporal attention model for human action recognition from skeleton data », *AAAI*, 2017, 4263–4270.

164. Y. Zheng, Q. Liu, E. Chen, Y. Ge et J. L. Zhao, *Time Series Classification Using Multi-Channels Deep Convolutional Neural Networks*, Cham, Springer International Publishing, 2014, p.298–310.

Une dernière méthode présentée est celle de G. Devineau, il s'agit d'une des méthodes les plus performante sur le dataset DHG 14-28. G. Devineau¹⁶⁵ démontre que l'utilisation d'un réseau de neurones à convolutions à trois couches parallèles est très performant pour la reconnaissance des gestes de la main issus de la base de données DHG 14-28. Il obtient un taux de précision de 91.28%.

2.3.3 Les Périphériques utilisés pour l'acquisition des gestes de l'utilisateur

Pour enregistrer ou streamer les différents gestes que l'utilisateur effectue, de nombreux périphériques existent. La plupart de ceux qui sont présentés ci-dessous permettent l'utilisation de modèles utilisant le squelette pour la classification et la reconnaissance des gestes de la main.

2.3.3.1 La Kinect de Microsoft

La Kinect est un périphérique d'interaction produit par Microsoft et disponible sur le marché depuis le mois de Novembre 2010. Depuis sa sortie, La Kinect, dans sa version 1.0 (pour XBox 360), est le moins cher et le plus populaire capteur de profondeur pour la communauté IHM¹⁶⁶ travaillant sur la vision. Le partage du SDK¹⁶⁷ par Microsoft permet à la Kinect d'utiliser le tracking des 20 articulations du corps humain utile à la reconnaissance des gestes¹⁶⁸. L'usage de la Kinect pour la classification peut alors se faire de deux manières : soit en utilisant le squelette comme donnée d'entrée, ou bien en utilisant les données issues du capteur de profondeur. Depuis 2013, une deuxième version de la Kinect est disponible avec le lancement de la nouvelle XBox One. Les différences techniques entre les deux versions sont présentes dans la Table 1.

165. G. Devineau, W. Xi, F. Moutarde, J. Yang, « Deep Learning for Hand Gesture Recognition on Skeletal Data », *IEEE Conference on Automatic Face and Gesture Recognition (FG'2018)*, Xi'An, China, 2018.

166. Interface Homme Machine

167. Kit de développement logiciel

168. S. Hochreiter et J. Schmidhuber, « Long short-term memory », *Neural Computation*, 9(8), 1997, 1735-1780.



(a) Version 1



(b) Version 2

FIGURE 64 – Les différentes versions de la Kinect de Microsoft.

Feature	Kinect V. 1.0	Kinect V. 2.0
Color Camera	640x480 @30 fps	1920 x 1080 @30 fps
Depth Camera	320x240	512x424
Max Depth Distance	4.0m	4.5m
Min Depth Distance	40cm	50cm
Horizontal Field of view	57 degrees	70 degrees
Vertical Field of view	43 degrees	60 degrees
Tilt Motor	Yes	No
Skeleton joints defined	20 joints	26 joints
Full skeleton tracked	2	6
USB Standard	USB 2.0	USB 3.0
Supported OS	Win 7, Win 8	Win 8, Win 10

TABLE 1 – Caractéristiques techniques des différentes versions

Feature	Leap Motion
Size	13×30×76 mm
Weight	45g
Field of view	Super Wide 150 degrees
Rate	200 fps
Skeleton joints defined	27 Hand skeleton joints
USB Standard	USB 2.0
Supported OS	Win 7, Win 8, Mac OSX

TABLE 2 – Caractéristiques techniques du Leap Motion

2.3.3.2 Le Leap Motion

Le Leap Motion (cf. Figure 65) est un petit capteur de reconnaissance de mouvements basé sur les mains de l'utilisateur. Il est développé par l'entreprise qui porte le même nom qui le commercialisa en 2013. Il est principalement utilisé en réalité virtuelle pour augmenter le sentiment d'immersion et d'interaction à travers le casque immersif.

La centralisation de la capture au niveau des mains permet une détection précise dans l'espace 3D. La détection des doigts et des mains se fait avec une précision de l'ordre de 0.01 mm. Ce capteur permet aux chercheurs de développer des techniques plus précises permettant la reconnaissance de gestes 3D plus complexes. La grande force de ce périphérique est le grand nombre de joints disponible pour la création du squelette de la main de l'utilisateur.

Son SDK permet de l'intégrer à bon nombre de moteurs 3D de jeux vidéos. La Table 2 présente ses caractéristiques techniques.



FIGURE 65 – Capteur Leap Motion

Feature	Leap Motion
Color Camera	1920x1080 @30 fps
Depth Camera	640x480 @60 fps
Tracking Distance	Between 0.2 to 1.5m
Size	44x100x157 mm
Weight	350g
Field of view	77 degrees (RVB), 83 degrees (profondeur IR)
Rate	200 fps
Skeleton joins defined	22 Hand skeleton joints
USB Standard	USB 3.0
Supported OS	Win 10

TABLE 3 – Caractéristiques techniques de la Webcam Senz3D de Creative

2.3.3.3 La Webcam Senz3D, équipée de la technologie Intel RealSense

La technologie Intel RealSense est une suite de capteurs de profondeurs permettant aux périphériques qui en sont équipés de mieux comprendre le monde qui les entoure. Ces capteurs sont principalement utilisés dans le domaine de la robotique, des objets connectés et de la Réalité Virtuelle. La webcam Senz3D (cf. Figure 66) possède cette technologie et permet aux développeurs de disposer d'un tracking des mains et d'une reconnaissance faciale de qualité. La Table 3 résume les caractéristiques techniques du capteur.



FIGURE 66 – Capteur SenZ3D composé de la technologie Intel RealSense

2.3.3.4 Les gants de données

Le gant de données est un gant composé de capteurs qui permet l'interaction virtuelle en trois dimensions d'un objet en réalité virtuelle. Ce type de périphérique d'interaction se veut être extrêmement précis afin de représenter au plus près la multitude de gestes

que l'homme peut effectuer.

Il existe deux utilisations des gants de données : la première est une utilisation seule qui permet seulement le suivi des mains de l'utilisateur ; l'autre cas est celui d'une utilisation combinée avec une combinaison de capture de mouvement qui permet un tracking du corps en intégralité.

Utilisation seule : Il existe une multitude de modèles de gants de données évoluant grâce à la miniaturisation et à la puissance croissante de l'électronique embarquée. Pour interagir virtuellement avec un environnement en trois dimensions, il est possible d'utiliser ces gants de données. Nous allons prendre ici l'exemple du gant de données 5Dt Data Glove (cf. Figure 67) qui mesure la flexion moyenne pour chacun des 5 doigts. Il dispose de 14 capteurs Flex qui permettent un tracking optimal sans ajout de filtres supplémentaires. Le suivi s'effectue de manière fluide et l'interaction se fait en temps réel. La reconnaissance des gestes peut alors être mise en place en utilisant ces capteurs pour former un squelette de la main.



FIGURE 67 – Gant de données 5dt Glove

Utilisation au sein d'une combinaison de capture de mouvements : L'interaction peut être plus précise avec l'utilisation d'une combinaison de capture de mouvement. Les combinaisons à capteurs inertiels permettent de s'abstenir des caméras à capteurs infrarouges et d'éviter l'occlusion engendrée par ces dernières. L'interaction n'en n'est que plus précise. Le Cireve possède une de ces combinaisons : le Perception Neuron. En plus d'enregistrer différents gestes, cette combinaison peut être utilisée pour une utilisation en

Publication	Capteur	Méthode	Description
Acquisition			
Ren et al. (2011)	Kinect		Static hand posture
Guyon et al. (2012)	Kinect		Chalearn gesture challenge
Wang et al. (2012)	Kinect		3D ASL dataset
Potter et al. (2013)	Leap Motion		Leap Motion's use
De Smedt et al. (2017)	Intel RealSense		DHG 14/28 dataset
Nicolle et al. (2019)	Perception Neuron		Interaction Gesture dataset
Recognition			
Oreifej et al. (2013)	Intel RealSense & Kinect	Hon4D Descriptor	Activity recognition from videos
Keskin et al. (2013)	Kinect	RDF+SVM	3D Hand parts
Ohn-Bar et Trivedi (2013)	Intel RealSense	modified HOG	Action recognition
Zhang et Tian (2013)	Kinect	E2DMM	3D daily hand gestures
Cheng et al. (2014)	Kinect	WDTW approach	Continuous Hand Gestures
Devanne et al. (2015)	Intel RealSense	k -NN	Gesture Recognition with trajectories
Guerry et al. (2017)	Intel RealSense	Channels concat + VGG	RGB-D classification
Chen et al. (2017)	Intel RealSense	LSTM+RNN+FCL	Motion Feature Augmented RNN
De Smedt et al. (2017)	Intel RealSense	SoCJ+HoHD+HoWR	3D Hand Gesture Recognition
Devineau et al. (2018)	Intel RealSense	Parallel CNN	New 3D Hand Gesture approaches

TABLE 4 – Liste des différentes méthodes utilisées pour la reconnaissance des gestes de la main associées aux types de capteur et aux datasets utilisés.

temps réel. Elle propose de reconstituer le squelette virtuel de l'utilisateur par le biais de 32 capteurs, dont 20 qui sont destinés aux mains. Il est alors possible de l'utiliser pour travailler sur la reconnaissance des gestes de l'utilisateur afin de restituer de manière naturelle les gestes courants qu'il effectue.

2.3.4 Récapitulatif des différentes méthodes utilisées pour l'acquisition et la reconnaissance des gestes de la main

La Table 4 fait la synthèse des différentes méthodes utilisées pour la reconnaissance des gestes de la main. Chaque approche est renseignée ainsi que le nom de la méthode employée.

2.4 Méthode retenue

Il existe une multitude de méthodes permettant d'aboutir à une classification des gestes de la main au sein de la littérature. C'est pourquoi dans un premier temps nous allons développer une méthode de reconnaissances des gestes basée sur un dataset et une méthode existante, reposant sur le Deep Learning. Pour cela nous allons utiliser le dataset

DHG 14-28¹⁶⁹ et la méthode de classification de G. Devineau¹⁷⁰. Dans un second temps, une nouvelle méthode sera utilisée sur une nouvelle base de données, construite à l'aide de la combinaison Perception Neuron, et permettra de détecter les gestes présents dans le scénario d'interaction de l'application immersive.

2.4.1 Dynamic Hand Gesture Dataset 14-28 Gestures

La base de données retenue est celle créée par Q. De Smedt¹⁷¹. Cette base de données nommée DHG (Dynamic Hand Gesture) contient des séquences de 14 gestes de la main. Chaque geste est réalisé entre 1 et 10 fois par les 28 participants, il en résulte 2800 séquences. Tous les participants sont droitiers. Ces différents gestes ont été captés par un capteur Intel RealSense. Chaque image de la séquence contient une image de profondeur, les coordonnées des 22 joints à la fois dans l'image 2D de profondeur et à la fois dans l'espace 3D formant un squelette de la main (cf. Fig 68).

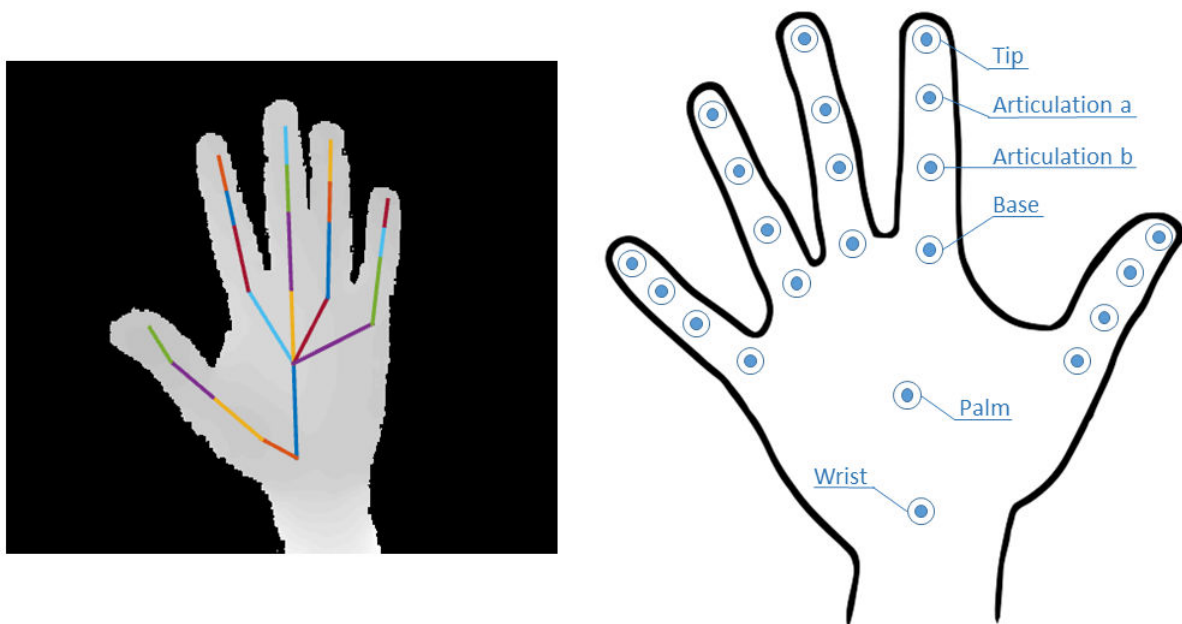


FIGURE 68 – Position des 22 joints du squelette de la main pour DHG (Réalisation Q. De Smedt).

Les différents gestes, d'une durée comprise entre 0.5 et 2 secondes, sont enregistrés à

169. Dynamic Hand Gesture 14/28 dataset disponible en ligne sur : <http://www-rech.telecom-lille.fr/DHGdataset/> (consulté le 14/09/2019).

170. G. Devineau, W. Xi, F. Moutarde, J. Yang, « Deep Learning for Hand Gesture Recognition on Skeletal Data », *IEEE Conference on Automatic Face and Gesture Recognition (FG'2018)*, Xi'An, China, 2018.

171. Dynamic Hand Gesture 14/28 dataset disponible en ligne sur : <http://www-rech.telecom-lille.fr/DHGdataset/> (consulté le 14/09/2019).

Gesture	Label	Tag Name
Grab	Fine	G
Expand	Fine	E
Pinch	Fine	P
Rotation CW	Fine	R-CW
Rotation CCW	Fine	R-CCW
Tap	Coarse	T
Swipe Right	Coarse	S-R
Swipe Left	Coarse	S-L
Swipe Up	Coarse	S-U
Swipe Down	Coarse	S-D
Swipe X	Coarse	S-X
Swipe V	Coarse	S-V
Swipe +	Coarse	S-+
Shake	Coarse	Sh

TABLE 5 – Liste des différents gestes présents dans DHG dataset

une fréquence de 30 Hz avec une résolution de 640 x 480 pixels. La liste des gestes est disponible dans le Tableau 5.

2.4.2 Le CNN à branches parallèles de G. Devineau

2.4.2.1 Description de la méthode

G. Devineau a proposé une nouvelle approche dans la reconnaissance des gestes de la main à partir de données issues du squelette¹⁷². Il a introduit une nouvelle architecture de CNN où toutes les séquences temporelles sont traitées par des couches de convolutions indépendantes et parallèles. Le modèle utilise seulement les données du squelette et donc aucune image de profondeur.

Dans un premier temps, il procède à une uniformisation de tous les gestes présents dans le dataset. Les coordonnées de joint du squelette sont ramenées à 100 frames par une interpolation linéaire. Dans la base DHG, le squelette de la main est constitué de 22 joints. Chaque joint est quand à lui composé de 3 coordonnées (x, y, z). Au final, le geste est décomposé en $22 \times 3 = 66$ séquences de 100 frames. Les données d'entrée du modèle de G. Devineau sont des vecteurs 1D (un par joint) de 100 frames représentant toutes les séquences du geste.

172. G. Devineau, W. Xi, F. Moutarde, J. Yang, « Deep Learning for Hand Gesture Recognition on Skeletal Data », *IEEE Conference on Automatic Face and Gesture Recognition (FG'2018)*, Xi'An, China, 2018.

Le modèle (cf. Figure 69) est composé de 3 branches de convolutions parallèles par joint (une couche de convolution basse résolution, une couche résiduelle, et une couche de convolution haute résolution). Chaque séquence passe à travers un tel réseau spécifique à trois branches. Une concaténation des vecteurs de sortie est ensuite réalisée avant de fournir les données à une couche complètement connectée qui effectue la classification des gestes.

La première branche est construite en utilisant trois couches séquentielles alternant convolutions et pooling. La première et la deuxième couche utilisent 8 convolutions de tailles 3, la dernière emploie 4 convolutions de tailles 3.

La deuxième branche ne sert qu'à descendre en résolution le vecteur d'entrée. Elle est constituée de trois couches de pooling.

La troisième branche est identique à la première branche, sauf que les tailles de convolutions sont égales à 7.

Il est nécessaire de concaténer les vecteurs de sortie de chaque branche, afin d'obtenir un vecteur unique que l'on pourra traiter. Ces convolutions permettent d'extraire les différentes caractéristiques du geste afin de le rendre unique.

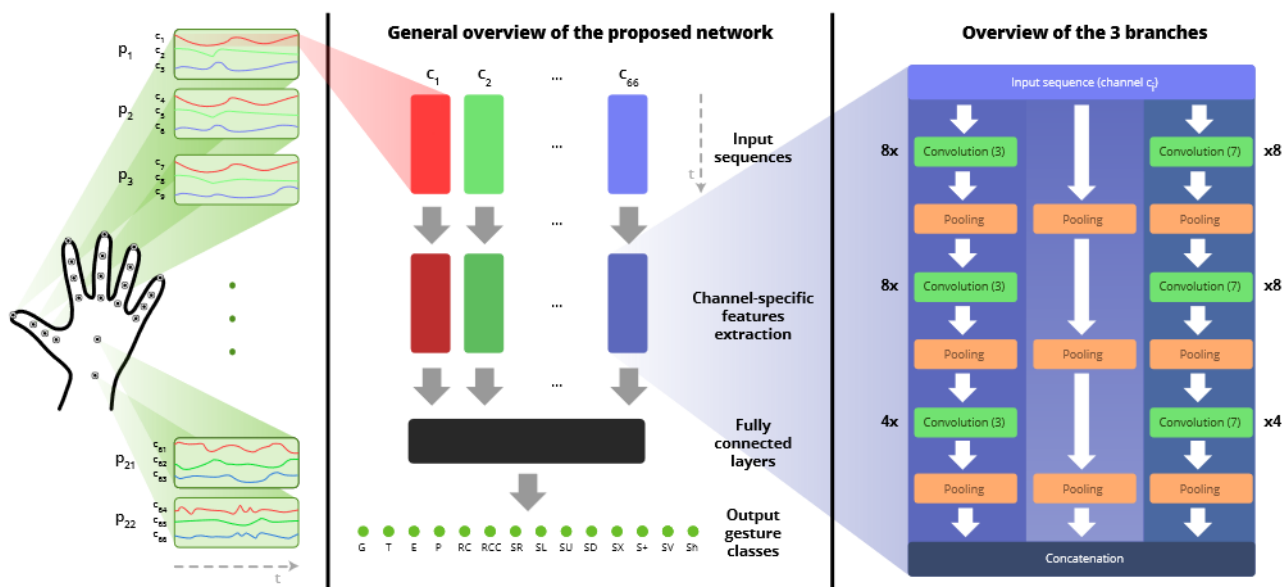


FIGURE 69 – Méthode proposée par G. Devineau utilisant un CNN à branches parallèles.

Les données, une fois concaténées, sont envoyées dans un MLP (Multi-Layer Perceptron). Ce réseau est constitué d'une couche complètement connectée de 1996 neurones cachés et d'une couche de sortie de 14 neurones, qui correspond aux différents gestes que l'on veut classifier.

Dans notre cas, pour le développement, PyTorch est utilisé avec CUDA pour le calcul GPU. Le modèle est entraîné sur une machine disposant d'une carte graphique NVIDIA GTX 1080 Ti, sur une durée de 1000 steps (chaque étape dure approximativement 12 secondes).

L'initialisation aléatoire des poids du réseau est effectuée par l'utilisation du *Xavier Initialisation*. Le calcul de la *Loss* est réalisé grâce à la *Negative log-likelihood*. Pour entraîner son modèle G. Devineau utilise le populaire *Adam optimization algorithm* qui calcule une moyenne du gradient entre plusieurs itérations. Les paramètres qui sont utilisés pour cette optimisation sont :

- $\beta_1 = 0.9$,
- $\beta_2 = 0.98$,
- $\epsilon = 10^{-8}$,
- $\alpha = 10^{-3}$.

Cette méthode permet de classifier les gestes présents dans le dataset DHG. Le taux de précision des résultats obtenus est parmi les meilleurs des approches récentes exploitant le Deep Learning, d'où notre choix de cette méthode.

2.4.2.2 Résultats

Sur la bibliothèque de données DHG 14-28, le modèle de G. Devineau obtient une précision de classification de 91.28% pour 14 classes de gestes et 85.35% pour 28 classes de gestes.

La Table 6 nous renseigne sur les résultats obtenus et les compare aux résultats des différentes méthodes de la littérature. Au contraire, la Table 7 détaille la précision, en pourcentage, de la classification des différents gestes pour le réseau de neurones convolutif à couches parallèles de G. Devineau.

173. O. Oreifej et Z. Liu, « Hond4d : Histogram of oriented 4d normals for activity recognition from depth sequences », *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2013, p716-723.

174. M. Devanne, H. Wannous, S. Berreti, P. Pala, M. Daoudi et A. Del Bimbo, « 3-d human action recognition by shape analysis of motion trajectories on riemannian manifold », *IEEE transactions on cybernetics*, 45(7), 2015, 1340-1352.

175. Q. De Smedt, H. Wannous, J.-P. Vandeborre, J. Guerry, B. Le Saux et D. Filliat, « Shrec'17 track : 3d hand gesture recognition using a depth and skeletal dataset », *10th Eurographics Workshop on 3D Object Retrieval*, 2017.

176. E. Ohn-Bar et M. Trivedi, « Joint angles similarities and hog2 for action recognition », *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops*, 2013, p.465-470.

177. X. Chen, H. Guo, G. Wang et L. Zhang, « Motion feature augmented recurrent neural network for

Approches	14 gestes	28 gestes
Oreifej & Liu ¹⁷³	78.53	74.03
Devanne & al. ¹⁷⁴	79.61	62.00
Guerry & al. ¹⁷⁵	82.90	71.90
Ohn-Bar & Trivedi ¹⁷⁶	83.85	76.53
Chen & al. ¹⁷⁷	84.68	80.32
De Smedt & al. ¹⁷⁸	88.24	81.90
Devineau & al. ¹⁷⁹	91.28	84.35

TABLE 6 – Résultats de classification (en %) des différentes méthodes sur DHG dataset pour 14 ou 28 gestes.

	G	T	E	P	RC	RCC	SR	SL	SU	SD	SX	S+	SV	Sh
G	94.8	1.7	0.0	1.7	1.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
T	11.5	77.0	0.0	3.3	4.9	0.0	0.0	0.0	0.0	3.3	0.0	0.0	0.0	0.0
E	0.0	5.5	90.9	0.0	0.0	0.0	1.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.8
P	15.7	0.0	0.0	78.4	3.9	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
RC	0.0	1.8	0.0	0.0	98.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
RCC	3.4	6.9	0.0	1.7	5.2	77.6	0.0	1.7	0.0	1.7	0.0	0.0	0.0	1.7
SR	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
SL	0.0	0.0	0.0	0.0	7.4	0.0	3.7	88.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
SU	2.9	2.9	10.3	0.0	0.0	0.0	1.5	0.0	79.4	1.5	0.0	0.0	1.5	0.0
SD	3.3	0.0	0.0	0.0	3.3	0.0	0.0	0.0	0.0	91.8	0.0	0.0	1.6	0.0
SX	0.0	2.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	89.9	1.4	5.8	0.0
S+	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100	0.0	0.0
SV	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100	0.0
Sh	0.0	8.6	2.9	0.0	12.9	0.0	2.9	0.0	1.4	0.0	0.0	0.0	0.0	71.4

TABLE 7 – Confusion Matrix pour DHG dataset en utilisant la méthode de G. Devineau.

La méthode de G. Devineau est aujourd’hui parmi les plus efficace pour la classification des gestes sur le dataset DHG 14-28. Elle nous servira donc de base dans l’élaboration de notre méthode de reconnaissances des gestes en réalité virtuelle.

skeleton-based dynamic hand gesture recognition », *arXiv preprint arXiv :1708.03278*, 2017.

178. Q. De Smedt, H. Wannous et J.-P. Vandeborre, « Skeleton-based dynamic hand gesture recognition », *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops*, 2016, p.1–9.

179. G. Devineau, W. Xi, F. Moutarde, J. Yang, « Deep Learning for Hand Gesture Recognition on Skeletal Data », *IEEE Conference on Automatic Face and Gesture Recognition (FG’2018)*, Xi’An, China, 2018.

3 | Développement d'une méthode permettant d'interagir virtuellement avec les automates antiques

3.1 Intégration du modèle dans une application immersive interactive

3.1.1 Introduction

Le développement d'une méthode de reconnaissance de gestes reste très théorique et notre but est de l'appliquer à une application qui va permettre d'interagir virtuellement avec un environnement 3D. Il est ici question de mettre en relation l'utilisateur avec le monde virtuel des automates antiques. La réalisation d'un scénario d'interaction pour chaque machine va permettre de tirer profit de la méthode développée dans ce chapitre. Cette méthode détecte les différents gestes que nous pouvons réaliser de façon naturelle avec nos mains, il sera alors possible de récupérer divers objets virtuels ou d'interagir directement avec des dispositifs mécaniques. Tout cela est réalisé au sein d'un environnement virtuel en totale immersion.

3.1.2 Choix du matériel immersif

3.1.2.1 L'adoption d'une solution portable

Un grand panel de matériels immersifs est aujourd'hui disponible sur le marché. Le choix d'un dispositif requiert la création d'un cahier des charges précis. Dans notre cas, l'installation de l'expérience immersive interactive doit être la plus rapide possible pour être présentée lors de salons, de conférences ou de visites guidées. L'usage d'un CAVE¹⁸⁰

180. Le CAVE (Cave Automatic Virtual Environment) est un espace immersif composé de 3 à 6 écrans. Il a pour objectif de projeter sur tous les écrans un environnement 3D en stéréoscopie ou non afin d'immerger l'utilisateur dans un monde virtuel. Il est principalement utilisé dans le domaine de l'industrie et de la

(cf. Figure 70) est donc sans intérêt et l'usage d'une solution portable favorisée. De plus l'utilisation d'un CAVE est à la fois couteux en temps humains et en consommables (lampes, etc.). L'interaction au sein du système est réalisée à partir de caméras infrarouges qui captent en trois dimensions les déplacements des utilisateurs. Ce dispositif onéreux favorise d'autant plus la recherche d'une solution portable de qualité.

Pour un usage portatif immersif, nous pouvons regarder sur le marché les différents choix que proposent les constructeurs à propos des casques de réalité virtuelle.



FIGURE 70 – Pierre Denise (Président de l'Université de Caen Normandie) et Leslie Decker (Comète - Université de Caen Normandie) dans le CAVE du CIREVE lors de son inauguration le jeudi 2 mars 2017. Cliché Charlie Morineau

3.1.2.2 Le casque immersif Oculus Rift

Oculus VR, racheté par Facebook en 2014, lance l'Oculus Rift CV1 (Commercial Version 1) en 2016. Il s'agit d'un des premiers casques de réalité virtuelle disponibles pour le grand public (cf. Figure 71). Il propose des caractéristiques techniques qui se situent entre le milieu de gamme et le haut de gamme. Pour le faire fonctionner, Oculus nous recommande au minimum d'utiliser une carte graphique Nvidia GTX 970, recherche.

un processeur Intel Core i5 et 8Go de mémoire vive. Dans le cas du développement de l'application, le PC cible est muni d'une carte graphique Nvidia GTX 1080, un processeur Intel Xéon et de 32 GO de mémoire vive. La configuration minimum demandée est donc respectée.

Le casque immersif dispose de deux écrans OLED¹⁸¹ d'une résolution de 1080 x 1200 pixels. L'entreprise précise aussi que l'appareil propose un champ de vision de 110 degrés et d'un taux de rafraîchissement de 90 Hz.

Pour connaître la position et l'orientation exacte du casque, deux capteurs infrarouges sont disponibles dans le kit. Discrets et très stables, ils sont à installer de manière alignée sur un bureau (ou sur des trépieds) en face de l'utilisateur afin d'obtenir une zone de tracking. Pour affiner le calcul de l'orientation en trois dimensions, l'Oculus Rift dispose dans son socle d'un accéléromètre et d'un gyroscope.

D'une manière générale l'Oculus Rift est simple à installer, à configurer et dispose d'une belle qualité d'image.



FIGURE 71 – Casque de Réalité virtuelle Oculus Rift CV1 disponible au CIREVE - Cliché Jérôme Nicolle.

181. Diodes électroluminescentes organiques

3.1.2.3 Le casque immersif HTC Vive Pro

Le casque de réalité virtuelle HTC Vive, disponible pour le grand public depuis 2016, est né de la collaboration entre Valve Corporation et HTC. Cette collaboration permet aux deux entreprises de se pencher chacune sur une partie de la technologie employée : hardware pour HTC et software pour Valve.

Aujourd'hui deux types de casques immersifs siglés HTC Vive sont disponibles : le Vive et le Vive Pro. Les deux dispositifs ont été testés au CIREVE et le Vive Pro (cf. Figure 72) est aujourd'hui utilisé dans les projets.

Quatre éléments composent le kit :

- Le casque,
- Les capteurs Lighthouse,
- Les manettes,
- Le boîtier de liaison.

Le casque est composé de deux écrans AMOLED¹⁸² d'une résolution de 1440 x 1600 pixels, soit une définition théorique plus importante que l'Oculus Rift CV1. Le champ de vision de 110 degrés et le taux de rafraîchissement de 90 Hz sont identiques à l'Oculus. Les capteurs Lighthouse sont des caméras infrarouges qui permettent de calculer en temps réel la position de l'utilisateur dans la scène. Pour créer un espace de tracking il suffit de disposer ces capteurs dans la diagonale de la pièce. Ainsi une surface maximum de 7m x 7m est envisageable pour le déplacement de l'utilisateur. Cette possibilité de déplacement réel pour contrôler l'avatar virtuel est un point important pour la réalisation du scénario d'interaction de l'application.

Les manettes du Vive Pro possèdent des capteurs infrarouges qui permettent de réaliser une détection des mouvements de l'utilisateur dans l'environnement virtuel. Enfin, le boîtier de liaison permet d'alimenter et de raccorder l'ensemble du casque à l'ordinateur.

3.1.2.4 Comparatif et conclusion

Les deux dispositifs immersifs présentés représentent à peu près 80% du marché des casques de réalité virtuelle. Bien que différents dans l'utilisation, ces casques répondent à des besoins bien précis. L'Oculus Rift CV1 est optimisé pour une utilisation Debout/Assis devant son bureau de manière statique, tandis que le Vive Pro permet quant à lui de

182. Matrice active à diodes électroluminescentes organiques



FIGURE 72 – Casque de Réalité virtuelle HTC Vive Pro installé dans la Salle immersive du CIREVE - Cliché Jérôme Nicolle.

réaliser des mouvements réels pour contrôler l’avatar virtuel sur une surface maximale de 7m x 7m. Couplé à un système de capture de mouvements, notre but est de réaliser des déplacements naturels pour interagir avec des objets virtuels. C’est pour cela que notre choix se dirige vers le Vive Pro malgré une installation plus lourde et une configuration plus poussée.

3.1.3 Choix du matériel interactif

Il existe beaucoup de matériels différents pour interagir virtuellement au sein d’un environnement en trois dimensions. Notre application requiert la réalisation de gestes de façon naturelle et donc l’utilisation de manettes ou de Flysticks¹⁸³ ne convient pas. Il faut se reporter sur les diverses technologies qui proposent un suivi et une reconstruction du corps que l’on pourra utiliser comme moyen d’interaction. Les technologies low-cost comme les webcams ou la Kinect ne possèdent pas un niveau de précision très performant. Il est nécessaire de se porter sur des dispositifs plus professionnels comme la capture optique ou gyroscopique.

183. Un flystick est un périphérique d’interaction dont la position et l’orientation sont calculées en temps réel au sein d’un environnement immersif

3.1.3.1 L'acquisition par capteurs infrarouges

La capture de mouvements par capteurs infrarouges nécessite une pièce spécifique pour son fonctionnement. Dans le cas de la réalité virtuelle, cette capture est réalisée dans la plupart des cas au sein d'un CAVE. Différentes caméras infrarouges sont installées tout autour de la surface de projection pour pointer au plus près de l'utilisateur qui manipule en son centre. Le CIREVE utilise la technologie Vicon, couramment affectée aux installations haut de gamme. Treize caméras Bonita B10 (cf. Figure 73) sont installées de manière fixe et quatre Bonita Vero peuvent être ajoutées occasionnellement pour affiner la détection et couvrir les angles morts éventuels. Pour les Bonita Vero, l'installation est réalisée au sein de l'espace immersif.

Cette capture optique nécessite l'installation d'une multitude de capteurs réfléchissant sur l'utilisateur (cf. Figure 73). Les rayons infrarouges, émis par les caméras, vont rebondir sur ces sphères réfléchissantes et sont récupérés par les capteurs des caméras. Ces réflexions permettent de calculer la position de chacune des sphères dans l'espace réel et permettent de restituer virtuellement le squelette animé de l'utilisateur. Cette animation, une fois enregistrée, pourra être greffée à un avatar virtuel. Une utilisation en temps réel est également possible. Au CIREVE, la recherche médicale, par le biais de Comète¹⁸⁴, s'appuie sur une analyse en temps réel des mouvements des patients. Elle permet d'analyser différents paramètres relatifs à la posture et à la locomotion. Le fait de coupler cette capture à des enregistrements électromyographiques¹⁸⁵ et de les associer à des perturbations visuelles via la réalité virtuelle ou cognitives via le paradigme de double tâche, permet aux chercheurs de constater grossièrement les effets de la pathologie sur le système nerveux central des patients.

Cette technologie, coûteuse financièrement, dispose d'un problème majeur : il est nécessaire d'utiliser de nombreuses caméras infrarouges pour faire face au problème d'occlusion (la sensibilité aux obstacles entre les capteurs réfléchissants et les caméras) et permettre un grand volume de capture. Les rayons ne pourront pas être réfléchis si un obstacle se tient devant lui. C'est pour cela que la plupart des studios de cinéma ou

184. Le laboratoire Comète fait partie de l'Université de Caen et est membre du CIREVE. Son objectif est le développement des méthodologies et de technologies pour la santé à travers l'étude des processus neurophysiologiques fondamentaux.

185. L'électromyographie est un examen consistant à enregistrer l'activité électrique d'un muscle ou d'un nerf.



FIGURE 73 – a) Disposition de capteurs infrarouges afin d’analyser les mouvements de l’utilisateur - b) Caméra à capteurs infrarouges Vicon B10 - c) Sphères réfléchissantes - Janvier 2017- Clichés Philippe Fleury / Jérôme Nicolle.

de jeux vidéos utilisent la capture par centrales inertielles, comme par exemple avec la combinaison Perception Neuron.

3.1.3.2 La combinaison Perception Neuron

Le Perception Neuron est une combinaison de capture de mouvements créée et développée par Noitom. Le système est basé sur le Neuron, une IMU (Inertial Measurement Unit¹⁸⁶) composée d’un gyroscope à 3 axes, d’un accéléromètre à 3 axes et d’un magnétomètre à 3 axes. La combinaison est adaptative, c’est-à-dire que chacun des 32 Neurons (cf. Figure 74) peut être enlevé afin d’établir une configuration de squelette bien précise. Le fait d’utiliser une IMU permet de se débarrasser des caméras infrarouges qui nécessitent beaucoup de place pour l’installation. La capture de mouvement s’effectue en mode sans fil à l’aide d’un petit boîtier Wifi installé à la ceinture qui envoie en temps réel les informations de position et de rotation de chaque Neuron. C’est ensuite le logiciel propriétaire Axis Neuron qui restitue en trois dimensions le squelette virtuel de l’utilisateur. Les algorithmes utilisés délivrent un mouvement fluide, collant au plus près de la réalité, le tout avec un minimum de latence.

La combinaison est compacte, moins de 300 grammes sans la batterie, ce qui permet de

186. Unité de mesure inertielle

l'utiliser pendant de longs moments sans se fatiguer. Ce système portable peut s'utiliser n'importe où et est seulement soumis à la distance de captation du réseau Wifi. Un de ses gros avantages est qu'il est possible de la combiner avec un casque immersif afin de contrôler virtuellement et en temps réel un avatar. Disponible pour le grand public, pour la recherche académique et pour l'industrie, le système de capture de mouvements Perception Neuron reste l'un des plus abordables du marché.

3.1.3.3 Comparatif et conclusion

Les deux méthodes décrites sont très performantes. La capture optique est la plus précise, cependant elle n'est pas portable. Pour cet usage, la capture par capteurs inertiels semble donc la plus adéquate. En effet l'utilisation future de l'application, en salon, en conférence ou en colloque requiert une solution nécessitant une installation rapide et performante, comme le démontre le Perception Neuron.

3.1.4 L'application immersive interactive

L'application a pour but de mettre en relation l'utilisateur avec un automate antique. L'interaction doit se faire en temps réel afin de contrôler l'avatar virtuel sans décalage temporel. Pour l'intégration du modèle 3D, l'utilisation d'un moteur 3D temps réel semble pertinent. Cependant, de nombreux moteurs existent aujourd'hui et en choisir un requiert une étude préalable. Grâce à ce moteur, nous allons mettre en contexte l'automate et l'utilisateur afin de créer chez lui un sentiment d'étonnement et d'émerveillement. Cette mise en contexte permet aussi de réaliser un scénario d'interaction, où l'utilisateur manipule des objets virtuels de façon naturelle.

3.1.4.1 Le choix du moteur 3D

Pour développer des applications ou des jeux vidéos, le développeur dispose de nombreux outils. Parmi eux, les moteurs 3D temps réel se distinguent et proposent toujours plus de fonctionnalités pour répondre aux différents besoins.

CryEngine V est un moteur développé par l'entreprise allemande Crytek et spécialisé dans les jeux FPS¹⁸⁷. Lors de son lancement en 2016, la version 5 du Cryengine

187. First Person Shooter (jeux avec un point de vue à la première personne).

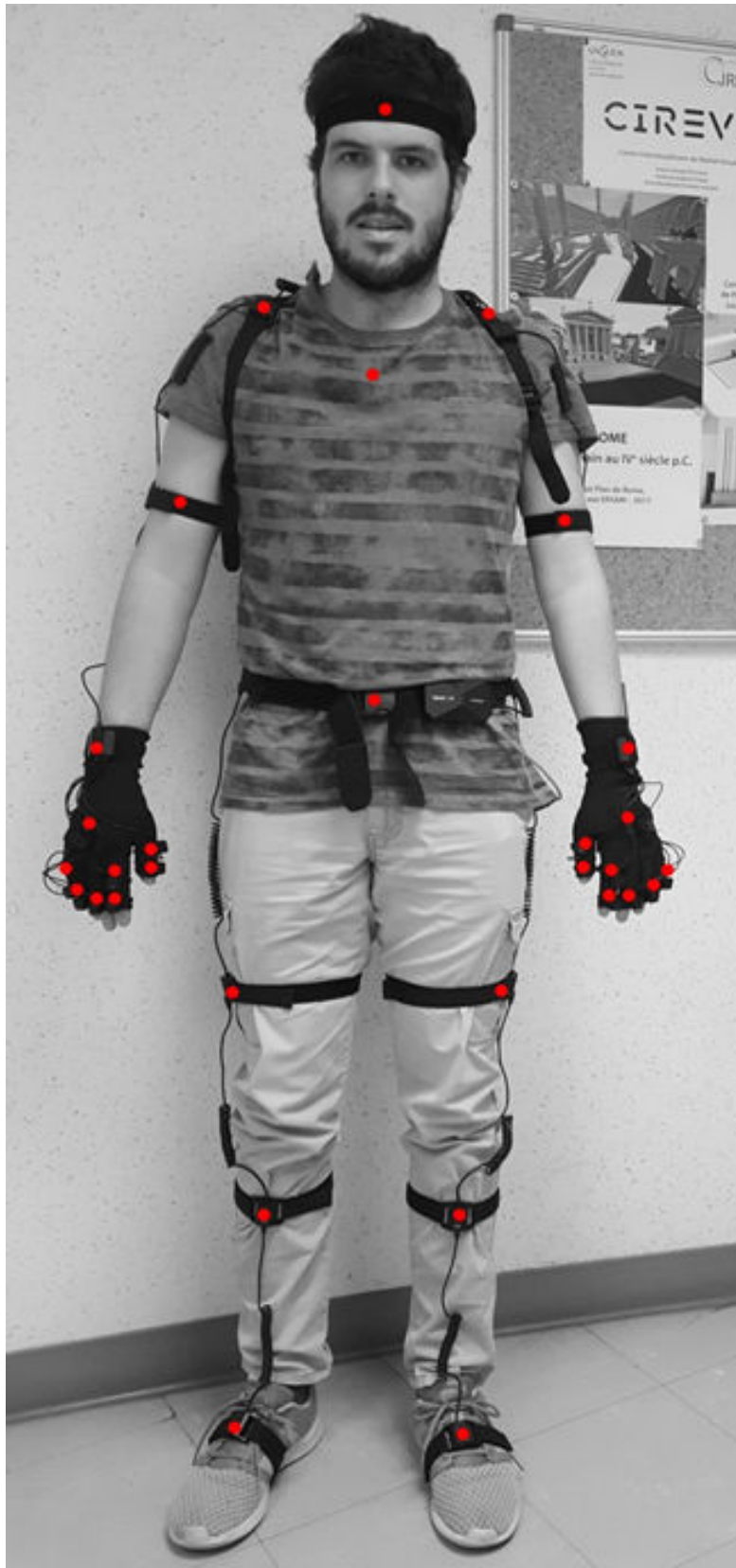


FIGURE 74 – Position des 32 capteurs de la combinaison Perception Neuron - 2018- Cliché Sophie Madeleine.

se présente comme étant plus accessible et orienté réalité virtuelle avec la compatibilité Playstation VR, Oculus Rift et HTC Vive. Du côté de la licence, il propose un modèle économique à prix libre, tout en gardant des royalties de 5% sur les ventes.

Unreal Engine 4 est le moteur créé par le studio américain Epic Games. Il est développé pour les artistes recherchant un moteur 3D pour la création de scènes et le rendu temps réel. La particularité de l'Unreal Engine est la programmation par système de script visuel appelé Blueprint. Depuis 2015, le moteur est gratuit et est l'un des plus utilisés par les gros studios de jeux vidéos. Pour les projets commerciaux, une redevance est demandée à partir d'un certain chiffre d'affaire.

Unity 3D est le moteur le plus utilisé dans la création de jeux et d'applications multiplateformes (ordinateur, consoles de jeux, smartphones, web etc.). Développé par Unity Technologies¹⁸⁸, et lancé en 2005, il est aujourd'hui utilisé par les indépendants, les grands studios de jeux vidéos, et le domaine académique. Il propose une Licence gratuite qui donne libre accès au moteur tout en limitant les technologies avancées de l'éditeur. Le langage utilisé par Unity est le C# (alias C Sharp). Unity dispose d'une grande force, son éditeur est extensible et la communauté de développeurs propose différents modules pour personnaliser son interface et gagner en fonctionnalités. Il est ainsi possible de développer différentes sortes d'applications 2D, 3D ou bien de réalité virtuelle et augmentée en utilisant ce moteur de jeu.

Pour le développement de l'application, notre choix s'oriente sur le moteur délivré par Unity Technologies. Le critère le plus important pour le choix du moteur est sa compatibilité avec la combinaison Perception Neuron. En effet toute l'interaction se base sur la reconnaissance des gestes de l'utilisateur. Unity 3D s'avère être aussi un très bon choix par sa rapidité à prototyper les scènes. De plus, nous avons besoin de personnaliser Unity 3D en ajoutant des fonctionnalités liées à la combinaison de capture de mouvement. Avec ce moteur nous allons pouvoir construire notre application pour différents systèmes immersifs sans devoir développer plusieurs versions du projet.

188. Site internet de Unity 3D : <https://unity3d.com/unity> (Consulté le 14/11/2019)

3.1.4.2 Construction et squelette de l'application

Avant de programmer, il est important de lister les différentes fonctionnalités que l'application utilisera. Une application de réalité virtuelle requiert au minimum trois éléments :

1. un système d'interaction.
2. un environnement 3D.
3. un système d'éclairage.

Notre application ne déroge pas à la règle et présente ces trois composants (cf. Figure 75). Le système d'interaction contient trois éléments : une caméra qui permet de simuler la vision humaine, un objet nommé « Body Controller » qui représente l'avatar virtuel contrôlé par l'utilisateur, et une interface 2D appelée « Debugage UI » qui affiche dans le casque de réalité virtuelle le geste effectué et l'objet attrapé.

Le conteneur qui contient l'environnement 3D est divisé en deux parties : une partie contenant les objets statiques et une partie contenant les objets dynamiques. Les objets statiques sont des modèles 3D qui ne vont pas se déplacer durant l'expérience. Par exemple, pour la servante automatique, sont statiques les murs, les portes et les différents éléments architecturaux de la Domus Flavia¹⁸⁹, ainsi que le mobilier qui ne sera pas interactif. Les éléments dynamiques sont ceux soumis au scénario d'interaction, comme les coupes, les aiguères et leurs liquides, et les différentes parties de l'automate.

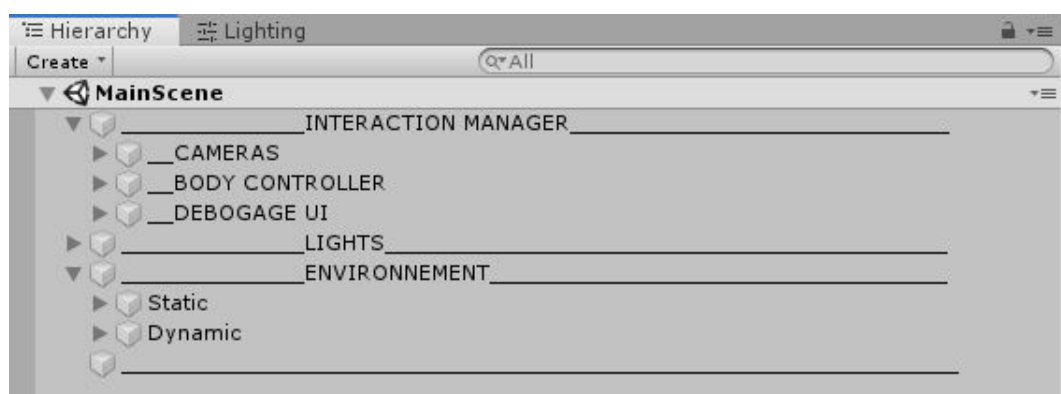


FIGURE 75 – Organisation hiérarchique de l'application interactive.

Le dernier élément important dans la construction d'une application de réalité virtuelle est l'éclairage. Qu'il soit dynamique ou pré-calculé, l'éclairage permet de restituer

189. C'est le nom donné à la partie publique du Palais des empereurs de Rome.

les lumières de la scène. Le placement des différentes sources de lumières va recréer virtuellement l'ambiance que l'on veut apporter.

3.1.4.3 Intégration de l'environnement 3D

Les différents objets ont été modélisés sur le logiciel 3DS Max et exportés au format FBX¹⁹⁰. Le décor n'est pas modélisé de façon imaginaire ; la restitution 3D permet de mettre en contexte la machine dans son environnement. Lors de l'importation des modèles dans la scène, il est nécessaire ensuite de cocher l'option « Static » pour chaque objet immobile. Quant aux objets dynamiques, il est important de les marquer comme tels à l'aide de « tags »¹⁹¹. Cela permettra aux scripts d'identifier chaque objet. Ces éléments dynamiques sont soumis à la physique pour s'attacher au mieux à la réalité. Ainsi lorsque l'utilisateur lâchera un objet, celui-ci sera soumis à la gravité et tombera au sol. Pour simuler cette physique, on ajoute un composant « rigidbody » à l'objet.

