
PROGRAMMATION D'AUTOMOBILE AUTONOME A LA MANIÈRE DE HÉRON D'ALEXANDRIE

Eva COROT¹

Lycée Louis-le-Grand, Paris

Résumé. Les premiers automates ont été évoqués par Homère dans l'Iliade avec le terme d'αὐτόματος comme machines qui se meuvent d'elles-mêmes. Cet article revisite l'héritage des automates anciens à travers les innovations d'Héron d'Alexandrie. Les automates, jadis utilisés dans les temples et les théâtres, ont inspiré des mécanismes ingénieux tels que les portes automatiques. Héron a également conçu des trépieds autonomes, préfigurant les véhicules autonomes modernes. La programmation de ces trépieds, basée sur des axes et des clous, a été démontrée à travers des ateliers pratiques avec des élèves. L'article souligne la pertinence durable des principes mécaniques et énergétiques anciens, tout en encourageant une compréhension de l'innovation à travers les âges. Cette approche offre une perspective sur l'ingénierie antique et son lien avec la programmation contemporaine.

Mots-clés. Programmation sans ordinateur, Héron d'Alexandrie, Automate, Maquette, Antiquité, Lycée, Interdisciplinarité.

Absract. AUTONOMOUS CAR PROGRAMMING IN THE MANNER OF HERON OF ALEXANDRIA. The earliest automatons were alluded to by Homer in the *Iliad* using the term αὐτόματος, denoting self-moving machines. This article reexamines the legacy of ancient automatons through the innovations of Heron of Alexandria. Automatons, once employed in temples and theaters, served as a wellspring of inventive mechanisms, including automatic doors. Heron further devised autonomous tripods, prefiguring modern autonomous vehicles. The programming of these tripods, predicated upon axles and pegs, was empirically demonstrated through practical workshops involving students. The article underscores the enduring relevance of ancient mechanical and energetic principles while promoting a comprehension of innovation across epochs. This approach proffers a perspective on antiquated engineering and its nexus with contemporary programming.

Keywords. Programming without computer, Heron of Alexandria, Automaton, Model, Antiquity, High school, Interdisciplinarity.

Introduction

Les premiers automates sont parfois attribués à Vaucanson (1709 - 1782), ingénieur français qui réalisa un canard automate (1740) ou encore un Flûtiste automate (1738). Pourtant, dès l'antiquité grecque, les premiers automates sont décrits et réalisés au moyen de bois, métal ou vapeur. Les premiers automates ont été évoqués par Homère dans l'Iliade avec le terme d'αὐτόματος comme machines qui se meuvent par elles-mêmes. Il s'agissait de portes automatiques et de trépieds d'Héphaïstos. Héron d'Alexandrie (Ier siècle E.C) plus connu pour ses résultats en géométrie, en a construit de plusieurs types. Ces trépieds agissaient comme de véritables petites automobiles autonomes à 3 roues qui transportaient les offrandes dans les temples pendant les événements religieux, emplis de mystère divin pour le public. Le véhicule contient son propre stockage d'énergie (masse en hauteur), et se programme pour avancer, reculer, tourner ou attendre. Chaque roue se programme indépendamment et la synchronisation se fait au moyen d'une ficelle tirée par la masse posée sur un sablier. Pour ce faire, on place des clous sur un bâton qui compose l'essieu et l'on enroule une ficelle.

¹ eva@corot.top

Nous allons ainsi nous demander comment lier culture sur la Grèce antique et ingénierie moderne. Peut-on faire construire des automates de ce type en classe ? Et que peuvent faire et apprendre des élèves dans ce type d'activité ?

Avec une approche informatique débranchée auprès d'élèves de seconde générale nous avons ainsi programmé un trépied pour réaliser différents parcours puis avons réalisé par analogie avec un compilateur, un système afin d'encoder plus facilement l'information en langage machine à partir d'une représentation du parcours désiré. Par ailleurs un modèle autonome a été réalisé en Lego.

Dans une première partie est présentée le cadre théorique d'étude et le contexte historique, dans une deuxième partie l'automobile autonome programmable. Dans une troisième partie, nous aborderons les manipulations effectuées en classe mêlant grec (enseignement de complément de langues et cultures de l'Antiquité), mathématique et informatique débranchée et enfin, la maquette réalisée.

1. Contexte

1.1. Interdisciplinarité et Ordinateur sans ordinateur

L'apprentissage de la programmation passe par l'apprentissage de langages informatiques et de l'algorithmique. Au collège, les élèves peuvent découvrir en troisième le grec, ou le latin dès la cinquième. Des synergies sont envisageables, relativement au vocabulaire ou à la logique, mais ici ce sont d'autres liens interdisciplinaires que nous allons exposer. Hormis les textes grecs que l'on découvre généralement en classe sur les conquêtes politiques et guerrières, la philosophie, la rhétorique, le théâtre et la mythologie, des textes grecs portant sur les mathématiques, ou l'ingénierie sont aussi accessibles. On peut citer en particulier les recueils aux éditions des Belles Lettres que sont : *Mathematikos* (Houlou-Garcia, 2019) qui présente une sélection d'extraits mathématiques, et *Ex Machina* (Collognat et al., 2020) qui présente une sélection d'extraits décrivant les machines de l'antiquité. Ainsi, il est envisageable de lier grec ancien et sciences, tout en gardant un niveau compréhensible et accessible dans les deux matières envisagées. Nous allons dans notre cas mélanger informatique et culture de la Grèce antique dans une activité d'informatique débranchée, aussi appelée l'informatique sans ordinateur.

1.2. Antiquité grecque

Les plus anciens automates sont mentionnés par Homère, au VIII^e avant notre ère, qui emploie le terme « *automate* » du grec « *αὐτόματος* », qui se meut soi-même (*se lit automatoss*).

