



HAL
open science

La liburne automotrice du De rebus bellicis

Philippe Fleury

► **To cite this version:**

Philippe Fleury. La liburne automotrice du De rebus bellicis. La technologie gréco-romaine entre restitution et reconstitution. Lire entre les lignes, mettre en les mains, Mar 2010, Caen, France. pp.77-96. hal-01609460

HAL Id: hal-01609460

<https://hal.science/hal-01609460v1>

Submitted on 3 Oct 2017

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.

LA LIBURNE AUTOMOTRICE DU *DE REBUS BELLICIS*

Un traité anonyme du IV^e siècle p.C., le *De rebus bellicis*, décrit, parmi d'autres nouveautés en matière d'ingénierie militaire, une liburne automotrice. Il s'agit d'un navire de guerre à roues à aubes, dont l'énergie motrice est fournie par des manèges d'animaux. Aucune autre source littéraire ancienne, aucune source archéologique ou iconographique ne témoigne de l'existence de ce système qui a souvent laissé les chercheurs bien dubitatifs. Un des premiers éditeurs modernes du *De rebus bellicis*, R. Schneider, a écrit en 1908: «*Die Liburna ist geradezu verrückt*», c'est-à-dire «La liburne est carrément insensée»¹, et, plus récemment, en 1989, A. Giardina considère que si le char à faux, décrit aussi par l'anonyme, aux chapitres 12 à 14, fut d'abord une réalité sur les champs de bataille et ensuite un mythe de l'ingénierie militaire, le navire à roues actionnées par des bœufs fut exactement le contraire: né comme une machine fantastique («*macchina fantastica*»), il ne trouva une application réelle qu'avec l'invention de la vapeur². Même un spécialiste des techniques dans l'Antiquité comme J.G. Landels³ doute que le système ait pu réellement fonctionner. Le propos de cette communication est de montrer que la liburne automotrice décrite dans le *De rebus bellicis* peut être restituée virtuellement à partir du texte confronté aux connaissances techniques du IV^e siècle p.C., que le modèle virtuel fonctionne et qu'il aurait donc pu y avoir des applications pratiques de ce système dès l'Antiquité. L'enjeu est important pour l'histoire des techniques car, si l'hypothèse est exacte, la première propulsion d'un navire par des roues à aubes ne devrait pas être attribuée à Denis Papin à la fin du XVII^e siècle avec un moteur à vapeur (ou à Robert Fulton au début du XIX^e siècle pour des modèles opérationnels), mais elle serait à remonter d'au moins treize siècles avec un moteur animal. Nous nous pencherons d'abord sur le texte lui-même, sa fiabilité, les dessins des manuscrits. Nous verrons ensuite, dans l'histoire des techniques, les indices qui permettent d'accréditer l'existence du système. Nous terminerons par une présentation de la restitution virtuelle du système et de son analyse technique⁴.

1. Anonyme, *De rebus bellicis*, R. Schneider (éd.), Berlin, Weidmann, 1908, p. 33.
2. Anonimo, *Le cose della guerra*, A. Giardina (éd.), Milan, Mondadori, 1989, p. XVII.
3. J.G. Landels, *Engineering in the Ancient World*, Londres, Chatto and Windus, 1978 (rééd. : Berkeley – Los Angeles, University of California Press, 2000), p. 15-16.
4. Ce travail fait partie du projet d'interprétation du *De rebus bellicis* dans le cadre d'une édition pour la Collection des Universités de France, mais il s'inscrit dans le cadre plus large de la restitution de la Rome du IV^e siècle p.C., sous ses aspects à la fois architecturaux, urbanistiques et technologiques (voir www.unicaen.fr/rome et www.unicaen.fr/ersam).

La source

Le *De rebus bellicis* est un petit traité anonyme dans lequel l'auteur adresse à l'empereur des propositions de réforme dans le domaine fiscal, monétaire et militaire. Il ne s'agit pas d'un « ingénieur mécanicien » du même type que Vitruve, l'auteur du *De architectura*. Si nous devons le qualifier en utilisant des notions modernes, nous parlerions d'un ingénieur en sciences sociales, d'un spécialiste en sciences économiques et financières. Le titre qui a été donné à son traité, probablement à une époque tardive, en reflète mal le contenu, puisque les machines de guerre n'occupent guère plus de la moitié de ce qui nous a été conservé (l'ouvrage paraît inachevé) et que ce n'est pas dans le domaine technique de la construction militaire que l'anonyme semble le plus expert. Au moment où il écrit, l'auteur n'exerce pas de fonction officielle⁵, mais le vocabulaire qu'il emploie pour traiter des questions administratives et financières indique qu'il fut probablement un fonctionnaire de l'administration civile impériale, en contact étroit avec le monde et la culture des *apparitores*⁶, une classe de fonctionnaires au service des magistrats à laquelle appartenait aussi Vitruve. Il s'agit donc de quelqu'un de « fiable », qui propose au prince de véritables innovations dans la politique monétaire, dans la politique sociale, dans la science de la guerre⁷. Dans le domaine militaire, il suggère une augmentation de la puissance de l'armée grâce à l'adoption de nouvelles machines ou à l'amélioration d'anciens systèmes :

Ainsi donc, Empereur invaincu, en renforçant aussi ton armée invaincue de ces inventions mécaniques, tu doubleras sa puissance : tu feras face aux incursions ennemies non seulement par la force et la violence, mais également par le génie technique⁸.