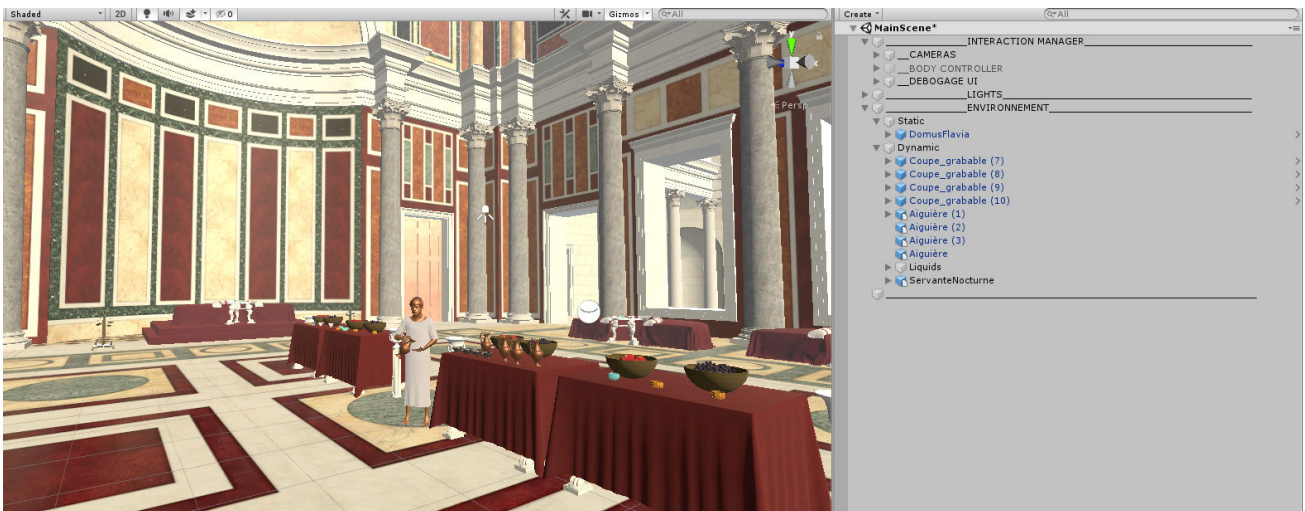


FIGURE 76 – Intégration de l'environnement 3D dans l'application.

Pour faire apparaître l'utilisateur au bon endroit dans la scène lors de l'expérimentation, un objet vide est implémenté. Cet objet placé à l'endroit désiré, sert de référence pour l'apparition de l'avatar virtuel.

Le fait de naviguer au sein de la Domus flavia pour interagir avec la servante permet de comprendre que l'automate, dans l'Antiquité, était destiné à un riche public. Il permet à la fois d'émerveiller les convives invités par l'empereur mais surtout de forcer l'admiration

190. Acronyme du format de fichier FilmBox, il est très utilisé dans les moteurs de jeux en 3D temps réel.

191. Dans le moteur Unity 3D, un « tag » est une étiquette que l'on vient affecter à un objet.

devant de tels prouesses mécaniques.

3.1.4.4 Réalisation du scénario d'interaction

Chaque automate nécessite un scénario d'interaction différent. En effet, chacun demande une succession et un nombre de gestes qui leurs sont propres.

Pour comprendre les différentes étapes d'un scénario d'interaction, nous allons prendre l'exemple de la servante automatique pour illustrer nos propos.

Dans un premier temps, nous devons isoler du modèle 3D les différentes parties qui seront interactives : la tête servant de couvercle, la coupe, les aiguières de remplissage. Ces différentes parties vont pouvoir être manipulés virtuellement par l'utilisateur. Il est alors nécessaire et indispensable de créer une boîte de trigger¹⁹² nécessaire à la détection du geste. Cette boîte englobante virtuelle permet aussi de savoir quel objet est manipulé par l'utilisateur. La main de l'utilisateur, une fois dans cette boîte virtuelle, permet à l'algorithme de commencer la détection des gestes.

Ensuite, vient la découpe en plusieurs étapes de l'interaction virtuelle avec l'automate. La servante automatique nécessite 4 étapes pour l'interaction standard (IS) et 7 étapes supplémentaires pour l'interaction complète (IC) avec le remplissage des réservoirs. Chaque étape d'interaction nécessite la validation de l'épate précédente.

1. (IS) Prendre la coupe sur la table : détection du geste « attraper ».
2. (IS) Déposer la coupe sur la main de la servante : détection de l'ouverture de la main de l'utilisateur seulement lorsqu'il est dans le trigger de la main de la servante.
3. (IS) Reprendre la coupe sur la main de la servante : détection du geste « attraper ».
4. (IS) Porter la coupe au niveau de la bouche de l'utilisateur : détection du mouvement du bras et du geste « Verser ».
5. (IC) ôter le couvercle de la servante : détection du geste « attraper » au niveau du trigger de la tête.
6. (IC) Déposer le couvercle sur la table : détection de l'ouverture de la main.
7. (IC) Prendre l'aiguière : détection du geste « attraper ».

192. Il s'agit d'une boîte virtuelle englobant l'objet qui permettra la détection du geste uniquement à l'intérieur de celle-ci, permettant ainsi d'économiser les ressources logicielles et physiques de l'ordinateur.

8. (IC) Verser le contenu de l'aiguière dans les réservoirs : détection du geste « verser ».
9. (IC) Reposer l'aiguière sur la table : détection de l'ouverture de la main.
10. (IC) Reprendre le couvercle : détection du geste « attraper ».
11. (IC) Refermer l'automate : détection de l'ouverture de la main.

La détection de l'ouverture de la main est réalisé en dehors des bases de données de gestes. Notre méthode consiste à regarder si les joints de la main sont plus ou moins alignés pour considérer que la main est ouverte. L'angle formé par les joints des doigts doit être inférieur à 25 degrés. Dans 100% des cas, l'ouverture de la main est détectée.

3.1.4.5 Expérimentation et premiers résultats

L'utilisation de la méthode d'interaction¹⁹³ au sein de l'application immersive interactive permet d'obtenir une niveau de détection efficace et performant des gestes de l'utilisateur. Lorsque le Trigger est activé par la main de l'utilisateur, l'algorithme réalise une détection des gestes toutes les 20 frames afin de limiter le risque d'erreurs. Au pire des cas (approximativement 1 fois sur 12), nous devons nous y prendre à deux fois afin que le geste soit bien reconnu.

La première expérimentation publique de l'application interactive a été proposée lors d'une Nocturne du Plan de Rome le 4 avril 2018 (cf. Figure 77), devant un public de 264 personnes et d'une tranche d'âge très variée. Elle avait pour but d'interagir virtuellement avec la servante automatique de Philon de Byzance afin de démontrer et comprendre le fonctionnement de son mécanisme interne. Cette présentation a été vraiment bien perçue par le public et la méthode a permis d'obtenir de très bons résultats en terme de détection et de classification des gestes que nous avons effectués en direct (une classification de 90,4%¹⁹⁴ a été enregistrée à postériori).

193. Voir la méthode présentée dans la partie 3.2.4.2 page 191.

194. Cette classification des gestes a été calculée en réalisant un test de cinquante gestes. Si un geste est détecté il renvoie 1 sinon 0. Une moyenne est ensuite effectuée pour obtenir le pourcentage de réussite.



FIGURE 77 – Interaction virtuelle de la servante automatique de Philon de Byzance. Utilisation de l’application virtuelle interactive lors d’une présentation des Nocturnes du Plan de Rome le 4 avril 2018.

3.2 Développement de la méthode

3.2.1 Un développement inspiré de la méthode G. Devineau

La méthode de G. Devineau consiste à créer une architecture CNN à branches parallèles afin d’extraire les caractéristiques de chaque geste. Cette méthode est aujourd’hui une des plus efficace dans la classification des gestes sur la base de données DHG 14/28 Gesture Dataset¹⁹⁵. C’est pourquoi nous allons l’utiliser afin d’obtenir une solide base de développement.

L’algorithme utilisé permet l’extraction des caractéristiques de chaque coordonnée de points de façon indépendante. La principale amélioration qui sera apporté par notre développement est l’ajout d’une quatrième branche parallèle qui prendra en compte la relation entre chaque doigt lors de l’exécution d’un geste.

195. Dynamic Hand Gesture 14/28 dataset disponible en ligne sur : <http://www-rech.telecom-lille.fr/DHGdataset/> (consulté le 19/11/2019)

3.2.2 L'ajout d'une branche parallèle pour la gestion du doigt

L'ajout d'une quatrième branche parallèle permet à l'algorithme de récupérer des caractéristiques sur le positionnement d'un doigt au cours de l'exécution d'un geste. Cette extraction s'exécute de manière parallèle et indépendante des trois branches de la méthode de G. Devineau (cf. Figure 78).

Dans un premier temps l'algorithme d'apprentissage procède à l'extraction des caractéristiques des 66 coordonnées du geste par des couches de convolutions et de pooling, qu'il concatène ensuite en un vecteur unique pour le passer dans des couches entièrement connectées pour obtenir une prédiction de geste. C'est ici que s'arrête la méthode de G. Devineau.

Notre méthode permet d'ajouter des caractéristiques propres à chaque doigt. En effet, durant la réalisation d'un geste, chaque doigt dispose d'une position et d'une orientation précise. C'est pourquoi nous avons développée une branche, parallèle aux trois autres, qui permet d'isoler les caractéristiques des différents doigts. Chaque doigt dispose de quatre joints de coordonnées comme le montre la Figure 78a. Les joints 1 et 2, qui représentent le poignet et la paume de la main, ne sont pas utilisés pour l'isolation des doigts.

Chaque doigt utilise toujours les mêmes joints quel que soit le geste :

- Doigt 1 (pouce) : 3-4-5-6,
- Doigt 2 (index) : 7-8-9-10,
- Doigt 3 (majeur) : 11-12-13-14,
- Doigt 4 (annulaire) : 15-16-17-18,
- Doigt 5 (auriculaire) : 19-20-21-22.

Ensuite chaque doigt (D_i) est soumis à des couches de convolutions 2D (car nous avons 4 joints sur 1 doigt sur 100 frames) et de pooling dans la branche parallèle afin d'en extraire les caractéristiques. Notre modèle est assez classique et ressemble à l'architecture des branches traitant les 66 coordonnées. Nous commençons par 8 filtres de convolutions 2D de taille 3 x 3, suivi d'une descente en résolution par le pooling de taille 2. On recommence une nouvelle fois le schéma. La troisième couche de convolution utilise 4 filtres de taille 3 x 3 tandis que la couche de pooling reste la même (cf. Figure 78c.). Pour résumer, chaque doigt passe par 3 couches de convolutions et de pooling avant d'être concaténé ensemble :

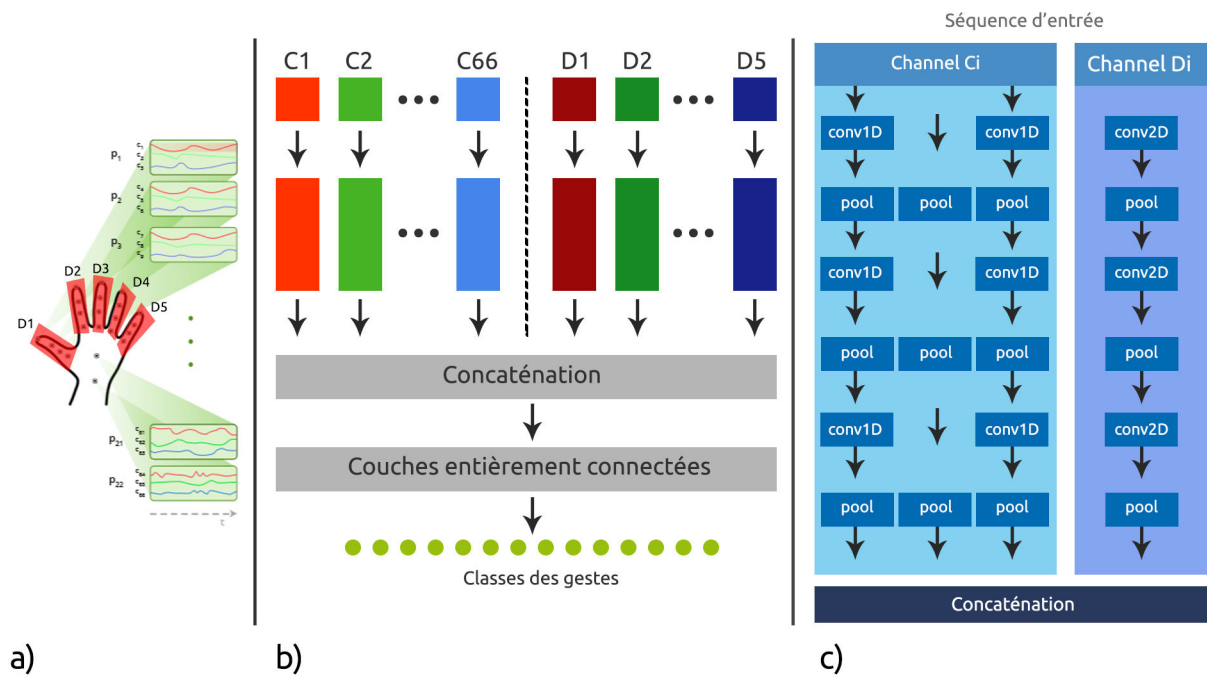


FIGURE 78 – Schéma détaillant l'architecture CNN de notre méthode de reconnaissance des gestes. a) Illustration des différents paramètres d'entrée du modèle : les channels C_i pour chaque coordonnées de points et les channels D_i représentant les doigts. b) Vue générale du réseau de neurones. c) Illustration des branches parallèles permettant d'extraire les caractéristiques. (Réalisation J. Nicolle)

- 8 x Convolution 2D de taille 3 x 3.
- Pooling de taille 2.
- 8 x Convolution 2D de taille 3 x 3.
- Pooling de taille 2.
- 4 x Convolution 2D de taille 3 x 3.
- Pooling de taille 2.

Cette gestion de chaque doigt devrait permettre en théorie de gagner en précision sur la détection des gestes et leur classification. Cela peut en effet capturer des caractéristiques globales de mouvement de chaque doigt. Il est nécessaire de concaténer ensemble le résultat des différentes branches afin d'obtenir un vecteur unique à transmettre aux couches entièrement connectées. Ces dernières couches classent les différents gestes en 14 catégories lors d'une utilisation avec la base de données DHG 14/28 Gesture Dataset.

3.2.3 Calcul de la Loss et réglages des hyper-paramètres

Comme G. Devineau, nous avons choisi d'utiliser l'algorithme d'optimisation Adam et la Cross-entropy comme fonction de coût afin d'entraîner notre modèle. L'algorithme Adam nécessite de paramétrer quatre variables :

- $\beta_1 = 0.9$.
- $\beta_2 = 0.98$.
- $\epsilon = 10^{-8}$.
- $\alpha = 10^{-3}$ correspond au taux d'apprentissage.

Pour l'initialisation aléatoire de tout les poids du modèle nous utilisons le Xavier initialization. Pour cette fonction, seule une fonction d'activation en paramètre est nécessaire. Nous avons choisi la ReLU.

L'utilisation de Tensorflow, puis de PyTorch, a permis le développement en Python du modèle. Le modèle a été entraîné durant 2000 étapes (Steps) sur une machine disposant d'un processeur Intel Xéon (8 cœurs physiques) et d'une carte graphique Nvidia GTX 1080. L'utilisation de CUDA¹⁹⁶ permet l'apprentissage du modèle sur la carte graphique afin d'optimiser et d'accélérer les calculs.

3.2.4 Phase de test sur différentes bases de données

3.2.4.1 DHG 14/28 Gesture Dataset

Pour tester notre méthode et montrer son efficacité, nous avons réalisé l'apprentissage sur la base de données DHG 14/28 Gesture Dataset de Q. De Smedt présentée plus haut. Les résultats obtenus sont très encourageant et rivalisent avec les méthodes les plus efficaces de la littérature. Une présentation complète des résultats est réalisée dans la partie 3.3.2 à la page 191.

3.2.4.2 Interaction Gesture Dataset

Pour les besoins de notre application, une nouvelle base de données de gestes est créée en février 2019. Cette base, intitulée *Interaction Gesture Dataset*, réunit des gestes réalisés avec la combinaison de capture de mouvements Perception Neuron.

196. CUDA est une technologie permettant d'exécuter des calculs coûteux sur une processeur graphique (GPU) à la place du processeur (CPU).

Cette base regroupe, pour le moment, deux gestes utiles pour interagir avec les automates antiques :

1. Attraper : permet de détecter la prise d'objet. La combinaison avec le mouvement du bras permet de savoir dans quelle direction l'utilisateur porte ou tire l'objet. Le geste commence main ouverte et se termine main fermée.
2. Verser : à combiner avec le premier geste. Il permet de savoir si l'utilisateur verse quelque chose, notamment dans le cadre d'un remplissage de réservoir. La totalité du geste s'effectue la main fermée.

L'*Interaction Gesture Dataset* est construite par un panel de 4 personnes (3 sont droitiers et 1 est gauchère). Chacun effectue le geste 30 fois, ce qui nous donne $4 \times 30 = 120$ exécutions par gestes. La bibliothèque regroupe au total 240 gestes.

3.3 Résultats

3.3.1 Résultats de la méthode

La méthode que nous avons développée obtient un résultat de classification de 89,97% sur la base de données de gestes DHG 14/28. Cela permet de nous positionner à la deuxième place des méthodes les plus efficaces de la littérature. G. Devineau obtient, avec sa méthode, une moyenne de classification de 91,28%, tandis que Q. De Smedt obtient un score de 88,24%. Cependant dans le cadre de l'application immersive interactive nous n'avons pas besoin de tous les gestes présents au sein de cette base de données. Si l'on regarde attentivement, on remarque que pour le geste « attraper », notre méthode est plus efficace que celle de G. Devineau : 95,2% contre 94,8%.

3.3.2 Comparaison détaillée avec la méthode de G. Devineau sur DHG

Les deux tableaux (8 et 9) ci-dessous permettent de comprendre et d'analyser les petites différences de classifications qui existent entre les deux méthodes. Chaque geste est classé en pourcentage.

3.3.3 Résultats des méthodes sur IGD

La combinaison de capture de mouvement construit un squelette de la main composé de 2 joints par doigts, contre 4 avec le capteur Intel RealSense utilisé pour DHG 14/28 Gesture Dataset. Nous allons, dans un premier temps, utiliser notre nouvelle base de données sans traitement sur l'algorithme entraîné. Cela permet de voir si les 4 joints du doigt sont importants, ou si seulement 2 suffisent. Ce premier test nous conduit à un pourcentage de classification de 65,23% avec la méthode Devineau sur IGD avec réplication. La réplication des coordonnées permet de générer les joints manquants de la main. Chaque joint manquant se voit attribuer la coordonnée la plus proche (cf. Figure 79). Cette réplication permet de construire un squelette de 22 joints de la main, similaire à celui utilisé par Devineau dans sa méthode.



FIGURE 79 – Principe de réplication des coordonnées afin de restituer un squelette de la main à 22 joints, similaire à celui obtenu par le capteur Intel Real Sense (Réalisation J. Nicolle).

Pour obtenir une meilleure précision et construire notre squelette, l'usage de l'interpolation linéaire pour créer les coordonnées manquantes (cf. Figure 80) semble plus efficace que la simple réplication des données. Pour construire un joints manquant, nous allons récupérer ses deux plus proches voisins afin de réaliser une moyenne, qui sera pondérée en fonction de leurs distances par rapport à celui-ci. Ce calcul mathématique génère ainsi un

squelette plus complet et plus précis de la main qui sera mieux reconnu par l'algorithme. Cette modification entraîne un gain de pourcentage de près de 20%. On atteint ainsi les 83,57%, avec la méthode Devineau sur IGD avec interpolation, pour la classification des gestes de la nouvelle base de données.

Pour la base de données IGD, que nous avons créée spécialement pour la combinaison Perception Neuron, nous obtenons avec notre nouvelle approche un taux de classification de 84,26%, soit une classification meilleure que celle de Devineau sur ces mêmes données. Ceci montre l'intérêt d'avoir construit cette deuxième base de données spécifique car elle contient les gestes dont nous allons avoir besoin pour l'interaction avec des automates antiques. Les tests des différentes méthodes ont été réalisés avec la combinaison Perception Neuron. Nous prévoyons de diffuser cette nouvelle base de données sur un site web dédié, tout comme pour la base DHG 14/28.

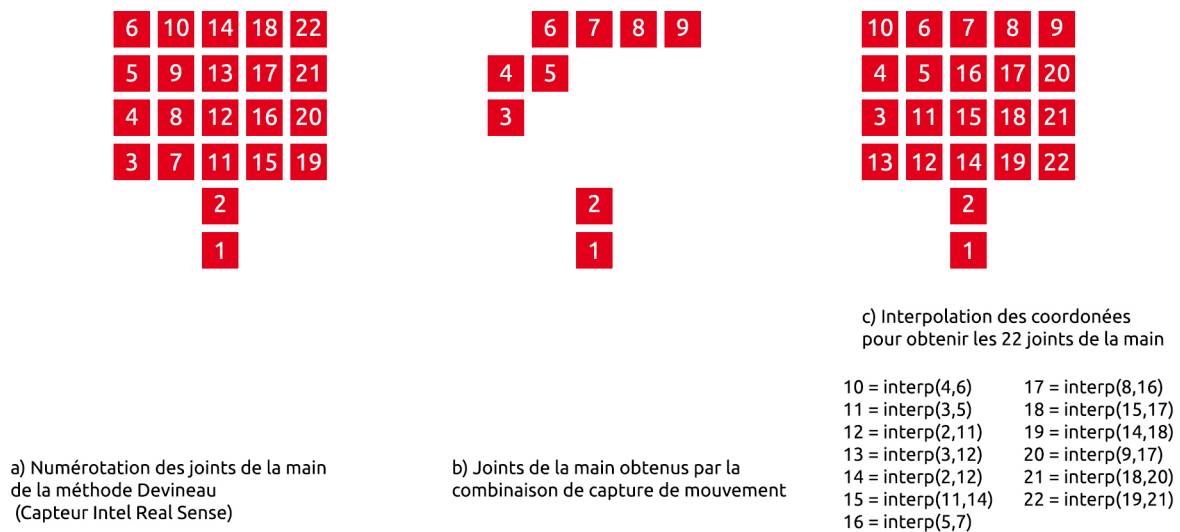


FIGURE 80 – Principe d'interpolation des coordonnées afin de restituer un squelette de la main à 22 joints, similaire à celui obtenu par le capteur Intel Real Sense (Réalisation J. Nicolle).

	G	T	E	P	RC	RCC	SR	SL	SU	SD	SX	S+	SV	Sh
G	94.8	1.7	0.0	1.7	1.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
T	11.5	77.0	0.0	3.3	4.9	0.0	0.0	0.0	0.0	3.3	0.0	0.0	0.0	0.0
E	0.0	5.5	90.9	0.0	0.0	0.0	1.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.8
P	15.7	0.0	0.0	78.4	3.9	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
RC	0.0	1.8	0.0	0.0	98.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
RCC	3.4	6.9	0.0	1.7	5.2	77.6	0.0	1.7	0.0	1.7	0.0	0.0	0.0	1.7
SR	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
SL	0.0	0.0	0.0	0.0	7.4	0.0	3.7	88.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
SU	2.9	2.9	10.3	0.0	0.0	0.0	1.5	0.0	79.4	1.5	0.0	0.0	1.5	0.0
SD	3.3	0.0	0.0	0.0	3.3	0.0	0.0	0.0	0.0	91.8	0.0	0.0	1.6	0.0
SX	0.0	2.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	89.9	1.4	5.8	0.0
S+	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100	0.0	0.0
SV	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100	0.0
Sh	0.0	8.6	2.9	0.0	12.9	0.0	2.9	0.0	1.4	0.0	0.0	0.0	0.0	71.4

TABLE 8 – Matrice de confusion pour DHG dataset en utilisant la méthode de G. Devineau.

	G	T	E	P	RC	RCC	SR	SL	SU	SD	SX	S+	SV	Sh
G	95.2	1.5	0.0	1.7	1.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
T	12.4	75.7	0.0	3.4	5.1	0.0	0.0	0.0	0.0	3.4	0.0	0.0	0.0	0.0
E	0.0	5.6	90.6	0.0	0.0	0.0	1.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.9
P	18.6	0.0	0.0	76.4	3.8	1.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
RC	0.0	2.0	0.0	0.0	98.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
RCC	3.4	7.4	0.0	1.9	5.3	76.3	0.0	1.9	0.0	1.9	0.0	0.0	0.0	1.9
SR	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
SL	0.0	0.0	0.0	0.0	8.4	0.0	4.1	87.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
SU	2.9	2.9	10.1	0.0	0.0	0.0	1.5	0.0	79.6	1.5	0.0	0.0	1.5	0.0
SD	3.8	0.0	0.0	0.0	3.8	0.0	0.0	0.0	0.0	90.6	0.0	0.0	1.8	0.0
SX	0.0	3.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	87.3	1.9	6.9	0.0
S+	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100	0.0	0.0
SV	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100	0.0
Sh	0.0	7.8	3.2	0.0	12.2	0.0	2.5	0.0	1.6	0.0	0.0	0.0	0.0	72.7

TABLE 9 – Matrice de confusion pour DHG dataset en utilisant notre méthode.

4 | Conclusion

La réalisation d'une application immersive interactive permet ici d'illustrer et de tester des hypothèses de restitutions virtuelles d'automates de l'Antiquité. L'usage de cette technologie est unique pour le domaine des langues et littératures anciennes et apporte une réelle plus-value pour comprendre et restituer les mécanismes antiques. Le fait de pouvoir interagir en temps réel et de façon naturelle sur les parties d'un mécanisme, permet de juger de leur fiabilité.

L'intelligence artificielle, et en particulier l'apprentissage automatique, permet d'ajouter une dimension supplémentaire à l'interaction virtuelle. Il nous permet, via divers algorithmes, de détecter et de classifier les gestes d'un utilisateur porteur de la combinaison de capture de mouvement. Grâce à cela, nous pouvons créer des scénarios d'interaction précis, décrits dans les différents traités techniques antiques, qui nous permettent d'interagir virtuellement avec les automates, comme les Romains ou les Alexandrins le faisaient il y a 2000 ans.

La méthode développée dans ce chapitre permet de détecter et de classer des gestes issus d'une nouvelle base de données que nous avons créée. Cette base regroupe des gestes, comme *attraper* ou *verser* qui nous permettent d'interagir avec nos automates. L'algorithme, une fois entraîné, génère un total de 84,26% de réussite à la classification des gestes.

L'immersion de l'utilisateur au sein de cette application interactive, crée chez lui un engouement extraordinaire. En effet, depuis très longtemps, les historiens essaient de comprendre comment des machines pouvaient susciter l'étonnement et générer un sentiment de magie divine. L'immersion virtuelle à échelle humaine, via ses nouvelles technologies d'interaction, permet de faire revivre ses émotions à travers des restitutions animées grandeur nature.

Troisième partie

Roma in tabula : une application
interactive qui permet le partage des
recherches avec des publics pluriels

Roma in tabula est une application multi-plateforme permettant à tout un chacun de manipuler un avatar virtuel pour visiter des monuments de la Rome de Constantin.

L'application est disponible au téléchargement pour les appareils Android et les ordinateurs Windows, MacOS et Linux. Les liens sont listés dans l'Annexe C.1 à la page 305. L'annexe suivante liste les différentes actions que l'ont faire sur une manette de jeux-vidéos pour interagir avec le modèle sur ordinateur.

La description technique du développement de l'application est détaillée dans le rapport de mon stage de Master 2 disponible en Annexe C.3 à la page 307.

Dans un premier temps, nous allons évoquer le souhait pour l'équipe « Plan de Rome » de disposer d'un outil interactif permettant le partage des recherches au plus grand nombre. Nous allons partir de la maquette de Paul Bigot, classée monument historique, puis nous évoquerons les différentes visites que proposent les chercheurs au grand public pour terminer avec la naissance de l'application.

Ensuite nous allons présenter l'application et ses fonctionnalités dans l'état actuel pour terminer avec le « Musée virtuel des automates » qui est une visite virtuelle interactive regroupant les restitutions des automates avec leurs documentations. Cette nouvelle catégorie permet la diffusion du savoir sur les automates antiques à un public plus large.



FIGURE 81 – Bannière introductive de l'application *Roma in tabula*.

1 | Un outil de médiation et de partage des recherches

1.1 La maquette en plâtre de Paul Bigot, objet de recherche scientifique classé monument historique

« L'université de Caen Normandie possède une maquette de la Rome du IV^e siècle après J.-C. réalisée par Paul Bigot (1870/1942). Cette construction en plâtre de 70 m² (11m x 6m) est bien plus qu'une oeuvre d'art. Il s'agit en effet d'un véritable objet de recherche scientifique et il intègre avec une incroyable précision l'ensemble des connaissances de l'époque sur la topographie de la Rome antique. Paul Bigot travaillait naturellement sur l'ensemble des sources anciennes (sources textuelles, iconographiques et archéologiques) et son œil d'architecte archéologue permettait de synthétiser l'ensemble, dont on mesure toujours aujourd'hui la complexité. Une des meilleures preuves de la précision de ce travail est la confrontation de la maquette de Bigot avec une scène satellite de la ville moderne où les principaux bâtiments de la Rome antique se repèrent très bien. Tant sur le calage des bâtiments que sur le tracé viaire, l'architecte a réalisé un remarquable travail, alliant les considérations scientifiques au regard esthétique de l'œuvre »¹⁹⁷.

La présence de cette maquette à l'université de Caen, a permis, en 1994, la création d'une équipe de recherche travaillant sur la restitution virtuelle de Rome à la même époque (Pôle pluridisciplinaire « VILLE – Architecture, Urbanisme et Image virtuelle », aujourd'hui intégré à l'équipe Erlis - Équipe de Recherche sur les Littératures, les Imaginaires et les Sociétés – EA 4254). Suite à cela est créé en mars 2006, le Centre Interdisciplinaire de Réalité Virtuelle, plateau technique de l'Université de Caen et marque déposée, associant les compétences de scientifiques et d'infographistes pour créer des environnements virtuels pour tous les domaines de la recherche.

197. Descriptif de la maquette de P. Bigot - CIREVE - <http://www.unicaen.fr/rome>



FIGURE 82 – Présentation de Ph. Fleury devant la maquette de P.Bigot, classée monument historique.

1.2 L'objectif du Plan de Rome pour le partage des recherches

Pour partager les dernières découvertes scientifiques autour de la ville de Rome, l'équipe du Plan de Rome, partenaire du CIREVE, propose des visites et des conférences tout au long de l'année sur des thématiques spécifiques. Chaque discours est ponctué d'une analyse des sources anciennes connues à ce jour et est suivi de la présentation d'une hypothèse de restitution virtuelle. A la fin de l'intervention, le discours des chercheurs est soumis aux diverses questions des spectateurs, qu'ils soient amateurs ou historiens chevronnés. Ce débat permet d'obtenir des points de vues différents sur le discours et des remarques constructives pour l'amélioration du modèle virtuel.

Ce partage des recherches peut être séparé en deux groupes distincts : les visites thématiques données par un médiateur culturel et les Nocturnes du Plan de Rome.

1.2.1 Les visites thématiques de la Rome antique

Un médiateur culturel, intégré à l'équipe du Plan de Rome, propose trois types de visites sur le Plan de Rome virtuel¹⁹⁸ :

- Les séances en 3D stéréoscopique.
- Les mardis du Plan de Rome.
- Les visites hors site.

1.2.1.1 Les séances en 3D stéréoscopique

Les visites en 3D stéréoscopiques permettent de simuler la notion de profondeur du modèle 3D. Elles peuvent être combinées avec une visite de la maquette de P. Bigot. La thématique est à définir au préalable parmi les thèmes suivants :

- La présentation générale de la Rome antique.
- La vie quotidienne.
- Les loisirs.
- La citoyenneté.
- Les origines de Rome.
- Les sources anciennes.
- L'architecture et le pouvoir.
- Les sciences et techniques.

Les visites durent une heure, une heure trente ou deux heures pour un panel de dix personnes minimum.

1.2.1.2 Les mardis du Plan de Rome

Ces visites ont lieu au sein de l'amphithéâtre de la MRS¹⁹⁹ de l'Université de Caen Normandie. Elles permettent d'aborder de façon générale la Rome antique pour un public de 150 personnes au maximum.

1.2.1.3 Les visites hors site

Le médiateur se déplace hors de l'université pour proposer une visite virtuelle interactive sur une thématique définie auparavant. Ces thématiques sont identiques à celles

198. Nom donné à l'application virtuelle interactive représentant la ville de Rome en 320 après J.-C.

199. Maison de Recherche en Sciences Humaines

présentées lors des séances en 3D stéréoscopique.

1.2.2 Les Nocturnes du Plan de Rome

Les Nocturnes du Plan de Rome sont organisées cinq mercredis dans l'année. Elles ont lieu au sein de l'amphithéâtre Pierre Daure de l'université de Caen Normandie. Ce cycle de conférences de l'Erlis, propose une intervention en trois parties :

1. Une partie consacrée à l'aspect historique de la thématique abordée réalisée par Philippe Fleury (Professeur de latin au sein du CIREVE).
2. Une visite virtuelle interactive réalisée par Sophie Madeleine (Ingénieur en sources anciennes) traitant la thématique.
3. Un débat sous forme de questions/réponses.

Les conférences des Nocturnes sont les interventions annuelles les plus importantes du Plan de Rome. Elles sont retransmises en direct sur les réseaux sociaux et sur Youtube pour permettre de toucher un public le plus large possible. Ces enregistrements vidéos permettent aussi à des professeurs d'illustrer et d'imager des notions étudiées en cours qui paraissent abstraites aux yeux des collégiens et lycéens.

1.3 La naissance de l'application

Les souhaits de partage des connaissances de l'équipe du Plan de Rome sont à l'origine de la création de l'application *Roma in tabula*. En effet, depuis plus de vingt ans, l'équipe Plan de Rome travaille sur la restitution virtuelle de la Rome antique avec la volonté de ne pas s'arrêter à la restitution virtuelle mais bien de proposer de la réalité virtuelle (immersion et interaction avec l'environnement restitué). Ainsi en 2016, le CIREVE désirait donner un accès gratuit aux restitutions sur leur site internet. L'application voit le jour avec pour objectif de cibler différents périphériques (PC/Macintosh et Android). Chaque utilisateur dispose d'un accès aux sources et d'un mode visite virtuelle, le tout gratuitement. C'est dans le cadre du stage de Master 2 IVI (Ingénierie du Virtuel et de l'Innovation), que le développement de l'application m'a été confiée. Je l'ai perfectionnée au cours de ma thèse.

2 | Présentation de l'application

L'application est disponible au téléchargement pour les appareils Android et les ordinateurs Windows, MacOS et Linux. Les liens sont listés dans l'Annexe C.1 à la page 305.

2.1 Descriptif

Les technologies 3D, issues de la réalité virtuelle, permettent une mise en lumière originale, ludique et pédagogique des résultats académiques traditionnels. L'emploi de la 3D temps réel permet un grand niveau d'interactivité (immersion, animation...). La diffusion des travaux de recherche au format numérique (applications interactives, panoramiques 360 degrés, rendus 3D, etc) est aujourd'hui envisageable par la démocratisation des smartphones et des tablettes numériques.

L'utilisation de deux modes d'interaction et de visualisation au sein de la même application permet d'aborder de deux manières différentes les édifices romains restitués. L'élévation 3D en réalité augmentée offre un aperçu global et une vision élargie du monument, contrairement à la visite virtuelle interactive qui propose une immersion naturelle et réaliste. *Roma in tabula* regroupe les deux types de visualisation à travers dix monuments restitués. L'application mobile, disponible sur périphériques Android, et la version disponible sur PC et Macintosh²⁰⁰, favorisent le partage des recherches du Plan de Rome à des publics divers et variés.

2.1.1 L'utilisation de la réalité augmentée

La réalité augmentée est une notion qui est souvent abstraite aux yeux du grand public. Pour en comprendre le principe, nous pouvons nous appuyer sur la définition de Ronald Azuma, chercheur à l'université de Caroline du Nord (Etats-Unis) qui définit la réalité augmentée comme « la combinaison du réel et du virtuel, de manière interactive

200. Les applications sont disponibles en téléchargement gratuit sur le site internet du Plan de Rome : <https://www.unicaen.fr/cireve/rome/>

(en temps réel) et en respectant la perspective »²⁰¹. Une autre définition nous est donnée par Ph. Fuchs et G. Moreau dans le *traité de la réalité virtuelle* : « La réalité augmentée regroupe l'ensemble des techniques permettant d'associer un monde réel avec un monde virtuel, spécialement en utilisant l'intégration d'Images Réelles (IR) avec des Entités Virtuelles (EV) »²⁰². Pour simplifier la définition, nous pouvons déduire trois règles à respecter pour qu'un modèle soit visible en réalité augmentée :

1. Combiner le réel et le virtuel (captation de l'environnement réel avec superposition d'éléments 2D ou 3D).
2. Interagir en temps réel.
3. Utiliser l'environnement en trois dimensions (notion de perspective).

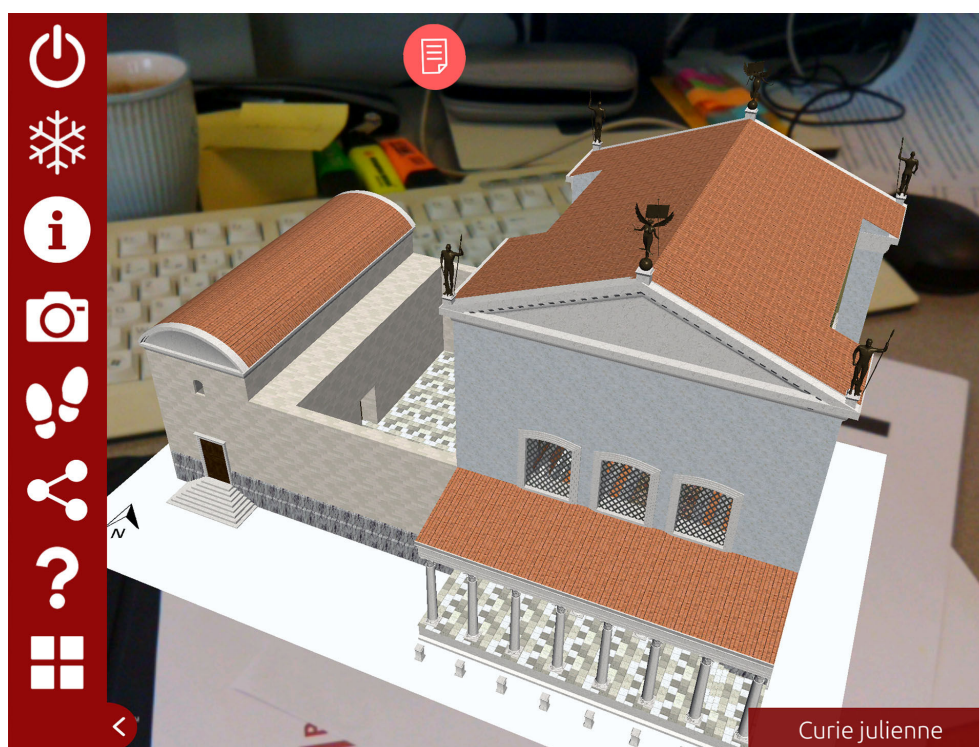


FIGURE 83 – Réalité augmentée de la Curie julienne

Depuis quelques années, la réalité augmentée se démocratise et les domaines d'application sont de plus en plus variés : industrie, jeux vidéo, médecine, culture, navigation, etc. *Roma in tabula* se veut être une application de médiation culturelle et scientifique, utilisant la réalité augmentée pour montrer virtuellement un bâtiment disparu au-dessus

201. R. Azuma, « A Survey of Augmented Reality », *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, 6, 4, 1997, p. 355-385.

202. Ph. Fuchs et G. Moreau, *Le traité de la réalité virtuelle*, Paris, Les Presses de l'école des Mines, 2003, p.39.

de son plan au sol. C'est ce que l'on appelle une détection par marqueur image. Un marqueur est une image ou une illustration en deux dimensions servant de déclencheur et de point de repère au bon positionnement du modèle 3D.

L'utilisation de cette technologie nécessite l'impression du plan du bâtiment, qui sera ensuite scanné avec la tablette ou le smartphone pour faire apparaître le monument en trois dimensions. Pour le grand public, cette technologie permet d'obtenir un aperçu global du monument disparu et de l'observer sous tous ses angles. Cette visualisation offre une vision plus large et une observation de certains détails architecturaux qui sont invisibles lors d'une immersion à échelle humaine. Des élèves pourront par exemple, devenir acteurs de leurs découvertes en visualisant différents points de vue du bâtiment. Les plans permettant l'augmentation 3D du monument sont regroupés dans un livret disponible gratuitement sur le site internet du Plan de Rome . Une double page est attribuée à chaque édifice :

- Sur la première page, est donné son plan au sol.
- Sur la deuxième page, un paragraphe descriptif, un plan 2D servant à localiser le bâtiment dans la ville et une photo de son état actuel sont disponibles.

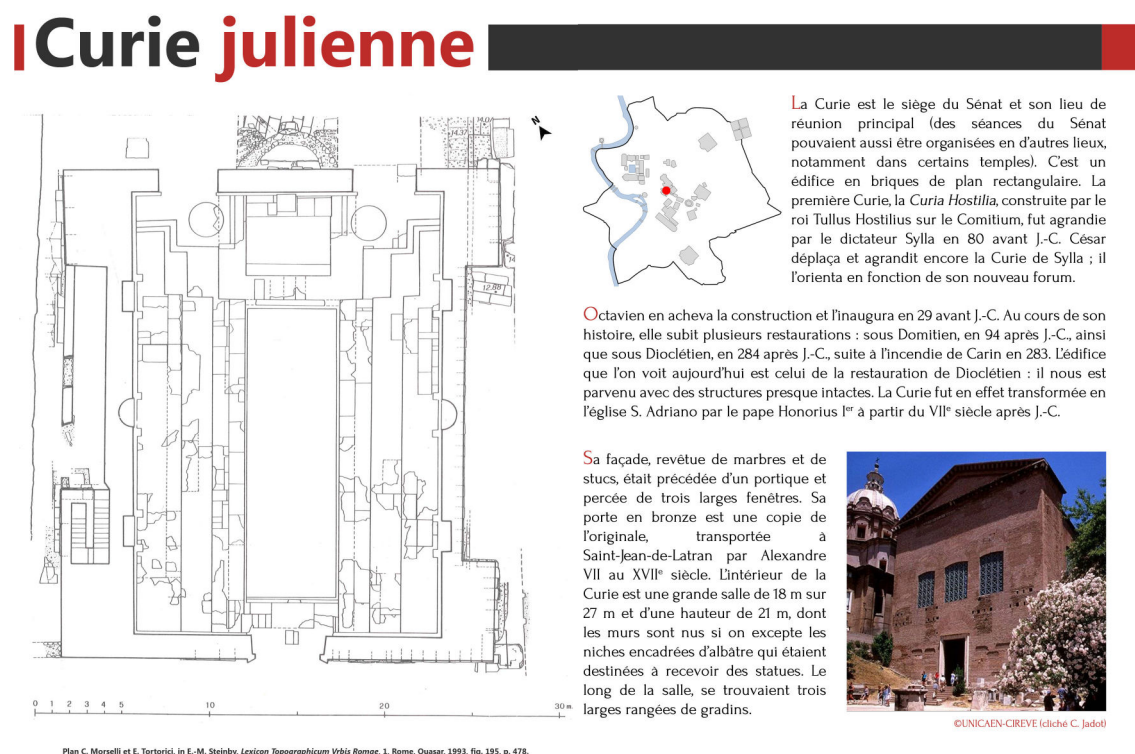


FIGURE 84 – Double page d'informations du livret de l'application

Les pastilles d'information présentes à de multiples endroits sur le modèle, permettent un accès aux documentations utilisées par les chercheurs pour donner une hypothèse de restitution. Ces documentations fournissent au public le cheminement d'un travail de recherche, partant des sources anciennes jusqu'à l'élaboration d'un modèle 3D.

À tout moment, l'utilisateur, par l'action d'un bouton sur le menu, peut s'immerger et naviguer à échelle humaine à l'intérieur d'un monument, lors d'une visite virtuelle interactive.

2.1.2 La visite virtuelle interactive

Si la réalité augmentée permet d'obtenir un aperçu global du bâtiment disparu ou ruiné, la visite virtuelle 3D interactive immerge l'utilisateur à échelle humaine et lui propose de découvrir l'architecture et l'urbanisme de Rome au IV^e siècle après J.-C. Pour naviguer au sein du monument restitué par les chercheurs, un avatar virtuel²⁰³ d'1,65 m²⁰⁴ est dirigé à l'aide de deux joysticks virtuels. Le joystick de gauche permet le déplacement de l'utilisateur, celui de droite son orientation. Chacun devient alors maître de sa visite. Lorsqu'un périphérique est compatible, la navigation peut être réalisée à l'aide du gyroscope en orientant la tablette ou le smartphone dans la direction voulue. Comme dans la réalité, le visiteur virtuel est soumis aux collisions et à la gravité : le sentiment d'immersion est alors augmenté.

À l'instar du mode « réalité augmentée », l'accès aux documentations synthétisant les sources primaires et leur interprétation est présent à divers endroits du modèle.

203. L'avatar virtuel est restitué avec une vue à la première personne (ou Vue subjective). Cela désigne dans le domaine de la réalité virtuelle, la façon d'apercevoir l'environnement 3D à travers les yeux du personnage et donner au joueur une impression d'immersion.

204. Une étude menée sur des ossements retrouvés à Pompéi, montre que l'homme moyen romain mesurait, au premier siècle de notre ère, environ 1,64 m. E.Lazer , *Resurrecting Pompeii*, Londres, Routledge, 2009, p. 155-156.



FIGURE 85 – Visite virtuelle interactive de la Curie julienne

2.2 Liste des monuments disponibles

L'application propose la visite virtuelle de différents monuments de la Rome antique. Huit sont proposés dans la version pour périphériques Android et dix pour la version disponible sur PC et Macintosh. Il est ainsi possible de visiter :

- La Curie julienne,
- Le temple de Castor et Pollux,
- La basilique julienne,
- La basilique émilienne,
- La basilique de Constantin,
- Le Mausolée d'Auguste,
- Le Mausolée d'Hadrien,
- Le Forum de la Paix,
- Le Forum de Nerva,
- Le Colisée.

Les différentes descriptions des bâtiments ont été rédigées dans le cadre du développement de l'application par les chercheurs de l'équipe Plan de Rome : Philippe Fleury,

Sophie Madeleine et Karim Sammour. Les images, quant à elles, sont issues de l'application.

2.2.1 La Curie julienne

La Curie est le siège du Sénat et son lieu de réunion principal (des séances du Sénat pouvaient aussi être organisées en d'autres lieux, notamment dans certains temples). C'est un édifice de plan rectangulaire. La première Curie, la Curia Hostilia, construite par le roi Tullus Hostilius sur le Comitium, fut agrandie par le dictateur Sylla en 80 avant J.-C. César déplaça et agrandit encore la Curie de Sylla ; il l'orienta en fonction de son nouveau forum.

Sa façade, revêtue de marbres et de stucs, était précédée d'un portique et percée de trois larges fenêtres. Sa porte en bronze est une copie de l'originale, transportée à Saint-Jean-de-Latran par Alexandre VII au XVII^e siècle. L'intérieur de la Curie est une grande salle de 18 m sur 27 m et d'une hauteur de 21 m, dont les murs sont nus si on excepte les niches encadrées d'albâtre qui étaient destinées à recevoir des statues. Le long de la salle, se trouvaient trois larges rangées de gradins.



FIGURE 86 – Restitution virtuelle de la Curie - CIREVE 2008

2.2.2 Le temple de Castor et Pollux

Dans l'Antiquité ce temple était surtout connu sous le nom de « Temple de Castor ». D'après Tite-Live (2, 20, 12), lors de la bataille du lac Régille en 499 av. J.-C., le dictateur A. Postumius Albinus « n'oubliant aucune des ressources que pouvaient lui offrir les dieux et les hommes voua, dit-on, un temple à Castor ».