En effet, dès l'Antiquité, on chantait les louanges des automates !

Nous allons mentionner brièvement les diverses activités d'Héron d'Alexandrie jusqu'aux trépieds abordés dans la partie 1.5. Ces derniers sont le cœur de l'activité présentée par la suite.

Voici un extrait du chant V de *l'Iliade* (Homère, 1859) accompagné de sa traduction (édition République des Lettres, 2019) dont nous avons mis en exergue les mots clés principaux :

730 Αὐτὰρ Ἀθηναίη κούρη Διὸς αἰγίοχοιο πέπλον μὲν κατέχευεν ἑάνον πατρός ἐπ' οὐδὲι ποικίλον, ὅν ῥ' αὐτὴ ποιήσατο καὶ κάμε χερσίν.

Athéna, elle, fille de Zeus porte-égide, laissait couler à ses pieds, sur le seuil de son père, la belle robe brodée qu'elle avait faite elle-même et travaillée de ses mains.

745 ἐς δ' ὄχεα φλόγεα ποσὶ βήσετο, λάζετο δ' ἔγχος βριθὺ μέγα στιβαρόν, τῷ δάμνησι σίχας ἀνδρῶν ἡρώων, οἷσιν τε κοτέσσεται ὀβριμοπάρη.

Puis elle monta sur le char flamboyant, et saisit la pique lourde, grande, solide, dont elle dompte les rangs des héros et sévit contre eux, la déesse au père puissant ! Héra, avec le fouet, poussa vivement les chevaux.

Ἡρῇ δὲ μάλιστα θοῶς ἐπεμαίετ' ἄρ' ὑππούς· αὐτόματα δὲ πύλαι μύκον οὐρανοῦ ἅς ἔχον Ὠραι...
D'elles-mêmes, **automatiquement**, s'ouvrirent en grondant les portes du ciel, gardées par les Heures, ...

Ingénieur, physicien, mathématicien et mécanicien, Héron d'Alexandrie aussi appelé Héron l'ancien, est grec, originaire d'Alexandrie (actuellement en Égypte). Il a écrit plusieurs ouvrages sur la pression, différents moyens de mesurer la géométrie comme sa formule pour mesurer l'aire d'un triangle, les machines de jet, les moyens de soulever des objets et autres automates.

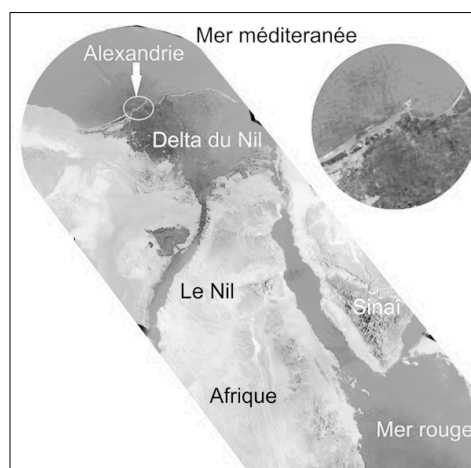


Figure 1 : Alexandrie sur la Méditerranée. Photo prise par l'autrice depuis l'ISS dans le cadre du projet AstroPi, Avril 2022 (Corot, 2022).

Nous ignorons les dates précises de sa vie mais les historiens ont de bonnes raisons de penser qu'il vécut au premier siècle après Jésus-Christ. Comme l'indique Sidoli (2011), Héron mentionne au chapitre V de son livre *Dioptré* une éclipse de lune et en donne l'heure et la durée, simultanément pour une observation à Alexandrie et à Rome (voir figure 1 et 2). Des modèles astronomiques ont permis de dater cette éclipse.

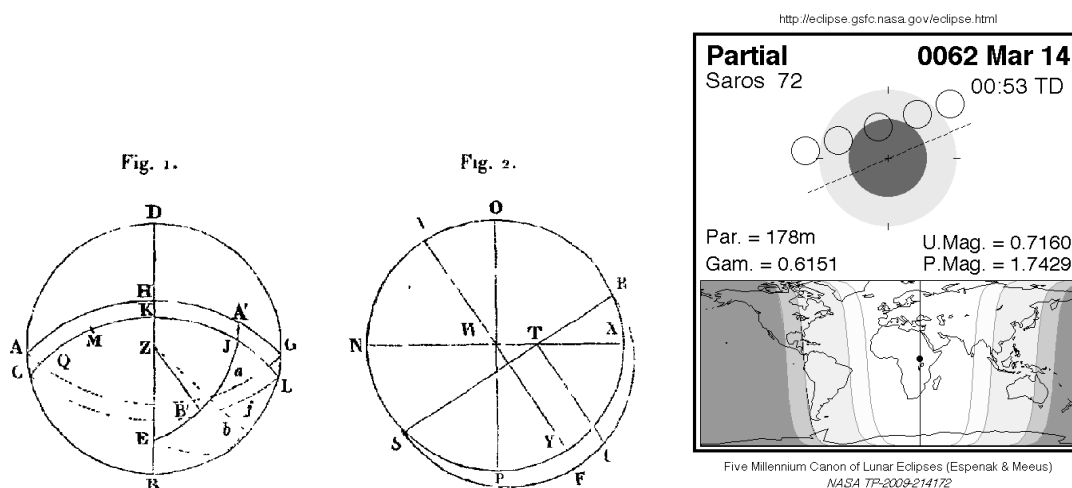
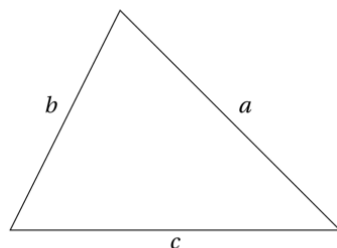


Figure 2 : Héron d'Alexandrie présente des calculs de distance de la Lune dans son livre *Dioptré* chapitre V, à partir d'une éclipse de lune visible depuis deux latitudes différentes, à Alexandrie et à Rome (sur la gauche). Ainsi, les simulations ont permis de dater cette éclipse au 14 mars de l'an 62 (sur la droite).