Mais son traité n'est pas destiné aux praticiens : personne, ni aujourd'hui, ni dans l'Antiquité, ne serait capable de construire les machines proposées par l'auteur anonyme du *De rebus bellicis* avec les seules indications données dans l'ouvrage. C'est un livre de principes.

-
5. Anon., *De rebus bell., praef. 4* : *Sed fas erit rei publicae praesulem a priuato desiderata cognoscere, cum rerum utilitas interdum eum lateat inquirentem* / « Mais il sera permis au Chef de l'État de connaître les propositions provenant d'un particulier étant donné que parfois l'utilité des choses échappe à son enquête » ; *praef. 16* : *Verum quia illos multa occupatos effugiunt, otio persuasus, non adeo a rerum commoditatibus peregrinus, utilia uestrae felicitati undique redacta conferre gestiui* / « parce que beaucoup de choses échappent à ces gens occupés, inspiré par le loisir et pas trop étranger au côté pratique des choses, j'ai été impatient de rassembler des éléments utiles à Votre Félicité en allant les chercher de toutes parts ». L'édition utilisée dans cet article est celle de R.I. Ireland, Leipzig, Teubner, 1984, pour le texte latin. Les traductions sont personnelles.
 6. Voir à ce sujet l'analyse d'A. Giardina, p. XXXIII-XXXVI.
 7. Voir en dernier lieu H. Jouffroy, « Le *De rebus bellicis*, source d'histoire militaire ? Avec traduction française intégrale du traité », in *L'armée romaine de Dioclétien à Valentinien I^{er}* (Actes du congrès de Lyon, 12-14 septembre 2002), Y. Le Bohec, C. Wolff (éd.), Lyon, Université Jean Moulin – Lyon 3, 2004, p. 55-67.
 8. Anon., *De rebus bell.* 18, 7 : *His igitur, inuicte imperator, machinarum quoque inuentionibus communitam potentiam inuicti duplicabis exercitus, hostium incursibus non ui solum et uiribus obuiando, sed etiam artis ingenio.*

Sa datation a été controversée. Si l'on met de côté l'hypothèse extravagante de R. Schneider⁹ qui en attribue la paternité à un humaniste du XIV^e siècle et celle, plus réaliste mais généralement contestée, de R. Neher¹⁰ qui le date du règne de Justinien (527-565 p.C.), toutes les datations proposées sont comprises dans une fourchette qui va du règne de Constance II (337-361 p.C.) à celui de Théodose (379-395 p.C.), avec une préférence pour la période qui précède le désastre d'Andrinople en 378 (où l'empereur Valens lui-même fut tué et où seulement un tiers de l'armée romaine échappa au massacre) puisque, dans le traité, il est seulement question d'ennemis menaçant l'Empire¹¹ et non d'invasions effectives. A. Cameron avance une proposition précise : l'anonyme aurait dédié son livre à Valens à la fin de 368 ou au début de 369 p.C.¹²

Le texte est transmis par quatre manuscrits principaux des XV^e et XVI^e siècles, dont trois au moins¹³ dérivent de façon sûre d'un archétype, le *Spirensis* (X^e siècle ?), perdu au XVI^e siècle. Trois passages concernent la liburne automotrice. Il est à noter qu'ils ont été transmis de façon exactement identique et sans problèmes de compréhension dans les quatre manuscrits principaux.

Nous montrerons donc que, par la maîtrise de l'ingéniosité, un type de liburne très rapide surpasse dix navires, si bien qu'elle les anéantit sans le secours d'une chiourme nombreuse¹⁴.

Une liburne adaptée au combat naval, qu'en raison de sa taille la faiblesse humaine empêchait d'une certaine manière d'être manœuvrée à bras d'hommes, est propulsée par la force animale secondée par l'intelligence humaine pour aller facilement là où le besoin l'appelle. Dans sa coque (c'est-à-dire l'espace libre intérieur), des paires de bœufs attelés à des machines font tourner des roues fixées sur les flancs du navire ; sur leur pourtour (c'est-à-dire sur la circonférence), il y a des rayons en saillie ; lorsque les roues tournent, ils sont mis en mouvement et leur action chasse l'eau à la manière des rames – effet étonnant de la technique – et l'impulsion fait naître le déplacement.