FIGURE 87 – Restitution virtuelle du temple de Castor et Pollux - CIREVE 2011

Denys d'Halicanasse (*Antiquités Romaines*, 6, 13) donne une vision plus « étrange » en parlant de l'apparition de deux cavaliers mystérieux sur le champ de bataille, puis le soir même à Rome où, faisant boire leurs chevaux à la fontaine de Juturne juste à côté du lieu où sera construit le temple plus tard, ils auraient annoncé la victoire des Romains avant de disparaître. Toujours est-il que le temple aurait été dédié par le fils de Postumius en 484 avant J.-C. Le temple s'élevait sur un soubassement d'environ 50 m de long sur 30 m de large.

2.2.3 La basilique julienne

Située à l'emplacement de l'ancienne *Basilica Sempronia*, la *Basilica Iulia* fut bâtie par César, qui lui donna le nom de sa famille en 54 avant J.-C. Cet édifice, qui se trouve entre le temple de Saturne et celui de Castor et Pollux, servait de palais de justice. C'était aussi un centre de réunions et d'affaires. Comme de nombreux monuments du forum Romain, la *Basilica Iulia* fut détruite en 14 avant J.-C. par un incendie. A la suite

de cette destruction, elle fut refaite par Auguste qui la dédia en 12 après J.-C. au nom de ses fils adoptifs, Caius et Lucius.



FIGURE 88 – Restitution virtuelle de la basilique julienne - CIREVE 2010

La basilique julienne, surélevée de quelques marches, se présentait comme un grand rectangle, long de 101 m et large de 49 m. Un portique à arcades formé de piliers quadrangulaires (18 sur les longs côtés, 8 sur les petits) entourait l'édifice. Près des arcades on pouvait voir des statues de grands sculpteurs grecs tels que Praxitèle et Polyclète. Elle comportait une salle centrale de 75 m x 16 m entourée de deux portiques concentriques. Cette salle assurait la fonction de cour de justice : elle était divisée en quatre tribunaux, mais lors des grands procès, on employait la salle entière. La foule assistait à ces procès, assemblée dans les galeries de l'étage supérieur qui dominaient la nef centrale et qui étaient ornées d'une colonnade. Au XV^e et au XVIII^e siècles, les restes de la basilique Iulia firent office de carrière.

2.2.4 La basilique émilienne

Édifice rectangulaire soutenu par plusieurs rangs de colonnes, la *Basilica Aemilia* fut construite en 179 avant J.-C. par les censeurs Marcus Aemilius Lepidus et Marcus Fulvius Nobilior. Comme toutes les basiliques antiques, elle n'avait pas de fonction religieuse, mais des fonctions judiciaire, politique et économique : on y traitait en effet les affaires et on y rendait la justice.

La basilique émilienne comprenait une grande nef centrale entourée d'un déambulatoire, le tout couvrant 70 m de long sur 29 m de large. Du côté du forum, on pouvait y accéder par trois entrées. Les nefs étaient séparées par des colonnes de marbre coloré. L'édifice était pavé de larges dalles de marbre richement décorée. Détruite par l'incendie de 14 avant J.-C, la basilique fut reconstruite par Auguste. Quelques années plus tard, en 22 après J.-C., elle fut à nouveau restaurée.



FIGURE 89 – Restitution virtuelle de la basilique émilienne - CIREVE 2010

2.2.5 La basilique de Constantin

La basilique de Constantin, commencée par l'empereur Maxence et achevée par Constantin, abritait les activités judiciaires de Rome à l'époque tardive. Ce fut la dernière des basiliques construites à Rome. Elle remplaça les *Horrea Piperataria*, magasins du poivre et des épices. Elle se situe sur la Velia, une petite colline qui sépare le forum proprement dit de la vallée du Colisée. Ce bâtiment de 110 m de long, 65 m de large et 35 m de hauteur, est impressionnant.

Véritable apogée de l'architecture romaine, la basilique était formée de trois nefs voûtées. La nef centrale (80 m sur 25 m et d'une hauteur de 35 m) était flanquée de huit colonnes de marbre de Proconnèse, hautes de 14,50 m. Une de ces colonnes fut déplacée par Paul V en 1613 sur la place devant Sainte Marie Majeure où elle se trouve encore aujourd'hui. Ces colonnes étaient simplement décoratives. Dans l'abside de la nef centrale se trouvait une statue acrolithe de Constantin. La tête de la statue, retrouvée en 1487,

se trouve aujourd'hui dans la cour des Musées du Capitole.



FIGURE 90 – Restitution virtuelle de la basilique de Constantin - CIREVE 2012

2.2.6 Le Mausolée d'Auguste

Le mausolée d'Auguste abrite les dépouilles de la première dynastie des empereurs de Rome : les Julio-Claudiens. L'urne funéraire d'Auguste était située au centre de l'édifice et les urnes de ses successeurs dans une galerie périphérique. Le Mausolée d'Auguste se trouve à l'extrémité nord du Champ de Mars entre la Via Flaminia et le Tibre. Octave décida sa construction probablement en 29 avant J.-C. après sa victoire sur Antoine et la conquête de l'Égypte. C'est un édifice circulaire de 87 m de diamètre. Il est surmonté d'un tumulus de terre, planté de cyprès.

L'entrée du mausolée était tournée vers le sud, flanquée à droite et à gauche de deux obélisques qui se trouvent aujourd'hui sur la Piazza del Quirinale et la Piazza dell'Esquilino. Le monument servit de sépulture impériale jusqu'à l'époque de Trajan : outre celles d'Auguste, les cendres de Marcellus, Agrippa, Octavie, Drusus l'ancien, Caius et Lucius César, Drusus le jeune, Livie, Tibère, Agrippine, femme de Germanicus, Néron et Drusus, frères de Caligula, Claude, Britannicus et Nerva y furent déposées.



FIGURE 91 – Restitution virtuelle du Mausolée d'Auguste - CIREVE 2008

2.2.7 Le Mausolée d'Hadrien

Comme Auguste l'avait déjà fait en construisant son mausolée, l'empereur Hadrien (117-138 après J.-C.) érigea sur le Champ de Mars un sépulcre monumental pour lui et ses successeurs. Le Mausolée d'Hadrien, aujourd'hui Château Saint-Ange, se situe sur la rive droite du Tibre dans la région du Vatican. Commencé en 130 après J.-C., il ne fut terminé qu'en 139, un an après la mort d'Hadrien.

Le soubassement du sépulcre est un carré de 89 m de côté et de 15 m de haut. Il porte un cylindre, d'un diamètre de 64 m et d'une hauteur de 21 m, surmonté d'une tour carrée. Cette masse cylindrique était recouverte par un tumulus de terre, planté de cyprès. Au centre de la construction, s'élevait un pilastre surmonté d'un quadrigue en bronze doré avec la statue d'Hadrien.

2.2.8 Le Forum de la Paix

Le forum de la Paix, aussi appelé forum de Vespasien, se situe à l'est du forum de Nerva à l'emplacement d'un ancien marché incendié en 64 après J.-C. Érigé par Vespasien après son triomphe sur la Judée en 71 après J.-C., il fut appelé Temple puis forum de la Paix en raison du sanctuaire consacré à la Paix qui orne la place. Cet ensemble architectural (145 m sur 139 m) était entouré d'un mur d'enceinte et, sur trois des côtés, il y avait des portiques à colonnes de granite rouge.



FIGURE 92 – Restitution virtuelle du Mausolée d'Hadrien - CIREVE 2016

L'emplacement du temple de la Paix lui-même doit probablement être reconnu dans la grande salle en retrait (environ 34 x 22 m) qui forme une abside sur le côté sud-est du portique. Vespasien en fit un véritable musée : à l'intérieur se trouvaient en effet les dépouilles du temple de Jérusalem (le chandelier en or à sept branches, les tables de la loi de Moïse et les trompettes d'argent qui figurent sur l'arc de Titus).

Le forum de la Paix abritait la Préfecture de la ville. La *Forma Urbis*, plan d'époque sévérienne gravé dans le marbre, y était exposée.



FIGURE 93 – Restitution virtuelle du Forum de la Paix - CIREVE 2008

2.2.9 Le Forum de Nerva

Le Forum de Nerva fut entrepris par Domitien afin d'occuper l'espace laissé vacant entre les précédents Forums : il fut parfois appelé pour cette raison *Forum Transitorium*.

Cette place ne reçut pas le nom de son fondateur, Domitien, dont la mémoire avait été condamnée par le sénat (*damnatio memoriae*), mais celui de Nerva qui se chargea d'achever sa construction et de l'inaugurer en 97 après J.-C.



FIGURE 94 – Restitution virtuelle du Forum de Nerva - CIREVE 2007

Le Forum de Nerva se présentait comme une place rectangulaire, étroite et allongée, mesurant environ 120 m sur 45 m, au fond de laquelle se trouvait le Temple de Minerve, divinité chère à Domitien.

Toutes les parois de la place étaient ornées d'une suite de colonnes en saillie avec un entablement figuré et un attique. On en voit aujourd'hui deux belles colonnes, connues sous le nom de « Colonnace », ainsi que des fragments de frise. La frise représente des scènes de travaux féminins et sur l'attique on reconnaît la figure de Minerve, protectrice de l'artisanat.

2.2.10 Le Colisée

Situé au milieu d'une large vallée entourée par les hauteurs du Palatin, de l'Esquilin et du Caelius, le Colisée ou Amphithéâtre Flavien reste un des monuments les plus imposants de Rome.

C'est l'empereur flavien Vespasien qui fit débiter les travaux en 70 après J.-C. Ses fils Titus et Domitien contribuèrent aussi à sa construction ; l'inauguration eut lieu en 80 après J.-C. sous le règne de Titus.

Cet amphithéâtre fut construit à l'emplacement même de l'étang de la *Domus Aurea* de Néron. Au Moyen-Âge, il prit le nom de « Colosseo », Colisée qui lui vient de la statue colossale de Néron, déplacée et rapprochée de l'amphithéâtre par Hadrien afin de libérer l'espace pour la construction du Temple de Vénus et Rome.

L'ensemble de l'amphithéâtre est elliptique, d'un périmètre de 524 m avec des axes de 156 m et de 188 m. Sa hauteur est de 48,50 m. L'arène mesurait 86 m sur 54 m. Elle était généralement couverte de sable. Le plan de l'arène était en partie en maçonnerie et en partie en bois à plaques mobiles pour faciliter l'accès à un sous-sol qui contenait le matériel destiné aux spectacles, les cages des fauves ainsi que les monte-charge, les rampes permettant aux acteurs, aux gladiateurs et aux animaux d'accéder à la piste.



FIGURE 95 – Restitution virtuelle du Colisée - CIREVE 2011

Les spectacles commençaient à l'aube et finissaient au coucher du soleil. Ils duraient en général plusieurs jours suivant la commémoration, la fête ou l'événement triomphal. On donnait plusieurs genres de spectacles : combats de gladiateurs, chasses de fauves, spectacles de variété ; des naumachies (combats navals) semblent même avoir été données au début. Parmi les spectacles les plus somptueux, on relève celui de l'inauguration sous Titus, en 80 après J.-C., avec des combats de gladiateurs et d'innombrables animaux : éléphants, tigres, lions, léopards, hippopotames, etc. A cette occasion 5 000 fauves au

moins furent tués !

2.3 Une application soumise à une phase de test

Pour évaluer l’ergonomie et la prise en main de l’application, nous avons organisé une phase de test en ouverture d’une « Nocturne du plan de Rome », le 1^{er} juin 2016.

Nous avons lancé la phase de test sur un panel de 23 personnes, dont l’âge varie de 10 à 70 ans. Qu’ils soient néophytes ou utilisateurs aguerris, chaque personne devait remplir un formulaire de questions à la fin de la séance de test (cf. Annexes – Questionnaire Post-Expérience). Les réponses ainsi récupérées ont permis de corriger des problèmes ou d’ajouter des fonctionnalités que nous n’avions pas envisagées. Les testeurs n’ont eu accès qu’à un seul bâtiment lors de l’expérimentation (seul l’aspect ergonomique et la prise en main de l’application étaient évalués, non le contenu) : la Curie julienne.

Les 23 personnes ont testé l’application dans les deux modes de visualisation : la réalité augmentée et la visite virtuelle interactive. Pour faire le test, nous disposions de deux tablettes, tournant sous Android 4.4 Kitkat :

- Une tablette Samsung Galaxy Tab 2.
- Une tablette HTC Nexus 9.

Lors de cette première phase de tests, les utilisateurs ont été agréablement surpris par la facilité d’utilisation de l’application, mais ils ont aussi listé quelques points à améliorer. Ils ont, par ailleurs énoncé le souhait de pouvoir utiliser indépendamment les deux modes de visualisation. Nous avons proposé de créer un système de catalogue qui permettrait de choisir quel bâtiment visiter, indépendamment de la réalité augmentée (cf. Figure 17). Les autres points mineurs à corriger sont :

- Des problèmes de collision rencontrés au cours de l’expérimentation.
- Des textes trop petits pour des personnes présentant des problèmes de vue.

3 | Le musée virtuel des automates

3.1 Présentation

A la fin de mon stage de master, *Roma in tabula* présentait uniquement des monuments de la Rome antique. Au cours de ma thèse j'ai créé une nouvelle catégorie dans le but de montrer les constructions mécaniques des ingénieurs antiques. C'est dans cette optique que le Musée virtuel des automates est construit. Ce musée se présente sous la forme d'un bâtiment regroupant les différents automates restitués au cours de cette thèse.

La visite commence dans un sas²⁰⁵ (cf. Figure 96), où devant nous se trouvent deux grandes portes. Les portes une fois ouvertes (cf. Figure 97), l'entrée dans la salle principale peut se faire. On aperçoit au fond sur le mur, une inscription en grec, *mouseion automaton* (cf. Figure 98), qui signifie « musée des automates ». La salle est divisée en boxes qui accueillent chacun une machine.

Pour le décor, cette pièce reprend des principes de construction et de décoration de l'époque romaine bien qu'elle soit purement imaginaire. Des colonnes corinthiennes en marbre blanc sont présentes à l'entrée de chaque box. Au sol, un pavement en marbre est présent. Les murs et la corniche sont recouverts de stucs blanc. Le plafond en forme de caissons est en bois.

La scène est éclairée par des candélabres en bronze disposés entre les colonnes. Des tables en marbre blanc, recouvertes d'une nappe en lin rouge, soutiennent les différents éléments de décor ainsi que les automates les plus petits.

3.2 Les machines disponibles

Les machines disponibles au sein de l'application sont les mêmes que celles présentées dans la première partie de cette thèse. Il s'agit de cinq automates décrits par Philon de Byzance et Héron d'Alexandrie entre 250 avant J.-C. et le I^{er} siècle après J.-C :

205. Le sas permet d'accentuer le sentiment de présence chez l'utilisateur. Une étude est menée par A. Maneuvrier dans le cadre de sa thèse, pour comprendre les différents aspects de la présence en Réalité Virtuelle.



FIGURE 96 – Sas d'entrée avec portes fermées

- La servante automatique de Philon de Byzance, distribuant alternativement de l'eau et du vin sans que la coupe ne déborde.
- Les portes automatiques d'un petit temple miniature s'ouvrant lorsque l'on allume un feu sur l'autel, par Héron d'Alexandrie.
- Un jeu miniature représentant Héraclès et Ladon aux jardins des Hespérides : lorsque l'on tire sur la pomme posée sur le socle, Héraclès tire une flèche qui vient terrasser le *drakon* - Héron d'Alexandrie
- L'automate des oiseaux chanteurs et de la chouette est une fontaine à intermittence qui fait siffler les oiseaux quand la chouette leur tourne le dos - Héron d'Alexandrie.
- Un théâtre automatique à base mobile représentant l'apothéose de Bacchus par Héron d'Alexandrie.

3.3 Navigation et interaction

Dans ce musée virtuel, la navigation se fait comme pour les visites virtuelles des monuments de Rome. Il s'agit d'un point de vue à la première personne contrôlable à l'aide du clavier et de la souris ou par une manette de jeux vidéo. Dans la version Android, le déplacement se réalise à l'aide de joysticks virtuels. Les fonctionnalités de course et de



FIGURE 97 – Sas d'entrée avec portes ouvertes

saut sont désactivées et limitent ainsi la création de malaise.

Trois niveaux d'interaction sont possibles :

1. Interaction documentaire sur le cartel de présentation,
2. Lancement des animations,
3. Réduction de l'opacité de la machine pour apercevoir le mécanisme interne de la machine.

3.3.1 Les cartels de présentation

Les cartels (cf. Figure 99) sont les principales sources d'interaction dans le musée virtuel. Ils sont représentés sous la forme de blocs de marbre blanc sur lequel le nom de la machine et l'année de fabrication estimée sont écrits. En cliquant dessus, avec la souris ou la manette, une documentation s'affiche.

Cette documentation (cf. Figure 100) permet d'afficher les sources anciennes qui ont permis la restitution virtuelle de l'automate, ainsi qu'une explication sur le fonctionnement des mécanismes internes. Une galerie d'images permet par exemple d'ajouter des schémas explicatif pour la compréhension de la machinerie.

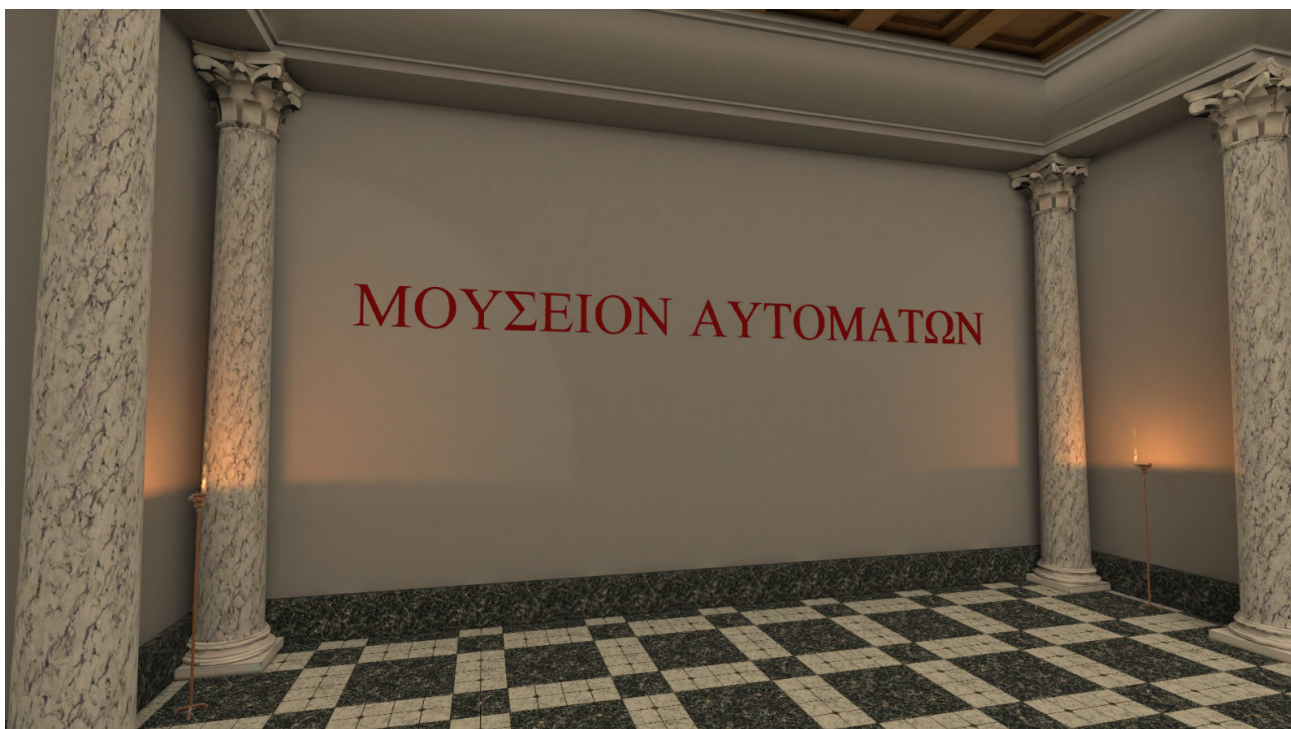


FIGURE 98 – Inscription du nom du musée en grec sur le mur du fond

3.3.2 Les animations

En se décalant sur la droite dans le box, nous avons la vision sur l'automate. Un survol par dessus affiche un texte qui permet de lancer l'animation de la machine (cf. Figure 101). Si nous prenons le cas de la *Servante automatique* de Philon de Byzance, l'animation des mécanismes permet de voir que le bol, une fois posée sur la main, libère alternativement une dose de vin et d'eau. Une interaction permet d'arrêter, de revenir en arrière ou de rejouer l'animation.

3.3.3 La vision des mécanismes internes

Le dernier point fort de cette application permet de comprendre le fonctionnement de ces machines en réduisant au maximum l'opacité de la couche supérieure de l'automate. Cette réduction d'opacité rend visible les mécanismes internes (cf. Figure 102), et il est possible de relancer l'animation. Cette mise en lumière des entrailles mécaniques de la machine aide l'utilisateur à comprendre les différentes astuces des Anciens pour cacher aux yeux de tous cette machinerie pneumatique.



FIGURE 99 – Accès aux documentations par l'interaction du cartel de présentation

La servante automatique de Philon de Byzance – 250 avant J.-C.

Traduction de la source ancienne

Description d'un autre vase plus merveilleux que celui-là. - C'est une fontaine à intermittence ayant la forme d'une servante qui tient en main une aiguière. Quand on place dans la paume de sa main gauche une coupe à boire, elle verse du nébid en la quantité que l'on veut; ensuite elle verse l'eau qu'on mélange à ce nébid.

Vous faites une servante de cuivre ou d'argent, représentée debout. De sa tête à sa poitrine vous pratiquez un réservoir séparé par une cloison en deux moitiés. Dans chaque réservoir est un tuyau à air, et dans chacun un tuyau à liquide qui s'en va à l'aiguière. Le tuyau du réservoir à nébid se dirige droit vers l'aiguière et le tuyau du réservoir d'eau, qui est long, est dans le ventre de la servante, tournant autour du réservoir. Les tuyaux à air s'ouvrent en bas du réservoir, du côté du ventre de la servante. La main gauche tient, à l'épaule, sur deux tourillons. A l'intérieur de la figure est une crosse, tournée en bas, pareille à la serpette à émonder les arbres; sur cette crosse sont deux verges, semblables à deux robinets, et toutes deux forment clef. Elles ont deux fentes ou deux trous à leurs extrémités. Ces extrémités entrent exactement dans celles des tuyaux à air et elles y tournent à frottement doux. Le bas de la crosse qui ressemble à la serpette est un peu alourdi. Il tend naturellement vers le bas et il élève la main gauche; celle-ci s'élève à l'extérieur, en tirant les deux petits tuyaux qui forment clef. Leurs deux trous s'écartent des deux trous des tuyaux à air.

Ceux-ci sont bouchés, et les liquides ne s'écoulent pas des deux orifices dans l'aiguière.

Toute cette construction est à l'intérieur de la servante. L'eau et le nébid se déversent de la tête de la servante et coulent facilement; le crâne constitue un couvercle très étanche. La main droite reste à sa place, ne se mouvant pas, et l'aiguière non plus ne se meut pas. Les deux trous font communiquer les deux réservoirs avec l'aiguière, comme nous l'avons dit.

Voici la description de la servante : α et β sont les marques des deux réservoirs; celles des tuyaux à air γ et δ ; celles des deux tuyaux à liquides qui s'en vont à l'aiguière ϵ et ζ ; celle des tourillons de la main est η ; celle de la crosse θ ; les deux clefs sont marquées ι et κ .

Il y a dans la figure un trou qui ouvre sur l'extérieur, et le couvercle est fermé pendant l'opération, afin que l'air

> Commentaire du texte et explication du fonctionnement

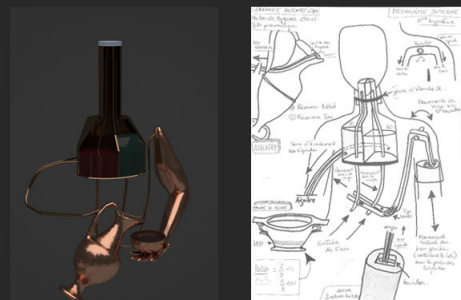


FIGURE 100 – Documentation sur la servante automatique de Philon de Byzance



FIGURE 101 – Interaction pour le lancement de l'animation



FIGURE 102 – Vision des mécanismes internes de la servante automatique

4 | Conclusion

L'application *Roma in tabula* permet à l'équipe « Plan de Rome » de partager avec le plus grand nombre ses travaux de recherche sur la Rome antique. La mise à disposition des dernières informations sur la restitution virtuelle de la Rome antique permet à tous, néophytes et chercheurs confirmés, de participer à un débat et d'apporter une contribution au projet.

La visite virtuelle de chaque bâtiment permet une nouvelle approche de la compréhension des édifices antiques et nous renseigne sur les diverses techniques de construction. Cette démarche rend ludique l'apprentissage et le partage des connaissances antiques pour un public plus jeune, comme les collégiens ou lycéens dans le cadre, par exemple, des cours de grec, de latin ou d'histoire.

L'accès aux sources primaires (textuelles, iconographiques et archéologiques) ayant permis la restitution est aussi présent et permet à tout à chacun de participer au débat d'évolution du modèle virtuel, avec des interprétations différentes. De plus ces informations sont complémentaires du modèle virtuel : la restitution virtuelle est justifiée par les sources.

L'ouverture d'une nouvelle catégorie de visites virtuelles permet de partager les connaissances de l'équipe sur la restitution des machines construites par les ingénieurs antiques. Dans le cadre de la thèse, une catégorie dédiée aux automates est créée et permet de partager avec le public les derniers modèles virtuels des systèmes mécaniques antiques. La réalisation de l'application permet d'apporter de la vie au modèle et il est possible de lancer l'animation des mécanismes. L'ajout de l'animation et du son apporte deux dimensions supplémentaires à la scène virtuelle : on parle ainsi de modèle 5D²⁰⁶.

Dans le cadre des machines antiques, seule la visite virtuelle interactive est disponible. La réalité augmentée n'est, pour le moment, disponible que pour les monuments. La présentation de machines antiques est un plus dans le cadre de la recherche et du partage avec le public. En effet, en dehors du cadre universitaire, la médiatisation de ces appareils

206. Les trois premières dimensions sont les coordonnées 3D (X,Y et Z) de la scène, ensuite vient l'ajout de la dimension temporelle avec l'animation et enfin une dernière dimension est créée avec le son.

est peu répandue, ce qui permet à *Roma in tabula* d'être un levier dans ce domaine. Comme pour les monuments, les machines peuvent être soumises à un débat afin de coller au mieux aux sources anciennes et de perfectionner les différents mécanismes avec les techniques qui existaient dans l'Antiquité.

Différentes versions de cette application sont disponibles, que se soit sur PC, Macintosh ou Android²⁰⁷. Cela permet de s'adresser à un plus grand panel de personnes et d'obtenir le plus grand nombre de retours possible pour améliorer et optimiser au mieux le partage des connaissances sur la Rome antique. L'application a vraiment pour but de s'améliorer et donc n'a pas pour vocation de rester à un niveau de connaissance établi à un instant T.

Roma in tabula est aujourd'hui très utilisée dans les collèges et lycées de Normandie par les professeurs d'histoire-géographie et de lettres classiques comme supports de cours. Elle vient parfaire les connaissances enseignées par une visite virtuelle très enrichissante pour les élèves qui y trouvent une façon ludique d'apprendre le grec et le latin, comme en témoigne un reportage réalisé par l'académie de Rouen au collège Nelson Mandela à ce sujet²⁰⁸.

L'objectif principal de l'équipe « plan de Rome », à long terme, est de partager de façon gratuite, l'intégralité de son modèle virtuel représentant Rome et ses machines au IV^e siècle après J.-C. *Roma in tabula* est donc le précurseur de ce mode de partage.

207. Catalogue d'applications disponibles sur le Google Play Store :

<https://play.google.com/store/apps/developer?id=Cireve>

ou bien sur le site internet du plan de Rome :

http://www.unicaen.fr/cireve/rome/pdr_realisations.php?fichier=Romaintabula

208. Vidéo explicative présente au sein de l'article *Le « latin » et le « grec » en classe : mais que se passe-t-il vraiment ?* sur :

<http://lettres.spip.ac-rouen.fr/spip.php?article594>

Conclusion générale

Ces travaux de thèse avaient initialement pour but de restituer virtuellement quelques exemples d'automates antiques. Cependant, un second axe de recherche a été introduit avec l'interaction virtuelle d'un modèle 3D au sein d'une application virtuelle immersive.

Cette thèse devient pluridisciplinaire et construit un projet innovant liant les langues anciennes et l'informatique. Le fait de lier les modèles 3D représentant des machines à de l'interaction virtuelle permet d'ajouter une dimension supplémentaire pour juger de l'efficacité de la restitution virtuelle. Cette immersion virtuelle ressuscite l'effet de la thaumaturgie chez les utilisateurs. Ces différents axes de recherche, totalement différents, mais liés ensemble, offrent de nouvelles solutions inédites de visualisation et d'interaction aux chercheurs.

Ces travaux de recherche ont nécessité pour moi quelques formations avant d'entreprendre les restitutions des modèles d'automates antiques. En effet, étant développeur en réalité virtuelle, j'ai dû prendre part à des formations pour pouvoir analyser et comprendre les différents traités techniques antiques. De même que pour le domaine de l'intelligence artificielle, qui m'était totalement inconnu lors du démarrage de la thèse. L'autre atout pour cette recherche est d'utiliser l'application *Roma in tabula*, que j'ai développée pendant mon stage de Master 2, pour partager avec le public les restitutions des automates. Cette application est très utilisée dans le domaine académique par les professeurs, qui voit en elle un support d'apprentissage ludique et scientifique.

La restitution virtuelle des automates antiques

Les premiers mois de cette thèse m'ont permis d'appréhender rapidement les bases et les notions pour la compréhension des textes anciens latins et grecs. Ce travail personnel enrichissant permet d'acquérir les compétences nécessaires à la construction des schémas détaillés des mécanismes et de comprendre les différents termes mécaniques énoncés par les mécaniciens.

La période choisie pour la restitution virtuelle des automates antiques est située entre

le III^e siècle avant J.-C. et le I^{er} siècle après J.-C. Cet intervalle correspond à la période où les automates furent développés au sein du Musée d'Alexandrie par les mécaniciens antiques tels que Philon de Byzance et Héron d'Alexandrie. Une collaboration avec Delphine Lauritzen, chercheuse à la Sorbonne, a permis d'observer que les mêmes procédés techniques étaient utilisés lors de la réalisation des automates de l'empire Byzantin au V^e siècle après J.-C. Les techniques de fabrication des automates sont ensuite oubliées durant la période médiévale avant de réapparaître à la renaissance.

Ces travaux de recherche présentent la restitution de cinq automates imaginés par Philon de Byzance et Héron d'Alexandrie dans leurs traités des *Pneumatiques* et des *Automates*. Ainsi une servante automatique distribuant l'eau et le vin, un temple miniature avec des portes automatiques, l'automate de la chouette et des oiseaux chanteurs, un jeu miniature illustrant un des douze travaux d'Hercules et un théâtre automatique à base mobile ont été restitués virtuellement.

Chaque mécanisme est indépendant de son enveloppe externe et offre une possibilité à l'utilisateur d'interagir avec lui pour comprendre son fonctionnement.

L'intelligence artificielle, un atout pour l'interaction

L'intelligence artificielle gagne d'années en années plusieurs domaines d'activités. C'est pourquoi je l'ai choisie pour développer une méthode d'interaction efficace. En effet l'intelligence artificielle, en particulier l'apprentissage automatique, permet de générer d'excellents résultats dans le domaine de la réalité virtuelle.

Le développement d'une méthode de reconnaissance des gestes couplée à une combinaison de capture de mouvement permet à l'utilisateur d'interagir de manière naturelle et sans périphérique avec des modèles virtuels. Pour cela un algorithme entraîné sur une base de données existante (DHG 14/28) compare l'efficacité des résultats avec ceux de la littérature. Une nouvelle base de données, en adéquation avec la combinaison, est ensuite créée pour détecter et classer des gestes bien spécifiques. Ces gestes sont décrits au travers de scénarios d'interaction réalisés pour chaque automate.

Cette thèse propose une application immersive interactive, réalisée sous Unity 3D, où l'utilisateur navigue et interagit de façon naturelle avec les automates antiques. Chaque automate est intégré dans un contexte bien spécifique. La méthode actuelle de reconnaissance des gestes propose un taux de classification de 84,26%. Pour améliorer l'efficacité de

la méthode, il est envisageable d'accentuer le nombre de données au sein de la base pour proposer plus de matière à l'apprentissage des gestes. Une optimisation de l'algorithme est aussi à l'étude et devrait permettre de gagner encore en précision.

***Roma in tabula* : un outil pour le partage des recherches**

L'application *Roma in tabula* a vu le jour en fin d'année 2016 sur différentes plateformes tels que les ordinateurs personnels (Windows, MacOS et Linux) et les périphériques Android. Elle est le fruit d'un travail de collaboration entre les chercheurs de l'équipe « Plan de Rome » et moi-même lors de mon stage de Master 2 réalisé au sein du Cireve. Elle permet le partage des recherches sur la restitution virtuelle de la ville de Rome au public, le tout gratuitement.

Cette thèse propose un perfectionnement de l'application d'un point de vue technique et une nouvelle catégorie d'objets en offrant un « Musée » virtuel des automates. Cet édifice imaginaire permet de regrouper au sein d'un même lieu les différentes restitutions d'automates réalisées pendant le doctorat. La déambulation dans ce musée se fait de la même manière que dans le reste de l'application. Nous pouvons interagir avec ces machines : animation des automates, accès aux documentations scientifiques, schéma explicatif, mise en surbrillance des mécanismes cachés etc.

Les professeurs qui utilisent l'application pourront désormais présenter aux élèves, des restitutions virtuelles animées des machines antiques pour illustrer l'étude des textes anciens. La mise à jour de l'application sera disponible pour tout le monde au cours de l'année 2020.

Bibliographie générale

Textes anciens

APOLLODORE D'ATHÈNES, *La Bibliothèque d'Apollodore*, éd. et trad. par CARRIÈRE, J.-C. et MASSONIE, B., Besançon, Université de Besançon, 1991.

APOLLODORE D'ATHÈNES, *The library*, trad. par FRAZER, J. G., 2 t., Londres, W. Heinemann, 1921.

ARISTOPHANE, *Les Grenouilles*, Paris, Les Belles Lettres, 2012.

ARISTOTE, *Politique*, Paris, Les Belles Lettres, 1960.

ARRIEN, *Anabase*, Paris, Les Belles Lettres, 2017.

AULU-GELLE, *Les nuits attiques*, Paris, Les Belles Lettres, 2002.

HÉRON D'ALEXANDRIE, *Automates*, éd. et trad. par SCHMIDT, W., Leipzig, Teubner, 1903.

HÉRON D'ALEXANDRIE, *Pneumatiques*, éd. et trad. par SCHMIDT, W., Leipzig, Teubner, 1903.

HÉRON D'ALEXANDRIE, *Pneumatiques*, trad. par WOODCROFT, B., Londres, Macdonald, 1971.

HÉRON D'ALEXANDRIE, *Pneumatiques*, éd. et trad. par ARGOUD, G. et GUILLAUMIN, J.-Y., Saint-Étienne, Publications de l'Université de Saint-Étienne, 1997.

HÉSIODE, *Théogonie, Les Travaux et les Jours, Le Bouclier*, Paris, Les Belles Lettres, 1972.

HOMÈRE, *Iliade. Tome I, Chants I-VI*, Paris, Les Belles Lettres, 2009.

HOMÈRE, *Iliade. Tome II, Chants VII-XII*, Paris, Les Belles Lettres, 2011.

HOMÈRE, *Iliade. Tome III, Chants XIII-XVIII*, Paris, Les Belles Lettres, 1992.

HOMÈRE, *Odyssée. Chants I à VII*, Paris, Les Belles Lettres, 2001.

HYGIN, *L'astronomie*, Paris, Les Belles Lettres, 1983.

- LUCIEN DE SAMOSATE, *Oeuvres complètes*, éd. et trad. par OZANAM, A.-M., Paris, Editions Robert Laffont, 2015.
- NONNOS DE PANOPOLIS, *Les Dionysiaques. Tome IX, Chants XXV-XXIX*, Paris, Les Belles Lettres, 1990.
- OVIDE, *Les Métamorphoses*, Paris, Les Belles Lettres, 2009.
- PAPPUS D'ALEXANDRIE, *La Collection mathématique*, trad. par VER EECKE, P., Paris, Desclée de Brower, 1933.
- PAUSANIAS, *Description de la Grèce*, trad. par CLAVIER, M., Paris, Société royale académique des sciences, 1821.
- PHILON DE BYZANCE, *Pneumatiques*, trad. par ROCHAS D'AIGLUN, A. d., Paris, Typ. Pillet et Dumoulin, 1881.
- PHILON DE BYZANCE, *Pneumatiques*, éd. et trad. par CARRA DE VAUX, B., Paris, Imprimerie nationale, 1903.
- PHILON DE BYZANCE, *Pneumatiques*, trad. par PRAGER, F. D., Wiesbaden, L. Reichert, 1974.
- PHILON DE BYZANCE, *Poliorcétique*, trad. par WHITEHEAD, D., Stuttgart, Franz Steiner Verlag, 2016.
- PLATON, *Oeuvres complètes*, Paris, Les Belles Lettres, 1968.
- STRABON, *Géographie*, Paris, Les Belles Lettres, 2015.
- VETERES MATHEMATICII, *Veterum mathematicorum Athenæi, Bitonis, Apollodori, Heronis, Philonis et aliorum opera, græce et latine pleraque nunc primum edita. Ex manuscriptis codicibus Bibliothecæ regiæ*, éd. par THÉVENOT, M., Paris, Imprimerie royale, 1693.
- VITRUVÉ, *De l'architecture, Livre IV*, éd. , trad. et comm. par GROS, P., Paris, Les Belles Lettres, 1992.
- VITRUVÉ, *De l'architecture, Livre IX*, éd. , trad. et comm. par SOUBIRAN, J., Paris, Les Belles Lettres, 1969.
- VITRUVÉ, *De l'architecture, Livre VII*, éd. et trad. par LIOU, B. et ZUINGHEDAU, M., avec des comment. de CAM, M.-T., Paris, Les Belles Lettres, 1995.
- VITRUVÉ, *De l'architecture, Livre X*, éd. et trad. par CALLEBAT, L., avec des comment. de CALLEBAT, L. et FLEURY, P., Paris, Les Belles Lettres, 1986.

Études sur les sciences et techniques de l'Antiquité

- ABBADI, M., *Vie et destin de l'ancienne Bibliothèque d'Alexandrie*, Paris, UNESCO, 1992.
- AMBROSETTI, N., « Cultural roots of technology : an interdisciplinary study of automated systems from the antiquity to the renaissance », thèse de doct., Milan, Université de Milan, 2010.
- ARGOUD, G. et GUILLAUMIN, J.-Y. (éds.), *Autour de La dioptre d'Héron d'Alexandrie : actes du colloque international de Saint-Étienne*, Saint-Étienne, Publications de l'Université de Saint-Étienne, 2000.
- ARGOUD, G. et GUILLAUMIN, J.-Y., *Sciences exactes et sciences appliquées à Alexandrie*, Saint-Étienne, Publications de l'Université de Saint-Etienne, 1998.
- BALDI, B., *Erone Alessandrino : degli automati ovvero macchine semoventi*, Milan, Ristampe anastatiche, 1962.
- BAYET, J., *Littérature latine*, Paris, Armand Colin, 2003.
- BEAUNE, J.-C., *L'Automate et ses mobiles*, Paris, Flammarion, 1980.
- BERNAND, A., *Alexandrie la Grande*, Paris, Hachette, 1996.
- BREDEKAMP, H. et CASANOVA, N., *La nostalgie de l'antique : statues, machines et cabinets de curiosités*, Paris, Diderot éditeur, 1996.
- BREMMER, J. N., *The early Greek concept of the soul*, Princeton, Princeton University Press, 1983.
- BRETON, P., *À l'image de l'Homme : du Golem aux créatures virtuelles*, Paris, Éditions du Seuil, 1995.
- BRIOIST, P., « Les savoirs scientifiques », in : *Revue d'histoire moderne et contemporaine* 49.5 (2002).
- CALLEBAT, L., FLEURY, P. et CAM, M.-T., *Dictionnaire des termes techniques du « De architectura » de Vitruve*, Hildesheim, Olms, 1995.
- CANFORA, L., *La véritable histoire de la bibliothèque d'Alexandrie*, Paris, Desjonquères, 1988.

- CARRER, J., *Etude de la valorisation d'un objet antique : l'exemple de l'automate des oiseaux chanteurs et de la chouette d'Héron d'Alexandrie*, Mémoire de Master sous la dir. de M.T. Cam, Université de Bretagne Occidentale, 2016.
- CHAPUIS, A. et DROZ, E., *Les automates, figures artificielles d'hommes et d'animaux : histoire et technique*, Neuchâtel, Éditions du Griffon, 1949.
- CHAPUIS, A., GÉLIS, É. et HARAUCOURT, E., *Le Monde des automates : étude historique et technique*, Genève, Slatkine, 1984.
- COHEN, J., *Les robots humains : dans le mythe et dans la science*, Paris, Librairie philosophique J. Vrin, 1968.
- DELCOURT, M. et GREEN, A., *Héphaïstos ou la Légende du magicien*, Paris, Les Belles Lettres, 1982.
- DETIENNE, M. et VERNANT, J.-P., *Les ruses de l'intelligence : la mêtis des Grecs*, Paris, Flammarion, 1978.
- DRACHMANN, A. G., « Ktesibios, Philon and Heron : a study in ancient pneumatics », thèse de doct., Copenhague, E. Munksgaard, 1948.
- FAYOL, A., *Précurseurs oubliés : de Ctesibios à Judson*, Paris, Editions et Imprimeries du Sud-est, 1962.
- FEYEL, M., « Comment restituer la dioptré d'Héron d'Alexandrie ? », in : *Autour de la dioptré d'Héron d'Alexandrie*, (Actes du colloque international de Saint-Étienne, 17, 18, 19 juin 1999), Saint-Étienne, Publications de l'Université de Saint-Étienne, 2000.
- FLEURY, P., *La mécanique de Vitruve*, Caen, Presses Universitaires de Caen, 1993.
- FLEURY, P., « Les textes techniques de l'Antiquité », in : *Euphrosyne* 18 (1990), p. 359–394.
- FLEURY, P., « Traités de mécanique et textes sur les machines », in : *Les littératures techniques dans l'antiquité romaine*, t. 42, Vandœuvres - Genève, Fondation Hardt, 1995, p. 45–75.
- GALLI, M., « Tecnologia per stupire : gli automata nel mondo romano », in : *Machina tecnologia dell'antica Roma*, Rome, Palombi, 2009, p. 280–284.
- GARLAN, Y., *Recherches de poliorcétique grecque*, Athènes, Ecole française d'Athènes, 1974.
- GEORGIADÈS, P., *L'Étrange destin de la bibliothèque d'Alexandrie*, Alexandrie, Publications de l'Atelier, 1982.

- GILLE, B., *Les Mécaniciens grecs : La naissance de la technologie*, Paris, Éditions du Seuil, 1980.
- GODIER, R.-M., *L'automate et le cinéma : dans « La règle du jeu » de Jean Renoir, « Le limier » de Joseph L. Mankiewicz, « Pickpocket » de Robert Bresson*, Paris, Harmattan, 2005.
- GUILLAUMIN, J.-Y., « L'éloge de la géométrie dans la préface du livre 3 des *Metrica* d'Héron d'Alexandrie », in : *Revue des Études Anciennes* 99 (1997), p. 91–99.
- GUIMIER-SORBETS, A.-M. (éd.), *L'eau. Enjeux, usages et représentations*, Paris, De Boccard, 2008.
- HAIRY, I. (éd.), *Du Nil à Alexandrie*, Paris, De Boccard, 2011.
- HAMMERSTEIN, R., *Macht und Klang : tönende Automaten als Realität und Fiktion in der alten und mittelalterlichen Welt*, Bern, A. Francke, 1986.
- HERMANN, L., « Une traduction française inédite de la Lettre d'Aristée », in : *Revue belge de philologie* 44 (1966).
- INGLEBERT, H., *Histoire de la Civilisation Romaine*, Paris, Presses universitaires de France, 2005.
- KOTSANAS, K., *Les technologies des Grecs de l'Antiquité*, Pyrgos, 2015.
- LAZER, E., *Resurrecting Pompeï*, Londres, Routledge, 2009.
- LLOYD, G. E. R., *Les débuts de la science grecque de Thalès à Aristote*, trad. par BRUNSCHWIG, J., Paris, Maspero, 1974.
- LLOYD, G. E. R., *Une histoire de la science grecque*, trad. par BRUNSCHWIG, J., Paris, Éditions du Seuil, 1993.
- LO CASCIO, E. (éd.), *Innovazione tecnica e progresso economico nel mondo romano : atti degli Incontri capresi di storia dell'economia antica*, Bari, Edipuglia, 2006.
- MADELEINE, S., *Le théâtre de Pompée à Rome : Restitution de l'architecture et des systèmes mécaniques*, Caen, Presses Universitaires de Caen, 2014.
- MARCINKOWSKI, A. et WILGAUX, J., « Automates et créatures artificielles d'Héphaïstos : entre science et fiction », in : *Techniques & Culture*. 43 (2004), [en ligne], URL : <http://journals.openedition.org/tc/1164>.
- MARTIN, T.-H., *Recherches sur la vie et les ouvrages d'Héron d'Alexandrie, disciple de Ctésibius, et sur tous les ouvrages mathématiques grecs, conservés ou perdus, publiés*

- ou inédits, qui ont été attribués à un auteur nommé Héron*, Paris, Imprimerie impériale, 1854.
- MAURY, A. et LETRONNE, M., « Recherches critiques, historiques et géographiques sur les fragments de Héron d'Alexandrie », in : *Revue Archéologique* 9.2 (1852), avec la coll. de VINCENT, A. J. H.
- MEYER, J. A., *Dei ex Machinis*, Saint-Ouen, Les éditions du Net, 2015.
- MÖRI, F. *et al.* (éds.), *Alexandrie la divine*, Genève, La Baconnière, 2014.
- OMONT, H., « Inventaire des manuscrits grecs et latins donnés à Saint-Marc de Venise par le cardinal Bessarion (1468) », in : *Revue des Bibliothèques* (1894).
- PROU, V., *Les théâtres d'automates en Grèce au IIe siècle avant l'ère chrétienne : d'après les Αυτοματοποιικα d'Héron d'Alexandrie*, Paris, Imprimerie Nationale, 1881.
- RICH, A., *Dictionnaire des antiquités romaines et grecques*, trad. par CHÉRUÉL, M., Paris, Éditions Molière, 2004.
- ROCHAS D'AIGLUN, A. d., *La science des philosophes et l'art des thaumaturges dans l'Antiquité, 2e éd. augmentée de documents inédits et accompagnée de 24 planches*, Paris, Dorbon-Ainé, 1912.
- ROSE, V., *Anecdota graeca et graecolatina : Mitteilungen aus Handschriften zur Geschichte der griechischen Wissenschaft*, Berlin, F. Duemmler, 1870.
- SCHIØLER, T., *Roman and Islamic water-lifting wheels*, trad. par KATBORG, P. M., Odense, Odense University press, 1973.
- SCOTCHMER, S., *Innovation and Incentives*, Cambridge, MIT Press, 2006.
- SEZGIN, F. *et al.*, *Archimedes and Philon in the Arabic tradition : texts and studies*, Francfort-sur-le-Main, Johann Wolfgang Goethe University, 2001.
- SEZGIN, F. *et al.*, *Hero of Alexandria in the Arabic tradition : texts and studies*, Francfort-sur-le-Main, Johann Wolfgang Goethe University, 2001.
- TAQUET, A., *Elementia geometriae planae ac solidae (1665)*, Whitefish, Kessinger Publishing, 2005.
- VAUCANSON, J. d., *Le mécanisme du fluteur automate : présenté à Messieurs de l'Académie royale des sciences*, Paris, J. Guerin, 1738.
- VERNANT, J.-P., *Mythe et pensée chez les grecs*. Paris, Maspero, 1981.