Le travail de Héron d’Alexandrie est riche en liens interdisciplinaires qui peuvent être étudiés au collège ou au lycée, notamment avec les mathématiques ou la physique. Nous présentons son travail brièvement à titre de contexte historique.

Héron d’Alexandrie est surtout connu pour une formule qui permet de calculer l’aire d’un triangle en ayant la longueur de chacun de ses trois côtés. Plusieurs démonstrations se trouvent sur Internet, dont certaines plus simples que la version de Héron non présentée ici, voir figure 3a.



$$A = \sqrt{\frac{a+b+c}{2} \left(\frac{a+b+c}{2} - a \right) \left(\frac{a+b+c}{2} - b \right) \left(\frac{a+b+c}{2} - c \right)}$$

Figure 3a : Formule d’Héron pour le calcul de l’air A d’un triangle scalène de longueur de cotés a , b , c .

Héron d’Alexandrie peut également être cité en physique-chimie au sujet de la pression. En effet, Héron avait construit une fontaine basée sur des principes simples pouvant être reproduits en classe : trois flacons sont plus ou moins remplis d’eau et sont placés à différentes hauteurs. À l’aide d’un système hermétiquement fermé et de jeux de pressions, de l’eau s’échappe du troisième flacon. Le principe : la colonne d’eau entre les flacons 1 et 2 exerce une pression sur la poche d’air du flacon 2 qui met sous pression une réserve d’eau faisant jaillir du liquide, voir figure 3b.



Figure 3b : Schéma de la fontaine surmontée d’une sculpture ornemental de satyre.
Extrait du livre *Pneumatica*, copié par le moine Ange Vergèce au XVI^e siècle :BNF – Gallica.

Il a aussi ajouté des sifflets au bout de la fontaine et a ainsi *programmé* des séquences mélodiques pour ses petits théâtres animés.

De plus, Héron d'Alexandrie a conçu de nombreuses machines hydrauliques. Il est à l'origine de l'éolipyle, engin à vapeur constituée d'une sphère fixée sur un axe et équipée de deux tubes coudés sortant de manière opposée. En chauffant l'eau contenue dans la chaudière inférieure, la vapeur d'eau formée donne, en s'échappant, un mouvement de rotation à la sphère. En effet, de cette chaudière sort un tube relié à une sphère pouvant tourner autour d'un axe horizontal et comportant deux autres petits tubes perpendiculaires à l'axe laissant sortir la vapeur qui fait tourner la sphère. Cet ancêtre de la machine à vapeur de James Watt (1736 - 1819) n'a cependant pas été utilisé de manière productive.

1.3. Les automates d'Héron d'Alexandrie

Héron d'Alexandrie a décrit ou inventé de nombreux automates. Certains de ses automates correspondent parfaitement à ceux évoqués antérieurement par Homère. Ses automates étaient utilisées principalement dans les temples et dans les théâtres. Dans les temples, les prêtres en gardaient le mécanisme secret et les miracles accomplis par les automates montraient ainsi aux visiteurs que les dieux étaient de leur côté, ou même qu'ils pouvaient communiquer avec les dieux. C'était un moyen direct de s'enrichir puisque plusieurs automates étaient déclenchés directement par l'apport d'offrandes ou par l'insertion de pièces (analogue à l'introduction de pièces dans un distributeur automatique) (McGrath & Clarke, 2002).

L'un des mécanismes automatiques les plus connus et installés dans plusieurs temples sont les portes automatiques. Lorsque le prêtre débutait la cérémonie, il plaçait des offrandes sur un plateau ce qui actionnait le mécanisme par leur poids. Un autre moyen de déclenchement pour actionner l'ouverture automatique des portes était d'allumer un feu qui dilatait de l'air dans un récipient. Cette fonction de portes automatiques correspond parfaitement à la description d'Homère vue plus haut, voir figure 4.

XXXVIII.

10

Ναῖσκον κατασκευή, ὥστε θυσίας γινομένης τὰς
θύρας αὐτομάτως ἀνοίγεσθαι, σβεσθείσης δὲ τῆς θυσίας
πάλιν κλείεσθαι.

Ἔστω ὁ προειρημένος ναῖσκος ἐπὶ βάσεως τῆς
ΑΒΓΔ, ἐφ' ἧς ἐπικείμεθα βωμίσκος ὁ ΕΔ· διὰ δὲ 15
τοῦ βωμίσκου διώσθω σωλὴν ὁ ΗΖ, οὗ τὸ μὲν Ζ

ὑγρὸν διὰ τοῦ ΚΑΜ σωλήνος. καὶ πρῶτον μὲν πληρω-
θήσεται ὁ ἀσκὸς ὕδατος· εἴτα ἐκχυθήσεται εἰς τὸ λουτηρίδιον·
τὸ δὲ ἐγγεθὲν ἐν αὐτῷ ὕδαρ φερόμενον πάλιν εἰς τὸ ΓΒ
ἀγγεῖον ἐκθλίψει ὁμοίως τὸν ἐν αὐτῷ ἀέρα, ὃς δὴ πάλιν 20
τὸ ἐν τῷ ΑΔ ἀγγεῖῳ ὕδαρ ἐκθλίψει εἰς τὸν ἀσκὸν καὶ εἰς
τὸ λουτηρίδιον· καὶ τοῦτο ἀεὶ γενήσεται, ἄχρις ἂν κενωθῇ
τὸ ἐν τῷ ΑΔ ἀγγεῖῳ ὕδαρ. δεήσει δὲ τὸν ΚΑΜ σωλήνα
λεπτότατον παντάπασιν ὑπάρχειν ἕνεκα τοῦ τὴν ἐπίδειξιν
ἐπὶ πλεονα χρόνον παραμένειν.