- VITRAC, B., « Euclide et Héron : Deux approches de l'enseignement des mathématiques dans l'Antiquité? », in : *Science et vie intellectuelle à Alexandrie (Ier-IIIe siècle après J. C.)* Saint-Étienne, Publications de l'Université de Saint-Etienne, 1995.
- VITRAC, B., « Faut-il réhabiliter Héron d'Alexandrie? », in : *L'homme et la science*, (Actes du XVIe Congrès international et quinquennal de l'Association Guillaume Budé organisé à l'Université Paul-Valéry, Montpellier III, du 1er au 4 Septembre 2008), Montpellier, Les Belles Lettres, 2008, p. 281–296.
- VITRAC, B., « Mécanique et mathématiques à Alexandrie : le cas de Héron », in : *Oriens-Occidens* 7 (2009), p. 155–199.
- WHITE, K. D., *Greek and roman technology*, Londres, Thames et Hudson, 1986.

Reconnaissance de geste et réalité virtuelle

- CHEN, X. *et al.*, « Motion Feature Augmented Recurrent Neural Network for Skeleton-based Dynamic Hand Gesture Recognition », in : *2017 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)* (2017), p. 2881–2885.
- CORNUÉJOLS, A., MICLET, L. et BARRA, V., *Apprentissage artificiel : Deep learning, concepts et algorithmes*, Paris, Eyrolles, 2018.
- DEVANNE, M. *et al.*, « 3D Human Action Recognition by Shape Analysis of Motion Trajectories on Riemannian Manifold », in : *IEEE Transactions on Cybernetics* 45.7 (juil. 2015), p. 1340–1352.
- DEVINEAU, G. *et al.*, « Convolutional Neural Networks for Multivariate Time Series Classification using both Inter- & Intra- Channel Parallel Convolutions », in : (2018).
- DEVINEAU, G. *et al.*, « Deep Learning for Hand Gesture Recognition on Skeletal Data », in : *13th IEEE International Conference on Automatic Face Gesture Recognition*, 2018, p. 106–113.
- FUCHS, P. et MOREAU, G., *Le traité de la réalité virtuelle - volume 1*, Paris, Presses de l'école des Mines, 2003.
- FUCHS, P. et MOREAU, G., *Le traité de la réalité virtuelle - volume 2*, Paris, Presses de l'école des Mines, 2003.

- GARBADE, M. et GALL, J., « Handcrafting vs Deep Learning : An Evaluation of NTraj+ Features for Pose Based Action Recognition », in : 2016.
- GARCIA-HERNANDO, G. *et al.*, « First-Person Hand Action Benchmark with RGB-D Videos and 3D Hand Pose Annotations », in : *Proceedings of Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)* (2017).
- GÉRON, A., *Deep Learning avec TensorFlow*, Malakoff, Dunold, 2017.
- GORISSE, G., CHRISTMANN, O. et RICHIR, S., « De la présence à l'incarnation, proposition d'un méta-modèle pour la réalité virtuelle », in : *Interfaces numériques 7.1* (), p. 94–114.
- HUANG, Z. *et al.*, « Deep Learning on Lie Groups for Skeleton-based Action Recognition », in : *arXiv :1612.05877* (2016).
- JAIN, A. *et al.*, « Structural-RNN : Deep Learning on Spatio-Temporal Graphs », in : *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2016, p. 5308–5317.
- LEZORAY, O., *Traitement d'image par modèles discrets sur graphes et classification de données d'images par apprentissage*, Habilitation à diriger des recherches, Université de Caen Normandie, 2007.
- LEZORAY, O. et CARDOT, H., « Comparing Combination Rules of Pairwise Neural Networks Classifiers », in : *Neural Processing Letters* 27 (2008), p. 43–56.
- LI, C. *et al.*, « Action-Attending Graphic Neural Network », in : *IEEE Transactions on Image Processing* 27.7 (2018), p. 3657–3670.
- LI, C. *et al.*, « Spatio-Temporal Graph Convolution for Skeleton Based Action Recognition », in : *arXiv :1802.09834* (2018).
- LI, C. *et al.*, « End-to-end learning of deep convolutional neural network for 3D human action recognition », in : *2017 IEEE International Conference on Multimedia Expo Workshops (ICMEW)*, 2017, p. 609–612.
- LIU, J. *et al.*, « Temporal Perceptive Network for Skeleton-Based Action Recognition », in : (2017).
- LIU, J. *et al.*, « Skeleton-Based Action Recognition Using Spatio-Temporal LSTM Network with Trust Gates », in : *arXiv :1706.08276* (2017).
- LIU, J. *et al.*, « Spatio-Temporal LSTM with Trust Gates for 3D Human Action Recognition », in : *arXiv :1607.07043* (2016), arXiv : 1607.07043.

- LIU, J. *et al.*, « SSNet : Scale Selection Network for Online 3D Action Prediction », in : *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2018, p. 8349–8358.
- LIU, J. *et al.*, « Global Context-Aware Attention LSTM Networks for 3D Action Recognition », in : *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2017, p. 3671–3680.
- MAHASSENI, B. et TODOROVIC, S., « Regularizing Long Short Term Memory with 3D Human-Skeleton Sequences for Action Recognition », in : *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2016, p. 3054–3062.
- MOREAU, G., « Interaction in virtual environments », in : *Virtual Concept* (2003), p. 264–270.
- NEZ, J. C. *et al.*, « Convolutional Neural Networks and Long Short-Term Memory for Skeleton-based Human Activity and Hand Gesture Recognition », in : *Pattern Recognition* 76 (C 2018), p. 80–94.
- OHN-BAR, E. et TRIVEDI, M. M., « Joint Angles Similarities and HOG2 for Action Recognition », in : *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops*, 2013, p. 465–470.
- OREIFEJ, O. et LIU, Z., « HON4D : Histogram of Oriented 4D Normals for Activity Recognition from Depth Sequences », in : *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2013, p. 716–723.
- RAHMANI, H. et MIAN, A., « 3D Action Recognition from Novel Viewpoints », in : *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2016, p. 1506–1515.
- RICHIR, S., SAMIER, H. et SANDOVAL, V., *Les cybertechnologies dans les entreprises industrielles*, Paris, Hermès science publications, 2003.
- SANKAR, A., ZHANG, X. et CHANG, K. C.-C., « Motif-based Convolutional Neural Network on Graphs », in : *arXiv :1711.05697* (2017).
- SHI, L. *et al.*, « Non-Local Graph Convolutional Networks for Skeleton-Based Action Recognition », in : *arXiv :1805.07694* (2018).
- SI, C. *et al.*, « Skeleton-Based Action Recognition with Spatial Reasoning and Temporal Stack Learning », in : *arXiv :1805.02335* (2018).

- SIMONOVSKY, M. et KOMODAKIS, N., « Dynamic Edge-Conditioned Filters in Convolutional Neural Networks on Graphs », in : *arXiv :1704.02901* (2017).
- SMEDT, Q. D., WANNOUS, H. et VANDEBORRE, J., « Skeleton-Based Dynamic Hand Gesture Recognition », in : *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW)*, 2016, p. 1206–1214.
- TANG, Y. *et al.*, « Deep Progressive Reinforcement Learning for Skeleton-Based Action Recognition », in : *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2018, p. 5323–5332.
- VELIČKOVIĆ, P. *et al.*, « Graph Attention Networks », in : (2017).
- VERMA, N., BOYER, E. et VERBEEK, J., « FeaStNet : Feature-Steered Graph Convolutions for 3D Shape Analysis », in : *arXiv :1706.05206* (2017).
- WANG, H. et WANG, L., « Modeling Temporal Dynamics and Spatial Configurations of Actions Using Two-Stream Recurrent Neural Networks », in : *arXiv :1704.02581* (2017).
- WANG, P. *et al.*, « Action Recognition Based on Joint Trajectory Maps Using Convolutional Neural Networks », in : *arXiv :1611.02447* (2016).
- WANG, P. *et al.*, « Scene Flow to Action Map : A New Representation for RGB-D based Action Recognition with Convolutional Neural Networks », in : *arXiv :1702.08652* (2017).
- WU, D. *et al.*, « Deep Dynamic Neural Networks for Multimodal Gesture Segmentation and Recognition », in : *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 38.8 (2016), p. 1583–1597.
- YAN, S., XIONG, Y. et LIN, D., « Spatial Temporal Graph Convolutional Networks for Skeleton-Based Action Recognition », in : *arXiv :1801.07455* (2018).
- ZHANG, S., LIU, X. et XIAO, J., « On Geometric Features for Skeleton-Based Action Recognition Using Multilayer LSTM Networks », in : *IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision (WACV)*, 2017, p. 148–157.
- ZHANG, T. *et al.*, « Tensor graph convolutional neural network », in : *arXiv :1803.10071* (2018).
- ZHANG, X. *et al.*, « Graph Edge Convolutional Neural Networks for Skeleton Based Action Recognition », in : *arXiv :1805.06184* (2018).

ZHU, W. *et al.*, « Co-occurrence Feature Learning for Skeleton based Action Recognition using Regularized Deep LSTM Networks », in : *arXiv :1603.07772* (2016).

Annexes

A | Corpus littéraire

A.1 Traités techniques

A.1.1 Jeu miniature : Héraclès et Lâdon

Héron d'Alexandrie, *Pneumatiques*, 1, 41²⁰⁹ : Βάσεως ούσης, ἐφ' ἧς ἐφέστηκε δενδρύφιον, περὶ ὃ δράκων εἰλεῖται, καὶ παρεστῶς Ἡρακλῆς τοξεύων καὶ μῆλου ἐπικειμένου τῇ βάσει, ἐπὰν τὸ μῆλον μικρὸν ἀπὸ τῆς βάσεώς τις κουρίσῃ τῇ χειρὶ, ὁ μὲν Ἡρακλῆς ἀφήσει τὸ βέλος πρὸς τὸν δράκοντα, ὁ δὲ δράκων συρίσει.

Ἐστω ἡ μὲν εἰρημένη βᾶσις στεγνὴ ἢ AB διάφραγμα ἔχουσα τὸ ΓΔ· τῷ δὲ διαφράγματι συμφυῆς ἔστω κοῖλον κόλουρον κωνάριον τὸ EZ ἔχον ἐλάσσονα τὸν Z κύκλον ἀνεωγῶτα πρὸς τῷ πυθμένι, ὀλίγον δὲ ἀπέχοντα ὅσον ὕδατι διάρρυσιν· τούτῳ δὲ συνεσμηρισμένον ἔστω ἕτερον τὸ Θ καὶ ἐξ ἄλυσειδίου τινὸς ἀποδεδεμένον διὰ τρήματος εἰς τὸ Κ μῆλον ἐπικείμενον τῇ βάσει. κατεχέτω δὲ ὁ Ἡρακλῆς τοξάριον κεράτινον ἔχον ἐντεταμένην τὴν νευρὰν ἀπέχουσαν ἀπὸ τῆς δεξιᾶς χειρὸς τὸ αὐταρκές· ἐν δὲ τῇ δεξιᾷ χειρὶ κατὰ τὸν δράκοντα ἔστω χεὶρ ὁμοία τῇ ἐκτὸς κατὰ πάντα πλὴν ὅτι μικρά, ἔχουσα καὶ τὴν σχαστηρίαν. ἐκ δὲ τοῦ ἄκρου τῆς σχαστηρίας ἄλυσειδίου ἢ σπάρτος ἀποδεδόσθω διὰ τῆς βάσεως εἰς τρόχιλον ὑπὲρ τὸ διάφραγμα κείμενον καὶ ἔτι εἰς τὸ ἄλυσειδίου τὸ ἐνδεδεμένον εἰς τε τὸ κωνάριον καὶ τὸ μῆλον.

ἐπισπασώμεθα οὖν τὸ τόξον καὶ ὑποβαλόντες ὑπὸ τὴν χεῖρα κατακλείσωμεν τὴν σχαστηρίαν, ὥστε εἶναι τεταμένην τὴν σπάρτον καὶ βιάζεσθαι τὸ μῆλον εἰς τὸ κάτω μέρος. ἔστω δὲ ἡ σπάρτος διὰ τοῦ σώματος καὶ τῆς χειρὸς ἔσωθεν τοῦ Ἡρακλέους. ἐκ δὲ τοῦ διαφράγματος ἀνατεινέτω σωληνάριον ὑπὲρ τὴν βᾶσιν τῶν εἰθισμένων συρίζειν· τοῦτο δὲ ἔστω ὑπὸ τὸ δενδρύφιον ἢ παρ' αὐτὸ τὸ δενδρύφιον. πεπληρώσθω δὲ τὸ ΑΔ ἀγγεῖον ὕδατος. καὶ ἔστω τὸ μὲν δενδρύφιον τὸ ΑΜ, τοξάριον δὲ τὸ ΝΞ, νευρὰ δὲ ἡ ΟΠ, ἡ δὲ ἐπιλαμβανομένη χεὶρ ἢ ΡΣ, σχαστηρία δὲ ἡ ΤΥ, σπάρτος δὲ ἡ ΦΧ, τρόχιλος δὲ ὁ Χ, περὶ ὃν ἡ σπάρτος, συρίγγιον δὲ τὸ ΨΩ. ἐὰν οὖν ἐπάρῃ τις τὸ Κ μῆλον, συνεπαρεῖ καὶ τὸ Θ κωνάριον καὶ ἐπισπάσεται

209. Héron d'Alexandrie, *Pneumatiques*, 1, 41, texte établi et traduit par G. Argoud et J.Y. Guillaumin, publications de l'Université de Saint-Étienne, 1997, p. 118-120.

τὴν $\Upsilon\Phi\chi$ σπάρτον καὶ σχάσει τὴν χεῖρα, ὥστε ἀφευθῆναι τὸ βέλος. καὶ τὸ ἐν τῷ $A\Delta$ ἀγγεῖῳ ὕδωρ φερόμενον εἰς τὸ $B\Gamma$ ἐκκρούσει τὸν ἐν αὐτῷ ἀέρα διὰ τοῦ συριγγίου καὶ τὸν ἥχον ἀποτελέσει. τεθέντος δὲ τοῦ μήλου πάλιν τὸ κωνάριον ἐναρμόσαν τῷ ἐτέρῳ στεγνώσει τὴν ῥύσιν, ὥστε μηκέτι φθέγγεσθαι. πάλιν οὖν καταρτισώμεθα τὰ κατὰ τὸ βέλος καὶ ἐάσωμεν. πληρωθέντος δὲ τοῦ ΓB ἀγγείου, πάλιν κενωθήσεται διὰ τινος κρουνοῦ κλειδίου ἔχοντος· τὸ δὲ $A\Delta$ πληρώσομεν ὡς καὶ τὸ πρότερον.

Étant donné une base sur laquelle est placé un petit arbre autour duquel est enroulé un dragon, avec à côté Héraclès tirant à l'arc, et une pomme posée sur la base, si de la main l'on soulève un peu la pomme de la base, Héraclès tirera sa flèche contre le dragon, et le dragon sifflera.

Soit la base en question étanche de toutes parts AB , pourvue d'un diaphragme $\Gamma\Delta$; qu'au diaphragme soit fixé un petit cône tronqué creux EZ , ayant son petit cercle Z ouvert sur le fond, dont il est distant de manière à permettre juste à l'eau de passer. A ce cône tronqué on en ajustera soigneusement un autre Θ , relié par une petite chaîne passant à travers un trou à la pomme K posée sur la base. Héraklès tiendra un petit arc en corne, dont la corde est tendue et à la distance convenable de sa main droite. A l'intérieur de cette main droite, en face du dragon, soit une main semblable en tout point à la main extérieure, excepté qu'elle doit être petite et pourvue d'une détente. De l'extrémité de cette détente part une petite chaîne ou une corde qui, traversant la base, va à une poulie reposant sur le diaphragme, et encore à la petite chaîne reliée au cône et à la pomme.

Ainsi donc, bandons l'arc et, en plçant la corde dans la main, fermons la détente, de sorte que la corde soit tendue et que la pomme soit tirée vers le bas. La corde doit passer dans le corps et dans le bras à l'intérieur de l'Héraklès. On fera monter du diaphragme au-dessus de la base un petit tube, de ceux dont on se sert pour siffler; que ce tube soit sous le petit arbre ou près de ce petit arbre. On remplira d'eau le vase $A\Delta$. Et soit le petit arbre ΛM , le petit arc $N\Xi$, la corde $O\Pi$, la main qui reçoit $P\Sigma$, la détente $T\Upsilon$, la corde $\Phi\chi$, la poulie autour de laquelle vient la corde, X , et le sifflet $\Psi\Omega$. Si donc on soulève la pomme K , on soulèvera en même temps le cône Θ , on tendra la corde $\Upsilon\Phi\chi$, et on lâchera la main, de sorte que la flèche partira. Et

l'eau du vase AΔ, entraînée dans le compartiment BΛ, chassera par le tuyau l'air contenu dans le compartiment et produira un sifflement. Si l'on repose la pomme, le cône, en venant s'adapter à l'autre, fermera l'écoulement, de sorte que le sifflement cessera. Disposons donc à nouveau la flèche et ce qui va avec elle, et laissons. Quand le vase AB sera rempli, on le videra grâce à un goulot muni d'un petit robinet ; et nous remplirons de nouveau AΔ comme précédemment.

A.1.2 L'automate de la chouette et des oiseaux chanteurs

Héron d'Alexandrie, *Pneumatiques*, 1, 16²¹⁰ : Αί μὲν οὖν φωναὶ γίνονται διὰ τῶν συρίγγων· διάφοροι δὲ τοῖς ἤχοις γίνονται, τῶν συρίγγων ἦτοι λεπτοτέρων γινομένων ... ἦτοι καὶ παρεκτεινομένων εἰς μῆκος ἢ καὶ συστελλομένων καὶ τοῦ βαπτίζομένου μέρους εἰς τὸ ὕδωρ ἦτοι πλείονος ἢ ἐλάττονος γινομένου, ὥστε διὰ τοιοῦτου τρόπου ὀρνέων πλειόνων διαφόρους γίνεσθαι φωνάς. κατασκευάζεται οὖν ἦτοι ἐν κρήνῃ ἢ ἐν ἄντρῳ ἢ καθόλου ὅπου ἐπίρρυτον ὕδωρ ἐστίν, ὄρνεα πλείονα διακείμενα καὶ τούτοις παρακειμένη γλαυζ, ἣτις ἐπιστρέφεται αὐτομάτως παρὰ τὰ ὄρνεα καὶ πάλιν ἀποστρέφεται· καὶ ἀποστραφείσης μὲν φθέγγονται τὰ ὄρνεα, ἐπιστραφείσης δὲ πρὸς αὐτὰ οὐκέτι φθέγγονται. Καὶ τοῦτο πλεονάκις γίνεται. Κατασκευάζεται δὲ τὸν τρόπον τοῦτον.

Ἐστω κρουνησμάτιον ἀεὶ ῥέον τὸ Α· τούτῳ δὲ ὑποκείσθω στεγνὸν ἀγγεῖον τὸ ΒΓΔΕ ἔχον πνικτὸν διαβήτην ἢ χαμπύλον σίφωνα τὸν ΖΗ καὶ καθιεμένην χώνην τὴν ΘΚ, ἣς ὁ καυλὸς ἀπεχέτω ἀπὸ τοῦ πυθμένος τοῦ ἀγγείου ὅσον ὕδατι διάρρυσιν. ἐχέτω δὲ καὶ πλείονα συριγγίδια, οἷα εἴρηται, ὄντα τὰ Λ. συμβήσεται οὖν πληρουμένου μὲν τοῦ ΒΓΔΕ ἀγγείου τὸν ἀέρα τὸν ἐν αὐτῷ ἐκθλιβόμενον καὶ τὰς τῶν ὀρνέων ποιεῖν φωνάς, κενουμένου δὲ μετὰ τὴν πλήρωσιν διὰ τοῦ ΗΖ διαβήτου μηκέτι φθέγγεσθαι.

ἵνα οὖν ἡ γλαυζ ἐπιστρέφηται καὶ ἀποστρέφηται, ὡς προ εἴρηται, προκατασκευάζεται τὰ μέλλοντα λέγεσθαι· ἔστω γὰρ ἐπὶ τινος βάσεως τῆς Μ ἄξων βεβηκῶς ὁ ΝΞ ἀπὸ τόνου εἰργασμένος, περὶ δὲν περικείσθω ἀρμοστή σύριγγξ ἢ ΟΠ εὐλύτως δυναμένη περὶ αὐτὸν στρέφεσθαι· ταύτῃ δὲ συμφυῆς ἔστω τυμπάνιον τὸ ΡΣ, ἐφ' ᾧ ἐπιβήσεται ἡ γλαυζ συμφυῆς αὐτῷ ὑπάρχουσα· περὶ δὲ τὴν ΟΠ σύριγγα δύο ἀλύσεις ἐπὶ τὰναντία ἐπιληθεῖσαι αἱ ΤΥ, ΦΧ διὰ τροχιῶν δύο ἀποδεδέσθωσαν ἢ μὲν ΤΥ εἰς βᾶρος ἐκκρεμάμενον τὸ Ψ, ἢ δὲ ΦΧ εἰς κοῖλον

210. Héron d'Alexandrie, *Pneumatiques*, 1, 16, texte établi et traduit par G. Argoud et J.Y. Guillaumin, publications de l'Université de Saint-Étienne, 1997, p. 74-77.

ἀγγεῖον τὸ Ω ὑποκείμενον τῷ ΖΗ σίφωνι ἢ πνικτῷ διαβήτῃ. συμβήσεται οὖν κενουμένου τοῦ ΒΓΔΕ ἀγγείου τὸ ὑγρὸν φέρεσθαι εἰς τὸ Ω ἀγγεῖον καὶ ἐπιστρέφεσθαι τὴν τε ΟΠ σύριγγα καὶ τὴν γλαῦκα, ὥστε βλέπειν πρὸς τὰ ὀρνιθάρια, κενωθέντος δὲ τοῦ ΒΓΔΕ ἀγγείου κενουῦσθαι καὶ τὸ Ω διὰ τινος ἐν αὐτῷ πνικτοῦ διαβήτου ἢ καμπύλου σίφωνος, ὥστε πάλιν καταβαρῆσαν τὸ Ψ βάρος ἀποστρέψαι τὴν γλαῦκα κατὰ τὸν καιρὸν ἐκεῖνον, ὅτε πληροῦται τὸ ΒΓΔΕ ἀγγεῖον καὶ πάλιν αἱ τῶν ὀρνέων γίνονται φωναί.

Ainsi donc, les sons se produisent à travers les tuyaux ; et il y a une différence dans les bruits produits selon que l'on a des tuyaux plus minces < ou plus épais >, ou plus étirés en longueur ou plus courts, et selon que la partie immergée dans l'eau est plus ou moins grande ; et ainsi, grâce à un tel procédé, on produit dans sa variété le chant de plusieurs oiseaux. On construit donc, soit sur une fontaine soit dans une grotte, ou partout où il y a de l'eau qui coule, plusieurs oiseaux et à côté d'eux une chouette qui se tournera automatiquement vers les oiseaux puis du côté opposé ; quand elle s'est détournée, les oiseaux chantent, quand elle se tourne vers eux ils cessent de chanter ; et cela se répète. Voici comment on réalise cette construction.

Soit A un jet d'eau qui coule toujours ; plaçons en dessous un vase étanche ΒΓΔΕ muni d'un siphon confiné ou d'un siphon recourbé ΖΗ, et d'un entonnoir ΘΚ qui s'insère dans le vase, et dont le tube ne doit être éloigné du fond que de manière à laisser un passage à l'eau. Il doit y avoir aussi plusieurs petits tuyaux, comme on l'a dit, qui sont les tuyaux Α. Il se produira donc que, pendant que le vase ΒΓΔΕ se remplira, l'air qu'il contient sera expulsé et produira le chant des oiseaux, et que, une fois plein, quand il se videra par le siphon cavalier ΗΖ, ils ne chanteront plus.

Donc, pour que la chouette se tourne vers les oiseaux puis dans le sens opposé, comme on l'a dit précédemment, on fait d'avance la construction qui va être indiquée. Soit, fixé sur une base Μ, un axe tourné ΝΞ, et ajustons-lui un tube ΟΠ, qui puisse tourner librement autour de lui ; à ce tube, adaptons solidement un petit disque ΡΣ, sur lequel sera placée la chouette, qui lui sera solidement fixée. et autour du tube ΟΠ, deux chaînes ΤΥ et ΦΧ, enroulées en sens contraire et passant par deux poulies ; à ΤΥ est suspendu un poids Ψ, et l'extrémité de ΦΧ est attachée à un vase vide Ω placé au-dessus du siphon

ZH, ou siphon confiné. Il se produira donc que, pendant que le vase ΒΓΔΕ se videra, le liquide passera dans le vase Ω et fera tourner en même temps le tube ΟΠ et la chouette, de sorte qu'elle regardera vers les oiseaux, tandis que le vase ΒΓΔΕ une fois vide, Ω aussi se videra par un siphon confiné ou par un siphon recourbé qu'il contient, de sorte que le poids Ψ, reprenant le dessus, fera se détourner la chouette, au moment où le vase ΒΓΔΕ se remplira et où de nouveau les oiseaux chanteront.

A.1.3 Les portes automatiques d'un temple miniature

Héron d'Alexandrie, *Pneumatiques*, 1, 38²¹¹ : Ναίσκου κατασκευή, ὥστε θυσίας γινομένης τὰς θύρας αὐτομάτως ἀνοίγεσθαι, σβεσθείσης δὲ τῆς θυσίας πάλιν κλείεσθαι.

Ἔστω ὁ προειρημένος ναίσκος ἐπὶ βάσεως τῆς ΑΒΓΔ, ἐφ' ἧς ἐπικείσθω βωμίσκος ὁ ΕΔ· διὰ δὲ τοῦ βωμίσκου διώσθω σωλὴν ὁ ΗΖ, οὗ τὸ μὲν Ζ στόμιον ἐντὸς ἔστω τοῦ βωμίσκου, τὸ δὲ Η ἐν σφαίρᾳ τινὶ περιειληφθῶ τῇ Θ ἀπέχον ἀπὸ τοῦ κέντρου αὐτῆς βραχύ· συνεστεγνώσθω δὲ καὶ ἡ σφαῖρα τῷ ΗΖ σωλῆνι. ἔστω δὲ καὶ ἐν τῇ σφαίρᾳ καμπύλος σίφων ὁ ΚΛΜ. οἱ δὲ στροφεῖς τῶν θυρῶν παρεκτετάσθωσαν εἰς τὸ κάτω μέρος καὶ στρεφέσθωσαν ἐν κνωδακίαις οὖσιν ἐν τῇ ΑΒΓΔ βάσει εὐλύτως. ἐκ δὲ τῶν στροφέων ἀλυσεῖδια εἰς ἐν ἀποδεθέντα διὰ τροχίλου ἀποδεδέσθω εἰς ἀγγεῖον κοῖλον τὸ ΝΞ κρεμάμενον· ἕτερα δὲ ἀλυσεῖδια ἐπειληθέντα πρὸς τοὺς στροφεῖς τὰ ἐναντία τοῖς πρότερον εἰς ἐν ἀποδεθέντα διὰ τροχίλου εἰς βᾶρος μολιβδοῦν ἀποδεδέσθω, δι' οὗ καταρρέποντος ἀποκεκλεισμένοι ἔσονται αἱ θύραι. ὁ δὲ ΚΛΜ σίφων τὸ ἐκτὸς σκέλος ἐχέτω φέρον εἰς τὸ κρεμαστὸν ἀγγεῖον. ἐμβεβλήσθω δὲ διὰ τινος τρυπήματος τοῦ Π ὕδωρ εἰς τὴν σφαῖραν, ὥστε δι' ἡμίσεως γενέσθαι, ὃ μετὰ τὴν ἔγχυσιν ἐστεγνώσθω. συμβήσεται οὖν τοῦ πυρὸς θυμιαθέντος θερμαινόμενον τὸν ἐν τῷ βωμίσκῳ ἀέρα χεῖσθαι εἰς πλείονα τόπον· οὗτος δὲ διὰ τοῦ ΗΖ σωλῆνος εἰς τὴν σφαῖραν χωρῶν ἐκθλίψει τὸ ἐν αὐτῇ ὑγρὸν διὰ τοῦ ΚΛΜ σίφωνος εἰς τὸ κρεμαστὸν ἀγγεῖον, ὃ δὴ καταβαρῆσαν ἐπισπάσεται τὰ ἀλυσεῖδια καὶ ἀνοίξει τὰς θύρας. πάλιν δὲ σβεσθέντος τοῦ πυρὸς ὁ μὲν λεπτυνθεὶς ἀήρ ἐκχωρήσει διὰ τῶν ἀραιωμάτων τοῦ τεύχους τῆς σφαίρας. ὁ δὲ καμπύλος σίφων ἐπισπάσεται τὸ ὑγρὸν τὸ ἐκ τοῦ κρεμαστοῦ ἀγγείου, ὥστε ἀναπληρῶσαι τὸν τῶν ἐκαριθέντων ἀραιωμάτων τόπον· ἔσται γὰρ αὐτοῦ τὸ ἄκρον βαπτιζόμενον εἰς τὸ ἐν τῷ κρεμαστῷ ἀγγεῖῳ ὕδωρ. κουφισθέντος δὲ τοῦ ἀγγείου πάλιν τὸ ἐκκρεμάμενον βᾶρος κα-

211. Héron d'Alexandrie, *Pneumatiques*, 1, 16, texte établi et traduit par G. Argoud et J.Y. Guillaumin, publications de l'Université de Saint-Étienne, 1997, p. 112-114.

ταρρέψαν κλείσει τὰς θύρας. ἔνιοι δὲ ἀντὶ ὕδατος ὑδραργύρω χρωῶνται, ἐπειδήπερ βαρύτερός ἐστι τοῦ ὕδατος καὶ εὐκόπως ὑπὸ τῆς θερμότητος λύεται.

Construction d'un petit temple, de façon que le feu du sacrifice fasse s'ouvrir les portes toutes seules et qu'elles se referment quand le feu s'éteint.

Soit le petit temple en question sur la base $AB\Gamma\Delta$, sur laquelle se trouve le petit autel $E\Delta$; à travers le petit autel, on fera passer le tube HZ , dont l'ouverture Z sera à l'intérieur de l'autel, tandis que l'ouverture H s'ouvrira dans la sphère Θ , à peu de distance de son centre. La sphère sera aussi soudée au tube HZ . Il y aura aussi dans la sphère un siphon recourbé $K\Lambda M$. Les gonds des portes seront prolongés dans leur partie inférieure et tourneront librement dans des crapaudines ménagées dans la base $AB\Gamma\Delta$. Aux gonds on fixera deux petites chaînes au, réunies en une seule, passeront par une poulie pour aller à un vase creux $N\Xi$ qui est suspendu. D'autres petites chaînes, enroulées autour des gonds en sens inverse des premières et réunies en unes, passeront par une poulie et seront attachées à un poids de plomb dont la descente fera fermer les portes. Le siphon $K\Lambda M$ aura sa branche extérieure dans le vase suspendu. Par un trou Π , on versera de l'eau dans la sphère pour la remplir à moitié, trou que l'on refermera ensuite.

Voici ce qui se passera alors : quand le feu produira de la chaleur, l'air du petit autel sera chauffé et passera dans un espace plus grand. Cet air, passant dans la sphère par le tube HZ , chassera par le siphon $K\Lambda M$ le liquide qui s'y trouve pour l'envoyer dans le vase suspendu, et ce dernier, en descendant avec son poids, entraînera les petites chaînes et ouvrira les portes. Puis quand le feu sera éteint, l'air raréfié s'échappera de la sphère par les interstices de sa paroi, et le siphon recourbé attirera le liquide du vase suspendu de sorte qu'il viendra remplir l'espace vide des interstices séparés. L'extrémité du siphon sera en effet plongée dans l'eau du vase suspendu. quand le vase sera vide, le poids suspendu descendra et fera ouvrir à nouveau les portes. Certains, à la place de l'eau, utilisent du mercure, parce qu'il est plus lourd que l'eau et qu'il n'est pas complètement évaporé par la chaleur.

A.1.4 La servante automatique distribuant l'eau et le vin

Philon de Byzance, *Pneumatiques*, 30²¹²

٣٠ صفة إناء آخر اطرف من هذا وهو قطارة الجارية التي بيدها ابريق
 فاذا وضع القدح على راحتها اليسرى صبت نبيداً بقدر ما عملت له
 ثم صبت ماء يمزج لذلك النبيد تجعل جارية من نحاس او فضة
 كانتها قائمة وتتخذ من رأسها الى صدرها خزنة مجبوبة بنصفين وفي
 كل خزنة انبوب للريح ولكل خزنة انبوب ميزاب نافذ الى الابريق
 ويكون انبوب خزنة النبيد يمر مستقيماً الى الابريق ويكون خزنة الماء
 *بطن المولاة قد عمل طويلاً يدور حول الخزانة ويكون انبوبا الريح من
 اسفل الخزانة مما يلي بطن الجارية مفتوحين ويكون اليد اليسرى من
 الكتف على محورين ويكون من داخلها قضيب ماز الى اسفل كانه
 صولجان ويكون عليه قضيبان قائمان انبوبان وهما مفتاحان ويكون
 فيها شفتان او ثقبان عند اطرافها ويكون هذه الاطراف تدخل اطراف
 انبوبي الريح مهندمة مطونة سلاسة ويكون اسفل القضيب الذي
 كانه صولجان مثقل قليل فهو يجذب بالطبع الى اسفل ويرفع اليد
 اليسرى ويرتفع الكف من خارج فتجذب الانبوبين الصغيرين
 اللذين هما مفتاحان فيزول *ثقبها عن ثقبى انبوبي الريح فينسد
 انبوبا الريح ولا يخرج من الثقبين شيء الى الابريق فهذه صنعة داخل
 هذه الجارية ويكون مصب الماء والنبيد من رأس الجارية ويصب نجماً
 ويكون الثقب ضمامة يابسة جداً ويكون اليد اليمنى مستيبة في
 موضعها لا تتحرك والابريق لا تتحرك والثقبان نافذان من الخزانتين

212. Philon de Byzance, *Pneumatiques*, 30, texte établi et traduit par B. Carra de Vaux, Paris, Imprimerie Nationale, 1903, p. 159-161.

الى الأبريق جمعاً كما قلنا فهذه صفة الجارية ۞ فلتكن علامة الخزانين
 آ و ب و علامة انبوي الريج ج و د و علامة الميزابين النافذين الى
 الأبريق هـ و ز و علامة محوري اليد ح و علامة الصولجان ط و علامة
 المفتاحين ي و ك ويكون في الصورة ثقب نافذ الى خارج ويغلق
 الضمامة عند العمل ليجتذب الهواء والآن تحمل الآلة فاذا فرغت مما
 وصفنا فاتخذ قدحاً يسع رطلا او نصف رطل او ما شئت على قدر ما
 كنت قدرت ثقبى المثقبين فينبغي ان تقدره اثلاثا ثلثي من النبيذ
 وثلث من الماء ويكون كذلك سعة القدح ويكون اسفل القدح مثقلا
 بوزن اذا وضع على الكف اليسار حطها الى اسفل فيتحرك الصولجان
 ويرتفع انبويان اللذان هما المفتاحان ويكون ثقب مفتاح النبيذ
 اسبقهما حتى يبلغ منفذه ولا يكون مفتاح الماء قد بلغ مبلغه حتى
 ينثقل القدح بالنبيذ ويكاد يبلغ تمامه ثم يميل الكف فيبلغ
 مفتاح الماء منفذه ويجاوز ثقب مفتاح النبيذ موضعه الى فوق
 فينسد ولا يخرج منه شيء ويبدأ الماء ينصب فاذا صب ما له ان
 يصب فخذ القدح فان اليد ترجع الى مكانها ويسد ثقبى الريج فلا
 يخرج من الأبريق شيء *البتة فاذا اعدت القدح الى كنف الجارية وقد
 فرغته رجعت فصبت من الأبريق في القدح النبيذ ثم الماء كذلك
 ما دام فيها الماء والنبيذ فهذا ما اردنا من ايراد صورة الجارية القطارة
 فافهم ما وصفنا وهذه صورة ذلك ۞

Description d'un autre vase plus merveilleux que celui-là. - C'est une fontaine à intermittence ayant la forme d'une servante qui tient en main une aiguère. Quand on place dans la paume de sa main gauche une coupe à boire, elle verse du nébîd en la quantité que l'on veut ; ensuite elle verse l'eau qu'on mélange à ce nébîd.

Vous faites une servante de cuivre ou d'argent, représentée debout. De sa tête à sa poitrine vous pratiquez un réservoir séparé par une cloison en deux

moitiés. Dans chaque réservoir est un tuyau à air, et dans chacun un tuyau à liquide qui s'en va vers l'aiguière. Le tuyau du réservoir à nébîd se dirige droit vers l'aiguière et le tuyau du réservoir d'eau, qui est long, est dans le ventre de la servante, tournant autour du réservoir. Les tuyaux à air s'ouvrent en bas du réservoir, du côté du ventre de la servante. La main gauche tient, à l'épaule, sur deux tourillons. A l'intérieur de la figure est une crosse, tournée en bas, pareille à la serpette à émonder les arbres ; sur cette crosse sont deux verges, semblables à deux robinets, et toutes deux forment clef. Elles ont deux fentes ou deux trous à leurs extrémités. Ces extrémités entrent exactement dans celles du tuyau à air et elles y tournent à frottement doux. Le bas de la crosse qui ressemble à la serpette est un peu alourdi. Il tend naturellement vers le bas et il élève la main gauche ; celle-ci s'élève à l'extérieur, en tirant les deux petits tuyaux qui forment clef. Leurs deux trous s'écartent des deux trous des tuyaux à air. Ceux-ci sont bouchés, et les liquides ne s'écoulent pas des deux orifices dans l'aiguière.

Toute cette construction est à l'intérieur de la servante. L'eau et le nébîd se déversent de la tête de la servante et coulent facilement ; le crâne constitue un couvercle très étanche. La main droite reste à sa place, ne se mouvant pas, et l'aiguière non plus ne se meut pas. Les deux trous font communiquer les deux réservoirs avec l'aiguière, comme nous l'avons dit.

Voici la description de la servante : α et β sont les marques des deux réservoirs ; celles des tuyaux à air γ et δ ; celles des deux tuyaux à liquide qui s'en vont à l'aiguière ϵ et ζ ; celle des tourillons de la main est η ; celle de la crosse θ ; les deux clefs sont marquées ι et κ .

Il y a dans la figure un trou qui ouvre sur l'extérieur, et le couvercle est fermé pendant l'opération, afin que l'air soit aspiré, autrement l'appareil ne fonctionnerait pas.

Après avoir achevé ce que nous venons de décrire, prenez une coupe de la capacité d'un ritl ou d'un demi-ritl, ou de la capacité que vous voudrez, en rapport avec les dimensions que vous aurez données aux orifices. Il convient de diviser le mélange dans la proportion du tiers, soit $2/3$ de nébîd et $1/3$ d'eau. La capacité de la coupe sera en conséquence. La coupe est alourdie en

bas par un poids convenable.

Quand on la place dans la paume de la main gauche, elle l'abaisse ; la crosse se meut ; les tuyaux qui forment clef se lèvent, le trou d'air qui correspond au nébîd précédant l'autre, de façon qu'il parvienne plus vite à sa place dans le tuyau à air ; le trou correspondant à l'eau ne parvient à la sienne que lorsque la coupe est déjà alourdie de nébîd et lorsque celui-ci y est déjà versé presque en entier. Alors la main s'incline davantage et la clef du nébîd dépasse la sienne par en dessus ; son tuyau se bouche et il n'en sort plus rien ; puis l'eau commence à couler.

Quand la figure a versé ce qu'elle a à verser, prenez-lui la coupe. La main revient à sa place en bouchant les deux trous d'air, et il ne sort plus rien de l'aiguère.

Si on replace la coupe dans la main de la servante, après l'avoir vidée, la main redescend et le nébîd puis l'eau recommencent à couler dans la coupe. Ainsi de suite, tant qu'il y a du nébîd et de l'eau.

Voilà ce que nous voulions expliquer au sujet de cette fontaine à intermittence faite à l'image d'une servante. Comprenez ce que nous avons décrit. Voici la figure.

A.1.5 Le théâtre automatique à base mobile

Héron d'Alexandrie, *De Automatis*, 1, 1-19²¹³ :

ΗΡΩΝΟΣ ΑΛΕΞΑΝΔΡΕΩΣ
ΠΕΡΙ ΑΥΤΟΜΑΤΟΠΟΙΗΤΙΚΗΣ.

1) Τῆς αὐτοματοποιητικῆς πραγματείας ὑπὸ τῶν πρότερον ἀποδοχῆς ἤξιωμένης διὰ τε τὸ ποικίλον τῆς ἐν αὐτῇ δημιουργίας καὶ διὰ τὸ ἔκπληκτον τῆς θεωρίας. ἔστι γάρ, ὡς συνελόντι εἰπεῖν, πᾶν μέρος τῆς μηχανικῆς ἐν αὐτῇ τῇ αὐτοματοποιητικῇ παραλαμβάνομενον διὰ τῶν κατὰ μέρος ἐν αὐτῇ ἐπιτελουμένων. ἔστι δὲ αὐτῆς ἡ ἐπαγγελία τοιαύδε· κατασκευάζονται ναοὶ ἢ βωμοὶ σύμμετροι αὐτόματοί τε προσαγόμενοι καὶ κατὰ τινὰς ὠρισμένους ἰστάμενοι τόπους, καὶ τῶν ἐνότων αὐτοῖς ζῳδίων ἕκαστον ἰδίᾳ κινεῖται πρὸς λόγον τὸν κατὰ τὴν

213. W. Schmidt, *Heronis Alexandrini opera quae supersunt omnia. Volumen 1. Pneumatica et Automata*, Leipzig, Teubner, 1903.

προκειμένην πρόθεσιν ἢ μῦθον ἀρμόζοντα, καὶ εἰς τὸν ἐξ ἀρχῆς ἀποκαθίστανται τόπον. τὰ μὲν οὖν τοιαῦτα δημιουργήματα τῶν αὐτομάτων καλεῖται ὑπάγοντα. ἔστι δὲ καὶ ἕτερον εἶδος ἐν αὐτοῖς, ὃ καλεῖται στατόν. ἔστι δὲ καὶ τούτου ἡ ὑπόσχεσις τοιαύτη· ἐπὶ τινος κιονίσκου πίναξ ἐφέστηκε θύρας ἔχων ἀνοιγομένης, καὶ ἐν αὐτῷ ... διάθεσις ζωδίων πρὸς τινὰ μῦθον διεσκευασμένων. κεκλεισμένου οὖν τοῦ πίνακος αἱ θύραι αὐτόματοι ἀνοίγονται, καὶ φαίνεται ἡ τῶν ζωδίων τάξις γεγραμμένη· καὶ μετ' οὐ πολὺν χρόνον κλεισθεισῶν τῶν θυρῶν πάλιν αὐτομάτως καὶ ἀνοιχθεισῶν, ἕτερα φαίνεται διάθεσις ζωδίων ἀρμόζουσα τῇ πρότερον φανείσῃ· καὶ πάλιν κλεισθεισῶν καὶ ἀνοιχθεισῶν τῶν θυρῶν ἕτερα διάθεσις πάλιν φαίνεται ζωδίων ἀρμόζουσα τῇ πρότερον κειμένη, καὶ ἦτοι ἀπαρτίζει τὸν προκειμένον μῦθον ἢ πάλιν μετὰ ταύτην ἕτερα φαίνεται, ἄχρις ἂν ἀπαρτισθῇ ὁ μῦθος. καὶ τῶν φαινομένων δὲ ζωδίων τῶν γεγραμμένων ἐν τῷ πίνακι ἐν ἕκαστον ἐν κινήσει δύναται φανέσθαι, ἐὰν ἀπαιτῇ ὁ μῦθος, οἷον ἂ μὲν πρίζοντα, ἂ δὲ σκεπαρνίζοντα, ἂ δὲ σφύραις ἢ πελέκεσιν ἐργαζόμενα, ψόφον ποιοῦντα καθ' ἑκάστην πληγὴν καθάπερ ἐπὶ τῆς ἀληθείας. δύνανται δὲ καὶ ἕτεραι κινήσεις ὑπὸ τὸν πίνακα γίνεσθαι, οἷον πῦρ ἀνάπτεσθαι ἢ ζώδια ἐπιφαίνεσθαι πρότερον μὴ φαινόμενα καὶ πάλιν ἀφανίζεσθαι. καὶ ἀπλῶς, ὡς ἂν τις ἔληται δυνατόν ἐστὶ κινεῖν μηδενὸς προσιόντος τοῖς ζωδίοις. ἔστι δὲ ἡ τῶν στατῶν αὐτομάτων ἐνέργεια ἀσφαλεστέρα τε καὶ ἀκινδυνότερα καὶ μᾶλλον πᾶσαν ἐπιδεχομένη διάθεσιν τῶν ὑπαγόντων. ἐκάλουν δὲ οἱ παλαιοὶ τοὺς τὰ τοιαῦτα δημιουργοῦντας θαυματουργοὺς διὰ τὸ ἔκπληκτον τῆς θεωρίας. ἐν μὲν οὖν τούτῳ τῷ βιβλίῳ περὶ τῶν ὑπαγόντων γράφομεν ἐκθέμενοι διάθεσιν ποικίλην κατὰ γε ἡμᾶς, ἥτις ἀρμόσει πάση διαθέσει πρὸς τὸ δύνασθαι τὸν προαιρούμενον ἑτέρως διατίθεσθαι μηδὲν ἐπιζητοῦντα πρὸς τὴν τῆς διαθέσεως ἐνέργειαν· ἐν δὲ τῷ ἐξῆς περὶ τῶν στατῶν αὐτομάτων γράφομεν.

DIE AUTOMATENTHEATER

HERONS VON ALEXANDRIA.

Die Schaustellung der Automaten (Automatentheater) erfreute sich bei den Alten großer Beliebtheit, einmal, weil eine mannigfaltige Kunstfertigkeit dabei entwickelt wird, sodann, weil das (dargebotene) Schauspiel geradezu staunenerregend ist. Denn eben die Anfertigung der Automaten bringt, um es kurz zu sagen, jeden Teil der Mechanik vermittelt dessen, was im einzelnen dabei ausgeführt wird, zur Anwendung. Was der Bau der Automaten verspricht, ergibt sich aus folgendem. Man stellt Tempel oder Altäre von mäfsigem Umfange her, die sich von selbst heranbewegen und auf einigen bestimmten Punkten halten; dann bewegt sich jede von den darin befind-

lichen Figuren entsprechend dem vorliegenden Plane oder einer passenden Fabel für sich, und (schliesslich) kehren Tempel und Altar nach ihrem ursprünglichen Platze zurück. Die auf solche Art gearbeiteten Automaten nennt man fahrende. Es giebt aber unter den Automaten auch eine andere Art, die sogenannten stehenden Automaten. Diese Art verspricht folgendes zu leisten. Auf einer niedrigen Säule steht eine Tafel mit Thüren, die sich öffnen können, und auf dieser sieht man eine Darstellung von Figuren, die in ihrer Anordnung irgend einem Stücke entsprechen. Die Tafel ist nun (zu Anfang) geschlossen; dann öffnen sich die Thüren von selbst, und die Gruppierung der Figuren auf dem Bilde wird sichtbar. Haben sich nach kurzer Zeit die Thüren wieder von selbst geschlossen und geöffnet, so erscheinen die Figuren anders verteilt, aber doch der zuerst vorgeführten Darstellung entsprechend. Wenn die Thüren wieder geschlossen und geöffnet sind, zeigt sich abermals eine andere Verteilung der Figuren, die zu der vorher erschienenen passt, und entweder führt diese das zu Grunde liegende Stück zu Ende, oder es kommt nach dieser nochmals eine andere Darstellung zum Vorschein, bis das Stück zu Ende geführt ist. Von den auf der Tafel sichtbaren, gemalten Figuren lässt sich jede einzelne in Bewegung zeigen, sobald es die Fabel erfordert, z. B. können die einen sägen, die andern das Schlichtbeil handhaben, wieder andere mit Hämmern oder Zimmeräxten arbeiten, indem sie bei jedem Schlage ein der Wirklichkeit entsprechendes Geräusch hervorbringen. Es können auch andere Bewegungen auf der Bühne vorgeführt werden, z. B. kann Feuer angezündet werden oder es können bis dahin nicht sichtbare Figuren plötzlich erscheinen und wiederum verschwinden. Kurz, man kann jede beliebige Bewegung ausführen, ohne dass man sich den Figuren nähert. Die Thätigkeit (bezw. der Mechanismus) der stehenden Automaten ist sicherer und weniger gefährdet und lässt in grösserem Masse jede Art der Darstellung zu als die fahrenden. Die Männer, welche sich mit dergleichen Dingen befafsten, nannten die Alten, weil das Schauspiel ihre Verwunderung erregte, Wunderkünstler (Thaumaturgen). In diesem Buche schreiben wir nun über die fahrenden Automaten, indem wir eine Darstellung veranschaulichen, welche wenigstens nach unserer Meinung mannigfaltig ist und zu jeder beliebigen (anderen) Darstellung

paft, damit der, welcher die Vorführung eines andern Stückes plant, dazu imstande ist und in Hinsicht auf das Gelingen der Vorstellung nichts vermifft. Im folgenden Buche handeln wir dagegen von den stehenden Automaten.

2) Δεῖ δὲ πρῶτον ἀπόκροτον εἶναι καὶ ἀκλινὲς καὶ ὁμαλὸν τὸ ἔδαφος ἐν ᾧ μέλλει τὸ αὐτόματον ὑπάγειν, ἵνα μῆτε οἱ τροχοὶ αὐτοῦ καταδύνωσι πιεζόμενοι μῆτε ἐμποδίζονται ὑπὸ τραχύτητός τινος μῆτε πρὸς ἀνάβασιν βιαζόμενοι εἰς τὸ ὀπίσω ἐπινεύωσιν. ἐὰν δὲ μὴ ὑπάρχη τὸ ἔδαφος τοιοῦτον οἷον εἴρηται, δεῖ σανίδας ἀποριθώσαντας ἐπὶ τοῦ ἐδάφους διατιθέναι, ἐν αἷς κατὰ μῆκος ἔσονται σωλῆνες δι' ἐφηλωτῶν κανόνων πρὸς τὸ τοὺς τροχοὺς ἐν τοῖς σωλῆσι κυλίεσθαι. δεῖ δὲ τὰ ὑπάγοντα κατασκευάζειν ἐκ κούφων τε καὶ ξηρῶν ξύλων, κἂν ἐξ ἄλλης δὲ τινος ὕλης ὑπάρχη τι ἐν αὐτοῖς κατεσκευασμένον, καὶ τοῦτο δεήσει ὡς κουφότατον πειρᾶσθαι ποιεῖν, ἵνα μὴ διὰ τὸ βᾶρος δυσκίνητα γένηται. δεῖ δὲ καὶ ὅς' ἂν ἐγκυκλίους στροφᾶς ἢ κινήσεις ποιῆται, ταῦτα ἔντορνα τε ἀκριβῶς καὶ περὶ ᾧ κινεῖται λεία καὶ μὴ τραχέα ὑπάρχειν, οἷον οἱ μὲν τροχοὶ περὶ κνώδακας σιδηροῦς ἐμβεβηκότας εἰς ἐμπυελίδας σιδηρᾶς, τὰ δὲ ζώδια περὶ ἄξονας χαλκοῦς ἐμβεβηκότας εἰς χοινικίδας χαλκᾶς συνεσμηρισμένας αὐτοῖς. καὶ ἔλαιον δὲ παρεπιχέειν δεήσει εἰς ταῦτα, ὅπως κατὰ [πάντα] τρόπον εὐκύλιστα πάντα ὑπάρχη καὶ μηδὲν παρὰ τοῦτο σφίγμα γένηται· εἰ δὲ μὴ, οὐκ ἔσται τῶν προκειμένων κατὰ λόγον οὐδὲ ἓν. δεῖ δὲ καὶ τὰς σπάρτους, αἷς εἰς ταῦτα προσχρώμεθα, μῆτε ἐπέκτασιν μῆτε συστολῆν λαμβάνειν, ἀλλὰ τοιαύτας διαμένειν τοῖς μήκεσιν οἷαι καὶ ἐξ ἀρχῆς κατεστάθησαν. τοῦτο δὲ ἔσται, ἐὰν λαβόντες αὐτὰς περὶ τινος πασσαλίσκου διατείναντες εὖ μάλα καὶ ἐάσαντες αὐτὰς ὀλίγον χρόνον πάλιν ἐπεκτείνωμεν καὶ τοῦτο πλεονάκεις ποιήσαντες κηρὸν μετὰ ῥητίνης καταψήσωμεν. βέλτιον δ' εἰ καὶ βᾶρος ἐξ αὐτῶν ἐξάψαντες ἐάσομεν ἐπὶ πλείονα χρόνον. προβασανισθεῖσα δὲ οὕτως οὐδεμίαν ἐπέκτασιν λήψεται ἢ παντελῶς βραχεῖαν. ἢ πάλιν ἀποκόψομεν, ὅταν ἐξαρτύσαντες τὸ αὐτόματόν τινα αὐτῶν παρεκτεταμένην εὐρωμεν. νευρίνω δὲ οὐδενὶ δεῖ χρῆσθαι, ἐπειδὴ παρεκτείνεται καὶ συστέλλεται κατὰ τὴν τοῦ ἀέρος περίστασιν, εἰ μὴ ἄρα ὅταν δέη ὑσπληγγί χρῆσασθαι. ὁ δὲ ὑσπληγγξ ἔστω καθάπερ ἐν τοῖς καταπέλταις ὁ ἄξων κατατεταγμένος ἐν τῷ ἡμιτονίῳ, ὡς ἐξῆς ἔσται δῆλον. πάντα δὲ ταῦτα τὰ ὑπάγοντα τὴν ἀρχὴν λαμβάνει τῆς κινήσεως διὰ ὑσπληγγος ἢ λείας μολιβῆς. κοινὸν δὲ ἔστι τοῦ κινουῦντος καὶ τοῦ κινουμένου σπάρτος ἔχουσα τὴν μὲν μίαν ἀρχὴν πρὸς τῷ κινουῦντι προσδεδεμένην, τὴν δὲ ἐτέραν πρὸς τῷ κινουμένῳ προσηγγυλωμένην. τὸ δὲ κινούμενον ἄξων ἐστί, περὶ ὃν ἡ σπάρτος περιεῖληται. τῷ δὲ ἄξονι προσαραρότες εἰσὶ τροχοί, ὥστε τοῦ ἄξονος στρεφομένου καὶ ἀπειλισσομένης τῆς σπάρτου συστρέφεσθαι καὶ τοὺς τροχοὺς ἐρείδοντας ἐπὶ τὸ ἔδαφος. τοῖς δὲ τροχοῖς περιέκειται τὸ τοῦ ὑπάγοντος αὐτομάτου πλινθίον. τάσιν δὲ ὑσπληγγος ἢ βᾶ-

ρος λείας δεῖ πρὸς τὰ ὅλα ἡρμόσθαι, ὅπως μὴ κατακρατῆται ἤτοι τὸ βᾶρος ἢ ἡ τοῦ ὑσπληγγος τάσις ὑπὸ τοῦ πλινθίου. αἱ δὲ ἐκ τῆς πορείας κινήσεις γίνονται πασῶν τῶν σπάρτων προσηγκυλωμένων μὲν τοῖς κινουμένοις ὀργάνοις, ἀποδεδεμένων δὲ εἰς τὴν λείαν. ἡ δὲ λεία ἐστὶν ἐν τινι σύριγγι, ἀρμοστῶς καὶ εὐλύτως δυναμένη καταβαίνειν εἰς αὐτήν. ἐν δὲ τῇ σύριγγι ἐπὶ μὲν τῶν ὑπαγόντων ἢ κέγχρος ἢ νᾶπυ ἐμβάλλεται διὰ τὸ κοῦφά τε ἀμφοτέρα εἶναι καὶ ὀλισθηρά, ἐν δὲ τοῖς στατοῖς ἄμμος ξηρὰ ἐμβάλλεται, ὧν ἐκρεόντων διὰ τοῦ πυθμένος τῆς σύριγγος ἡ λεία ἡρέμα καταφερομένη τὰς κινήσεις ἀποτελεῖ ἐπισπωμένη ἐκάστην σπάρτον. ἀρχὴ δὲ κινήσεως ἐστὶ τάσις σπάρτου, κινήσεως δὲ στάσις ἀπόλυσις σπάρτου ἐκπεσούσης τῆς ἀγκύλης ἀπὸ τοῦ τύλου τοῦ ἐν τῷ κινουμένῳ ὀργάνῳ. αἱ δὲ ὑπὸ τῆς λείας ἐλκόμεναι σπάρτοι πᾶσαι ἰσοταχῶς μὲν ἔλκονται, οὐκ ἰσοταχεῖς δὲ τὰς κινήσεις ποιοῦνται διὰ τὸ μὴ περὶ ὅμοια ὄργανα αὐτὰς περιειεῖσθαι, ἀλλὰ ἅς μὲν περὶ μείζονας κύκλους, ἅς δὲ περὶ ἐλάσσονας. δεῖ δὲ τῶν μὴ ἅμα κινουμένων ὀργάνων τὰς σπάρτους μὴ ἅμα τετάσθαι, ἀλλὰ τῶν ὕστερον κινουμένων τὰς σπάρτους χαλάσματα ἔχειν. τὰ δὲ χαλάσματα μηρύματα δεῖ ποιεῖν καὶ προσκολλᾶν κηρῶ ἐντὸς τοῦ πλινθίου κατὰ τὸν ἐπιβάλλοντα τόπον, ὅπως ἡ λεία ἐπισπωμένη τὸ χάλασμα πραέως τεῖνη τὴν σπάρτον. προσέχειν δὲ δεῖ καὶ ταῖς σπάρτοις, ὅπως ἐκάστη αὐτῶν τῷ ἰδίῳ ὀργάνῳ προσαγκυλωθῇ καὶ μὴ ἐπ' ἀριστερὰ τὴν ἐπείλησιν λάβῃ· μιᾶς γὰρ αὐτῶν ἀλλαγείσης ἢ ἐπ' ἀριστερὰ ἐπειληθείσης τὰ ὅλα στάσιν λήψεται. δεῖ δὲ καὶ τὰς τῶν ἀρχαίων ἐκφυγεῖν διαθέσεις, ὅπως καινότερον τὸ κατασκευάσμα φαίνεται· δυνατὸν γάρ, ὡς προείρηται, ταῖς αὐταῖς μεθόδοις χρώμενον ἐτέρας καὶ ἐτέρας διαθέσεις ποιεῖσθαι. βέλτιον δ' ἐν τούτοις ἀναστρέψει ὁ χαριεστέραν ἐπινοῶν διάθεσιν. ἦν δὲ ἡμεῖς ἐκτιθέμεθα, ἔστι τοιαύτη.

Zunächst mufs der Boden, auf dem der Automat vorrücken soll, fest, wagerecht und eben sein, damit seine Räder weder infolge des Druckes einsinken, noch von einer rauhen Stelle gehemmt werden, noch bergauf getrieben zurücklaufen. Wenn ein solcher Boden, wie er eben beschrieben, nicht vorhanden ist, mufs man Bretter wagerecht auf den Boden legen, auf denen der Länge nach Schienen vermittelt festgenagelter Latten hergestellt werden, damit die Räder in den Schienen rollen. Die fahrenden Automaten mufs man aus leichtem, trockenem Holz anfertigen. Sind sie aber teilweise aus anderem Material gemacht, mufs man versuchen, auch dieses möglichst leicht zu machen, damit nicht infolge der Schwere ihre Bewegung zu schwerfällig wird. Es mufs ferner alles, was kreisförmige Wendungen oder Bewegungen macht, recht rund, und die Gegenstände, um welche die Bewegung stattfindet, müssen glatt und nicht

rauh sein, wie z. B. die Räder um eiserne, in eisernen Naben ruhende Achsen und die Figuren um kupferne Achsen, die in kupfernen, entsprechend ausgeschliffenen Büchsen (Lagern) liegen. Man muß auch Öl daran gießen, damit in rechter Weise alles leicht rollt (sich bewegt), ohne dafs dabei irgend welche Klemmung entsteht. Sonst wird die Lösung der vorliegenden Aufgabe auch nicht in einem einzigen Punkte unserer Erwartung entsprechen. Es dürfen ferner die Schnü'e, welche wir noch dazu gebrauchen, sich weder dehnen noch zusammenziehen, sondern sie müssen immer so lang bleiben, als sie anfangs gemacht sind. Das erreichen wir, wenn wir sie um einige Pflöcke hängen, sie recht fest anspannen, kurze Zeit so lassen, dann wieder weiter ausdehnen und nach öfterer Wiederholung dieses Verfahrens Wachs mit Harz daranstreichen. Besser aber ist es, wenn wir auch ein Gewacht daranhängen und längere Zeit es so hängen lassen. Wenn man die Schnur vorher so erprobt hat, dehnt sie sich gar nicht weiter oder nur ganz wenig. Oder falls wir beim Bespannen des Automaten finden, dais eine von ihnen sich noch mehr gedehnt hat, schneiden wir sie ab. Man darf aber nichts verwenden, was aus Sehnen gemacht ist, da es je nach der Beschaffenheit der Luft sich ausdehnt oder zusammenzieht, falls es nicht etwa nötig ist, ein Spannholz zu verwenden. Das Spannholz (Hysplenx) sei aber älmlich wie bei den Katapulten die in den Halbpaun (Hemitonion, Sehnenstrang) gesetzte, (sogenannte) Achse (Spannbolzen), wie man weiter unten sehen wird. Alle diese fahrenden Automaten erhalten den Antrieb zur Bewegung durch eine Schnur oder vielmehr ein Gegengewicht aus Blei. Gemeinsam ist dem bewegenden und dem bewegten Gegenstände eine Schnur, deren eines Ende an den bewegenden Körper gebunden, deren anderes aber mittels einer Ose an dem bewegten Gegenstände befestigt ist. Der bewegte Körper ist eine Achse, um welche die Schnur gewickelt ist (Fig. 83b). An der Achse sitzen Räder fest. Wenn daher die Achse sich dreht und die Schnur sich abwickelt, drehen sich auch die Räder, die auf dem Boden ruhen. Die Räder umgibt beim fahrenden Automaten der Radkasten. Die Spannung der Schnur oder die Schwere des Gewichtes muß aber dem Ganzen angepaßt sein, damit nicht der Kasten das Gegengewicht oder die Spannung der Schnur überwiegt. Abgesehen von der Bewegung von Ort zu Ort erfol-

gen die Bewegungen dadurch, dafs sämtliche Schnüre sowohl an die bewegten Vorrichtungen mittelst Schlingen befestigt als an das Gegengewicht angebunden sind. Das Gegengewicht befindet sich in irgend einem Gewichtskasten (Syrinx, Pfeife) und kann passend und leicht in demselben hinuntergleiten. In den Gewichtskasten wird bei den fahrenden Automaten entweder Hirse oder Senfkorn geschüttet, weil beides leicht und schlüpfrig ist; bei den stehenden Automaten thut man trockenen Sand hinein. Wenn dies nun durch den Boden des Gewichtskastens ausläuft, so senkt sich allmählich das Gegengewicht und bringt durch das Anziehen jeder (einzelnen) Schnur die Bewegungen hervor. Den Antrieb zur Bewegung giebt die Anspannung der Schnur, das Aufhören der Bewegung aber die Loslösung derselben, indem die Ose von dem an der bewegten Vorrichtung befindlichen Pflöcke abfällt. Die von dem Gegengewicht gezogenen Schnüre werden alle gleich schnell gezogen, rufen aber nicht gleich schnelle Bewegungen hervor, weil sie nicht um gleiche (maschinelle) Vorrichtungen gewickelt werden, sondern die einen um gröfsere Peripherien (nämlich Achsen), die anderen um kleinere. Die Schnüre derjenigen Vorrichtungen, die nicht zur selben Zeit mit bewegt werden, dürfen nicht gleichzeitig gespannt sein, sondern die Schnüre der sich später bewegenden müssen lockere (nicht gespannte) Teile haben; diese ungespannten Teile müssen (lockere) Stränge (Schnurlagen) bilden und sind innerhalb des Kastens mit Wachs an der richtigen Stelle anzukleben, damit das Gegengewicht durch das Anziehen des lockeren Teiles allmählich die Anspannung der Schnur herbeiführt. Man mufs auch darauf achten, dafs jede der Schnüre mittels der Öse an die zugehörige Vorrichtung geknüpft und nicht verkehrt aufgewickelt wird. Wird nämlich eine von ihnen vertauscht oder verkehrt aufgewickelt, so wird das Ganze zum Stehen kommen. Man mufs ferner die Darstellungen der Vorgänger zu vermeiden suchen, damit der Apparat als etwas Neues erscheint. Denn man kann, wie oben bemerkt, unter Anwendung derselben Methoden immer wieder andere Darstellungen bieten. Je anmutiger die Scenerie ist, welche einer erfindet, um so gröfser wird sein Erfolg sein. Diejenige, welche wir veranschaulichen wollen, ist folgendermafsen beschaffen.

3) Ἔστω βάσις μήκος ἔχουσα ὡς πῆχους, πλάτος δὲ ὡς παλαιστῶν τεσσάρων, ὕψος

δὲ ὡς παλαιστῶν τριῶν, κυμάτιον ἔχουσα περιτρέχον εἰς τε τὸ ἄνω καὶ τὸ κάτω μέρος. ἐπὶ δὲ τῶν γωνιῶν αὐτῆς ἐφέστηκε κίονια τέσσαρα, ὕψος μὲν ἔχοντα ὡς παλαιστῶν ἡ', πλάτος δὲ παλαιστῶν δύο, ἔχοντα ὑποκείμενα σπειρία καὶ τούτοις ἀρμοζούσας κεφαλὰς ἐπικειμένας. ἐπὶ δὲ τῶν κεφαλῶν ἐπίκειται καθάπερ ἐπιστύλιον κύκλω ὕψος ἔχον ὄγδοον τοῦ κίονος ὄλου, ὡς δακτύλων ε'. κατὰ δὲ τῶν ἐπιστυλίων κατέστρωται σανίδια καλύπτοντα τὴν ἐπάνω ἐπιφάνειαν, καὶ περίκειται κύκλω κυμάτιον. ἐπὶ δὲ τοῦ καταστρώματος ἐφέστηκε μέσον ναῖσκος στρογγύλος περιφανῆς ἔχων κίονας ἕξ. ἐπὶ δὲ τούτου πυργίον κωνοειδὲς ἐφέστηκεν ἐντεταμένην ἔχον τὴν ἐπιφάνειαν, καθάπερ εἴρηται. ἐπὶ δὲ τῆς κορυφῆς ἐφέστηκε Νίκη ἐκπετακυῖα τὰς πτέρυγας καὶ ἐν τῇ δεξιᾷ χειρὶ στέφανον κατέχουσα. ἐν δὲ μέσῳ τοῦ ναῖσκου ζώδιον Διονύσου ἐφέστηκεν ἐν μὲν τῇ ἀριστερᾷ χειρὶ θύρσον κατέχον, ἐν δὲ τῇ δεξιᾷ σκύφον. παρακαθέζεται δὲ πανθηρίσκος πρὸς τοῖς τοῦ Διονύσου ποσίν. ἐν δὲ τοῖς ἔμπροσθεν καὶ τοῖς ὀπισθεν μέρεσι τοῦ Διονύσου ἐπὶ τοῦ καταστρώματος βωμὸς ἐπίκειται ἔχων ζύσματα τῶν σανίδων τεκτονικὰ ξηρὰ ὥστε εὐκαυστα εἶναι. κατὰ δὲ κίονα τῶν ἐν τῷ ναῖσκῳ τοῦ Διονύσου παρέστηκεν ἐκτὸς τοῦ ναῖσκου Βάκχη διεσκευασμένη ὡς ἂν τις προαιρηῆται.

Man denke sich einen Sockel, etwa eine Äufserer Ein Elle (= 46 cm) lang, etwa vier Spannen (= 31 cm) breit und ungefähr drei Spannen (= 23 cm) hoch, mit einer oben und unten ringsum laufenden Hohlkehle versehen. Auf den vier Ecken des Sockels stehen vier kleine, etwa acht Spannen (= 62 cm) hohe und zwei Spannen (= 15,5 cm) breite Pilaster, unten mit Wülsten und oben mit entsprechenden Kapitalen versehen. Auf den Kapitalen ruht ringsum eine Art Architrav, ein Achtel des ganzen Pilasters (= 7,71 cm), etwa vier Finger (= 7,71 cm), hoch. Über die Architrave hin sind kleine Bretter gelegt, welche die Oberfläche verdecken, ringsum liegt eine Hohlkehle. Auf der Überdeckung steht in der Mitte ein rundes Tempelchen, von allen Seiten sichtbar, mit sechs Säulen. Auf diesem steht eine kegelförmige Kuppel (Türmchen), deren Oberfläche überspannt (überdacht) ist, wie oben bemerkt. Auf der Spitze steht Nike mit ausgebreiteten Flügeln und in der Rechten einen Kranz haltend. In der Mitte des Tempelchens steht eine Bacchusfigur mit einem Thyrsus in der Linken und einem Becher in der Rechten. Zu den Füßen des Bacchus sitzt ein kleiner Panther. Vor und hinter Bacchus steht auf der Überdeckung ein Altar mit trockenen, leicht brennenden Hobelspänen. An jeder Säule am Bacchustempel steht außerhalb desselben eine Bacchantin in

beliebiger Stellung.

4) Τούτων δὲ οὕτως ὑπαρχόντων ἐν ἀρχῇ τεθέντος τοῦ αὐτομάτου ἐπὶ τινὰ τόπον καὶ ἀποστάντων μετ' οὐ πολὺν χρόνον ὑπάξει τὸ αὐτόματον ἐπὶ τινὰ ὠρισμένον τόπον. καὶ στάντος αὐτοῦ ἀνακαυθήσεται ὁ κατὰ πρόσθεν τοῦ Διονύσου βωμός. καὶ ἐκ μὲν τοῦ θύρσου τοῦ Διονύσου ἤτοι γάλα ἢ ὕδωρ ἐκπιτυσθήσεται, ἐκ δὲ τοῦ σκύφους οἶνος ἐκχυθήσεται ἐπὶ τὸν ὑποκείμενον πανθηρίσκον. στεφανωθήσεται δὲ πᾶς ὁ παρὰ τοὺς τέσσαρας κίονας τῆς βάσεως τόπος. αἱ δὲ περικύκλω Βάχχαι περιλεύσονται χορεύουσαι περὶ τὸν ναῖσκον. καὶ ἦχος ἔσται τυμπάνων καὶ κυμβάλων. καὶ μετὰ ταῦτα σταθέντων τῶν ἦχων ἀποστραφήσεται τὸ τοῦ Διονύσου ζώδιον εἰς τὸ ἐκτὸς μέρος. ἅμα δὲ τούτῳ καὶ ἡ ἐπικειμένη τῷ πυργίῳ Νίκη συνεπιστραφήσεται. καὶ πάλιν ὁ ἔμπροσθεν γεγονὼς τῷ Διονύσῳ βωμός, πρότερον δὲ ὀπίσθιος ὑπάρχων ἀνακαυθήσεται. καὶ πάλιν ἐκ μὲν τοῦ θύρσου ὁ ἀναπιτυσμὸς ἔσται, ἐκ δὲ τοῦ σκύφους ἡ ἐκχυσίς. καὶ πάλιν αἱ Βάχχαι χορεύουσι περιερχόμεναι τὸν ναῖσκον μετὰ ψόφου τυμπάνων καὶ κυμβάλων. καὶ πάλιν σταθεισῶν αὐτῶν τὸ αὐτόματον ἀναχωρήσει εἰς τὸν ἐξ ἀρχῆς τόπον. καὶ οὕτως τέλος ἔξει ἡ ἐπίδειξις. τοῖς δὲ εἰρημένοις μέτροις ἐχρησάμεθα ἀναγκαίως. μειζόνων γὰρ γεννηθέντων ὑπόνοιαν ἔξει τὸ ὄραμα ὡς ἐντὸς τινος ταῦτα δημιουργοῦντος. διὸ δὴ ἐν τε τοῖς ὑπάγουσι καὶ ἐν τοῖς στατοῖς αὐτομάτοις δεῖ φυλάσσεσθαι τὰ μεγέθη διὰ τὴν ἐσομένην ὑπόνοιαν. τῆς οὖν διαθέσεως εἰρημένης ἐξῆς τὴν κατασκευὴν τῶν κατὰ μέρος ἐν αὐτῇ ποιησόμεθα.

Ist bei solchen Vorrichtungen zu Anfang der Automat an irgend einem Punkte aufgestellt, so wird bald nachdem wir zurückgetreten sind, der Automat nach einer bestimmten Stelle vorrücken. Wenn er dann stehen bleibt, wird der Altar (das Altarfeuer) vor Bacchus angezündet. Und aus seinem Thyrsus spritzt Milch oder Wasser, aus dem Becher ergießt sich Wein auf den darunter liegenden Panther, der ganze Unterbau wird an den vier Pilastern bekränzt, die Bacchantinnen ringsum umkreisen im Tanze den Tempel, Trommelwirbel und Beckenschlag wird vernehmbar. Hat sich darauf der Lärm gelegt, so wird sich die Bacchusfigur nach aufsen wenden. Zugleich mit ihr wird sich auch die auf der Kuppel stehende Nike drehen. Dagegen wird nun der Altar, der jetzt vor Bacchus steht, vorher aber hinter ihm stand, aufflammen. Abermals sprudelt es aus dem Thyrsus hervor und erfolgt aus dem Becher der Ausgufs, und die Bacchantinnen tanzen von neuem unter Pauken- und Beckenschall um den Tempel. Wenn sie dann zum zweiten Male stehen bleiben, fährt der

Automat nach seinem Ausgangspunkte zurück. Und so wird die Vorstellung ein Ende haben. Die erwähnten Mafse haben wir notgedrungen verwendet. Werden sie nämlich gröfser genommen, so wird die Schaustellung Verdacht erwecken, als ob im Innern jemand diese Bewegungen hervorbringe. Deshalb mufs man also sowohl bei den fahrenden als den stehenden Automaten sich vor grofsen Dimensionen hüten, weil eben Verdacht entstehen könnte. Nachdem nun die (allgemeine) Einrichtung angegeben ist, wollen wir der Reihe nach die einzelnen Teile darin konstruieren.

5) Οἱ μὲν οὖν πρὸ ἡμῶν τὴν ἐπὶ μιᾶς ὁδὸν τῆς τε πορείας καὶ τῆς ἀποπορείας παρέδωκαν ἡμῖν καὶ ταύτην κακοπαθῆ τε καὶ ἐπικίνδυνον· σπάνιον γὰρ ἐπιτυχεῖν κατακολουθοῦντα ταῖς ὑπ' αὐτῶν ἀναγεγραμμέναις μεθόδοις, ὡς ἔστι φανερόν τοῖς πεπειραμένοις αὐτῶν. ἡμεῖς δὲ ὑποδείζομεν, ὡς ἔστι τὴν ἐπ' εὐθείας πορείαν καὶ ἀποπορείαν γίνεσθαι εὐκόπως τε καὶ ἀκινδύνως ἔτι τε καὶ ὡς ἔστι τὸ πλινθίον ἢ τὸ ζῳδίον κατὰ κύκλου τοῦ δοθέντος φέρεσθαι, οὐ μὴν ἀλλὰ καὶ ἐν παραλληλογράμμῳ ὀρθογωνίῳ τῷ δοθέντι φέρεσθαι. Καὶ πρότερον, ὡς ἐπὶ εὐθείας, ἐροῦμεν. Ἐστω γάρ τι πλινθίον τὸ ΑΒΓΔ, ἐν ᾧ ἄξων διακεῖσθω ὁ ΕΖ ἐν κνώδαξι στρεφόμενος, ἐμβεβηκῶς εἰς πυελίδας οὔσας ἐν τοῖς τοῦ πλινθίου τοίχοις. τῷ δὲ ἄξονι συμφυεῖς ἔστωσαν δύο τροχοὶ ἴσοι οἱ ΗΘ, ΚΛ τὰς περιφερείας εἰργασμένοι φακοειδεῖς· καὶ κατὰ μέσον τὸν ἄξονα ἐξελίχτρα ἢ ΜΝ καὶ αὐτὴ συμφυῆς τῷ ἄξονι, περὶ ἣν ἡ σπάρτος ἐπειληθήσεται. ταύτῃ δὲ συμφυῆς ἔστω τύλος ὁ Ξ, περὶ ὃν ἡ τῆς σπάρτου ἀγκύλη περικείται. ἕτερος δὲ ἔστω τροχὸς κατὰ μέσην τὴν ΓΔ πλευρὰν ὁ ΟΠ ἐν πῆγματι πολευόμενος τῷ ΡΣΤΥ περὶ ἄξονα τὸν ΦΧ μικρὸν σφόδρα. οὕτως δὲ ἐνηρμόσθωσαν οἱ ἄξονες τῶν τροχῶν, ὥστε τὸ πλινθίον ἀκλινὲς καθεστάναι κατὰ πᾶν μέρος. τῆς οὖν ἀγκύλης τῆς σπάρτου περιβληθείσης περὶ τὸν Ξ τύλον, ἐπειλείσθω περὶ τὴν ἐξελίχτραν ἢ σπάρτος. καὶ σύριγγος ἐπικειμένης τετραγώνου πρὸς ὀρθὰς κατὰ μέσον τὸ πλινθίον, ἢ ἑτέρα ἀρχὴ τῆς σπάρτου διὰ τροχίλου ἀποδεδόςθω εἰς τὸ ἄνω μέρος τῆς σύριγγος καὶ ἐξήφθω εἰς μολιβοῦν βᾶρος ἐνὸν ἐντὸς ἐν τῇ σύριγγι. οὐκοῦν ἐάν τις ἀφῆ τὸ βᾶρος ἐν τῇ σύριγγι κάτω φέρεσθαι, τείνει τὴν σπάρτον. αὕτη δὲ ἀπειλουμένη ἀπὸ τῆς ἐξελίχτρας ἐπιστρέφει τοὺς ΗΘ, ΚΛ τροχοὺς· οὗτοι δὲ κατὰ τοῦ ἐδάφους κυλιόμενοι ἄξουσι τὸ πλινθίον, ἄχρις ἂν ἦτοι ἡ ἀγκύλη ἐκπέση ἀπὸ τοῦ τύλου ἢ τὸ βᾶρος ἐπικαθίσῃ τινί.

Unsere Vorgänger haben uns als Weg der Vor- und Rückwärtsbewegung nur den auf einer Linie überliefert, und noch dazu einen mühseligen und unsicheren. Denn selten hat einer Erfolg, der sich nach ihren schriftlich aufge-

zeichneten Methoden richtet, wie denen bekannt ist, welche sie auf die Probe gestellt haben. Wir werden aber zeigen, dafs die Hin- und Rückfahrt auf einer geraden Linie sich sowohl mit leichter Mühe als mit sicherem Erfolge ausführen läfst, und werden ferner die Möglichkeit darthun, dafs ein Kasten oder eine Figur sich auf einem gegebenen Kreise bewegt, ja sogar auf einem gegebenen rechtwinkligen Parallelogramme. Zunächst wollen wir di Möglichkeit der Bewegung auf einer geraden Linie erörtern. Es sei $AB\Gamma\Delta$ ein Kasten; in diesem bringe man quer eine Achse EZ an, die sich um Zapfen dreht und in Büchsen (Zapfenlagern, Pyelides) ruht, welche sich in den Wänden des Kastens befinden. Mit der Achse seien zwei gleiche Räder $H\Theta$ und $K\Lambda$ verbunden, deren Peripherien (Laufflächen im Querschnitt) linsenförmig gearbeitet sind. Mitten an der Achse befinde sich eine Walze MU , welche gleichfalls mit der Achse verbunden (aus einem Stücke) ist; um diese wickelt man die Schnur. Mit der Walze sei ein Pflock Ξ fest verbunden, um den die Öse der Schnur gelegt wird. Ein anderes Rad $O\Pi$ befinde sich mitten an der Seite $\Gamma\Delta$ und drehe sich in einem Rollenkasten $P\Sigma\Upsilon\Upsilon$ um eine sehr kleine Achse ΦX . Die Achsen der Räder seien so in ih-e Lager eingepafst, dafs der Radkasten mit jedem seiner Teile wagerecht steht. Ist nun die Öse der Schnur um den Pflock Ξ gelegt, so wickle man die Schnur um die Walze. Und nachdem eine viereckige Pfeife (Syrinx, Gewichtskasten) rechtwinklig mitten auf den Radkasten gesetzt ist, leite man das eine Ende der Schnur vermitteltst einer Rolle nach dem oberen Teile des Gewichtskastens und knüpfe es an ein Bleigewicht, welches sich im Innern des Gewichtskastens befindet. Wenn man nun das Gewicht in dem Gewichtskasten losläfst, dafs es niedergeht, so spannt es die Schnur. Diese wird dadurch, dafs sie sich von der Walze abwickelt, die Räder $H\Theta$ und $K\Lambda$ drehen. Diese werden aber über den Boden hin rollen und den Kasten fortbewegen, bis entweder die Öse von dem Pflocke fällt oder das Gegengewicht auf irgend einen Gegenstand aufstößt.

6) Ἡ μὲν οὖν πορεία γίνεται τὸν εἰρημένον τρόπον, ἡ δὲ ἀποπορεία οὕτως. Ἐπειλήθεισης γὰρ τῆς σπάρτου περὶ τὴν ἐξελίχτραν ἐπὶ τι μέρος, περιτεθειῖσα περὶ τὸν Ξ τύλον τὰ ἐναντία ἐπειλείσθω τῇ πρότερον περὶ τὴν ἐξελίχτραν. εἶτα ἀποδεδόσθω ὁμοίως εἰς τὴν λείαν κρίκου συνεχομένου αὐτῇ. πάλιν οὖν καταφερομένη ἡ λεία ἀπειλήσει τὴν πρώτην ἐπειλήσιν,

καὶ τὸ πλινθίον πορευθήσεται. εἴτα ἀποστᾶσα ἀπὸ τοῦ τύλου εἰς τὰ ἐναντία ἐπιστρέψει τοὺς τροχούς. καὶ οὕτως ἔσται ἡ ἀποπορεία τοῦ πλινθίου. ἐὰν δὲ βουλώμεθα πορευθὲν τὸ πλινθίον στῆναι ἐπὶ τινὰ χρόνον καὶ οὕτως τὴν ἀποπορείαν ποιήσασθαι, ἐπειλήσαντες τὴν σπάρτον καὶ περιβαλόντες περὶ τὸν τύλον οὐκ εὐθέως τὰ ἐναντία ἐπειλησόμεθα, ἀλλὰ μηρυμάτιον ποιήσαντες καὶ προσκολλήσαντες [ἐπειλήσομεν] ἐπὶ τὴν ἐξελίκτηραν καὶ πάλιν τὰ ἐναντία ἐπειλήσαντες ἀποδώσομεν εἰς τὴν λείαν, καὶ ἔσται τὸ προκείμενον. ἐὰν δὲ καὶ πολλάκις βουλώμεθα πορεύεσθαι τε καὶ ἀποπορεύεσθαι τὸ πλινθίον, πλεονάκις καὶ τὰς ἐναλλάξ ἐπειλήσεις ποιήσομεθα καὶ τὰ διαστήματα ἡλίκα ἂν προαιρώμεθα καὶ τοὺς τῶν δαιμόνων χρόνους ποιήσομεν διὰ τῶν μηρυμάτων ἡλίκους ἂν προαιρώμεθα. νοεῖσθω δὲ καὶ κατὰ κρόταφον τὸ πλινθίον σὺν τῇ σύριγγι ὀρώμενον, καὶ ἔστω πλινθίον μὲν τὸ $\Psi\Omega$, ἐξελίκτηρα δὲ ἡ τ , σύριγγξ δὲ ἡ T , σπάρτος δὲ ἡ AB περὶ τρύχιλον [δὲ] περιχειμένη τὸν φ , λεία δὲ ἡ Δ , ὁ δὲ ἐν αὐτῇ κρῖκος ὁ E .

Die Hinfahrt wird also in der besprochenen Weise ausgeführt, die Rückfahrt aber in folgender. Nachdem nämlich die Schnur nur zu einem gewissen Teile um die Walze gewickelt ist, lege man sie um den Pflock Ξ und wickle sie in einer der früheren Umwicklung entgegengesetzten Richtung um die Walze. Sodann leite man sie ebenso nach dem Gegengewichte, indem die Verbindung mit ihm durch einen Ring hergestellt wird. Wieder wird nun das Gegengewicht, indem es niedergeht, die erste Aufwicklung abwickeln, und der Radkasten wird vorrücken. Ist dann die Schnur vom Pflocke abgesprungen, so wird sie die Räder nach der entgegengesetzten Richtung drehen. Und so wird die Rückfahrt des Kastens erfolgen. Soll der Kasten aber nach dem Vorrücken eine Zeit lang stehen bleiben und dann erst den Rückweg antreten, so wird man die Schnur, nachdem man sie aufgewickelt und um den Pflock gelegt hat, nicht sofort nach der entgegengesetzten Richtung wickeln, sondern eine lockere Schnurlage herstellen, sie auf die Walze kleben, dann wieder nach der entgegengesetzten Richtung aufwickeln und wieder nach dem Gegengewichte leiten. Dann ist die Aufgabe gelöst. Wenn der Kasten oft vorund zurückgehen soll, so lassen wir die Richtungen der Aufwicklung öfter abwechseln, machen die Abstände nach Belieben grofs und dehnen die Tänze der Gottheiten vermittelt der lockeren Schnurlagen nach Belieben aus. Man stelle sich den Radkasten mit dem Gewichtskasten auch in einer Seitenansicht vor. Es

sei der Radkasten $\Psi\Omega$, die Walze τ , der Gewichtskasten T, die Schnur AB, welche um eine Rolle φ läuft, das Gegengewicht Δ , der Ring daran E.

12) Περὶ μὲν οὖν τῆς πορείας καὶ τῆς ἀποπορείας τοῦ πλινθίου αὐτάρκως νομίζομεν εἰρηχέναι. ἐξῆς δὲ περὶ τῶν ἐκτὸς τῆς πορείας κινήσεων ἐροῦμεν· ἔστι δὲ ἡμῖν ἡ πρώτη κίνησις περὶ τῆς τοῦ πυρὸς ἀνακαύσεως τοῦ ἐν τῷ βωμῷ. Γίνεται οὖν οὕτως· ἔστω γὰρ βωμὸς ἐκ λεπίδων χαλκῶν ἢ σιδηρῶν πεποιημένος ὁ ABΓΔ, τρύπημα ἔχων ἐν μέσῳ τῷ ἐπιπύρῳ τὸ E. ὑπὸ δὲ τοῦτο λεπίδιον ἔστω τὸ ZH παρακτὸν ὡσπερ γλωσσοκόμου πῶμα, ἐπικαλύπτων τὸ E τρύπημα, ἐκ δὲ τούτου ἀλυσείδιον τὸ HΘΚ ἀποδοδομένον περὶ ἀξόνιον ἐντὸς τοῦ βωμοῦ κείμενον καὶ εὐλύτως στρεφόμενον. τὴν δὲ τῷ ἀξονίῳ ἀποδοδόσθω εἰς τὴν λείαν σπάρτος· αὕτη δὲ μετὰ τὴν πορείαν ταθεῖσα ὑπὸ τῆς λείας ἐπιστρέψει τὸ ἀξόνιον καὶ παραλλάξει τὸ λεπίδιον, καὶ τῆς ἀγκύλης ἐκπεσοῦσης ἀπὸ τοῦ τύλου τὰ ἐξῆς ἐπιτελεσθήσεται. ὑποκείσθω δὲ τῷ E τρυπήματι λαμπτήρ ὁ MN τὴν φλόγα ἔχων ὑποκειμένην τῷ τρυπήματι. ἐπικείσθω δέ, ὡς προείρηται, ἐν τῷ βωμῷ ὕλη δυναμένη εὐκόπως ἀνάπτεσθαι. μᾶλλον δὲ τῶν ἄλλων ποιεῖ τὰ τεκτονικὰ ζύσματα. ὅταν οὖν πορευόμενον τὸ πλινθίον στῆ, τότε ἡ ἐκ τοῦ HΘΚ ἀλυσείδιου σπάρτος ταθεῖσα ἐπισπάσεται τὸ ZH λεπίδιον, ὥστε ἀνοιχθῆναι τὴν ὀπὴν καὶ τὴν φλόγα ἄνω ἐνεχθεῖσαν ἀνακαῦσαι τὸν βωμόν. τὰ δ' αὐτὰ ἐπινοείσθω καὶ ἐπὶ τοῦ ἐτέρου βωμοῦ, μόνον ὅτι τὸ τῆς σπάρτου χάλασμα μεῖζον εἶναι δεῖ τοῦ νῦν εἰρημένου, ὅπως κατὰ τὰς ἐξῆς κινήσεις ταθεῖσα ἡ σπάρτος τὴν ἐτέραν ἕξαψιν ποιήσεται.

Die Hin und Rückfahrt des Radkastens glauben wir genügend besprochen zu haben. Wir werden nun der Reihe nach die (übrigen) Bewegungen mit Ausschluß des Fahrens (also die Bewegungen am Orte) besprechen. Die erste Bewegung aber, die wir erklären wollen, betrifft das Anzünden des Feuers auf dem Altare. Sie wird folgendermaßen ausgeführt. Es sei nämlich ABΓΔ ein aus Bronze oder Eisenplatten hergestellter Altar, mit einem Loche E mitten auf der Feuerstätte. Darunter sei ein Metallplättchen ZH, das sich wie ein Kastendeckel verschieben läßt und das Loch E verdeckt. Von dem Plättchen leite man ein Kettchen HΘΚ um eine kleine Achse, die innerhalb des Altars liegt und sich leicht dreht. Von der kleinen Achse leite man eine Schnur nach dem Gegengewicht (Antriebsgewicht). Diese Schnur wird nach dem Vorrücken (des Automaten) von dem Antriebsgewichte gespannt, dreht die kleine Achse und schiebt das Plättchen zur Seite, und sobald die Ose vom Pflocke abgesprungen ist, kommt das Weitere zur Ausführung. Unter dem Loche E stehe

eine Lampe MN mit der Flamme unter der Öffnung. Wie oben bemerkt, liege auf dem Altar Material, welches leicht angezündet werden kann. Leichter als die übrigen Dinge können das die Hobelspäne. Bewegt sich der Radkasten nun vorwärts und bleibt darauf stehen, dann wird die an das Kettchen gebundene Schnur sich spannen und das Plättchen ZH anziehen, so dafs die Öffnung frei wird und die Flamme nach oben schlägt und das Altarfeuer anzündet. Dasselbe Verfahren denke man sich auch bei dem anderen Altare, nur dafs die lockere Schlinge der Schnur gröfser sein mufs als die eben erwähnte, damit während der folgenden Bewegungen die Schnur sich spannt und das andere Feuer anzündet.

13) Μετὰ δὲ τὴν θυσίαν δεῖ ἐκ μὲν τοῦ θύρσου γάλα ἀναπιτυσθῆναι, ἐκ δὲ τοῦ σκύφους οἶνον. Γίνεται οὖν καὶ τοῦτο οὕτως· ὑπὸ τοὺς πόδας τοῦ Διονύσου συμφυῆς γίνεται σωλὴν ἔχων τρυπήματα ἐν τῇ ἐπιφανείᾳ ἐγγὺς ἀλλήλων δύο, ἐκ δὲ τούτων σωληνάρια ἀνατείνοντα εἰς τὸ ἐντὸς μέρος τοῦ Διονύσου φέροντα τὸ μὲν εἰς τὸν θύρσον, τὸ δὲ εἰς τὸν σκύφον. Ἐστω δὲ ἡ μὲν βᾶσις τοῦ Διονύσου ἡ AB, ὁ δὲ συμφυῆς τούτῳ σωλὴν ὁ ΓΔ· τὰ δὲ ἐν αὐτῷ τρυπήματα τὰ E, Z· τὰ δὲ ἐκ τούτων ἀνατείνοντα σωληνάρια τὰ ZH, EΘ, τὸ μὲν ZH εἰς τὸν θύρσον, τὸ δὲ EΘ εἰς τὸν σκύφον. ἔστω δὲ καὶ ὁ ἐπικείμενος πυρὴν τῷ ναίσκῳ ὁ ΚΛΜ. ἐντὸς δὲ τούτου ἀγγεῖον ἔστω τὸ ΝΞ μέσον διάφραγμα ἔχον τὸ O. καὶ ἐκ μὲν τοῦ NO ἀγγεῖου φερέτω σωλὴν ὁ ΠΡΣΤ εἰς τινα ἕτερον σωλῆνα τὸν ΥΦ συνεσμηρισμένον τῷ ΓΔ σωλῆνι, συμφυῆ δὲ ὄντα ἐκ τῶν ὑποκάτω μερῶν τῷ καταστρώματι, ἐφ' ὃ ὁ ναῖσκος ἐπίκειται. τὸ δὲ Τ τρύπημα κείσθω κατὰ τὸ E. ἐκ δὲ τοῦ ΞO ἀγγεῖου ... ἕτερος σωλὴν ὁ ΧΨΩϛ καὶ φέρων ὁμοίως εἰς τὸν ΥΦ σωλῆνα. τὸ δὲ ϛ τρύπημα κείσθω κατὰ τὸ Z. οὐκοῦν ἐάν τις ἐν μὲν τῷ ON ἀγγειδίῳ οἶνον ἐγγέῃ, ἐν δὲ τῷ ΞO γάλα, κειμένων τῶν E, Z τρυπημάτων κατὰ τὰ T, ϛ ἐνεχθήσεται ὁ μὲν οἶνος εἰς τὸν σκύφον, τὸ δὲ γάλα εἰς τὸν θύρσον. Ἴν' οὖν στέγη τὰ ὑγρά τὸν πρότερον χρόνον, κλείς ἔστω ἡ ϩ,T ἀποκλείουσα, ὡς εἴρηται, τὰ ὑγρά δι' ἐπιτονίου τοῦ A, περὶ ὃ ἀγκύλη σπάρτου περιβεβλήσθω χάλασμα ἴσχυουσα καὶ ἀποδοδομένη εἰς τὴν λείαν, ὅπως κατὰ τὸν δέοντα καιρὸν ταθεῖσα ἐπιστρέψῃ τὸ ἐπιτόνιον καὶ ἐνεχθῆ τὰ ὑγρά. πάλιν δὲ ἐπιστραφέντος τοῦ Διονύσου καὶ τοῦ ἐτέρου βωμοῦ ἀνακαυθέντος, δεῖ πάλιν ῥεῦσαι τὸν τε οἶνον καὶ τὸ γάλα· στρέφεσθαι δὲ οὕτως ἡμικυκλίου ἡ περιφέρεια. γεγονέτω κατὰ διάμετρον τοῖς T, ϛ τρήμασιν ἕτερα τρήματα τὰ B, Γ, καὶ ἐκ μὲν τοῦ B φερέτω σωλὴν εἰς τὸν ΡΣ ὁ B,Δ, ἐκ δὲ τοῦ Γ ἕτερος σωλὴν εἰς τὸν ΨΩ ὁ Γ,E. ὅταν ἄρα ἐπιστραφέντος τοῦ Διονύσου γένηται τὰ E, Z τρυπήματα κατὰ τὰ B, Γ, καὶ πάλιν ἀνοιχθήσεται ἡ ϩ,T κλείς, καὶ ῥεύσει ὁμοίως ὁ

τε οἶνος καὶ τὸ γάλα. [ἀνοίγεται δὲ ἡ κλεῖς ἐτέρας σπάρτου ἐπισπασαμένης τὸ ἐπιτόνιον εἰς τὰ ἕτερα ἰβάρη.] δεῖ δὲ τοὺς ΡΣ, ΨΩ σωλῆνας δι' ἐνὸς κιονίσκου τῶν ἐν τῷ ναίσκῳ κοίλου ὄντος ἐνεχθῆναι ὑπὸ τὴν βάσιν τοῦ ναίσκου, ὅπως ἀφανεῖς ὑπάρχωσιν. ἐπιστρέφεται δὲ ὁ Διόνυσος σὺν τῇ ἐπικειμένη Νίκη τῷ πυρῆνι οὕτως. καθείσθω ἄξων συμφυῆς ὦν τῇ Νίκη διὰ τοῦ πυρῆνος ὁ ςΖ εὐλύτως στρεφόμενος περὶ κνώδακα τὸν Ζ, καὶ περὶ αὐτὸν περιειληθεῖσα σπάρτος διὰ τροχίλου τοῦ Η ἀποδεδοσθῶ εἰς τὴν βάσιν τοῦ ναίσκου καὶ διὰ τροχίλου τοῦ Θ εἰς τὸ ὑπερέχον τοῦ ΓΔ σωλῆνος. οὐκοῦν ἐὰν ἐπιστρέφῃ τις τὸν ΓΔ σωλῆνα, ἀπειλήσει τὴν περὶ τὸν ςΖ ἄξωνα σπάρτον καὶ ἅμα ἐπιστρέφει τὴν Νίκη καὶ τὸν Διόνυσον· ἐπὶ τὰ αὐτὰ δὲ ἔστω μέρη ἢ ἐπιστροφή αὐτῶν· καὶ ἴσος δὲ ἔστω κατὰ τὸ πάχος ὁ ςΖ ἄξων τῷ ΓΔ σωλῆνι, ὅπως ἅμα ἀποκατασταθῶσιν ἢ τε Νίκη καὶ ὁ Διόνυσος μηδὲν παραλλάσσοντες κατὰ τὴν θέσιν. ἵνα γοῦν αὐτόματον τοῦτο γίνηται, ἐπειλήσθω ἐτέρα ἄλυσις περὶ τὴν ὑπεροχὴν τοῦ ΓΔ σωλῆνος καὶ διὰ τροχίλου τοῦ ΜΑ εἰς βάρος ἀποδεδοσθῶ τὸ ΜΒ. ὁ δὲ συγκεκοινωμένος τῷ βάρει κρίκος χειρὶ κατεχέτω καὶ σχαστηρία, καθάπερ ἐπὶ τῶν καταπελτῶν γίνεται, ὅπως τῆς σχαστηρίας ἀπολυθείσης ἀπὸ τινος σπάρτου τὸ βᾶρος κατενεχθὲν ἐπιστρέψῃ τὸν τε Διόνυσον καὶ τὴν Νίκη. καὶ ἡ ΗΘ δὲ σπάρτος δι' ἐτέρου κιονίσκου κρυπτέσθω, καθάπερ καὶ ἐπὶ τῶν σωλῆνων εἴρηται.