25

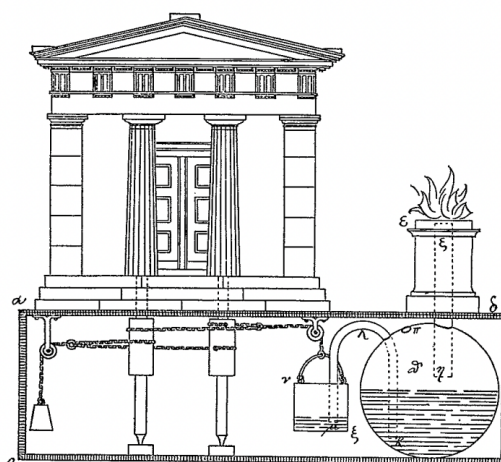


Fig. 89.

Soit ΑΒΓΔ piédestal sur lequel est placé le temple en question et un petit autel ΕΔ. A travers l'autel on fait passer un tube ΖΗ dont l'un des orifices Ζ s'ouvre dans l'autel, et dont l'autre Η s'ouvre dans un globe Θ, à peu près au centre de ce globe; le tube ΗΖ doit être soudé au globe. On adapte également au globe un siphon recourbé ΚΑΜ. Les gonds des portes doivent être prolongés à la partie inférieure et tourner librement dans des crapaudines ménagées dans la base ΑΒΓΔ. Aux gonds on fixe deux chaînes qui se réunissent en une seule qui passe sur une poulie et qu'on attache à un vase creux ΝΞ [qui se trouve ainsi suspendu]. D'autres chaînes enroulées autour des gonds en sens inverse des premières se réunissent également en une seule qui, après avoir passé sur une poulie, se termine par un poids en plomb dont la descente fait fermer les portes. La branche

extérieure du siphon KAM plonge dans le vase suspendu ; de plus, à l'aide d'un trou η, on introduit de l'eau dans le globe de manière à le remplir à moitié ; après cette opération, le trou est rebouché.

Voici maintenant ce qui va arriver : le feu développant de la chaleur échauffera l'air qui est dans l'autel et le forcera à se répandre dans un plus grand espace. Cet air, passant dans le globe par le tube HZ, chassera, par le siphon KAM, le liquide qui y est contenu jusque dans le vase suspendu et celui-ci, en descendant par son poids, entraînera les chaînes et ouvrira les portes.

Puis, quand le feu sera éteint, l'air raréfié s'échappera par les vides des parois du globe et le siphon recourbé attirera le liquide contenu dans le vase suspendu afin d'occuper la place des vides qui se sont produits ; l'extrémité du siphon est en effet plongée dans l'eau du vase suspendu. Le vase se vidant, le poids suspendu fera, par sa descente, ouvrir les portes. On se sert quelquefois de mercure au lieu d'eau parce que le mercure est plus lourd et facilement déplacé par l'effet de la chaleur.

Figure 4 : Système de portes automatiques décrit par Héron d'Alexandrie. Extrait du livre *Pneumatica*. Traduction de Albert de Rochas d'Aiglun.

On remarque que les schémas sont très précis, nommant chaque partie par une lettre de l'alphabet grec. Seuls des schémas recopiés plusieurs fois depuis l'antiquité jusqu'au moyen-âge nous sont parvenus, et non les originaux.

1.4. Les Trépieds

Les trépieds autonomes fabriqués par Héphestos (qui est Vulcain en latin) et mentionnés par Homère dans l'Iliade vont nous intéresser dans le reste de l'article (voir figure 5).

ILIADÉ, XVIII.	49
Θέτις δὲ ἀργυρόπεζα ἔκανε δόμον Ἡφαίστου, ἀφθιτον, ἀστερόεντα, μεταπρεπέα ἀθανάτοισι, χάλκεον, ὃν ῥα ποιήσατο Κυλλοποδίων αὐτός. Ἰὺρε δὲ τὸν ἰδρώοντα, ἐλίσσόμενον περὶ φύσας, σπεύδοντα· ἔτευχε γάρ ἐείκοσι τρίποδας πάντας, ἑστάμεναι περὶ τοῖχον μεγάροιο εὖσταθός· ὑπὸ δὲ ἐκάστω πυθμέν. θήκε σφι κύκλα χρύσεα, ὅφρα δυσαίατό οἱ αὐτόματοι ἀγῶνα θεῖον, ἥδὲ νεοίατο αὖτις πρὸς δῶμα, θαῦμα ἰδέσθαι.	Et Thétis aux-pieds-d'argent vint à la demeure de <u>Vulcain</u>, demeure incorruptible, étoilée, distinguée-parmi celles des immor- d'-airain, laquelle avait faite [tels,] le dieu boiteux lui-même. Or elle trouva celui-ci suant, s'empressant autour des soufflets, agissant-activement ; car il fabriquait vingt trépieds en-tout, pour se tenir auprès du mur du palais solidement-fondé ; et sous chaque pied il plaça à eux des roulettes d'-or, afin qu'ils entrassent à lui d'eux-mêmes dans l'assemblée divine, et qu'ils vinssent de nouveau dans sa demeure, prodige à voir.

Figure 5 : Extrait de l'Iliade, chant XVIII Traduction par C. Leprévost Source : BNF - Gallica (Homère, 1897) Les points les plus pertinents pour cet article sont soulignés.