Nach dem Opfer soll aus dem Thyrsus Milch aufspritzen, aus dem Becher Wein. Die Ausführung ist folgende. Unter Bacchus' Füße wird ein mit ihm in Verbindung stehendes Rohr gesetzt, das auf der Oberfläche mit zwei nahe bei einander liegenden Löchern versehen ist. Von diesen steigen kleine Röhren ins Innere des Bacchus empor, eine führt nach dem Thyrsus, die andere nach dem Becher. Die Basis des Bacchus sei AB, der mit ihm verbundene Cylinder (Rohr) ΓΔ, die Löcher darin E und Z, die von da aufsteigenden Röhren ZH und EΘ, von denen ZH in den Thyrsus, EΘ in den Becher führt. Ferner sei KAM, das auf das Tempelchen gehetzte Dach; innerhalb desselben stehe ein Gefäß NΞ mit einer Scheidewand O in der Mitte. Aus der Gefäßskammer NO führe eine Röhre ΠΠΣΤ in einen anderen Cylinder (Rohr) ΥΦ, welcher mit dem Cylinder ΓΔ verpafst und von unten mit der Überdeckung verbunden ist, auf welche der Tempel gestellt ist. Die Öffnung T liege E gegenüber. Aus der Gefäßskammer ΞΟ führe eine andere Röhre ΧΨΩς in gleicherweise nach dem Cylinder ΥΦ. Die Öffnung ς liege Z gegenüber. Gießt man nun in die kleine Kammer ON Wein, in ΞΟ Milch, so wird der Wein in den Becher, die Milch

in den Thyrsus fließen, wenn die Löcher E, Z den Öffnungen T, τ gegenüber liegen. Um nun nicht gleich im ersten Augenblicke die Flüssigkeiten auslaufen zu lassen, werde ein Verschluss g_t eingerichtet, welcher, wie gesagt, die Flüssigkeiten mittelst eines Hahnes A abschließt. Um diesen lege man eine Öse einer mit einer lockeren Lage versehenen und nach dem Gegengewichte geleiteten Schnur, damit sie, im rechten Augenblicke gespannt, den Hahn umdreht und damit die Flüssigkeit (weiter) fließen kann. Wenn dagegen Bacchus sich umgewendet hat und auf dem anderen Altare das Feuer angezündet ist, so muß wiederum der Wein und die Milch fließen. Des Bacchus Drehung macht so einen Halbkreis aus. Man bohre diametral entgegengesetzt den Löchern T, S andere Löcher B, Γ; und von B führe eine Röhre BΔ nach PΣ, von Γ eine andere ΓE nach ΨΩ. Wenn also nach der Drehung des Bacchus die Löcher E, Z gegenüber B, Γ liegen, so öffnet man den Verschluss g_t wieder, und Wein und Milch fließen in gleicher Weise. [Der Verschluss wird dadurch geöffnet, daß eine zweite Schnur den Hahn nach der anderen Seite dreht.] Die Röhren PΣ, ΨΩ müssen durch eine kleine, hohle Säule am Tempel unter dessen Basis führen, damit sie nicht sichtbar sind. Bacchus dreht sich aber zugleich mit der auf dem Tempeldache stehenden Nike auf folgende Weise. Man lasse durch das Dach eine mit der Nike verbundene Achse τZ hinab, die sich leicht um einen Zapfen Z, dreht, und man leite eine um sie gewickelte Schnur mittelst einer Rolle H nach der Basis des Tempelchens und mittelst einer Rolle Θ nach dem überstehenden Ende des Cylinders ΓΔ. Wenn man nun den Cylinder ΓΔ dreht, wird man die um die Achse τZ, laufende Schnur abwickeln und zugleich Nike und Bacchus drehen. Deren Drehung erfolge aber nach derselben Richtung. An Umfang sei die Achse τZ, (bez. ihre Welle) dem Cylinder ΓΔ gleich, damit Nike und Bacchus zu gleicher Zeit unverändert in ihre frühere Stellung zurückkehren. Um diese Bewegung automatisch zu machen, wickle man eine andere Kette um den hervorstehenden Teil des Cylinders ΓΔ und leite sie über eine Rolle MA nach einem Gewichte MB. Der an dem Gewichte befestigte Ring halte dieses mit Hilfe einer Hand (Cheir, zweier handartig gebogenen Stifte) und eines Abzuges (Schasteria), wie er bei den Katapulten verwendet wird, (oben) zurück, damit das Gewicht

(erst) niedersinkt und Bacchus und Nike umdreht, sobald der Abzug von einer Schnur losgemacht (zurückgezogen) ist. Auch die Schnur $\text{H}\Theta$ leite man versteckt durch eine andere kleine Säule, wie es schon bei den Röhren angegeben wurde.

14) Μετὰ δὲ τὸ σπεῖσαι πρώτως τὸν Διόνυσον δεήσει κυμβάλων καὶ τυμπάνων κτύπον γενέσθαι. Γίνεται δὲ καὶ τοῦτο οὕτως· ἐν τῇ κάτω βάσει, ἐν ἣ εἰσι καὶ οἱ τροχοί, ἀγγεῖον τίθεται ἔχον σφαιρία μολιβᾶ συρρέοντα εἰς τὸν πυθμένα. ἐν δὲ τῷ πυθμένι τρήμα γίνεται εὐλύτως δυνάμενον δέξασθαι τὰ σφαιρία, κλειθρίον ἔχον ἀνοιγόμενον ὑπὸ τῆς σπάρτου, ὅταν δέῃ. ὑπόκειται δὲ τῷ τρήματι τυμπάνιον ἐπικεκλιμένον· καὶ τοῦτω ἐξήφθω κυμβάλιον. ἐκπίπτοντα οὖν τὰ σφαιρία χρούσει πρώτον τὸ τυμπάνιον καὶ ἐκ τούτου ἀποπίπτοντα εἰς τὸ κυμβάλιον τὸν ἦχον ἀποτελέσει. δύναται δὲ μέσον διάφραγμα λαβὸν τὸ ἀγγεῖον δύο χώρας ποιῆσαι, ὥστε ἐν ἑκατέρᾳ εἶναι σφαιρία· καὶ τὰ μὲν ἐν τῇ μιᾷ χώρᾳ τὸν πρώτον ἦχον ἀποτελεῖν, τὰ δὲ ἐν τῇ ἑτέρᾳ τὸν ἐξῆς, κλειθρίου ὁμοίως ἀνοιχθέντος.

Nach der ersten Spenda des Bacchus soll Cymbelnschlag und Trommelklang erschallen. Dies macht man folgendermafsen. In dem unteren Räume des Sockels, in welchem auch die Räder sind, wird ein Gefäfs mit kleinen, nach dem Boden hin zusammenrollenden Bleikugeln aufgestellt. In den Boden wird ein Loch gebohrt, welches die Kugeln leicht aufzunehmen vermag, und mit einem kleinen Schieber (Verschlufs) versehen, der von der Schnur im richtigen Augenblicke geöffnet wird. Unter dem Loche steht eine kleine Trommel angelehnt, und daran sei ein kleines Becken befestigt. Fallen nun die Kugeln heraus, so schlagen sie zuerst auf die kleine Pauke und rufen, indem sie von dieser auf das Becken springen, den Schall hervor. Wenn das Gefäfs in der Mitte eine Scheidewand bekommt, kann es zwei Kammern bilden, so dafs in jeder Kugeln sind und die in der einen den ersten Schall hervorbringen, die in der andern den nächsten, nachdem in ähnlicher Weise ein Schieber geöffnet ist.

15) Ἐξῆς δὲ δεῖ τὸ περιστύλιον στεφανωθῆναι τὸ ἐν τῇ βάσει. Γίνεται δὲ οὕτως· νοεῖσθω τὸ θωράκιον τὸ ἐπικείμενον ἐν τῷ τετραστύλῳ τὸ ΑΒΓΔ ἔχον ἐντὸς ἕτερον θωράκιον τὸ ΕΖΗΘ, ὥστε τὴν μεταξὺ τῶν δύο χώραν θωρακίων κενὴν ἐκ τοῦ κάτω μέρους ὑπάρχειν. γεννηθὲν δὲ πλέγμα ἐκ στεφάνων ἑτετραγώνων πλοκῆ οἷα ἐάν τις βούληται καὶ πρὸς τὴν ὄψιν εὐαρμόστως καὶ τοῦτο πτυγὲν ἐγκρύπτεται εἰς τὸν εἰρημένον μεταξὺ τῶν θωρακίων τόπον

τάς ἄνω ἀρχὰς ἐξημμένας ἔχον ἐκ τοῦ θωρακίου. καὶ ἵνα μὴ αὐτόματον καταφέρηται, σανίδιον ἐπίμηκες ἀρμόζον τῷ μεταξὺ τῶν θωρακίων τόπῳ καθ' ἐκάστην πλευρὰν τοῦ θωρακίου γίνεται, ὥστε ἐπιπωμάσαι τὸ πλέγμα καὶ συσχεῖν εἰς τὸ ἄνω μέρος. ἵνα δὲ μὴ αὐτόματα τὰ σανίδια ἀποπίπτῃ, ἐκ τῆς μιᾶς πλευρᾶς τῆς εἰς τὸ ἐντὸς τοῦ θωρακίου μέρος στρωφωμάτια εὐλύτα λαμβάνει, ἵνα ὅταν ἐπιπωμασθῇ, ἐκ τοῦ ἐτέρου μέρους ἐπιστρεπτῶ κόρακι κατέχηται, ὥστε μὴ ἀνοίγεσθαι. ἐκ δὲ τοῦ ἐτέρου μέρους τοῦ κόρακος ἀγκύλη σπάρτου περιτίθεται, ἣτις ταθείσης τῆς σπάρτου καὶ τοῦ κόρακος ἐπιστραφέντος ἀποπίπτει. καὶ οὕτως τὸ πλέγμα καθίεται. ἔξει δὲ τὸ πλέγμα εἰς τὰ κάτω μέρη βαρύλλια μολιβᾶ ἐκδεδεμένα πρὸς τὸ ταχέως καταφέρεσθαι.

Nun muss das Peristyl (d. h. die Pilaster) an dem Unterbau bekränzt werden. Das macht man so. Man stelle sich vor, dafs der äufseren Brüstung (Rahmen) ABΓΔ auf dem viersäuligen Unterbau innen ein anderer Rahmen EZHΘ entspreche, so dafs der Raum zwischen den beiden Rahmen nach unten leer ist. Es wird aber eine rechteckige Guirlande (Geflecht aus Kränzen), in beliebiger, aber dem Auge gefälliger Form geflochten; und zwar wird diese zusammengefaltet und in dem genannten Räume zwischen den beiden Rahmen versteckt gehalten, indem ihre oberen Enden an den Rahmen gebunden sind. Damit sie nicht von selbst herunterfällt, wird ein kleines, längliches Brett, das in den Zwischenraum zwischen den Rahmen pafst, auf jeder Seite des Rahmens angebracht, um die Guirlande zu verdecken und nach oben zusammenzuhalten. Damit die Breiter nicht von selbst herunterfallen, erhalten sie auf der einen Seite im Innern des Rahmens leicht drehbare Scharniere, damit sie, wenn sie zugeklappt sind, auf der anderen Seite durch einen drehbaren Winkel (Korax, Haken) festgehalten werden, so dafs sich nicht (von selbst) öffnen können. Auf der anderen Seite des Winkels legt man die Ose einer Schnur herum, welche abfällt, sobald die Schnur gespannt und der Winkel gedreht ist. Und so wird die Guirlande heruntergelassen. Unten werden an die Guirlande kleine Bleikugeln gebunden, damit sie schnell herunterfällt.

16) Τὸ λοιπὸν δὲ δὴ καταλείπεται ὑποδείξαι, πῶς αἱ Βάκχαι χορεύουσι κατὰ τὸν δέοντα καιρόν. Γίνεται οὖν καὶ τοῦτο οὕτως· ὁ ναῖσκος ὁ στρογγύλος, ἐν ᾧ ἐστὶν ὁ Διώνυσος, στυλοβάτην ἔχέτω στρογγύλον καὶ λεῖον κατὰ τὸ ὕψος. ἔστω οὖν οὗτος ὁ ABΓΔ· περὶ δὲ τοῦτον περικείσθω ἴτις ἢ EZHΘKΛMN ἀρμοστὴ τῷ στυλοβάτῃ, ὥστε εὐλύτως περὶ αὐτὸν

στρέφεσθαι. περὶ δὲ τὸν κρόταφον τῆς ΚΑΜΝ περιφερείας ἐντετορνεύσθω σωλήν, ἐν ᾧ σπάρτος ἐπειληθεῖσα ἐγκεκοιμίσθω [εἰς τὸ βάθος τοῦ σωλήνος], ἧς ἡ μὲν μία ἀρχὴ κεκρούσθω δι' ἐπιούρου εἰς τὸ βάθος τοῦ σωλήνος, ὥστε μηκέτι ἐκσπᾶσθαι· ἡ δὲ ἑτέρα διὰ τροχίλου ἀποδεδόσθω εἰς τὸ κάτω μέρος τοῦ θωρακίου καὶ ἐπειλήσθω εἰς ἕτερον σωλήνα ἐνόντα ἐν τῷ τυμπάνῳ, ᾧ συμφυῆς ἔστω ἄξων εὐλύτως στρεφόμενος. τῷ δὲ ἄξονι περιειλήσθω ἑτέρα σπάρτος καὶ ἀποδεδόσθω εἰς τὴν λείαν. συμβήσεται οὖν ταθείσης τῆς περὶ τὸν ἄξονα σπάρτου ἐπειλεῖσθαι ἐπὶ τὸ συμφυῆς αὐτῷ τύμπανον τὴν ἐκ τῆς ἴτους σπάρτον καὶ οὕτως χορεύειν τὰς Βάκχας. ἐπεὶ οὖν δις αὐτὰς δεῖ χορεύσαι, ἔχει χάλασμα διαμεμηρυμένον ἢ περὶ τὸν ἄξονα σπάρτος, ὅπως στάσις γένηται τῶν Βακχῶν διὰ τοῦ χάλασματος. ταθείσης δὲ αὐτῆς πάλιν χορεύσουσιν· ἐπικείσονται γὰρ τῇ εἰρημένῃ ἴτιαι αἱ Βάκχαι.

Es bleibt nun noch das Übrige zu zeigen, nämlich wie es kommt, dais die Bacchantinnen zu rechter Zeit tanzen. Dies wird folgendermafsen ausgeführt. Das runde Tempelchen, in dem Bacchus steht, sei mit einem runden und am Rande glatten Säulenstand (Stylobatstufe) versehen; das sei ΑΒΓΔ. Um diesen liege ein Ring ΕΖΗΘΚΑΜΝ, welcher zu der Stufe pafst, so dafs er sich leicht um ihn dreht. Rings in den äufseren Rand ΚΑΜΝ drechsle man eine Rille, auf welche eine Schnur gewickelt werde. Diese bette man in die Tiefe der Rille. Das eine Ende der Schnur stofse man mit Hilfe eines Nagels tief in die Rille, so dafs sie nicht wieder herausgezogen werden kann. Das andere Ende leite man mittels einer Rolle (innen) nach dem unteren Teile der Brüstung und wickle es in eine andere Rille, die sich in einer Welle befindet, mit welcher eine leicht drehbare Achse verbunden sei. Um die Achse sei eine andere Schnur geschlungen und (von da) nach dem Gegengewichte geleitet. Ist nun die um die Achse laufende Schnur gespannt, so wird die Folge sein, dafs die Schnur von dem Ringe sich (mittels der Rolle) auf die mit der Achse verbundene Welle wickelt und dafs so die Bacchantinnen tanzen. Da sie nun zweimal tanzen müssen, so ist die um die Achse geschlungene Schnur mit einer quergezogenen, lockeren Schlinge versehen, um die Bacchantinnen mittels des lockeren Teiles der Schnur zum Stehen zu bringen; ist die Schnur aber gespannt, werden sie wieder tanzen. Die Bacchantinnen sollen nämlich auf dem genannten Ringe stehen.

17) Ὅσοι δὲ σπάρτοι ἐκ τῆς κάτω βάσεως εἰς τὴν λείαν ἀποδίδονται, δεῖ ταύτας ἀφανεῖς

ὑπάρχειν. Γίνεται οὖν καὶ τοῦτο οὕτως· ἔστω γὰρ τὸ στόμα τῆς σύριγγος, ἐν ᾗ ἐστὶν ἡ λεία, τὸ ΑΒΓΔ, καὶ καθείσθω διὰ τοῦ ἐν τῇ σύριγγι στόματος διάφραγμα κατὰ τὴν ΕΖ εὐθειᾶν ἀπολαμβάνον τὸ ΔΕ διάστημα ὀτὶ στενότατον. ἡ μὲν οὖν κέγχρος ἐμβληθήσεται εἰς τὴν ΕΒ χώραν, αἱ δὲ σπάρτοι ἐκ τοῦ κάτωθεν μέρους ἀνενεχθήσονται εἰς τὴν ΓΔΕΖ χώραν καὶ ἀποδοθήσονται εἰς τὴν λείαν τὴν ἐν τῇ ΑΒΖΕ χώρα διὰ τροχίλου· οὕτως γὰρ ἀφανεῖς ἔσονται πᾶσαι αἱ κάτωθεν ἀναφερόμεναι σπάρτοι. ἐπεὶ οὖν πολλῶν κινήσεων γινομένων καὶ τῆς τοῦ πλινθίου πορείας πολλῆς ὑπαρχούσης ἀνάγκη [μὴ] ἔξαρκεῖν τὸ τῆς σύριγγος ὕψος, δεῖ καὶ τοῦτο μηχανήσασθαι. πρὸς μὲν οὖν τὸ μῆκος τῆς πορείας δύνανται οἱ περὶ τὸν ἄξονα δύο τροχοὶ αὐξανόμενοι πολὺ μῆκος παρέχειν ἢ τὸ τοῦ ἄξονος πάχος ἔλασσον γινόμενον· ἅπαξ γὰρ τοῦ ἄξονος στραφέντος κινήθησεται τὸ πλινθίον τηλικαύτην ὁδὸν ἠλίκη ἐστὶν ἡ τοῦ ἐνὸς τροχοῦ περιφέρεια. διὸ εὐλόγως μείζονας αὐτοὺς δεῖ πειραῖσθαι ποιεῖν.

Alle Schnüre aber, die aus dem unteren Räume des Sockels nach dem Gegengewichte geleitet werden, müssen unsichtbar sein. Das erreicht man auf folgende Weise. Es sei nämlich die Öffnung des Kastens, in welchem sich das Gegengewicht befindet, ΑΒΓΔ. Durch seine Mündung lasse man eine Scheidewand in der Richtung der geraden Linie ΕΖ mit möglichst engem Abstände ΔΕ hinab. Die Hirse wird nun in den Raum ΕΒ geschüttet, die Schnüre aber werden von unten nach dem Räume ΓΔΕΖ geführt und mittels einer Rolle nach dem Gegengewichte in dem Räume ΑΒΖΕ geleitet. So werden nämlich alle Schnüre, die von unten nach oben gehen, unsichtbar sein. Trotzdem nun viele Bewegungen auszuführen sind und die Fahrt des Radkastens lang ist, mufs doch die (geringe) Höhe des Gewichtskastens ausreichen. Daher ist noch folgende Hilfsvorrichtung zu machen. Was die Länge der Fahrt (Strecke) betrifft, so kann die Vergrößerung der beiden Räder an der Achse oder die Verkleinerung des Achsenumfanges eine recht lange Fahrt herbeiführen. Bei einer einzigen Achsenumdrehung wird nämlich der Radkasten einen so großen Weg zurücklegen, als die Peripherie des einzelnen Rades ausmacht. Deshalb mufs man verständigerdie Räder größer zu machen suchen.

B | Iconographie

B.1 Héraclès et Ladon - Jardin des Hespérides



FIGURE 103 – Héraclès dans le jardin des Hespérides, Vase peint athénien à figures rouges du V^e siècle avant J.-C., British Museum, Londres, Royaume-Uni.



FIGURE 104 – Héraclès dans le jardin des Hespérides, Gros plan du vase peint athénien à figures rouges du V^e siècle avant J.-C., British Museum, Londres, Royaume-Uni.



FIGURE 105 – Héraclès et Ladon gardant l'arbre aux pommes dorées, Assiette romaine en relief, II^e/III^e siècle après J.-C., Collections des antiquités de l'Etat, Munich, Allemagne (Cliché M. Cyron - 2013).



FIGURE 106 – Héraclès combattant Ladon dans le jardin des Hespérides, Vase peint attique à figures rouges, 460 avant J.-C., British Museum, Londres, Royaume-Uni.



FIGURE 107 – Ladon le dragon gardien des Hespérides, Amphore peinte athénienne à figures rouges du V^e siècle avant J.-C., Musée de l'Ermitage, Saint-Petersbourg, Russie (Cliché Theoi).



FIGURE 108 – Héraclès, Atlas et le Dragon Hespérien, Cratère peint athénien à figures rouges du V^e siècle avant J.-C., J. Paul Getty Museum, Los Angeles, États-Unis (Cliché Theoi).



FIGURE 109 – Nympe Hespéride et dragon Hespérien, Amphore Campanienne à figures rouges du V^e siècle avant J.-C., British Museum, Londres, Royaume-Uni (Cliché T. Herondale).



FIGURE 110 – Héraclès, les Hespérides et le Dragon Hespérien, Mosaique Gréco-romaine du III^e siècle avant J.-C., Musée national d'archéologie d'Espagne, Madrid, Espagne (Cliché Azoor - 2017).



FIGURE 111 – Atlas et le Dragon Hespérien, Vase peint laconien à figures noires du VI^e siècle avant J.-C., Musées du Vatican, Vatican, Italie (Cliché Marsyas - 2005).



FIGURE 112 – Statue en marbre d'Hercules barbu, période Flavienne, 68-98 après J.-C., Metropolitan Museum of Art , New-York, États-Unis (Cliché Metropolitan Museum of Art).



FIGURE 113 – Héraclès archer, revers d'un tétradrachme de Thasos, première moitié du IV^e siècle avant J.-C., Bibliothèque Nationale de France, Paris, France (Cliché G. Haubold - 2009).

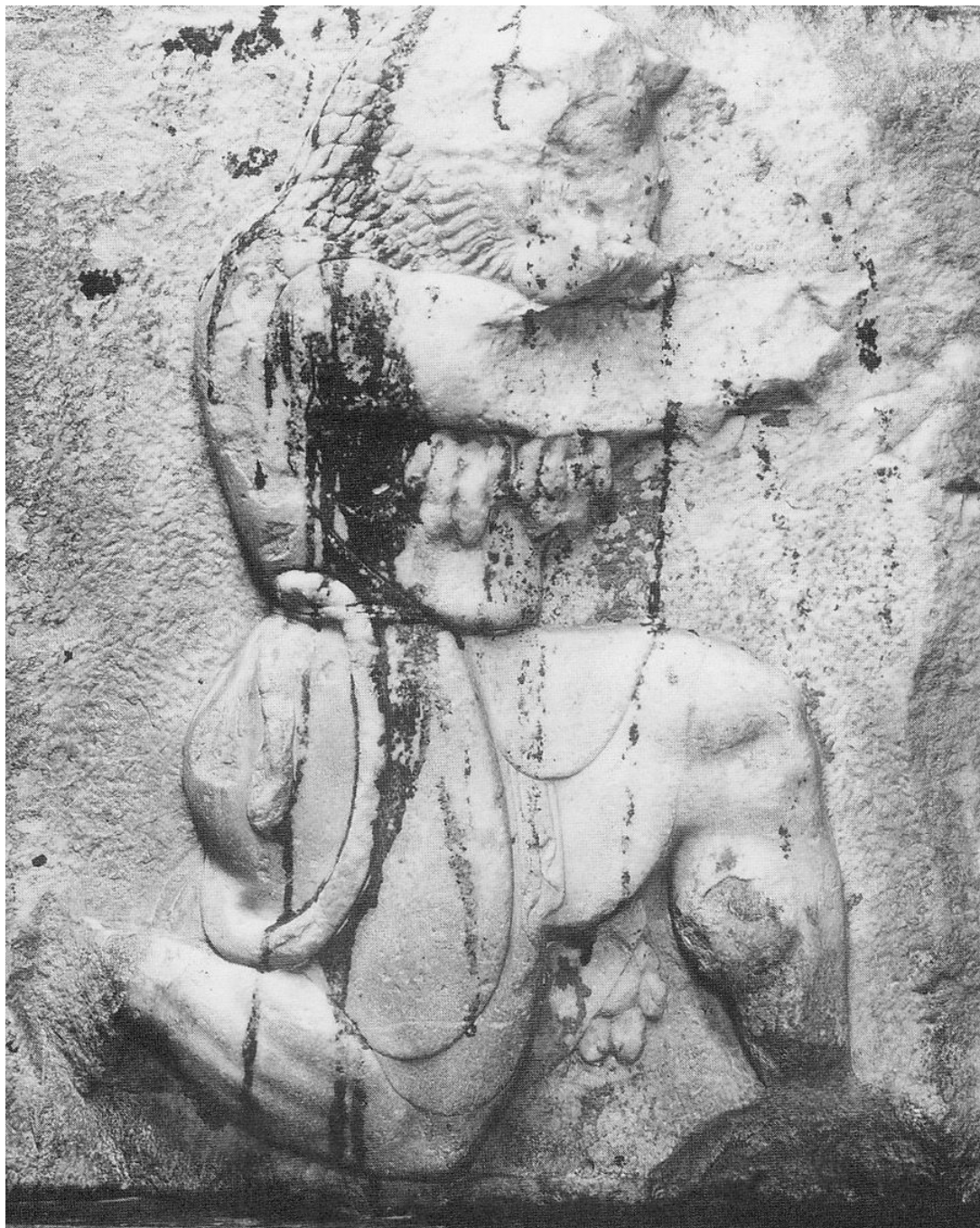


FIGURE 114 – Relief d'Héraclès archer, Thasos (ref. B. Holzmann, *La sculpture de Thasos. Corpus des reliefs I. Reliefs à thème divin*, Paris, 1994).



FIGURE 115 – Héraclès sur le fronton est du temple d’Aphaia à Égine, Glyptothèque de Munich, Munich, Allemagne (Cliché B. Saint-Pol - 2007).

B.2 Servante automatique

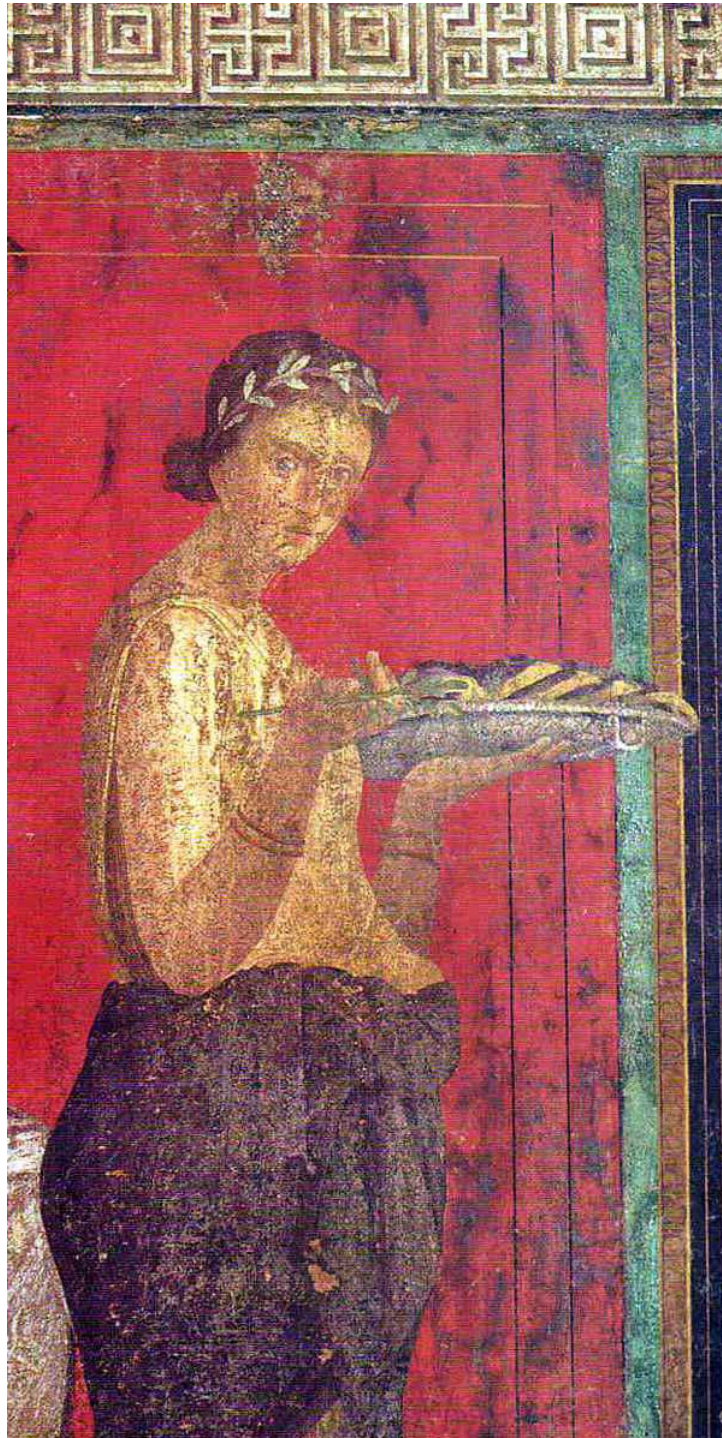


FIGURE 116 – Pompéï, Villa des Mystères (*Villa dei Misteri*) mégalographie (peinture monumentale) du *triclinium* (salle à manger) I^{er} siècle après J.-C. (Cliché Y. Forget - 2012).



FIGURE 117 – Jeune esclave présentant une boîte à bijoux à sa maîtresse assise, stèle funéraire, vers 430/410 avant J.-C., British Museum, Londres, Royaume-Uni (Cliché M.-L. Nguyen - 2006).



FIGURE 118 – Servante, vêtue d'une tunique, travaillant le sol, fresque murale, Pompéi, Italie, I^{er} siècle après J.-C. (cliché R. Delort).

B.3 Temple miniature

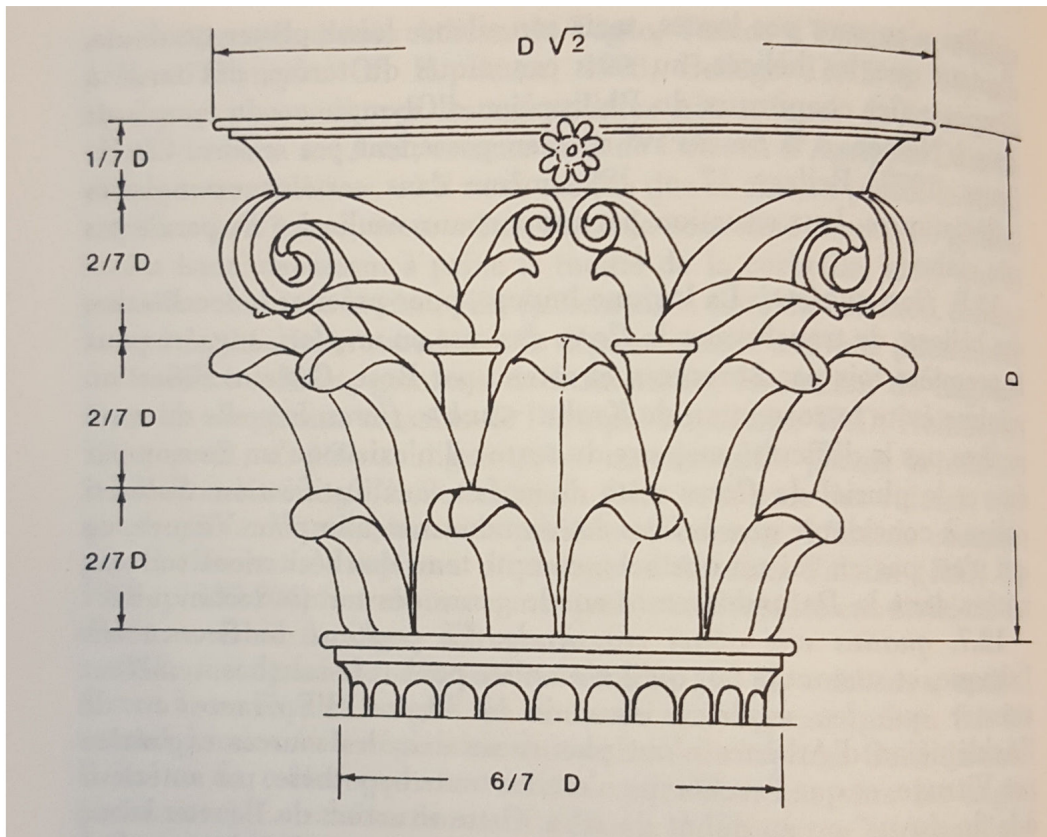


FIGURE 119 – Chapiteau corinthien selon Vitruve. (ref. Vitruve, *De l'architecture*, Livre IV, texte traduit et commenté par P. Gros, Paris, Les Belles Lettres, 2003, p.86.)

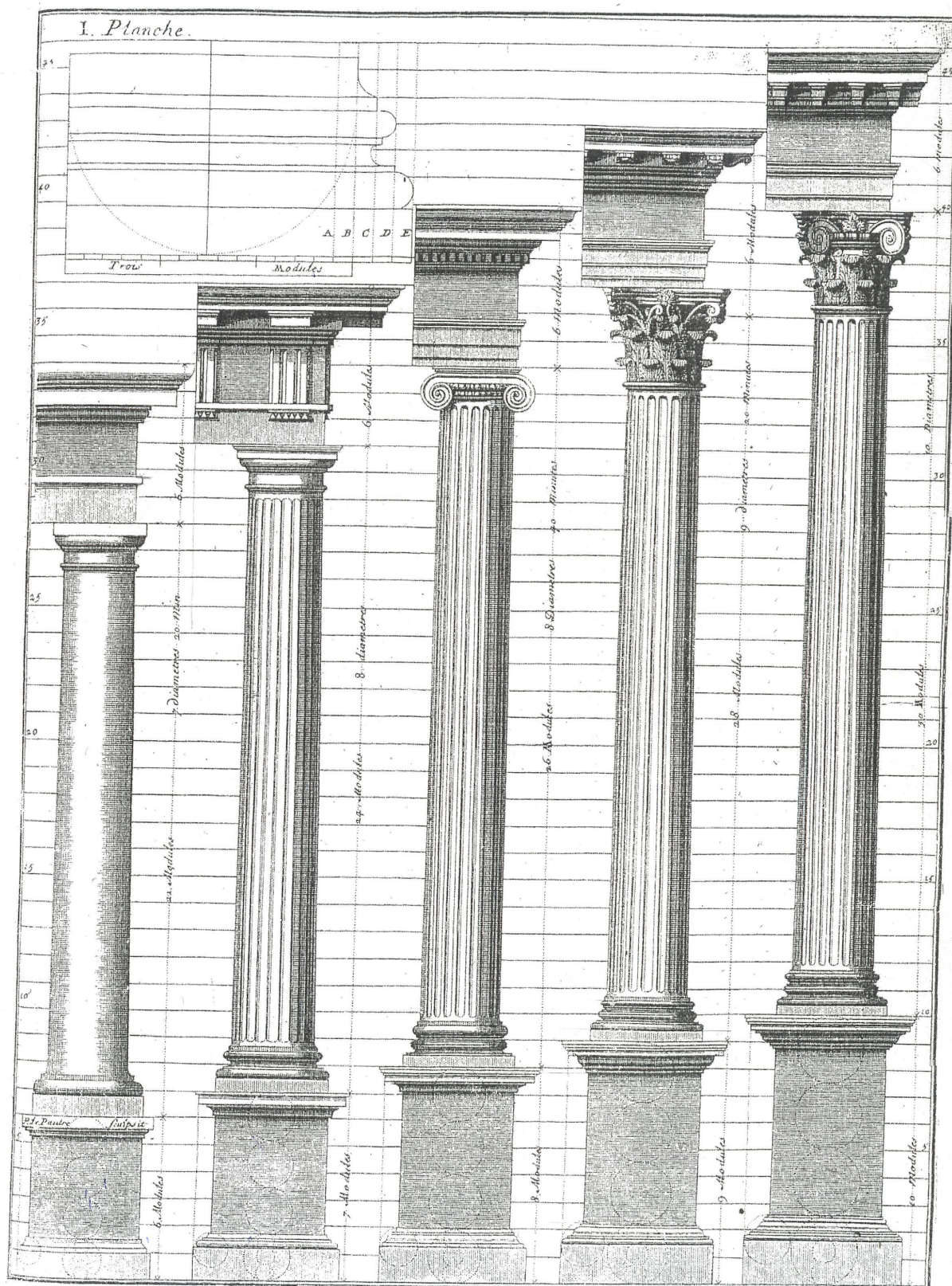


FIGURE 120 – Proportion des différents types de colonnes selon Vitruve, (ref C. Perrault, *Les dix livres d'architecture de Vitruve*, Paris, J.B. Coignard, 1683.).

B.4 La chouette et les oiseaux chanteurs



FIGURE 121 – Aryballe en forme de chouette, Provenance : Corinthe (Grèce), 640 avant J.-C., Musée du Louvre, Paris, France.



FIGURE 122 – Pièce en argent, Représentation d'une chouette sur le revers, Provenance : Athènes (Grèce), 450-406 avant J.-C., British Museum, Londres, Royaume-Uni.



FIGURE 123 – Lampe à huile romaine décorée d'une chouette, Provenance : Italie, 40-80 après J.-C., British Museum, Londres, Royaume-Uni.



FIGURE 124 – Statuette de pigeon, Provenance : Allier (France), II^e siècle après J.-C., British Museum, Londres, Royaume-Uni.



FIGURE 125 – Lampe à huile décorée avec un oiseau sur une branche, Provenance : Chypre, 40 après J.-C., British Museum, Londres, Royaume-Uni.



FIGURE 126 – Statuette en bronze d'une oie installée sur une fontaine, Provenance : Constantinople, IV^e siècle après J.-C., British Museum, Londres, Royaume-Uni.



FIGURE 127 – Poterie athénienne à figures rouges représentant une chouette, Provenance : Attique (Grèce), 475 avant J.-C., British Museum, Royaume-Uni.

B.5 Théâtre automatique à base mobile



FIGURE 128 – Dionysos sur un guépard, mosaïque dans la « Maison de Dionysos » (2,70m x 2,65m), 330-300 avant J.-C., Pella, Grèce. (Cliché S. Madeleine).



FIGURE 129 – Dionysos tenant d'une main le thyrsos et tendant de l'autre un canthare, Bas-relief d'Herculanum, Musée de Naples, Naples, Italie (cliché Sailko - 2013).



FIGURE 130 – Pièce en or. (Face) Tête d'Octave de profil. (Revers) Victoire drapée, debout sur un globe, tenant une couronne de fleurs et un vexillum, Provenance : Italie, 29-27 avant J.-C., British Museum, Londres, Royaume-Uni.



FIGURE 131 – Niké phainoméride (« à la belle cuisse »), Statue d'argile, Provenance : Nécropole de Myrina (Turquie), 175-125 avant J.-C., Musée du Louvres, Paris, France.

C | Roma in tabula

C.1 Installation et téléchargement de l'application

L'application *Roma in tabula* est disponible sur ordinateur (Windows, MACOS et Linux) et sur périphériques mobiles Android.

Pour installer l'application PC rendez vous sur :

http://www.unicaen.fr/cireve/rome/pdr_realisations.php?fichier=Romaintabula

L'installation se déroule de façon indépendante via l'interpréteur Windows.

Pour installer l'application Android, deux méthodes s'offrent à vous :

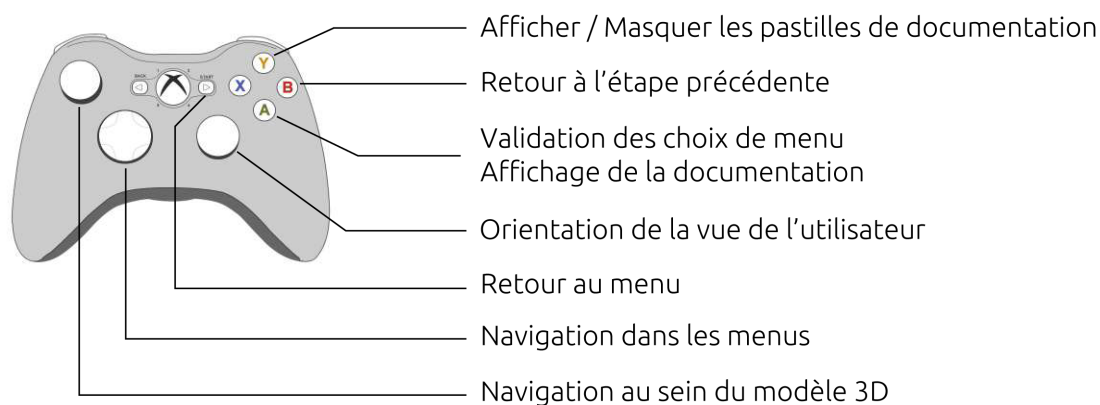
1. Rendez-vous sur : http://www.unicaen.fr/cireve/rome/pdr_realisations.php?fichier=Romaintabula
2. Ou allez sur le Google Play Store, et cherchez CIREVE pour télécharger l'application.

C.2 Comment utiliser l'application

NAVIGATION ET INTERACTION

L'application *Roma in tabula* est maintenant disponible sur ordinateur et propose deux systèmes de navigation.

XBOX 360 CONTROLLER



CLAVIER / SOURIS



Validation des choix de menu
Affichage de la documentation



Orientation de la vue de l'utilisateur



Navigation dans les menus

Navigation au sein du modèle 3D



Afficher / Masquer les pastilles de documentation



Retour au menu

FIGURE 132 – Commandes de navigation au sein de l'application *Roma in tabula* sur ordinateur.

C.3 *Roma in tabula* : Rapport de stage de Master 2

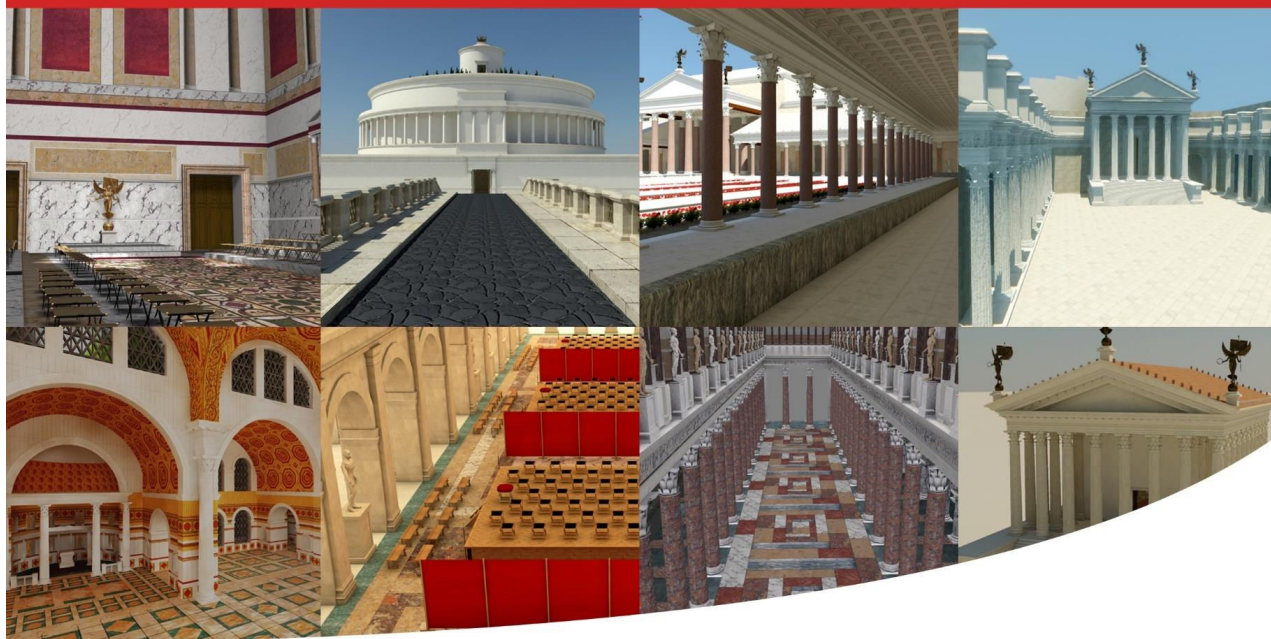
RAPPORT DE STAGE

JÉRÔME NICOLLE

ROME IN TABULA : application permettant la visite virtuelle des monuments de Rome au IV^{ème} siècle après J.-C. mêlant réalité augmentée et visite virtuelle interactive.

STAGE MASTER 2 IVI RÉALISÉ DU 28/03/2016 AU 28/08/2016
CENTRE INTERDISCIPLINAIRE DE RÉALITÉ VIRTUELLE (CIREVE)
UNIVERSITÉ DE CAEN NORMANDIE, CAMPUS 1 – MRSH – 14032 CAEN

TUTEURS : NICOLAS LEFÈVRE, SOPHIE MADELEINE ET PHILIPPE FLEURY
SOUTENANCE : 6 SEPTEMBRE 2016



NOTICE BIBLIOGRAPHIQUE

Année : 2015-2016

Numéro étudiant : 2014-2389

Centre de rattachement du projet : Arts et Métiers ParisTech Angers

Auteur : Jérôme Nicolle

Titre : Rome in Tabula - application permettant la visite virtuelle des monuments de Rome au IV^{ème} siècle après J.-C. mêlant Réalité augmentée et visite virtuelle interactive.

Encadrement du projet : Simon Richir, Arts et Métiers ParisTech Laval

Partenaire du projet : Centre Interdisciplinaire de Réalité Virtuelle

Résumé :

Depuis plus de 20 ans, l'équipe Plan de Rome travaille sur la restitution virtuelle de la Rome antique avec la volonté de ne pas s'arrêter à la restitution virtuelle mais bien de proposer de la réalité virtuelle (immersion et interaction avec l'environnement restitué). Actuellement l'objectif du CIREVE (Centre interdisciplinaire de Réalité Virtuelle) serait de donner un accès gratuit aux restitutions sur leur site internet (<http://www.unicaen.fr/cireve>). Ainsi le sujet du stage propose la réalisation d'une application Android reprenant une dizaine de monuments de Rome au IV^{ème} siècle. Pour chaque monument, un accès aux documentations scientifiques et historiques qui ont permis la restitution est présent, ainsi que deux modes de visualisation 3D : la réalité augmentée qui permet d'obtenir un aperçu global du modèle et une visite virtuelle interactive à échelle humaine qui permet d'observer la taille conséquente des constructions romaines.

Mots clés : Réalité augmentée, réalité virtuelle, visite virtuelle, restitution, modélisation 3D

PARTIE À REMPLIR PAR LE PROFESSEUR RESPONSABLE DU PROJET		
ACCESSIBILITE DE CE RAPPORT (entourer la mention choisie)		
Classe 0 = Accès libre		
Classe 1 = Confidentiel jusqu'au _____		
Classe 2 = Hautement confidentiel jusqu'au _____ (date de fin de confidentialité)		
Date :	Nom du signataire :	Signature :

Résumé :

Depuis plus de 20 ans, l'équipe Plan de Rome travaille sur la restitution virtuelle de la Rome antique avec la volonté de ne pas s'arrêter à la restitution virtuelle mais bien de proposer de la réalité virtuelle (immersion et interaction avec l'environnement restitué). Actuellement l'objectif du CIREVE (Centre interdisciplinaire de Réalité Virtuelle) serait de donner un accès gratuit aux restitutions sur leur site internet (<http://www.unicaen.fr/cireve>). Ainsi le sujet du stage propose la réalisation d'une application Android reprenant une dizaine de monuments de Rome au IVème siècle. Pour chaque monument, un accès aux documentations scientifiques et historiques qui ont permis la restitution est présent, ainsi que deux modes de visualisation 3D : la réalité augmentée qui permet d'obtenir un aperçu global du modèle et une visite virtuelle interactive à échelle humaine qui permet d'observer la taille conséquente des constructions romaines.

Mots-clés :

Réalité augmentée, Réalité Virtuelle, visite virtuelle, Restitution, modélisation 3D, Patrimoine culturel

Abstract:

For over 20 years, the team "Plan de Rome" works on the virtual reconstruction of ancient Rome with the wish not to stop on virtual reconstruction but to offer virtual reality (immersion and interaction with the 3D environment). Currently the goal of CIREVE would be to propose free 3D models on their website. The subject of the internship is the creation of an Android application showing ten buildings of Rome in the fourth century. For each building, access to scientific and historical documentation that enabled the restitution is present, as well as two 3D viewing modes: Augmented reality that provides an overview of the model and an interactive virtual tour on a human scale which allows to observe the consequent size of the Roman buildings.

Keywords:

Augmented Reality, Virtual Reality, Virtual tour, Restitution, 3D modeling, Heritage

TABLE DES MATIERES

NOTICE BIBLIOGRAPHIQUE	2
TABLE DES MATIERES	4
REMERCIEMENTS	5
AVANT-PROPOS	6
1 LE CENTRE INTERDISCIPLINAIRE DE REALITE VIRTUELLE (CIREVE)	7
1-1 Historique	7
1-2 Les différentes missions du CIREVE	8
1-3 La plus grande salle de réalité virtuelle de France	8
1-4 Présentation de l'équipe	9
2 APPLICATION « ROME IN TABULA »	10
2-1 Présentation du concept	10
2-2 Objectifs à atteindre	10
2-3 Développement de l'Application	10
2-3.1 Analyse de l'existant	10
2-3.2 Développement du squelette de l'application - StateMachine	12
2-3.3 Exports des différents modèles 3D vers Unity	19
2-3.4 Insertion de la documentation scientifique et historique	22
2-3.5 Premier prototype et première phase de test	25
2-3.6 Nouveaux objectifs	25
2-4 Ajout de nouveaux monuments	26
2-5 Utilisation du travail effectué	29
PERSPECTIVES ET CONCLUSION	31
TABLE DES ILLUSTRATIONS	32
GLOSSAIRE	33
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES ET WEBOGRAPHIQUES	34
ANNEXES	35
Annexe 1 – Questionnaire Post-expérimentation	36
Annexe 2 – Affiche de la dernière Nocturne du Plan de Rome - 1 ^{er} juin 2016	37
Annexe 3 – Exemple de Documentation au format XML	38
Annexe 4 – Intégration de différents modèles dans la salle immersive	39

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier toutes les personnes qui ont contribué au succès de mon stage et qui m'ont aidé lors de la rédaction de ce rapport.

Je tiens à remercier Mr Simon RICHIR et Mr Olivier CHRISTMANN, pour leurs enseignements tout au long des deux années du Master IVI (Ingénierie du Virtuel et de l'Innovation), et qui m'ont permis d'obtenir des acquis et ainsi favoriser le bon déroulement du stage.

Je tiens à remercier vivement mon maître de stage M. Nicolas Lefèvre ainsi que M. Philippe Fleury et Sophie Madeleine, pour leur accueil, le temps passé ensemble et le partage de leur expertise au quotidien. Grâce aussi à leur confiance, j'ai pu m'accomplir totalement dans mes missions avec leur aide précieuse dans les moments les plus délicats.

Je remercie également toute l'équipe du « Plan de Rome » pour son accueil, son esprit d'équipe et en particulier M. Philippe Fleury pour m'avoir intégré à son équipe.

Enfin je tiens à remercier toutes les personnes qui m'ont conseillé et relu lors de la rédaction de ce rapport. Je remercie également toutes les personnes que je n'ai pas citées et qui m'ont fait avancer.

AVANT-PROPOS

Ce rapport de stage se veut être la synthèse de mon expérience professionnelle dans le domaine de la réalité virtuelle et augmentée, acquise au sein du Centre Interdisciplinaire de Réalité Virtuelle (Cireve) de l'Université de Caen Normandie, du 28 mars au 28 août 2016. L'expérience acquise s'inscrit dans le cadre du stage de fin d'étude du Master Recherche « Ingénierie du Virtuel et de l'Innovation » (IVI) dispensé par l'école des Arts et Métiers ParisTech de Laval.

Ce stage s'insère dans le cadre d'un projet visant à proposer gratuitement les restitutions virtuelles de Rome par l'intermédiaire d'une application de Réalité augmentée. Cette application met en place également des visites virtuelles interactives sur périphériques Android.

Ainsi, le sujet de ce stage présente la réalisation d'une application qui sera disponible gratuitement sur le marché Android, permettant de visualiser les restitutions virtuelles de Rome au IV^{ème} siècle après J.-C. Cette réalisation s'appuiera sur la technologie de la réalité augmentée et proposera également de s'immerger à l'intérieur de bâtiments, à l'aide d'une visite virtuelle interactive.

Dans un premier temps, je décrirai la structure d'accueil en développant ses activités, ses ressources et son organisation ainsi que les objectifs attendus sur le développement de l'application. Puis, dans une deuxième partie, je développerai la phase de conception et de réalisation en présentant les spécificités de l'application. Enfin, je conclurai en précisant mes apports au projet, les expériences tirées de ce stage et les perspectives.

1 LE CENTRE INTERDISCIPLINAIRE DE REALITE VIRTUELLE (CIREVE)

1-1 Historique

L'université de Caen Normandie possède une maquette de la Rome du IV^{ème} siècle après J.-C. réalisée par Paul Bigot (1870/1942). Cette construction en plâtre de 70 m² (11m x 6m) est bien plus qu'une œuvre d'art. Il s'agit en effet d'un véritable objet de recherche scientifique et il intègre avec une incroyable précision l'ensemble des connaissances de l'époque sur la topographie de la Rome antique. Paul Bigot travaillait naturellement sur l'ensemble des sources anciennes (sources textuelles, iconographiques et archéologiques) et son œil d'architecte archéologue permettait de synthétiser l'ensemble, dont on mesure toujours aujourd'hui la complexité. Une des meilleures preuves de la précision de ce travail est la confrontation de la maquette de Bigot avec une scène satellite de la ville moderne où les principaux bâtiments de la Rome antique se repèrent très bien. Tant sur le calage des bâtiments que sur le tracé viaire, l'architecte a réalisé un remarquable travail, alliant les considérations scientifiques au regard esthétique de l'œuvre [Plan de Rome, 2016].



Figure 1- Maquette en plâtre de Paul Bigot (Plan de Rome)

La présence de cette maquette à l'université de Caen, a permis, en 1994, la création d'une équipe de recherche travaillant sur la restitution virtuelle de Rome à la même époque (équipe ERLIS - Équipe de Recherche sur les Littératures, les Imaginaires et les Sociétés – EA 4254). Suite à cela est créé en mars 2006, le Centre Interdisciplinaire de Réalité Virtuelle, plateau technique de l'université de Caen et marque déposée, associant les compétences de scientifiques et d'infographistes pour créer des environnements virtuels pour tous les domaines de la recherche [CIREVE, 2016].

1-2 Les différentes missions du CIREVE

Les missions principales du CIREVE sont :

- La mutualisation des équipements de réalité virtuelle (clusters, projecteurs, écrans, interfaces...).
- La mutualisation des compétences et l'organisation de formations.
- La promotion et le soutien de l'utilisation de la réalité virtuelle dans la recherche, aussi bien pour les sciences humaines et sociales que pour les sciences exactes et expérimentales.
- Le stockage et la structuration de modèles virtuels, l'organisation de l'accès à ces informations pour les étudiants, les enseignants, enseignants-chercheurs et chercheurs, les personnels techniques et administratifs et les partenaires extérieurs à l'établissement.
- L'organisation et la fourniture de l'assistance technique et du conseil nécessaires lors de l'acquisition de matériel de réalité virtuelle et de son utilisation.
- L'assistance et la formation pour le montage des projets en réalité virtuelle.
- La valorisation du Plan de Rome par la réalité virtuelle.

Depuis 2006 le CIREVE a de nombreuses réalisations à son actif :

- Le mémorial de Caen virtuel.
- L'Université de Caen avant la 2^{ème} guerre mondiale.
- Notre Dame de Saint Lô avant la 2^{ème} guerre mondiale.
- Rome au IV^{ème} siècle après J.-C.
- Vieux-la-romaine au II^e siècle après J.-C.
- Caen en 1936.

1-3 La plus grande salle de réalité virtuelle de France

Depuis le début de l'année 2016, le CIREVE s'est doté d'une salle de réalité virtuelle : une salle immersive de 290 m² (dont 45 m² de surface de projection), l'une des plus performantes de France en milieu universitaire. L'installation est composée de 2 écrans latéraux (9,60 m x 3 m), 1 écran de face (4,80 m x 3 m) et 1 écran de sol (9,60 m x 4,80 m). Bilan : 16 millions de pixels. 7 projecteurs 3D Christie permettent de projeter des images sur les écrans, et un système de tracking est également présent (17 caméras Vicon Bonita, 1024 x 1024 pixels, 240Hz, et un Oculomètre Dikablis Ergonners).

« Cette salle permettra des expérimentations dans des domaines très variés : santé, neuropsychologie, activités physiques et sportives... Par exemple, des patients souffrant de troubles de l'oreille interne seront invités à plonger dans des piscines ou des labyrinthes virtuels dans le cadre de leur thérapie. D'autres, touchés par la maladie d'Alzheimer, testeront leur mémoire », explique Sophie Madeleine, ingénieur de recherche au CIREVE. « La réalité virtuelle permet aussi, dans le cadre de nos axes de développement, de représenter et de visualiser interactivement et en trois dimensions des environnements disparus, dégradés, inaccessibles ou futurs. Exemples : le modèle virtuel de la Rome antique ou encore la modélisation en 3D du Caen d'avant-guerre ».

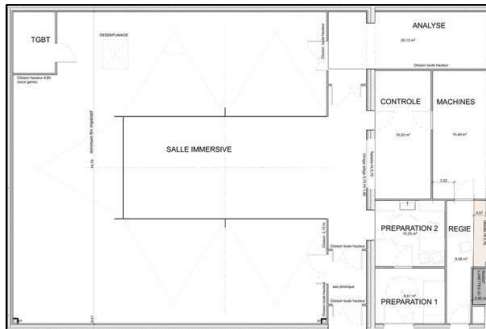


Figure 2 - Plan de la salle immersive

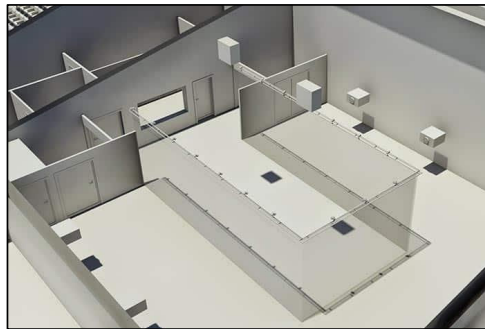


Figure 3 - Représentation 3D de la salle immersive

1-4 Présentation de l'équipe

Pendant toute la durée de mon stage, j'ai eu le privilège de travailler avec l'équipe pluridisciplinaire du plan de Rome composée de :

- [Philippe FLEURY](#), professeur de Latin - Responsable du Plan de Rome, spécialiste des techniques antiques, validation scientifique.
- [Sophie MADELEINE](#), Ingénieur de recherche en analyse de sources anciennes, Validation scientifique, théâtre de Pompée, machines romaines.
- [Nicolas LEFEVRE](#), Infographiste 3D et développeur, Images de synthèse 3DS Max, développement sur CryEngine et Unity.
- [Charlie MORINEAU](#), Infographiste 3D, Images de synthèse 3DS Max
- [Agnès GILLET](#), Infographiste 3D, Images de synthèse 3DS Max.
- [Karim SAMMOUR](#), Doctorant, spécialité : Les machines de siège romaines
- [Noémie GAUTIER](#), Doctorante, spécialité : Les animaux domestiques à Pompéi

2 APPLICATION « ROME IN TABULA »

2-1 Présentation du concept

Depuis plus de 20 ans, l'équipe Plan de Rome travaille sur la restitution virtuelle de la Rome antique avec la volonté de ne pas s'arrêter à la restitution virtuelle mais bien de proposer de la réalité virtuelle (immersion et interaction avec l'environnement restitué). Actuellement l'objectif du CIREVE (Centre interdisciplinaire de réalité virtuelle) serait de donner un accès gratuit aux restitutions sur leur site internet (<http://www.unicaen.fr/cireve>).

Ainsi le sujet du stage propose la réalisation d'une application Android reprenant une dizaine de monuments de Rome au IV^{ème} siècle. Pour chaque monument, un accès aux documentations scientifiques et historiques qui ont permis la restitution est présent, ainsi que deux modes de visualisation 3D : la réalité augmentée qui permet d'obtenir un aperçu global du modèle et une visite virtuelle interactive à échelle humaine qui permet d'observer la taille conséquente des constructions romaines. L'application nommée « Rome In tabula » permettra à terme d'avoir accès à une liste conséquente de monuments romains restitués tels qu'ils étaient, sous le règne de l'empereur Constantin au IV^{ème} siècle après J.-C.

2-2 Objectifs à atteindre

Pour produire cette application, plusieurs objectifs ont été émis en début de stage :

- Récupération des modèles 3D (optimisés pour CryEngine) pour les exporter sur Unity
- Réalisation d'un squelette d'application sobre et efficace (menu + interface)
- Intégration de 10 bâtiments dans les deux modes de visualisation (RA + VR)
- Intégration de la documentation scientifique et historique propre à chaque bâtiment
- Avoir une application fluide et fonctionnelle
- Utilisation de la charte graphique du Plan de Rome

Cette liste d'objectifs n'étant pas fermée, d'autres objectifs viendront tout au long du stage afin d'obtenir une application la plus complète possible.

2-3 Développement de l'Application

2-3.1 Analyse de l'existant

La réalité augmentée n'est pas une affaire nouvelle au sein du CIREVE. En effet, deux applications sont disponibles gratuitement sur le marché Android [Google Play Store, 2016]. Le premier objectif sera de les analyser pour regrouper leurs points forts et leurs points faibles, en vue d'améliorer l'expérience utilisateur et de fournir une application la plus ludique possible pour toucher un large panel de personnes.

Les deux applications développées auparavant par le CIREVE, reposent sur la même architecture. Au début nous avons accès à un mode « réalité augmentée » (cf. Figure 4) qui nous permet d’observer globalement le modèle 3D restitué. Puis, dans un second temps, nous avons la possibilité de naviguer à échelle humaine à l’intérieur de ce dernier (cf. Figures 6 & 7). Dans les deux cas, nous avons un accès à des documentations scientifiques et historiques qui nous en apprennent davantage sur la façon dont la restitution 3D a été effectuée (cf. Figure 5).

Les applications donnent accès à des restitutions de Caen d’avant-guerre (Université et Hôtel de ville) pour la première, et du Panthéon (époque de la Rome antique) pour la seconde. Elles ont, toutes les deux, été développées à l’aide de Vuforia [Vuforia, 2016] et d’Unity (qui a l’avantage d’être multiplateformes) [Unity, 2016]. Elles ont donc accès aux mêmes fonctionnalités.

Liste des fonctionnalités présentes :

- Système de capture d’écran
- Activer/désactiver les points d’information
- Partage sur les réseaux sociaux
- Accès aux modes « visite virtuelle » ou réalité augmentée
- Fonction gyroscope pour la visite virtuelle
- Navigation à l’aide de joysticks virtuels pour la visite virtuelle
- Galerie d’images et texte descriptif dans les documentations

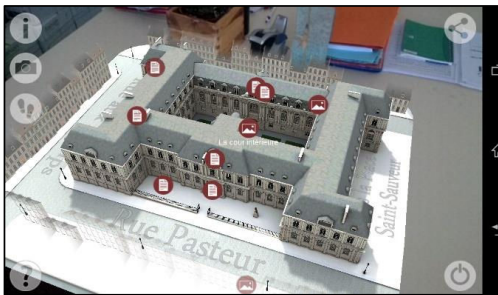


Figure 4 - Mode Réalité augmentée



Figure 5 – Documentation scientifique et historique

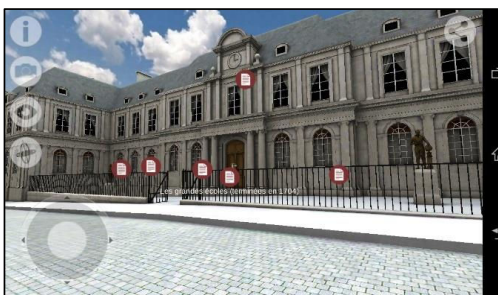


Figure 6 - Navigation joystick + gyroscope



Figure 7 - Navigation double joysticks

Suite à l’analyse de ces applications, plusieurs points forts et plusieurs points faibles sont ressortis. Pour une meilleure compréhension, ils sont regroupés dans le tableau ci-dessous.

Points Forts	Points Faibles
<ul style="list-style-type: none"> • L'interaction avec le modèle est présente dans les deux modes, ce qui permet de rendre l'utilisateur acteur 	<ul style="list-style-type: none"> • Absence de menu d'accueil
<ul style="list-style-type: none"> • La réalité augmentée est réactive 	<ul style="list-style-type: none"> • Icones dispersées sur l'écran
<ul style="list-style-type: none"> • La navigation est fluide et ludique 	<ul style="list-style-type: none"> • Accès aux mentions légales complexe
<ul style="list-style-type: none"> • Rendu graphique du modèle 3D 	
<ul style="list-style-type: none"> • Les documentations sont simples et précises 	
<ul style="list-style-type: none"> • L'application est non gourmande en ressources informatiques 	

Tableau 1 - Points forts et points faibles des précédentes applications du CIREVE

2-3.2 Développement du squelette de l'application - StateMachine

Pour commencer le développement de l'application, nous avons mis en place une machine d'états, fonctionnalité étudiée lors du cours de programmation Unity de M. Kacem Bekri [Bekri, 2015]. Une machine d'états permet un découpage clair du fonctionnement d'une application. Cela consiste, à l'intérieur d'une même scène, à séparer en plusieurs parties les différentes fonctionnalités de l'application. Dans le cas de l'application « Rome In Tabula », nous avons décidé d'utiliser 4 états : INTRODUCTION, MENU, RA et VISITEVIRTUELLE. Le premier état permettant d'introduire l'application, le second d'afficher le menu principal et les deux autres de choisir entre les deux fonctionnalités de l'application (réalité augmentée ou visite virtuelle interactive). Pour pouvoir faire appel à chaque état, nous devons créer une énumération (*enum*)-(cf. Figure 8) regroupant les différents états listés ci-dessus. Cette énumération donne naissance à notre Machine d'états.

```
public enum STATE
{
    INTRODUCTION = 0,
    MENU,
    RA,
    VISITEVIRTUELLE,
    COUNT
}
```

Figure 8 - StateMachine.cs - Énumération des différents états

Pour accéder à un état par l'intermédiaire du script, il suffit d'appeler l'énumération *STATE* suivi d'un point et de l'état que nous souhaitons (ex : *STATE.VISITEVIRTUELLE*). Cela permettra d'afficher l'état

correspondant et de masquer les autres dans la Machine d'états située dans la hiérarchie du projet (cf. Figure 9). La navigation dans l'application, par la Machine d'états, permet de mieux fractionner les différentes fonctionnalités, mais offre aussi un avantage non négligeable. En effet, cette dernière étant suffisamment souple, il n'est pas difficile de l'étendre et de lui ajouter de nouvelles fonctionnalités.

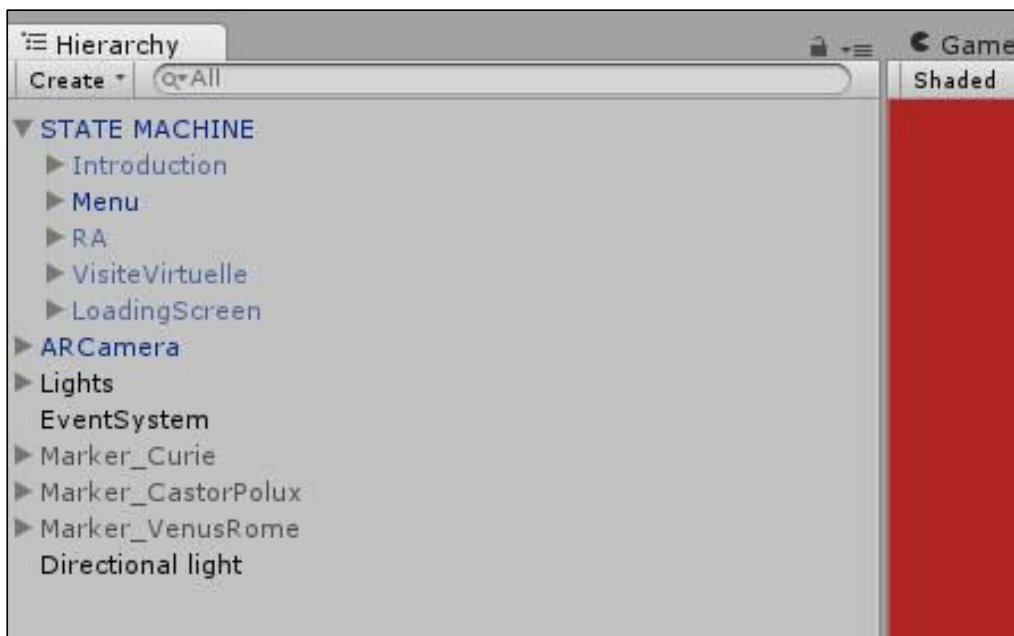


Figure 9 - StateMachine dans la hiérarchie du projet Unity

State : INTRODUCTION

Son nom est suffisamment explicite. Il s'agit de l'état permettant d'introduire l'application. Pour cela, nous avons décidé d'utiliser deux logos qui vont apparaître et disparaître (sous forme de fondu) sur fond blanc avant de laisser place au menu principal de l'application. Cette introduction permet de montrer la marque du laboratoire ainsi que celle de l'université (cf. Figure 10 & 11).



Figure 10 - Logo université de Caen Normandie

Figure 11 - Logo Cireve

Aucune interaction n'est possible pendant l'introduction. Une fois le défilement des logos terminé, le menu principal apparaît. Cette phase d'introduction dure 3.5 secondes.

State : MENU

Figure 12- Menu principal de l'application

Comme annoncé ci-dessus, le menu principal de l'application apparaît après l'introduction (cf. Figure 12). Il reprend la charte graphique du plan de Rome. Les différents boutons sont disposés de manière à être facilement accessibles. La lecture de ce menu d'accueil se fait naturellement de gauche à droite et de haut en bas. En haut à gauche le logo de l'application est présent, suivi en dessous des cinq boutons interactifs du menu. Ensuite sur la droite nous avons la présence de visuels 3D de certaines restitutions qui seront présentés à l'utilisateur au cours de l'application. Et enfin dans le bas, sont regroupés les logos des différentes institutions qui soutiennent le projet.

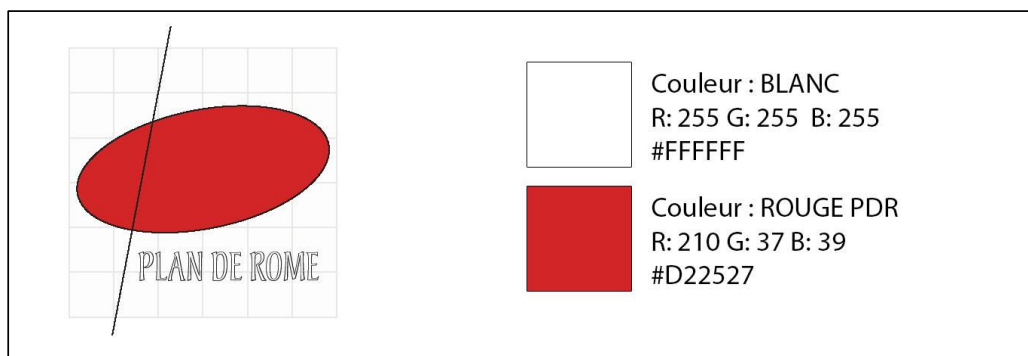


Figure 13 - Charte graphique du plan de Rome

Pour la charte graphique de l'application, nous avons décidé d'utiliser les couleurs présentes sur le logo du Plan de Rome, à savoir le Blanc et le Rouge PDR (référence au Plan de Rome), (cf. Figure 13). Quant à la police choisie, il s'agit de *Ubuntu-L*, une police sobre et simple, sans serif, qui suffit à fournir les informations essentielles (cf. Figure 14).

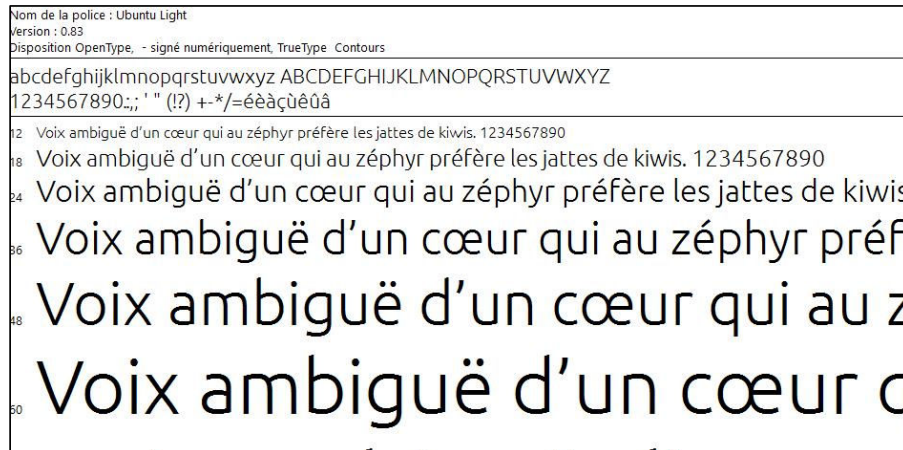


Figure 14 - Police Ubuntu-L

La position des différents boutons a été judicieusement étudiée afin de fournir la meilleure expérience possible à l'utilisateur (cf. Figure 12). En effet, les boutons sont à portée de main de l'utilisateur et le texte est suffisamment grand et explicite pour éviter toute ambiguïté. La zone interactive des boutons doit aussi être de taille conséquente, supérieure à 44 pixels [SimpleWeb, 2013] [UXMatters, 2013]. Le placement de la bannière de navigation sur le côté gauche est purement réfléchi, c'est la première chose que nous voulons montrer à l'utilisateur.

Comme vous l'avez remarqué, nous avons utilisé cinq boutons pour le menu principal : le premier permet de lancer le mode Réalité augmentée, le second donne accès à une galerie dans laquelle nous pouvons choisir le monument que nous voulons visiter, le troisième montre le descriptif du laboratoire (cf. Figure 15), le quatrième nous livre les informations sur les aspects techniques, et le dernier nous permet de quitter l'application.



Figure 15 - Description du CIREVE au sein de l'application

Une fois que l'utilisateur a observé les différents boutons présents, sa vision se dirige sur la droite de l'écran pour apercevoir les différents visuels 3D de bâtiments qui illustrent le reste du menu. En effet, ces visuels permettent d'avoir une pré-vision de ce que pourra observer l'utilisateur lors des visites des monuments romains.

En bas de l'écran, une bannière est présente afin de montrer les institutions qui soutiennent ce projet : Normandie Université, Université de Caen Normandie, Cireve, ERLIS, ERSAM et Plan de Rome (cf. Figure 16).



Figure 16 - Logos des différentes institutions

State : VISITEVIRTUELLE



Figure 17 - Menu d'accueil des visites virtuelles

Ce menu apparaît quand on appuie sur le deuxième bouton du menu principal. Il affiche une liste de huit monuments par page (cf. Figure 17). Chaque visite virtuelle possède les mêmes fonctionnalités. En cliquant sur un des bâtiments, la fonction envoie une chaîne de caractère *string*, qui va permettre de lancer la scène correspondante (ex : si on clique sur le premier bâtiment, la Curie julienne, ce dernier va renvoyer la chaîne de caractère *Curiejulienne* qui va permettre de lancer la scène du même nom).

Un bouton « Retour au menu », symbolisé par une flèche, est présent afin de pouvoir retourner au menu principal.

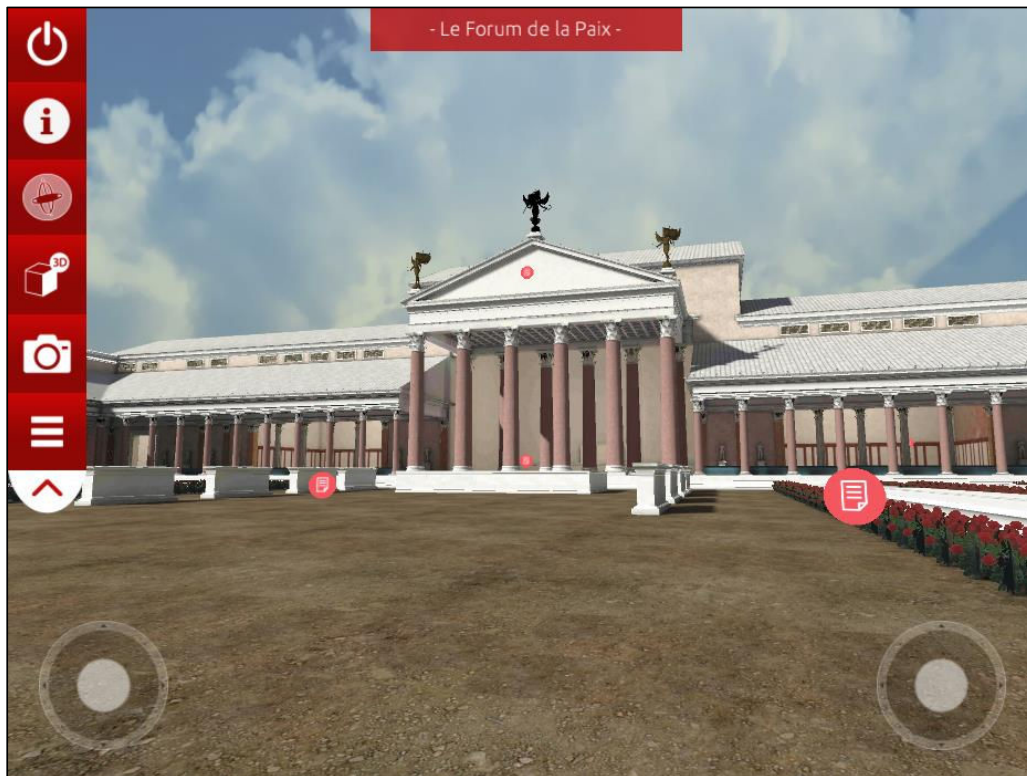


Figure 18 - Visite virtuelle du Forum de la Paix

Une fois la scène correspondante lancée, nous sommes immergés virtuellement au sein d'un monument romain à échelle humaine (cf. Figure 18). Comme nous l'avons énoncé précédemment, chaque monument possède les mêmes fonctionnalités, regroupées à travers un menu déroulant sur la gauche de l'écran. Un texte donnant le nom du bâtiment est présent sur le haut de l'écran, facilitant sa reconnaissance. Les pastilles rouges dispersées sur le modèles, correspondent aux points d'informations. En cliquant dessus vous pourrez avoir accès à des documentations scientifiques et historiques (cf. 2-3.4). Les fonctionnalités principales sont les suivantes :

- Navigation par le biais de joysticks virtuels (cf. Figure 18). Lors de la navigation avec le gyroscope, le joystick droit disparaît car les rotations s'effectuent par le mouvement du périphérique mobile.
- L'interaction avec le modèle 3D se fait par l'intermédiaire de pastilles rouges donnant accès aux documentations.
- Le premier bouton permet de quitter l'application sans devoir retourner au menu principal.
- Le deuxième bouton permet d'afficher et de masquer les pastilles des documentations (par défaut, elles sont masquées).
- Le troisième bouton permet d'activer ou de désactiver le gyroscope.
- Le quatrième bouton permet de retourner au mode réalité augmentée.
- Le cinquième bouton permet de prendre une capture d'écran de l'application.
- Le dernier bouton permet de retourner au menu.

State : RA

Ce mode servira de support au guide touristique sur la Rome Antique que M. Philippe Fleury et Mme Sophie Madeleine sont en train de rédiger. En effet ce guide offrira des plans de monuments que l'on pourra scanner pour observer leur restitution virtuelle. Comme le mode « visite virtuelle », le mode « réalité augmentée » donne l'accès aux documentations par le biais de pastilles rouges. Ce mode nous permet d'obtenir un aperçu global du bâtiment contrairement à la visite virtuelle, qui elle, se veut immersive.

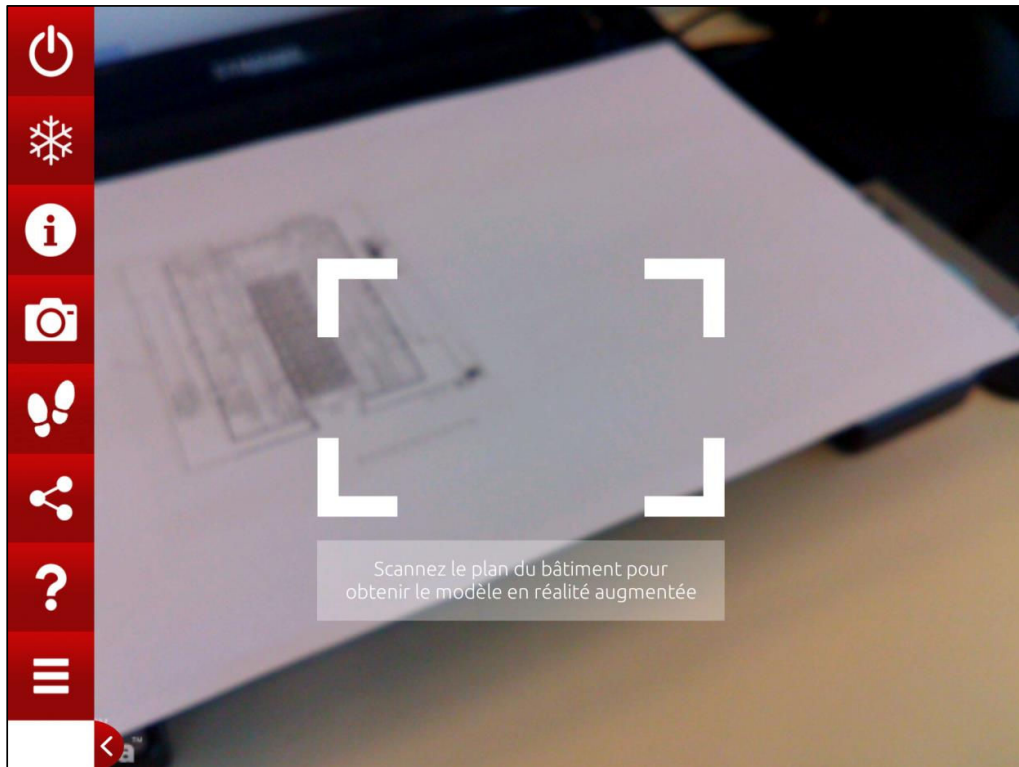


Figure 19 - Mode « réalité augmentée »

Au premier coup d'œil nous pouvons observer la présence d'une barre de navigation rétractable offrant 7 fonctionnalités (cf. Figure 19). Ensuite nous apercevons au centre de l'écran un rectangle de tracking nous indiquant de scanner un plan. Une fois le tracking du bâtiment établi, un cadre rouge apparaît dans le coin inférieur droit indiquant son nom (cf. Figure 20).

Ce mode offre les fonctionnalités suivantes :

- La première fonctionnalité est le *Freeze* : elle permet de stopper le tracking pour permettre à l'utilisateur d'observer le modèle sans devoir se préoccuper de la position du marqueur.
- La deuxième fonctionnalité permet d'afficher et de masquer les pastilles rouges destinées à l'affichage des documentations.
- La troisième fonctionnalité permet d'effectuer une capture d'écran de l'application.
- La quatrième fonctionnalité permet de basculer en mode visite virtuelle.

- La cinquième fonctionnalité permet de partager l'expérience sur les réseaux sociaux.
- La sixième fonctionnalité permet d'afficher l'aide, afin de comprendre les différentes actions représentées sous forme d'icônes.
- La dernière fonctionnalité permet un retour au menu principal.

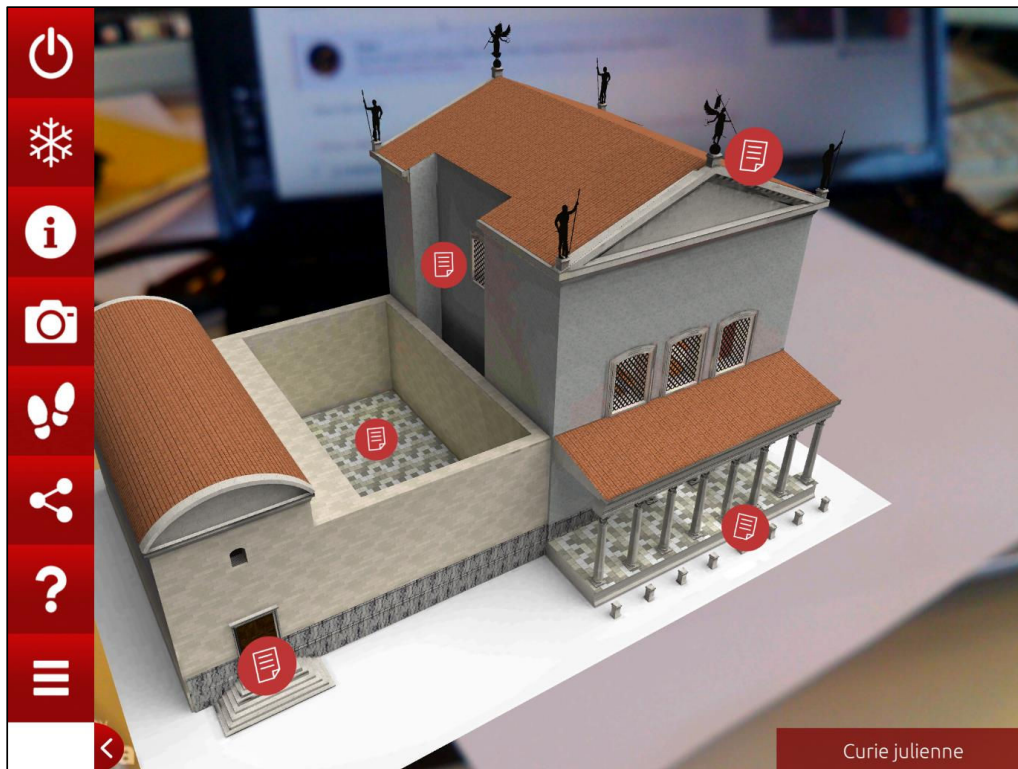


Figure 20 - Tracking d'un bâtiment en réalité augmentée

2-3.3 Exports des différents modèles 3D vers Unity

Une des premières tâches du stage a été de convertir une dizaine de restitutions 3D de CryEngine vers Unity. Voici la liste des bâtiments soumis à une exportation sous Unity :

- La Curie julienne
- Le temple de Castor et Pollux
- Le Forum de la Paix
- Le Forum de Nerva
- La Basilique de Constantin
- La Basilique julienne
- La Basilique émilienne
- Le Mausolée d'Auguste
- Le Mausolée d'Hadrien
- Les thermes de Caracalla
- Le théâtre de Pompée

Du fait de leurs exports sous CryEngine, les bâtiments sont relativement lourd (de 100 000 polygones à 3 Millions de polygones chacun) et leurs *shaders* de textures ne sont pas compatibles avec Unity. Il a donc fallu récupérer la base de données de textures pour les réattribuer une à une dans 3DS Max. Pour pouvoir réaliser cette action, il faut auparavant changer le *shader* du *Material* CryTiff en *shader* Blinn (cf. Figure 21). Une fois cette longue tâche effectuée, il nous reste plus qu'à nettoyer le modèle. En effet le modèle récupéré comprend des LODs (niveau de détails) qu'il nous faut supprimer afin de ne garder qu'une seule géométrie par objet. L'export en FBX pour Unity est alors possible. Une fois importé, nous avons changé le type de *Material* pour chaque bâtiment en utilisant le *Material* de type *Mobile*, dont le but est d'augmenter les performances de l'application (cf. Figure 22).

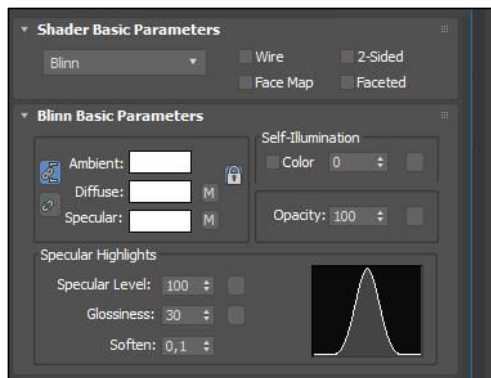


Figure 21 - Shader Blinn dans 3DS Max

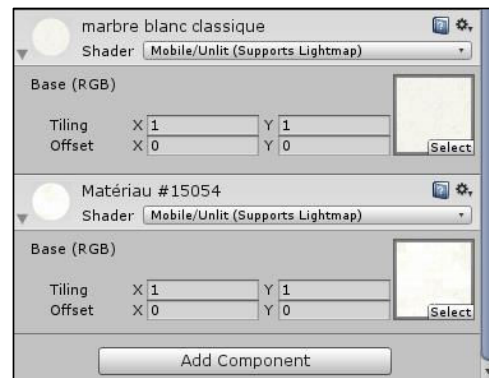


Figure 22- Shader Mobile dans Unity

Les deux étapes qui suivent sont à réaliser pour chaque bâtiment. Elles permettent de gagner en performance et d'optimiser nos différentes scènes.

LIGHTMAPPING

Le *lightmapping*, ou texture de lumières, permet de calculer les ombres et l'illumination globale de la scène Unity, en la stockant dans une texture. La technique entraîne un gain de performance tout en affichant des ombres très détaillées. Elles ne seront ainsi pas à calculer lors du lancement de l'application. Le calcul de *Lightmaps* nécessite que les lumières et les objets de la scène soient statiques. Nous avons donc effectué différents tests sur un petit monument romain (la Curie julienne) et nous avons réussi à obtenir de bons résultats avec les réglages ci-dessous (cf. Figure 23).

OCLUSION CULLING

L'*occlusion culling* est une opération qui permet d'afficher uniquement ce qui est présent devant et à une certaine distance de la caméra. Elle augmente considérablement les performances de l'application. La première étape consiste à créer un *GameObject* vide dans votre *Hierarchy* et à lui attribuer le composant *Occlusion Area*. Le logiciel va créer une boîte qui va permettre de définir la zone d'occlusion. Dans un second temps, il faut jouer avec les réglages pour que celle-ci englobe la totalité du modèle 3D. Ensuite il ne reste plus qu'à lancer le *Baking* de la scène. Vous trouverez ci-dessous les réglages que nous avons adoptés concernant cette optimisation (cf. Figure 24).

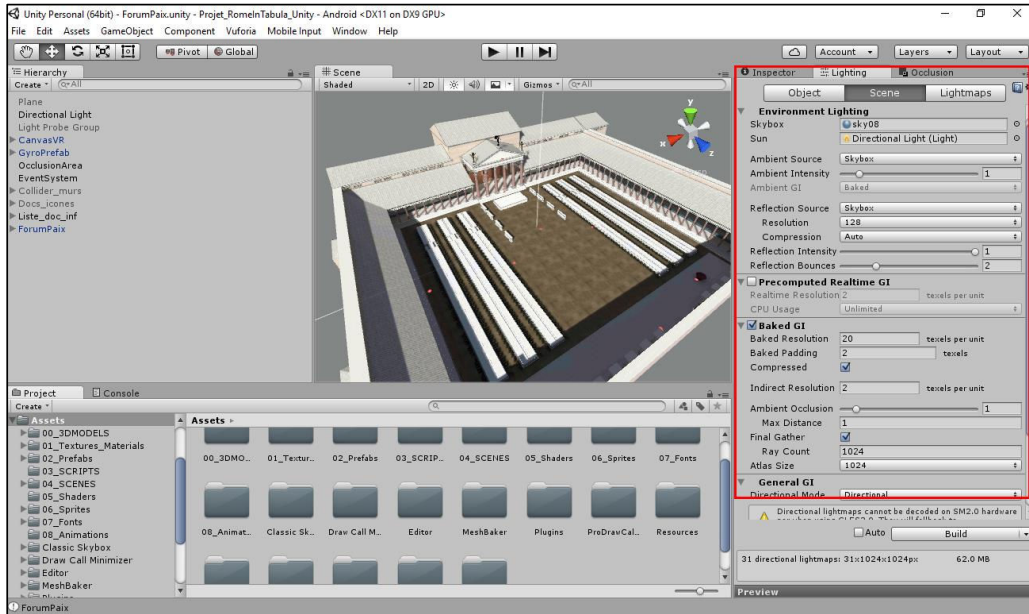


Figure 23 - Réglages des lightmaps

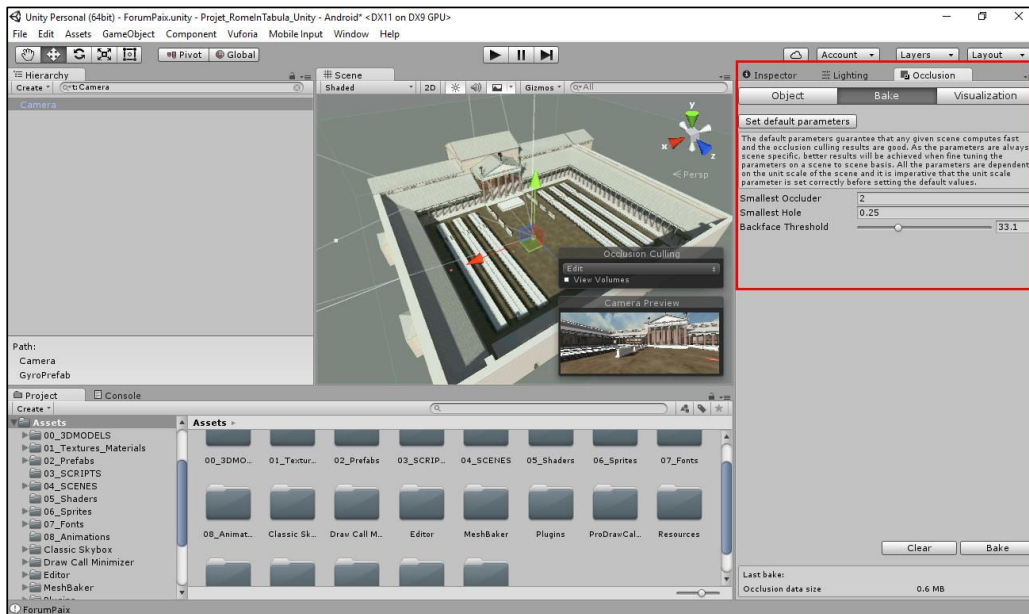


Figure 24 - Réglages de l' Occlusion Culling

2-3.4 Insertion de la documentation scientifique et historique

Mausolée d'Hadrien

>> Le Mausolée d'Hadrien aujourd'hui

↶

🔊

☰

Comme Auguste l'avait déjà fait en construisant son mausolée sur le Champ de Mars, l'empereur Hadrien (117-138 ap. J.C.) érigea un sépulcre monumental pour lui et ses successeurs.