1.5. Héron précurseur des *auto-mobiles autonomes* ?

Une approche naïve pourrait même présenter le travail d'Héron d'Alexandrie comme précurseur des voitures autonomes d'aujourd'hui avec un objet roulant, programmé, automobile et qui transportait des offrandes. Pour découvrir la programmation, de nombreux robots programmables ont été développés en vue de sensibiliser dès l'école élémentaire. On peut citer par exemple le robot Thymio qui peut se mouvoir et qui est assez répandu dans les écoles aujourd'hui avec divers usages. On peut toutefois mentionner des usages inattendus par les élèves comme de dessiner à la craie dans les rues (Corot, 2017). Il existe aussi de nombreuses plateformes comme Arduino ou RaspberryPi pour les collégiens ou lycéens qui permettent de programmer des robots ou des automates.

Au IV^e siècle avant l'ère commune, Aristote avait déjà envisagé que les machines autonomes remplaceraient l'emploi des hommes en prenant justement l'exemple des trépieds d'Héphaïstos, voir figure 6, qui sont concrétisés par nos trépieds roulant d'Héron d'Alexandrie (Marcinkowski & Wilgaux, 2004), ce qui illustre que le remplacement du travail humain par des machines est une question ancienne.

« Si chaque instrument était capable, sur une simple injonction, ou même pressentant ce qu'on va lui demander, d'accomplir le travail qui lui est propre, comme on le raconte des statues de Dédale ou des trépieds d'Héphaïstos, lesquels dit le poète : "Se rendaient d'eux-mêmes à l'assemblée des dieux", si, de la même manière, les navettes tissaient d'elles-mêmes, et les plectres pinçaient tout seuls la cithare, alors, ni les chefs d'artisans n'auraient besoin d'ouvriers, ni les maîtres d'esclaves. » (1, 4, 1253b33-1254a1, trad. J. Tricot, Vrin)

Figure 6 : Extrait de Politique, (Aristote, 1, 4, 1253b33-1254a1, trad. J. Tricot, Vrin). Les points les plus pertinents pour cet article sont soulignés.

2. Présentation et analyse de l'automate

Le trépied d'Héron d'Alexandrie a été reproduit à partir de ses textes. Si les maquettes que nous allons présenter peuvent posséder certaines limites, il est surprenant de manipuler et recréer ces automates programmables pour tous les participants qui s'y sont adonnés.

2.1. Maquettes existantes et fonctionnement de l'automate

On peut citer la maquette du trépied d'Héphaïstos par le musée Kostas de Kotsanas « *Automatopoetike* » en Grèce, voir schéma sur la figure 7. Il est constitué d'un cadre en bois d'environ 30 cm de diamètre et 1,30 m de haut. Deux disques métalliques d'environ 10 cm de diamètres avec pour essieu une tige en métal d'environ 1 cm de diamètre. Une troisième roue libre permet l'équilibre de l'ensemble. Une ficelle enroulée sur la tige de l'essieu remonte sur 1 m environ, fait le tour d'une poulie, redescend et est accrochée par un poids d'environ 2 à 5 kg posée sur le sable (du millet en l'occurrence) d'un sablier géant. Le poids peut ainsi descendre lentement sur une distance d'environ 50 cm et entraîner la ficelle. Ce mécanisme permet ainsi d'avancer sur environ 15 tours de roue soit environ 4 mètres. L'ensemble du robot est surmonté d'une coupe dans laquelle on peut placer des offrandes.

Mentionnons qu'il existe un ressource (CanoProf, s. d.) à destination des enseignants sur le site Canopé qui s'inspire de ces maquettes, pour un travail sur la robotique aux cycles 3 et 4.

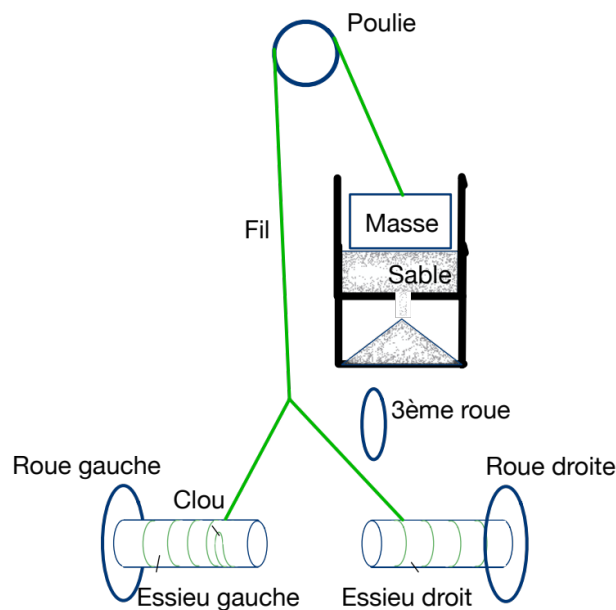


Figure 7 : Schéma du trépied

Une équipe de « New Scientist » menée par Noel Sharkey (2007) a produit une maquette plus légère sans sablier, activée par la chute libre d'un poids dans l'air qui entraîne les roues très rapidement. Le déplacement ne dure ainsi que quelques secondes à peine (par inertie), entraîné par une chute qui ne dure elle-même qu'une fraction de seconde (lancement).

2.2. Notions impliquées

Des notions impliquées de mécanique, robotique, électronique et physique sont toujours d'actualité.

La synchronisation du temps : Aujourd'hui les ordinateurs et robots ont une horloge pour rythmer le temps, et nous sommes tous familiers avec l'horloge à quartz qui a près de cent ans. La mesure du temps est presque toujours nécessaire et dans l'antiquité déjà un sablier où l'écoulement de sable (ou de graines de millet dans la reconstitution du trépied par le musée grec de Kotsanas) donne la mesure du temps qui passe à l'automate. Aujourd'hui cette mesure du temps est bien souvent numérique, alors qu'elle était continue et analogique dans l'antiquité.

Source d'énergie : Pour se mouvoir, l'énergie stockée aujourd'hui sous forme chimique (essence ou batterie des voitures, et bois/eau liquide pouvant donner de la vapeur surtout utilisée au XIXème siècle) l'était par Héron dans ses automates par une masse placée en hauteur. Lorsqu'elle descendait d'elle-même par pesanteur, elle entraînait une ficelle, et elle libérait son énergie qui était alors transformée en mouvement. Il utilisait ce qu'on appelle l'énergie potentielle de hauteur (aussi appelée énergie potentielle de pesanteur).

2.4. Programmation du parcours dans le temps

Le trépied est constitué de 3 roues, voir figure 7. Une roue centrale libre, et deux roues motrices, une à droite et une à gauche. Chaque roue est reliée à la masse qui descend au moyen d'une ficelle distincte. Lorsque la masse descend, la ficelle préalablement enroulée sur l'axe de chaque roue entraîne ainsi les roues et le mouvement de l'automate.

Chaque roue a son propre essieu qui peut tourner indépendamment. De manière différentielle, une roue peut tourner dans un sens ou dans l'autre, alors que la seconde roue peut aussi tourner ou non dans un sens ou dans l'autre. La différence d'action sur chacun de ces deux axes entraîne un mouvement rectiligne si les deux roues tournent en même temps (et à la même vitesse dans

notre cas). On pourrait imaginer une vitesse modifiée par un changement du diamètre de l'essieu auquel la corde est enroulée par exemple, mais cela dépasse le modèle antique. Plus simplement, un changement de direction se produit si une roue tourne tandis que l'autre roue est soit arrêtée soit tourne dans le sens inverse en un mouvement de recul, ce que l'on peut réaliser simplement dans notre cas au moyen d'enroulements et de butées comme nous allons le voir.

Des butées (clous sans tête) sur l'axe permettent à la ficelle d'être enroulée sur l'axe dans un sens, puis opérant un demi-tour sur la butée, de continuer d'être enroulée dans le sens inverse. Le placement des butées permet ainsi de « programmer » le changement de sens d'une roue. Il est possible aussi de laisser de la longueur de ficelle non enroulée de façon à garder la roue immobile un certain temps.

La programmation de l'automobile se fait donc en enroulant chacune des deux ficelles sur son axe, en choisissant les sens d'enroulement, les portions de ficelles laissées libres (pour les arrêts) et le changement de sens en plaçant des butées sur l'axe de sorte à pouvoir inverser le sens d'enroulement.

3. Description d'une séquence en classe

Un atelier de construction d'un tel automate a été réalisé à plusieurs reprises : auprès d'élèves en classe de seconde (une trentaine), d'élèves de première (une dizaine), et d'un petit groupe de jeunes professeurs de mathématique de lycée (une demi-douzaine) lors d'un stage de vacances.

3.1. Présentation du matériel

Une maquette de la partie programmable de l'automate a été réalisée par les participants. Pour cela le matériel nécessaire est :

- Un bâton de bois pour constituer l'axe d'un diamètre d'au moins 1cm, morceau d'environ 10 cm à 30 cm de long.
- Des petits clous sans tête (prévoir 5 clous par bâton environ).
- De la ficelle (type ficelle de cuisine blanche ou cordelette) de 1 à 2 mètres de long.
- Des marteaux pour planter les clous

Voici en quoi consistera la manipulation :

Planter un clou à chaque extrémité du bâton pour pouvoir tenir le bâton tout en le laissant tourner librement. Planter un premier clou sur le côté du bâton, et y attacher la ficelle. Enrouler la ficelle sur le bâton. Éventuellement, planter d'autres clous sur le côté du bâton pour que la ficelle puisse tourner autour et changer de sens. Il est possible alors d'expérimenter, essayer des enroulements, des diamètres d'axe différents, etc.

3.2. Structure de la séance

Tout d'abord, on commence par une présentation du contexte historique d'Héron d'Alexandrie comme l'a présenté l'article ci-dessus, avec plus ou moins de temps passé sur les textes grecs en fonction du public et de l'intérêt pour la culture de la Grèce antique. Cette introduction dure de 5 à 20 minutes (cet atelier peut être fait en cours de grec, c'est pourquoi cette introduction peut paraître longue pour un cours d'informatique). Toutes les figures de cet article peuvent être utilisées le cadre de l'activité auprès du public.

Le matériel est ensuite distribué aux participants.

L'enseignant invite un élève à tenir le bâton par les deux clous qu'il aura plantés aux extrémités. Puis comme sur la figure 8, il fixe la ficelle autour du bâton, par un nœud autour d'un clou ou plus simplement si la cordelette est plus épaisse la clouant au bâton. Un autre enroule la ficelle autour du bâton, et lorsqu'il le souhaite change de sens, il forme une boucle autour d'un clou, comme sur la figure 9.



Figure 8 : *Matériel nécessaire, et machine prête à l'enregistrement d'un parcours par les élèves.*

Pour démarrer le « programme de déplacement », il convient de tirer régulièrement et assez lentement, sur la ficelle tendue. Le bâton tournera dans un sens ou dans l'autre alternativement suivant la séquence enregistrée.

Au moment de dérouler la ficelle, si les participants ont suivi les consignes attentivement, c'est le moment de l'effet « waooh » (Houdart, 2019). En effet, Jusque-là, on peut suivre laborieusement les explications qui indiquent que les roues vont changer de sens, l'avoir compris éventuellement, mais quand on se rend compte par l'expérience comment les clous ont vraiment pour effet de faire changer de sens la rotation du bâton, cela semble un peu magique (comme devaient l'être les effets des automates antiques pour les personnes qui venaient au temple). Nous invitons le lecteur à faire l'expérience par lui-même.