Le mausolée d'Hadrien, aujourd'hui Château Saint-Ange, se situe sur la rive droite du Tibre dans la région du Vatican. Commencé en 130 ap. J.-C., il ne fut terminé qu'en 139, un an après la mort d'Hadrien.

Le soubassement du sépulcre est un carré de 89 m de côté et de 15 m de haut. Il porte un cylindre, d'un diamètre de 64 m et d'une hauteur de 21 m, surmonté d'une tour carrée. Cette masse cylindrique était recouverte par un tumulus de terre, planté de cyprès. Au centre de la construction, s'élevait un gros pilastre surmonté d'un quadrigé en bronze doré avec la statue d'Hadrien représenté sous la forme du dieu Hélios. Le mur extérieur de l'enceinte était revêtu de marbre. On pouvait y lire une série d'épithèques funéraires mentionnant les personnes qui étaient ensevelies à l'intérieur du monument. Dans la chambre sépulcrale (8 m sur 8 m), située au centre du monument, était déposée l'urne funéraire de l'empereur. Par la suite, la structure du mausolée d'Hadrien intéressa les stratèges militaires (les statues servirent de projectiles lors de l'assaut des Goths en 537 ap. J.-C.) et le bâtiment fut transformé en château, probablement au IXe siècle. On lui donna la fonction de forteresse par la construction de quatre tours d'angle. Tous les empereurs de la dynastie des Antonins ainsi que les Sévères jusqu'à Caracalla (211-217 ap. J.-C.) furent ensevelis dans ce monument.

- Galerie d'images -






(Fig. 1) Le mausolée et le pont Aelius (Fig. 2) Traces du parement ancien
(Fig. 3) Vue depuis le château St Ange (Fig. 4) La niche du couloir d'entrée

Figure 25 - Documentation du Mausolée d'Hadrien

L'accès à la documentation permet de découvrir des informations scientifiques et historiques sur le modèle concerné. Elle permet à l'utilisateur d'approfondir ses connaissances et de découvrir des faits historiques de l'époque de la Rome antique. Ces informations enrichissent l'application en lui apportant du contenu, rédigé par les chercheurs de l'équipe du Plan de Rome.

Chaque documentation comprend 5 éléments : trois boutons de navigations, le titre du bâtiment concerné, le titre de la documentation, le texte explicatif et une galerie d'images (cf. Figure 25). Pour permettre une mise à jour constante, les documentations ont été rédigées sous format XML (cf. Annexe 3 – Exemple de Documentation au format XML).

« Le XML, acronyme d'eXtensible Markup Language (qui signifie : langage de balisage extensible), est un langage informatique qui sert à enregistrer des données textuelles. Ce langage a été standardisé par le W3C en février 1998 et est maintenant très populaire. Ce langage, similaire à l'HTML de par son système de balisage, permet de faciliter l'échange d'information sur internet. Contrairement à l'HTML qui présente un nombre finit de balises, le XML donne la possibilité de créer de nouvelles balises à volonté. » [InfoWebMaster, 2016]

Le format choisi permet entre autres de structurer les informations [W3C, 2015] et de pouvoir facilement remplacer le contenu sans devoir modifier le projet Unity. Chaque monument possède une ou plusieurs documentations, référencées à l'aide d'identifiants (cf. Figure 26). Lors de notre navigation au sein de l'environnement 3D, nous allons interagir avec différentes pastilles d'information. Chaque pastille renverra alors à son identifiant. C'est à ce moment-là que le script ira chercher dans le document XML, l'identifiant correspondant et remplira les informations demandées.

```
<?xml version = "1.0" encoding="UTF-8" standalone="yes" ?>
<document>

  //Nom du batiment
  <building>
    <name></name>
  </building>

  //Liste des documentations relatives au batiment
  <documentation id="1" //identifiant servant à repérer la documentation
    <title></title> //Titre de la documentation
    <paragraph> //Texte explicatif
    </paragraph>

    //Galerie d'images
    <images>
      <img>
        <source></source>
        <legend></legend>
      </img>
    </images>

  </documentation>

  //Bibliographie
  <bibliographie>
    <text_bibliographie>
      <text></text>
    </text_bibliographie>
  </bibliographie>
</document>
```

Figure 26 - Balisage du document XML

La présence des trois boutons de navigation permet un retour au menu, une lecture audio des documentations ainsi qu'un affichage des bibliographies et du sommaire, qui lui regroupe la liste des documentations relative au bâtiment concerné (cf. Figure 27).

La galerie d'images est interactive. Un clic sur une image permet son agrandissement. Nous pouvons alors étudier plus en détails la photographie. Un simple *swipe* (mouvement horizontal du doigt sur l'interface tactile du périphérique) sur le côté permet de changer d'image sans quitter le mode *zoom*. Pour les réfractaires au *swipe*, des flèches sur les côtés permettent la navigation entre les images (cf. Figure 28).

Les documentations donnent à l'utilisateur les informations historiques et scientifiques, issues de différentes recherches. Elles permettent de mieux comprendre l'usage qui était fait du lieu au IV^{ème} siècle. Pour que l'usage des documentations soit optimal, il reste à trouver une méthode pour apporter la justification du texte sous Unity (car ce n'est pas présent en natif) et pour implémenter la lecture audio des documentations.

Forum de la Paix

- Liste des Documentations -

- > L'avant corps dans le temple de la Paix
- > Les canaux et les rosiers
- > Le fronton du temple de la Paix
- > La Forma Urbis Romae
- > Le mur mitoyen avec le forum de Nerva
- > Le plan au sol du forum de la Paix
- > Le portique du forum Vespasien
- > Le temple de la Paix
- > La vasque en porphyre

- Bibliographie -

F. Coarelli "Pax templum", L'UR, IV, 1999, p. 67-70.

Crypta Balbi - Fori imperiali, Archeologia urbana a Roma e interventi di restauro nell'anno del Grande Giubileo, Roma, Kappa, 2000 (voir notamment des chapitres de S. Rizzo, "Il progetto fori imperiali", p. 62 à 79; R. Santangeli Valenzani, "I Fori imperiali in età post-classica: i Fori di Cesare, Nerva e pace", p. 79 à 83; P. Gusberti, "L'area archeologica centrale di Roma. I Fori imperiali: oltre lo scavo", p. 103 à 114; M. Birzì, F. Pagano, G. Ricci, "Fori Imperiali: l'informatizzazione dei dati di scavo", p. 124 à 128).

R. H. Darwall-Smith, "Emperors and Architecture: a study of Flavian Rome", Latomus, 231, 1996, p. 35 à 74.

S. Fogagnolo, "Il Foro della Pace", Forma Urbis, itinerari nascosti di Roma Antica, 6, 2005, p. 4 à 14.

N. Louise, Le Templum Pacis ou la légitimation de la dynastie flavienne. Mémoire de maîtrise dir. par C. Bustany, Université de Caen Basse-Normandie, 2006.

R. Meneghini, R. Santangeli Valenzani, I Fori imperiali, Gli scavi del Comune di Roma (1991-2007), Roma, Viviani Editore, 2007.

Mitteilungen des Deutschen Archäologischen Instituts, Römische Abteilung, 108, 2001, (voir notamment E. La Rocca, "La nuova immagine dei Fori Imperiali. Appunti in margine agli scavi", p. 171 à 215; S. Rizzo, "Indagini nei Fori Imperiali. Foro di Cesare, Foro di Augusto, Templum Pacis", p. 215 à 245; R. Santangeli Valenzani, "I Fori Imperiali nel Medioevo", p. 269 à 287).

L. Ungaro (dir.), Il museo dei Fori Imperiali nei mercati di Trastevere, Roma, Electa, 2007 (voir notamment le chapitre de M. P. del Moro, "Il tempio della Pace", p. 170 à 177).

A. Viscogliosi, I Fori imperiali nei disegni d'architettura del primo cinquecento. Ricerche sull'architettura e l'urbanistica di Roma, Rome, Gangemi editore, 2000.B37


Figure 27 - Sommaire et bibliographie

Mausolée d'Hadrien

>> Le Mausolée d'Hadrien aujourd'hui

Cor
mal
(1.1
ses
Le
situ
Cor
an
Le
et
me
Cet
ter
s'él
don
dia
mal
me
l'im
sur
l'ur
mal
stat
531
pro
For
les

Sévères jusqu'à Caracalla (211-217 ap. J.-C.) furent ensevelis dans ce monument.



la coupe d'entrée

(fig. 1) Le mausolée et le pont Aelius

Figure 28 - Zoom sur la galerie d'images

2-3.5 Premier prototype et première phase de test

Pour évaluer l'ergonomie et la prise en main de l'application, nous avons organisé une phase de test en ouverture d'une Nocturne du plan de Rome, le 1^{er} juin 2016. Une Nocturne du Plan de Rome est une conférence portant sur un thème précis de la Rome Antique mêlant histoire et restitutions virtuelle (ex : La dernière nocturne était intitulée – Le forum boarium : de l'échouage du panier de Romulus et Rémus à l'accostage des bateaux marchands [cf. Annexes 2 – Affiche de la Nocturne]). Elles ont généralement lieu au sein d'un amphithéâtre avec retransmission de l'immersion dans CryEngine. Ces Nocturnes permettent de présenter le travail de restitution élaboré par l'équipe du Cireve.

Nous avons lancé la phase de test sur un panel de 23 personnes, dont l'âge varie de 10 à 70 ans. Qu'ils soient néophytes ou utilisateurs aguerris, chaque personne devait remplir un formulaire de questions à la fin de la séance de test (cf. Annexes 1 – Questionnaire Post-Expérience). Les réponses ainsi récupérées ont permis de corriger des problèmes ou d'ajouter des fonctionnalités que nous n'avions pas envisagées.

Les testeurs n'ont eu accès qu'à un seul bâtiment lors de l'expérimentation (seul l'aspect ergonomique et la prise en main de l'application étaient évalués, non le contenu) : la Curie julienne.

Les 23 personnes ont testé l'application dans les deux modes de visualisation : la réalité augmentée et la visite virtuelle interactive. Pour faire le test, nous disposions de deux tablettes, tournant sous Android 4.4 Kitkat :

- Une tablette Samsung Galaxy Tab 2.
- Une tablette HTC Nexus 9.

Lors de cette première phase de tests, les utilisateurs ont été agréablement surpris par la facilité d'utilisation de l'application, mais ils ont aussi listé quelques points à améliorer. Ils ont, par ailleurs énoncé le souhait de pouvoir utiliser indépendamment les deux modes de visualisation. Nous avons proposé de créer un système de catalogue qui permettrait de choisir quel bâtiment visiter, indépendamment de la réalité augmentée (cf. Figure 17).

Les autres points mineurs à corriger sont :

- Des problèmes de collision rencontrés au cours de l'expérimentation.
- Des textes trop petits pour des personnes présentant des problèmes de vues.

2-3.6 Nouveaux objectifs

Pendant le développement de l'application, au cours du stage, des nouveaux objectifs sont apparus :

- Rechercher des optimisations pour un gain de *fps* sur certains modèles (actuellement 30 à 70 selon le bâtiment)
- Terminer à 100% l'intégration des documentations (trouver une méthode de justification du texte et d'implémentation de la lecture audio des textes).
- Implémenter de nouveaux bâtiments afin de garnir l'application.

2-4 Ajout de nouveaux monuments

Pour permettre d'actualiser rapidement le contenu de l'application, nous avons développé une méthode simple qui permet d'ajouter, dans des délais très courts des nouveaux monuments dans la liste existante.

La première étape consiste à créer une scène vierge, à supprimer la *MainCamera* et à importer le modèle 3D (au format FBX) dans le dossier 00_3DMODELS qui regroupe tous les bâtiments (cf. Figure 29). Dans les paramètres d'importation du modèle 3D, il faut cocher la case *Generate LightMap coordinate* (**Attention** : étape indispensable pour le calcul des Lightmaps plus tard).

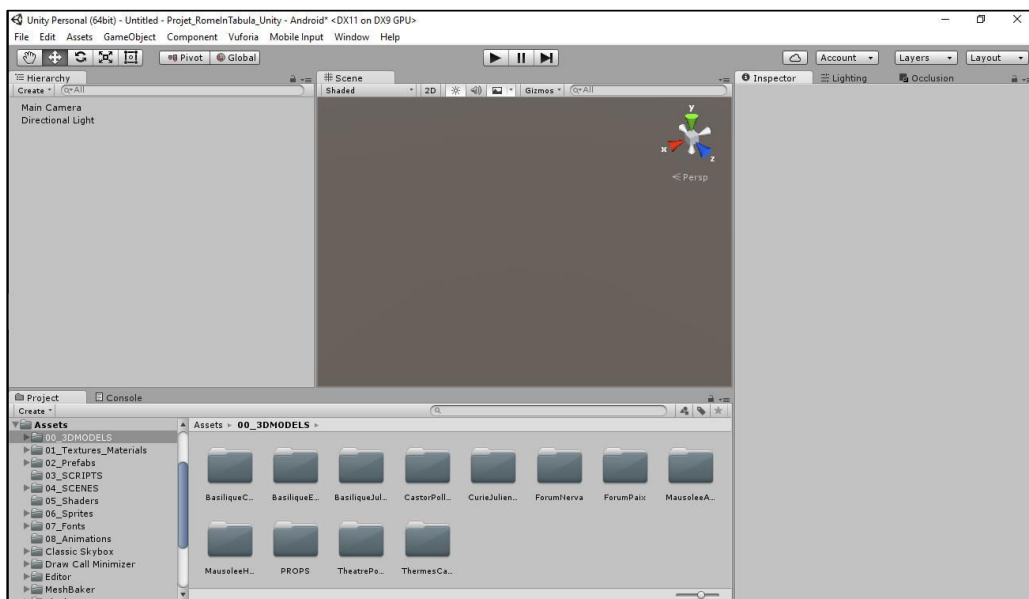


Figure 29 - Création de la scène et importation du modèle 3D

La deuxième étape consiste à glisser le modèle 3D dans la scène et le placer aux coordonnées (0,0,0). Ensuite, nous allons glisser deux *prefabs* dans la scène, un correspondant à l'interface et l'autre à la navigation dans la scène (cf. Figure 30). Pour réaliser cette opération, il suffit de se rendre dans le dossier 02_Prefabs et d'utiliser les deux *prefabs* suivants :

- *CanvasVR* : il s'agit d'un préfabriqué contenant toute l'interface. Une seule modification est nécessaire : ce *prefab* contient un objet nommé *NameBuilding* dans lequel il faudra rentrer le nom du nouveau bâtiment importé.
- *GyroPrefab* : ce préfabriqué permet d'implémenter la navigation dans la scène. Il faut simplement positionner où nous voulons la caméra sur le modèle 3D.

Pour que la navigation soit possible, il faudra enfin intégrer les *colliders* au modèle 3D en utilisant des primitives simples telles que les boîtes, les sphères, les cylindres etc...

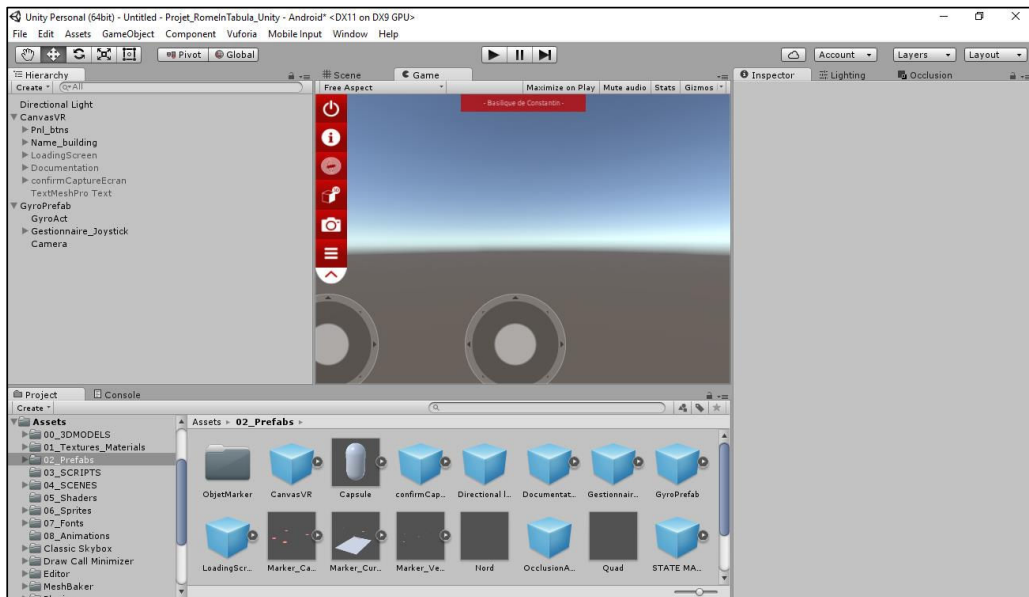


Figure 30 - Implémentation des deux préfabriqués

L'étape suivante est la génération des textures de lumières (Lightmaps). Tout d'abord nous avons besoin d'orienter, selon notre souhait, la lumière du soleil représentée par la lumière directionnelle. Une fois l'orientation effectuée, nous devons définir notre lumière comme statique (cf. Figure 31). Pour cela rendez-vous dans l'Inspector et cocher la case *Static*. Ensuite pour le modèle, c'est la même chose, nous devons le passer en *Static* pour que le calcul des Lightmaps s'effectue. C'est à ce moment ci que nous pouvons lancer le calcul des lumières avec les réglages énoncés dans la partie 2-3.3.

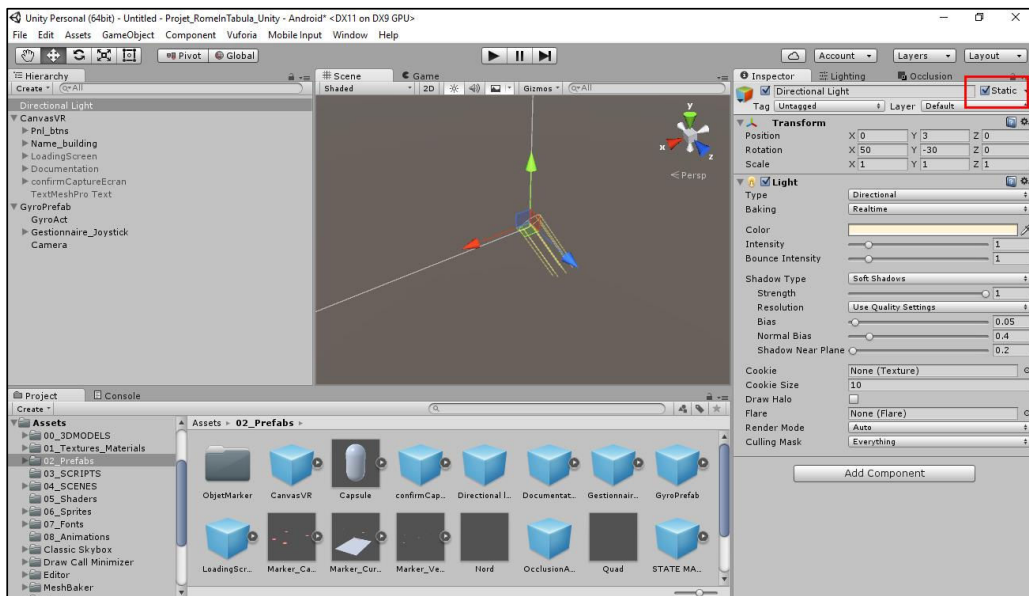


Figure 31 - Orientation de la lumière et choix du mode Static

Une fois le calcul des textures de lumières effectué, il nous faut calculer l'*occlusion culling*. Pour cela, nous allons créer un *GameObject* vide dans notre *Hierarchy* et lui attribuer le composant *Occlusion Area*. Il faut que la boîte ainsi créée englobe le modèle 3D. Ainsi n'hésitons pas à jouer avec les réglages de la boîte. Maintenant récupérons les réglages énoncés dans la partie 2-3.3 et lançons le calcul de l'occlusion (cf. Figure 32).

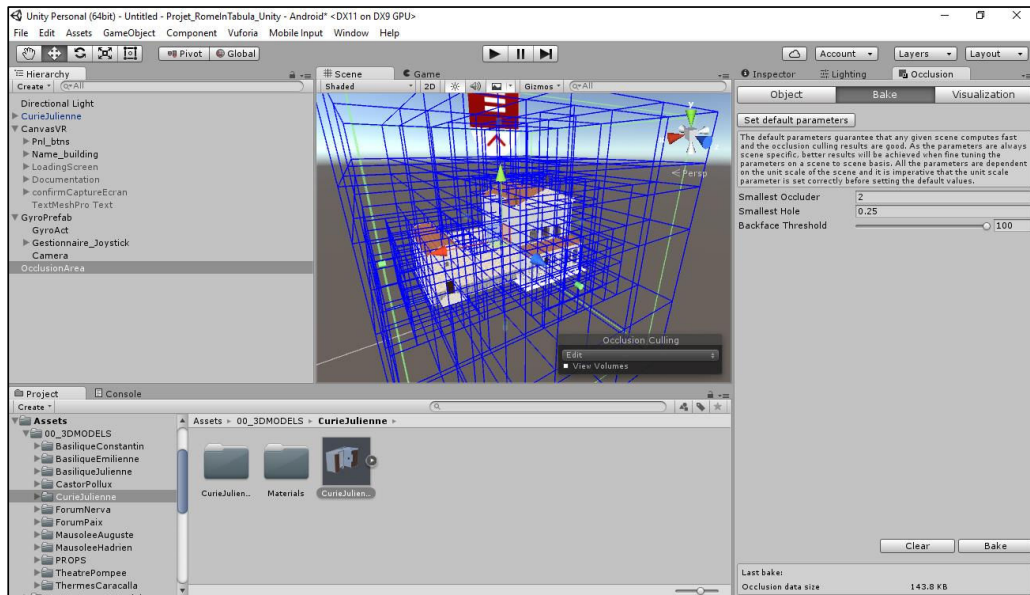


Figure 32 - Calcul de l'Occlusion Culling

L'avant dernière étape consiste à enregistrer la scène et à placer les points d'informations. La scène doit porter le nom du bâtiment. Si ce dernier possède plusieurs mots, attachez-les tous en mettant une majuscule à chaque début de mots. Pour les points d'informations, nous allons utiliser le préfabriqué *PointInf* présent dans le dossier *O2_Prefabs*. Nous allons placer autant de points d'informations que nous avons de documentations relatives à ce nouveau bâtiment. Si plusieurs points sont présents dans la scène, pensez à changer l'identifiant de chacun dans l'onglet *Inspector*. Pour que les interactions fonctionnent, il faut placer le fichier XML contenant les documentations et portant le même nom que la scène dans le dossier *Resources* (cf. Figure 33).

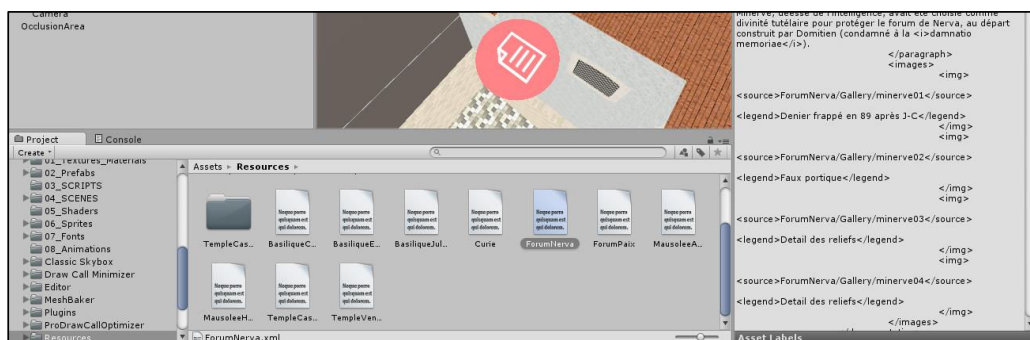


Figure 33 - Localisation des fichiers XML

La dernière étape consiste à ajouter notre bâtiment à la liste des bâtiments existant dans la galerie. Pour cela ouvrons la scène *MainScene*. Dirigeons-nous dans l'objet *STATEMACHINE*, puis dans *VISITEVIRTUELLE* qui contient la liste des bâtiments. Dupliquons le dernier bâtiment, changeons son nom et son image et allons dans l'onglet Inspector pour changer la chaîne de caractère que renvoie la fonction. Il suffit de remplacer les caractères existant par le nom de la scène enregistrée précédemment (cf. Figure 34). Le nouveau bâtiment est ainsi ajouté à la liste.

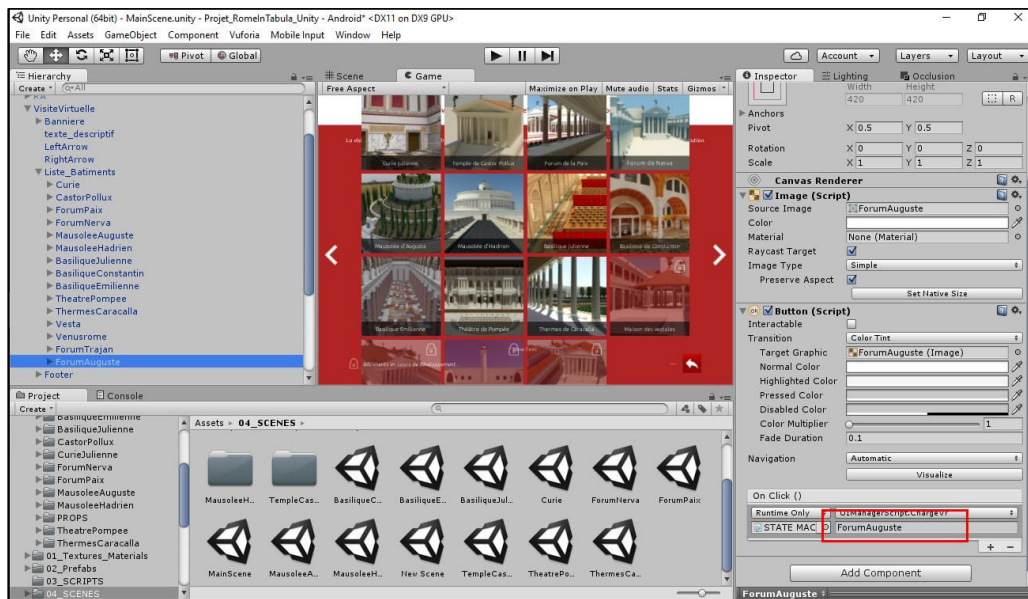


Figure 34 - Ajout du bâtiment à la liste existante

2-5 Utilisation du travail effectué

Une fois terminée, l'application sera disponible sur le store Android pour permettre aux habitués des Nocturnes du plan de Rome ou d'autres personnes, d'avoir accès aux restitutions virtuelles des monuments romains disparus.

La salle immersive du Cireve fonctionnant sous Unity, nous avons réutilisé les scènes de chaque bâtiment pour effectuer des démonstrations à l'intérieur de celle-ci (cf. Figure 35), (cf. Annexe 4). L'objectif après le stage est de reprendre ces scènes et de permettre à l'utilisateur d'interagir avec l'environnement 3D à l'aide d'un *flystick*.

En parallèle du développement de l'application, j'ai effectué un travail de modélisation pour remplacer des statues vieillissantes dans le modèle virtuel de la Rome antique. Pour cela j'ai modélisé deux types de statues dans cinq poses différentes : une statue d'homme nu (cf. Figure 36) et une statue d'homme en toge. Pour la modélisation de la statue, j'ai utilisé 3DS Max et Substance Painter pour la création des textures. Le modèle final pour la statue de l'homme en toge et de 10 000 polygones.



Figure 35 - Implémentation d'un modèle 3D dans la salle immersive



Figure 36 - Modélisation d'une Statue d'Homme nu

PERSPECTIVES ET CONCLUSION

Après ces vingt-deux semaines de stage au sein du CIREVE, j'ai acquis une véritable expérience professionnelle relative à la réalité virtuelle et en programmation d'application 3D temps réel dans le domaine du Patrimoine culturel.

La première partie de ce stage m'a ouvert des perspectives de mise en pratique des connaissances en 3D temps réel et d'acquisition de quelques notions nouvelles. La seconde partie de mon stage, centrée sur la réalité virtuelle, m'a permis d'enrichir mes compétences en développement.

En effet, l'utilisation de nombreux périphériques, couplés avec des moteurs tel que Unity3D et le CryEngine, ont enrichi mes solides compétences dans ce domaine. J'ai allié mes aptitudes en programmation, ainsi que mes connaissances en création d'application 3D, pour le développement d'une application de réalité virtuelle et augmentée nommée Rome in Tabula.

Au-delà de l'aspect technique, j'ai eu le plaisir de travailler avec Nicolas LEFEVRE et Sophie MADELEINE. Nos échanges mutuels ont conduit à un partage de connaissances et une avancée efficace en faveur de l'élaboration de nos différents projets. Au final, nous sommes arrivés à réutiliser des scènes 3D sur lesquelles j'ai travaillé pour les intégrer dans la salle immersive.

Bien que l'application ne soit pas terminée à 100%, je dresse un bilan très positif de ma période de stage, qui confirme ma volonté de poursuivre dans cette voie. Grâce à la qualité des enseignements que j'ai eu au sein du Master IVI, à mon travail et à ma motivation, j'ai le privilège de pouvoir continuer le développement de l'application au CIREVE pendant les deux prochains mois.

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1 – Maquette en plâtre de Paul Bigot (Plan de Rome).....	7
Figure 2 – Représentation 3D de la salle immersive.....	9
Figure 3 – Plan de la salle immersive.....	9
Figure 4 – Mode Réalité augmentée.....	11
Figure 5 – Documentation scientifique et historique.....	11
Figure 6 – Navigation joystick et gyroscope.....	11
Figure 7 – Navigation double joysticks.....	11
Figure 8 – StateMachine.cs : Enumération des différents états.....	12
Figure 9 – StateMachine dans la Hierchahie du projet Unity.....	13
Figure 10 – Logo Université de Caen.....	13
Figure 11 – Logo du CIREVE.....	13
Figure 12 – Menu principal de l’application.....	14
Figure 13 – Charte graphique du plan de Rome.....	14
Figure 14 – Police Ubuntu-L.....	15
Figure 15 – Description du CIREVE au sein de l’application.....	15
Figure 16 – Logos des différentes institutions.....	16
Figure 17 – Menu d’accueil des visites virtuelles.....	16
Figure 18 – Visite virtuelle du Forum de la Paix.....	17
Figure 19 – Mode Réalité Augmentée.....	18
Figure 20 – Tracking d’un bâtiment en Réalité Augmentée.....	19
Figure 21 – Shader Blinn dans 3DS Max.....	20
Figure 22 – Shader Mobile dans Unity.....	20
Figure 23 – Réglages des Lightmaps.....	21
Figure 24 – Réglages de l’Occlusion Culling.....	21
Figure 25 – Documentation du Mausolée d’Hadrien.....	22
Figure 26 – Balisage du document XML.....	23
Figure 27 – Sommaire et bibliographie.....	24
Figure 28 – Zoom sur la galerie d’images.....	24
Figure 29 – Création de la scène et importation du modèle 3D.....	26
Figure 30 – Implémentation des deux préfabriqués.....	27
Figure 31 – Orientation de la lumière et choix du mode Static.....	27
Figure 32 – Calcul de l’Occlusion Culling.....	28
Figure 33 – Localisation des fichiers XML.....	28
Figure 34 – Ajout du bâtiment à la liste existante.....	29
Figure 35 – Implémentation dans la salle immersive.....	30
Figure 36 – Modélisation d’une statue d’homme nu.....	30

GLOSSAIRE

CIREVE	Centre Interdisciplinaire de Réalité Virtuelle
IVI	Ingénierie du Virtuel et de l'Innovation
Ap. J.-C.	Après Jésus Christ
ERLIS	Équipe de Recherche sur les Littératures, les Imaginaires et les Sociétés (EA 4254)
ERSAM	Equipe de Recherche sur les Littératures, les Imaginaires et les Sociétés (EA 4254). Axe "Sources anciennes, Multimédias et valorisation du Patrimoine"
UFR	Unité de Formation et de Recherche
RA	Réalité Augmentée
VR	Réalité Virtuelle (Virtual Reality)
LODs	Levels of Details (Niveaux de détails)
OC	Occlusion Culling
XML	eXtensible Markup Language

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES ET WEBOGRAPHIQUES

- [Plan de Rome, 2016] Plan de Rome, **Histoire de la maquette de Paul Bigot** [en ligne]
 Disponible sur :
https://www.unicaen.fr/cireve/rome/pdr_maquette.php?fichier=histoire
- [CIREVE, 2016] CIREVE, **Le Centre interdisciplinaire de Réalité Virtuelle** [en ligne]
 Disponible sur :
<http://www.unicaen.fr/cireve/index.php>
- [Google Play Store, 2016] Google Play Store, **Applications disponibles gratuitement au public** [en ligne]
 Disponible sur :
<https://play.google.com/store/apps/developer?id=Cireve&hl=fr>
- [Vuforia, 2016] Vuforia, **Plugin de Réalité Augmentée pour Unity 3D** [en ligne]
 Disponible sur :
<https://developer.vuforia.com/>
- [Unity, 2016] Unity, **Unity 3D, Moteur de jeu 3D multiplateformes** [en ligne]
 Disponible sur :
<https://unity3d.com/>
- [Bekri, 2015] Bekri, **Cours de Programmation Unity 3D**
 Année 2015-2016
 Dispensé par Kacem Bekri
 Arts et métiers ParisTech Laval
- [SimpleWeb, 2013] SimpleWeb, **Recommandations de taille pour les éléments d'interfaces mobiles** [en ligne]
 Disponible sur :
<http://www.simpleweb.fr/2013/03/29/recommandations-de-taille-pour-les-elements-dinterfaces-mobiles/>
- [UXMatters, 2013] UXMatters, **Common misconceptions about touch** [en ligne]
 Disponible sur :
<http://www.uxmatters.com/mt/archives/2013/03/common-misconceptions-about-touch.php>
- [W3C, 2015] W3C, **Extensible Markup Language (XML)** [en ligne]
 Disponible sur :
<https://www.w3.org/XML/>
- [InfoWebMaster, 2016] InfoWebMaster, **XML, acronyme de eXtensible Markup Language** [en ligne]
 Disponible sur :
<http://glossaire.infowebmaster.fr/xml/>

ANNEXES

Annexe 1 – Questionnaire Post-Expérimentation.....	36
Annexe 2 – Affiche de la dernière Nocturne du plan de Rome – 1 ^{er} Juin 2016.....	37
Annexe 3 – Exemple de Documentation au format XML.....	38
Annexe 4 – Intégration de différents modèles dans la salle immersive	39

Annexe 1 – Questionnaire Post-expérimentation



Application Rome In Tabula (AR+VR) Mercredi 1er Juin 2016

Questionnaire post-expérience

Remarques : L'application testée est une version non terminée et ne représente en aucun cas la version finale. En effet, elle sera soumise à diverses transformations et modifications suite aux retours des tests. De plus, le contenu est limité pour la passation des tests. N'hésitez pas à laisser des remarques qui permettront de perfectionner l'application.

Questions	Réponses					Autres remarques ?
1 - Quel est votre ressenti global après avoir utilisé l'application ?						
2 - Est-ce que l'application vous a semblé intuitive et simple à prendre en main ?	OUI			NON		
3 - Les icônes utilisées pour l'interface de l'Application, vous semblent-elles assez explicites et appropriées ? (Notez de 1 à 5)	1	2	3	4	5	
4 - Trouvez-vous que la fonctionnalité "freeze" (ou blocage de la vue de Réalité augmentée) soit pertinent dans le cadre de l'application ?	OUI			NON		
5 - Comment trouvez-vous l'agencement de la documentation scientifique (texte + images) ?						
6 - Avez-vous des remarques à faire sur les différents temps de chargement au sein de l'Application (documentations, changement de scènes...)?						
7 - Quel est votre ressenti sur la taille et l'interaction des points d'information ?						
8 - Que pensez-vous du Menu d'accueil (agencement, contenu...)?						
9 - Pensez-vous que la taille des Joysticks de navigation soit adaptée à tout type de public ?						
10 - Si vous deviez noter cette application (fluidité, contenu...), quelle note mettriez-vous ?	1	2	3	4	5	
11 - Prenez-vous le temps de parcourir les documentations dans leur intégralité ?						

Suite à ce questionnaire, avez-vous d'autres remarques à nous faire parvenir ?

Annexe 2 – Affiche de la dernière Nocturne du Plan de Rome - 1^{er} juin 2016

<p>Plan de Rome UFR Humanités et Sciences Sociales Université de Caen Normandie</p>	<p>CIREVE Centre Interdisciplinaire de Réalité Virtuelle</p>
<h1>Les nocturnes du Plan de Rome</h1>	
<p>Mercredi 1^{er} juin 2016 Le forum boarium : de l'échouage du panier de Romulus et Rémus à l'accostage des bateaux marchands 18 h 30, amphithéâtre de chimie, bâtiment A - Campus I</p>	<p>Visites gratuites</p>
	
<p>Visites guidées interactives de la restitution virtuelle de la Rome antique Thème différent proposé à chaque séance (45 mn) Programme complet sur www.unicaen.fr/rome Réalisation et présentation sous la responsabilité de l'ERLIS, axe « Sources Anciennes, Multimédias et Valorisation du Patrimoine » (ERSAM)</p>	
<p>UNICAEN UNIVERSITÉ DE CAEN NORMANDIE</p> <p>CIREVE</p> <p>ERLIS</p> <p>MOSH</p> <p>CNRS</p> <p>UNIVERSITÉ DE CAEN NORMANDIE</p> <p>UNIVERSITÉ DE CAEN NORMANDIE</p>	
<p>Localisation de l'amphithéâtre</p> 	

Annexe 3 – Exemple de Documentation au format XML

```

<?xml version = "1.0" encoding="UTF-8" standalone="yes" ?>
<document>

  //Nom du bâtiment
  <building>
    <name>La Basilique julienne</name>
  </building>

  //Liste des documentations relatives au bâtiment
  <documentation id="1">
    <title>Les boutiques de la basilique</title>
    <paragraph>
      Les boutiques (<i>tabernae ueteres</i>) de la basilique Julia donnaient directement sur l'intérieur de l'édifice. Elles ne possédaient donc pas forcément de fermeture solide pour se protéger des intempéries. La profondeur de chaque boutique est telle que plusieurs banquiers pouvaient y faire leurs affaires en même temps. Une cassette (<i>fiscus</i>) remplie de monnaie, que le banquier avait en permanence avec lui, était déposée sur le comptoir. Les rideaux permettaient d'isoler les clients des regards des curieux.
    </paragraph>
    <images>
      <img>
        <source>BasiliqueJulienne/Gallery/rid</source>
        <legend>Mosaïque de la basilique de Ravenne (VIe siècle p.C.)</legend>
      </img>
      <img>
        <source>BasiliqueJulienne/Gallery/treseau</source>
        <legend>Scène de comptes (Musée de Belgrade)</legend>
      </img>
    </images>
  </documentation>

  <documentation id="2">
    <title>La décoration au sol</title>
    <paragraph>
      La texture du sol de la nef centrale a été dessinée et peinte sous forme d'aquarelle par l'architecte Alfred-Nicolas Normand en 1852 (R. Cassanelli et al., <i>Ruins of ancient Rome, the drawings of french architects who won the prix de Rome 1786-1924</i>, 2002). C'est une source d'une grande richesse, puisque les noms de marbre sont directement inscrits sur son relevé : Pavonazzetto (blanc à veines violettes), giallo antico (jaune), africano (rouge) et cipolin (vert). Il indique également la taille des rectangles de marbre. Cette aquarelle représente aussi le sol du portique côté forum, dallé avec du marbre blanc en plaques rectangulaires.
    </paragraph>
    <images>
      <img>
        <source>BasiliqueJulienne/Gallery/decosol2</source>
        <legend>Relevé d'Alfred Nicolas Normand en 1852</legend>
      </img>
    </images>
  </documentation>

  <documentation id="3">
    <title>Les avocats</title>
    <paragraph>
      Les avocats et les personnes qui étaient payés pour applaudir étaient assis sur des bancs (<i>subsellia</i>) de part et d'autre de l'estrade. Les avocats venaient plaider sur l'estrade, devant les juges. Le seuil à proximité des bancs servait d'urne pour recueillir les votes des juges.
    </paragraph>
    <images>
      <img>
        <source>BasiliqueJulienne/Gallery/bancAvocat</source>
        <legend>Reconstitution d'un banc (Herculaneum)</legend>
      </img>
      <img>
        <source>BasiliqueJulienne/Gallery/vote</source>
        <legend>Scène de vote (63 a.C.)</legend>
      </img>
    </images>
  </documentation>

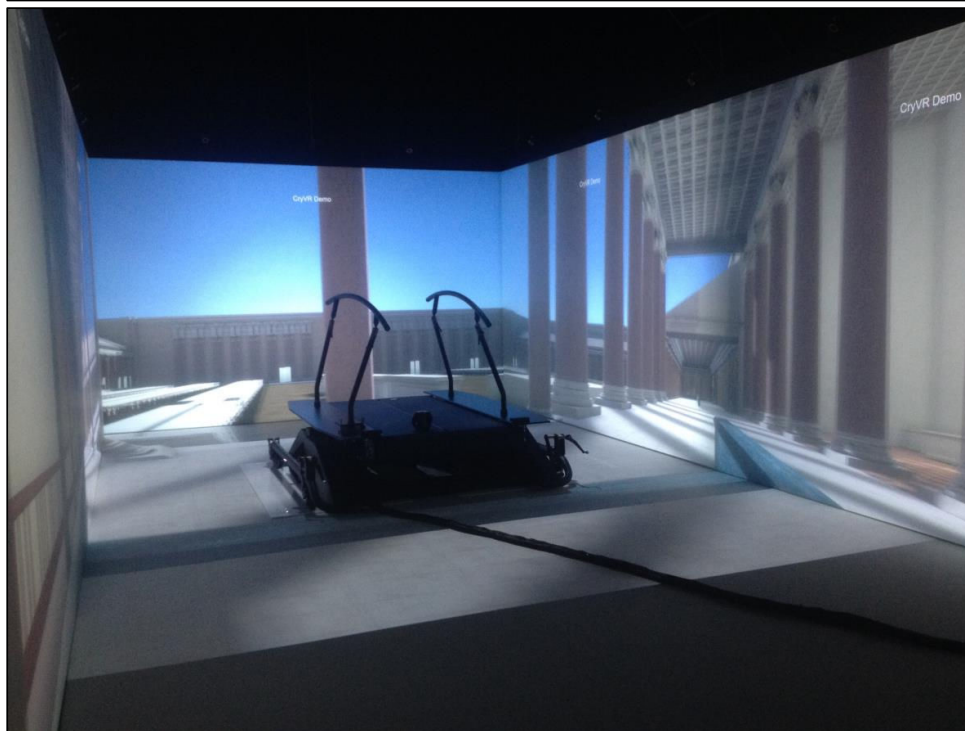
  <documentation id="4">
    <title>Les tribunaux</title>
    <paragraph>
      La basilique Julia, lors de procès extraordinaires, était dotée d'un mobilier judiciaire important. Quarante-cinq juges siégeaient sur chaque estrade : le président était assis devant, sur une chaise curule (<i>sellio curulis</i>) en ivoire. Les panneaux (<i>siparia</i>) entre les tribunaux pouvaient être peints, représentant diverses scènes sur lesquelles les avocats appuyaient leur plaidoirie.
    </paragraph>
    <images>
      <img>
        <source>BasiliqueJulienne/Gallery/podium</source>
        <legend>Détail de l'arc de Constantin (Ive siècle p.C.)</legend>
      </img>
      <img>
        <source>BasiliqueJulienne/Gallery/jp</source>
        <legend>Mosaïque représentant une estrade de bois (Nîmes, IIIe siècle p.C.)</legend>
      </img>
      <img>
        <source>BasiliqueJulienne/Gallery/cross</source>
        <legend>Fragments d'une chaise curule plaquée d'ivoire (Kenchreai, IVe siècle p.C.) </legend>
      </img>
      <img>
        <source>BasiliqueJulienne/Gallery/pattec</source>
        <legend>Fragments d'une chaise curule plaquée d'ivoire (Kenchreai, IVe siècle p.C.) </legend>
      </img>
    </images>
  </documentation>

  <documentation id="5">
    <title>La façade de la basilique</title>
    <paragraph>
      Nous avons suivi Ferdinand Dutert (R. Cassanelli et al., <i>Ruins of ancient Rome, the drawings of french architects who won the prix de Rome 1786 - 1924</i>, 2002) dans sa proposition d'insérer des statues sur le second niveau en ordre ionique de la façade de la basilique. Les ordres successivement toscan et ionique sont attestés par l'archéologie. Le toit en terrasse est quant à lui déductible des sources littéraires latines : Suétone raconte que l'empereur Caligula fit tomber pendant plusieurs jours des pièces de monnaie du haut de la basilique (<i>Iulius</i>) (<i>summa basilicae Iuliae</i>). Suet., <i>Calig.</i> 37, 1-2). On en déduit que l'opération se fit certainement depuis un toit en terrasse, tel que l'a représenté F. Dutert.
    </paragraph>
    <images>
      <img>
        <source>BasiliqueJulienne/Gallery/elevation</source>
        <legend>Élévation proposée par F. Dutert, 1874.</legend>
      </img>
      <img>
        <source>BasiliqueJulienne/Gallery/fac</source>
        <legend>La basilique Julienne aujourd'hui.</legend>
      </img>
    </images>
  </documentation>

  <bibliographie>
    <text_bibliographie>
      <text></text>
    </text_bibliographie>
  </bibliographie>
</document>

```

Annexe 4 – Intégration de différents modèles dans la salle immersive



Résumé : Les Grecs et les Romains ont développé et décrit un grand nombre d'automates utilisant des systèmes d'écoulement d'eau, la compressibilité de l'air, la force de la vapeur, des systèmes de contrepoids etc. Cependant, la plupart des traités techniques portant sur ce sujet ont aujourd'hui disparu, seuls ceux de Philon de Byzance et d'Héron d'Alexandrie nous sont parvenus. Les travaux de cette thèse pluridisciplinaire s'intéressent, dans un premier temps, à l'analyse des sources anciennes pour restituer virtuellement quelques automates antiques couvrant une période allant du III^e siècle avant J.-C. au I^{er} siècle après J.-C. Les restitutions virtuelles permettent de comprendre le fonctionnement d'un mécanisme et d'étudier différentes hypothèses. Dans un second temps, cette recherche s'intéresse à la reconnaissance de geste comme outil d'interaction. La construction d'une application immersive interactive permet à l'utilisateur d'interagir virtuellement avec les automates de l'Antiquité. Les résultats de cette recherche (hypothèses de restitutions et documentations scientifiques) sont partagées à travers l'application *Roma in tabula* disponible gratuitement.

Mots-clés : Automates, Antiquité, Rome, Grèce, Égypte, Alexandrie, Mécaniciens, Machines, Mécanisme, Histoire des Automates, Mythologie, Musée d'Alexandrie, Ktésibios, Philon de Byzance, Héron d'Alexandrie, Pneumatiques, Mécanique des fluides, Restitution Virtuelle, Reconnaissance de gestes, Interaction, Réalité Virtuelle, Immersion, *Roma in tabula*.

Abstract : Greeks and Romans developed and described a large number of automata using water flow systems, air compressibility, steam force, counterweight systems etc. However, most of the technical treatises on this topic are now gone, only those of Philo of Byzantium and Heron of Alexandria have survived. The work of this pluridisciplinary thesis focuses, firstly, on the analysis of ancient sources to virtually restore some ancient automata covering a period from the 3rd century BC to the 1st century AD. Virtual restitutions make it possible to understand how a mechanism works and to study different hypotheses. In a second step, this research focuses on gesture recognition as an interaction tool. The construction of an interactive immersive application allows the user to interact virtually with automatons of Antiquity. The results of this research (rendering hypotheses and scientific documentation) are shared through the freely available application *Roma in tabula*.

Keywords : Automata, Antiquity, Rome, Greece, Égypt, Alexandria, Mechanics, Machinery, Méchanism, Automata history, Mythology, Alexandria Museum, Ktésibios, Philo of Byzantium, Héro of Alexandria, Pneumatic, Fluids mechanics, Virtual Restitution, Gesture Recognition, Interaction, Virtual Reality, Immersion, *Roma in tabula*.