Il est ensuite possible de complexifier la séquence pour faire tourner deux roues (ici deux bâtons) de manière synchronisée en tirant deux ficelles nouées, et pour y insérer des temps de pause d'un côté ou de l'autre, avancer ou reculer d'un côté ou de l'autre, ce qui en pratique nécessite un groupe de trois ou quatre élèves pour plus de commodité. Toutefois, l'activité serait plus longue et l'on pourrait perdre l'attention de certains participants.

3.3. Résolution d'un problème

Voici, une fois un temps libre d'expérience laissé, comment revenir au contexte historique avec un problème à résoudre par les participants :

« Quel doit être l'algorithme d'enroulement pour programmer un parcours correspondant aux besoins d'un prêtre grecque ? A savoir : le trépied doit entrer sur scène pour apporter les offrandes, s'arrêter le temps des prières, puis effectuer un demi-tour et sortir de scène. Puis implémenter cet algorithme sur votre essieu. »

3.4. Éléments d'analyse

Exemple de réalisations d'enroulements d'élèves sur un essieu ci-dessous, voir figure 9.

Pour programmer simplement un parcours prédéterminé, une stratégie consiste à procéder « à l'envers » : l'enregistrement du parcours peut être réalisé très simplement en faisant suivre à l'automobile autonome le parcours prévu en sens inverse. Ce moyen simple de programmation,

sans avoir à calculer les nombres de tours de roues en particulier, est, dans une certaine mesure, analogue à l'apport d'un langage informatique facilement interprétable par un humain, sans avoir à manipuler des registres basiques d'un langage d'un assembleur qui correspondent ici à des nombres de tours de roue, et des demi-tours. Il est donc possible d'utiliser cette analogie pour commenter les différents niveaux de langages informatiques, plus ou moins proche de l'humain ou de la machine.

À la fin de l'atelier, les participants demandent en général à garder leur essieu programmé en souvenir. Ainsi, ils peuvent démontrer le principe à leur entourage et donc l'essaimer.

Un an plus tard, les élèves se souvenaient encore de la présentation et avaient été singulièrement étonnés par l'abondance des connaissances grecques qui nous sont encore utiles, ou tout du moins qui sont des bases de nos techniques actuelles.

Les élèves semblent avoir perçu qu'avec un bout de bois et trois bouts de ficelles, on peut programmer une auto-mobile (qui se meut par soi-même) autonome et que la technologie ne doit pas cacher les principes simples sous-jacents. Ils ont pu découvrir comment « programmer mécaniquement » un automate mobile, avec des liens et des analogies à la programmation informatique.

Aspects pratiques :

- Attention, l'atelier peut être bruyant au moment de clouer les butées dans les essieux.
- On m'a demandé de refaire l'atelier après une première séance devant le succès rencontré, j'ai dû improviser sans baguette en bois circulaire, mais avec une de la forme d'un parallélépipède rectangle. Cela n'est pas aussi simple, mais présente l'avantage de permettre une forme de discrétisation du temps, et faciliter l'insertion des clous puisque l'essieu peut être posé à plat.



Figure 9 : *En tirant sur la ficelle, on la déroule. La roue va tourner dans un sens, puis s'arrêter, puis reprendre son roulement, puis changer de sens, et enfin continuer de tourner jusqu'à la fin.*

4. Réalisation de maquette fonctionnelle en Lego

Une maquette en Lego a été réalisée par l'autrice avec une ficelle et du sable à des buts de démonstration. Cela permet de montrer l'ensemble de l'automate où la programmation avec l'essieu est réalisée. L'auto-mobile programmable se déplace sur une vingtaine de centimètres en une poignée de minutes. Programmé, il avance droit puis change de direction en tournant au milieu du parcours (voir figure 10).

Une telle maquette pourrait certainement être réalisée dans un projet par des élèves.

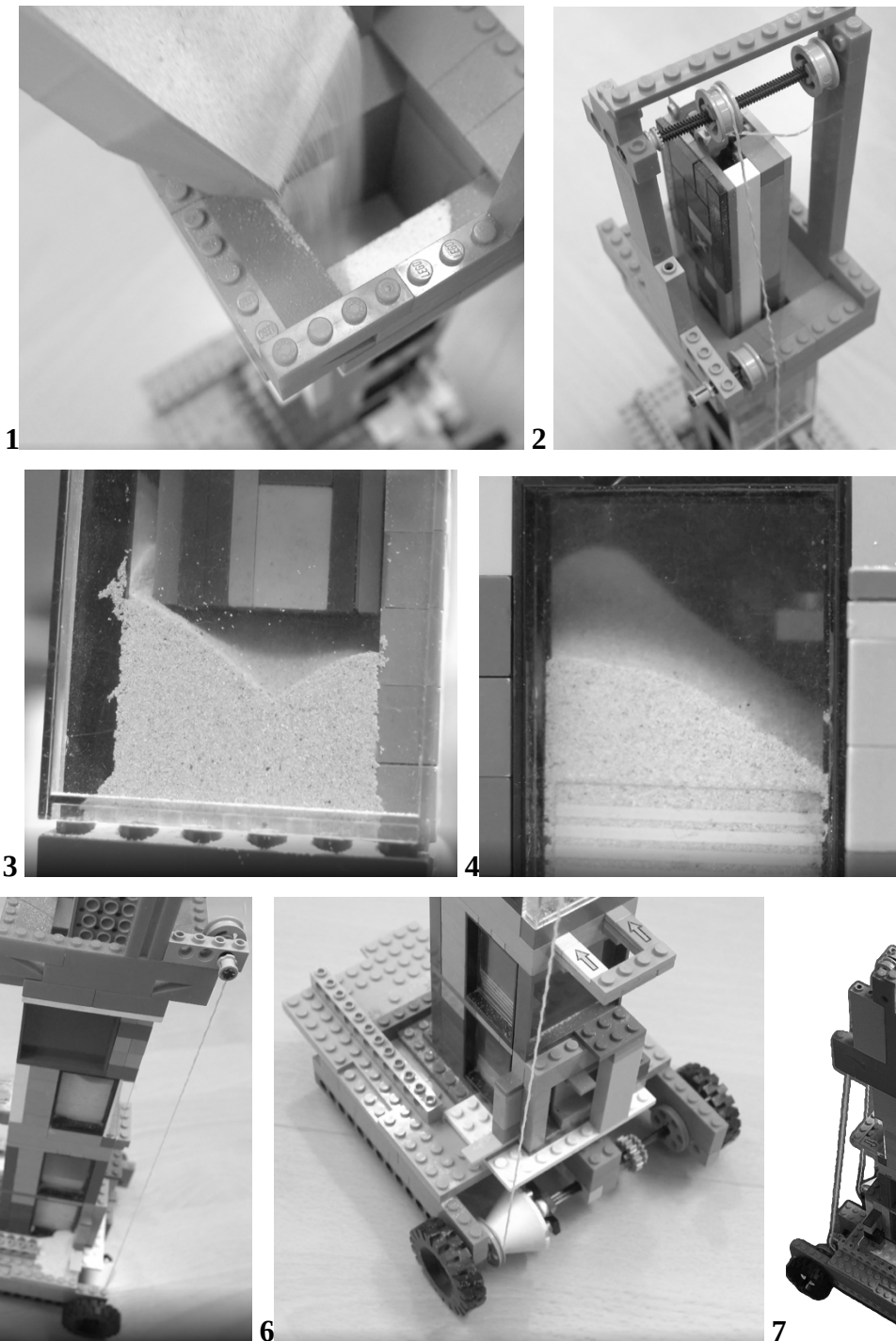


Figure 10 : 1-On remplit le compartiment supérieur avec du sable. 2-On repose dessus la masse lourde elle-même remplie de sable. 3-On ouvre le trou du sablier (flèche visible sur photo 6) ce qui provoque l'abaissement du niveau de sable sous la masse. 4-Le sable remplit petit à petit le compartiment inférieur, ce qui provoque la lente descente de la masse. 5-La masse entraîne la ficelle qui passe par une poulie pour redescendre vers les roues où elle y est enroulée. 6-La ficelle se déroule et actionne les roues. 7-On peut faire deux essieux indépendants avec deux ficelles.

Conclusion

Il est très satisfaisant de lier Mathématiques, Informatique, Physique et Grec, car il est rare de pouvoir lier en particulier grec et informatique. On se rend compte que l'on peut très facilement programmer un véhicule autonome avec un tout petit peu de matériel, tout en introduisant la fonction de différentes parties d'un robot (horloge, stockage d'énergie, programme, moteurs...). Les trépieds d'Héphaïstos et d'Héron nous semblent avoir un grand potentiel pour l'enseignement : un travail des élèves sur plusieurs jours, par exemple en science de l'ingénieur ou en NSI, pourraient construire les trépieds en entier voire développer des capteurs mécaniques sans électroniques. Un travail d'approfondissement des apprentissages possibles, et d'explicitation des liens avec les notions informatiques abordées et avec les programmes reste encore à développer. Cette proposition activité laisse entrevoir que cela est possible, et apporte des éléments pratiques pour des réalisations avec les élèves.

Références bibliographiques

- Aristote. (Politique 1, 4, 1253b33-1254a1). In J. Tricot (Trad.), *Politique*. Vrin.
- CanoProf (s. d.) 125 ap. J.-C. *Les automates de Héron d'Alexandrie robotique aux cycles 3 et 4*. Consulté le 16 avril 2025, à l'adresse https://atelier-canope-95.canoprof.fr/eleve/Automates%20et%20robots/res/robot.dossierHtml/co/04heronDalexandrie_2.html
- Collognat, A. et al. (2020) *Ex Machina*. Les Belles Lettres. ISBN9782251450971
- Corot, E. (2017) *CorotBot* APMEP 524.
- Corot, E. (2022) *Mission Space Lab Phase 4 report outline*. Consulté le 1^{er} juin 2022 à l'adresse <https://sergi5.com/astropi/astropi-pantheon.pdf>
- Héron d'Alexandrie. (1530-1539) *Pneumatica*. Gallica.
- Homère. (1897). *L'Iliade [expliqué littéralement, traduit et annoté par C. Leprévost]*. Hachette et Cie. Chant XVIII
- Homère. (1859). *Cinquième chant de l'Iliade [traduit par C. Leprévost]*. L. Hachette
- Homère. (2019). *L'Iliade*. République des Lettres. Chant V
- Houdart, M. (2019). *Very Math Trip*. Sciences. ISBN 9782081494480. Flammarion.
- Houlou-Garcia, A. (2019) *Mathematikos*, Les Belles Lettres. ISBN 9782251449326
- Kostas Kotsanas. *Musée des Technologies des Grecs de l'Antiquité*. Grèce. Consulté le 1^{er} juin 2022 à l'adresse <http://kotsanas.com/fr/exh.php?exhibit=0501001>
- Marcinkowski, A., & Wilgaux, J. (2004). Automates et créatures artificielles d'Héphaïstos : entre science et fiction. *Techniques & Culture*, 43-44. <http://journals.openedition.org/tc/1164>
- McGarth, A. & Clarke, S (producteurs et réalisateurs). « Grandes découvertes de l'Antiquité – Automates machines et effets spéciaux », 2002, France 5.
- Sharkey, N. (2007) *The programmable robot of ancient Greece*. New Scientist.
- Sidoli, N. (2011). Heron of Alexandria's date. *Centaurus*, 53(1), 55-61.