-
9. R. Schneider, « Von Büchlein De Rebus Bellicis », *Neue Jahrbücher für das klassische Altertum*, 23, 1910, p. 327 sq.
 10. R. Neher, *Der Anonymus de Rebus Bellicis* (Dissertation), Tübingen, Heckenhauer, 1911.
 11. Anon., *De rebus bell.* 6, 1-3 : *In primis sciendum est quod imperium romanum circumlatrantium ubique nationum perstringat insania et omne latus limitum tecta naturalibus locis appetat dolosa barbaries* / « Il faut d'abord savoir que l'Empire romain est assiégé par de furieuses nations qui aboient partout autour de lui et que chaque frontière est menacée par la convoitise d'une barbarie perfide, dissimulée dans des abris naturels ».
 12. A. Cameron, « The Date of the Anonymous *De Rebus Bellicis* », in *De rebus bellicis*, M.W.C. Hassal, R. Ireland (éd.), Part I : *Aspects of the De Rebus Bellicis, papers presented to Professor E.A. Thompson*, Oxford, British Archeological Reports, International Series, 1979, p. 1-7 (Part II : *The text edited, translated and presented, with commentaries on text, language and style*, by R. Ireland).
 13. C (Oxon. Canonicianus 378, XV^e siècle, Oxford), M (Monac. Lat. 1029, XVI^e siècle, Munich) et V (Vindobon. Lat. 3103, XV^e siècle, Trente). Le quatrième, P (Paris. Lat. 9661, XV^e siècle, Paris), dérive sinon du *Spirensis* lui-même, tout au moins d'un manuscrit frère (au total, quinze manuscrits sont conservés).
 14. Anon., *De rebus bell.*, Praef. 12 : *Docēbimus igitur uelocissimum liburnae genus decem nauibus ingenii magisterio praeualere, ita ut haec per eam sine auxilio cuiusquam turbae obruantur.*

En plus cette liburne, grâce à sa propre masse et grâce aux machines qui sont en fonctionnement à l'intérieur, engage le combat avec un tel débordement d'énergie qu'elle met facilement en pièces toutes les liburnes adverses qui s'approchent d'elle¹⁵.

Si, dans une guerre navale, l'ennemi fuyant la terre occupe les mers, la liburne, fendant les flots à une vitesse qui n'avait pas encore été imaginée, propulsée par des roues et des bœufs, un peu comme si elle était sur la terre ferme, rapportera la victoire sans délai. En effet qui résisterait à sa puissance : elle s'appuie sur la robustesse d'un véhicule terrestre et profite de la facilité de mouvement d'un navire¹⁶ ?

Le *De rebus bellicis* était accompagné d'illustrations, annoncées par l'auteur lui-même, dont douze (c'est-à-dire peut-être la totalité) ont été conservées dans trois manuscrits sur quatre¹⁷ :

Mais pour qu'il n'y ait pas de difficulté à mettre ces types d'armement à exécution, j'ai ajouté à la suite de mon discours des figures coloriées de ces engins, sans m'éloigner de la réalité, afin qu'il soit facile de les reproduire¹⁸.

Ces illustrations ayant toutes chances d'être sinon de l'auteur lui-même, du moins contrôlées par lui, elles sont donc un élément essentiel du travail de restitution. La figure de la liburne (fig. 1), dans les trois manuscrits qui la transmettent, est placée juste avant le chapitre 17 qui la décrit. Les variantes entre les trois versions sont peu significatives. Cette illustration est celle qui a connu la fortune la plus importante.

Les indices permettant d'accréditer l'existence du système

Nous avons donc un texte fiable, une illustration originale qui a été transmise, mais aucun témoignage sérieux qui permettrait de prouver que le système a bien été construit

15. Anon., *De rebus bell.* 17: *Liburnam naualibus idoneam bellis, quam pro magnitudine sui uirorum exerceri manibus quodammodo imbecillitas humana prohibebat, quocumque utilitas uocet ad facilitatem cursus ingenii ope subnixa animalium uirtus impellit. In cuius alueo uel capacitate bini boues machinis adiuncti adhaerentes rotas nauis lateribus uoluunt, quarum supra ambitum uel rotunditatem exstantes radii, currentibus iisdem rotis, in modum remorum aquam conatibus elidentes miro quodam artis effectum operantur, impetu parturiente discursum. Haec eadem tamen liburna pro mole sui proque machinis in semet operantibus tanto uirium fremitu pugnam capescit, ut omnes aduersarias liburnas comminus uenientes facili attritu comminuat.*

16. Anon., *De rebus bell.* 18, 9-10: *Quod si nauali bello terras fugiens maria hostis obsideat, nouo celeritatis ingenio terrestri quodammodo ritu rotis et bubus subacta fluctibus liburna transcurrrens restituet sine mora uictoriam. Quis enim huius uiribus resistet, quae et terrestris uehiculi nititur firmitate et habet de nauigii facilitate remedium ?*

17. Manuscrits C, M et P. Dans le manuscrit V, les emplacements ont été réservés pour les figures mais celles-ci n'ont jamais été réalisées. Cf. E.A. Thompson, *A Roman Reformer and Inventor*, Oxford, Clarendon Press, 1952, p. 8. Dans M, les figures sont doublées : une première série se trouve dans le texte même, une seconde série a été ajoutée à la fin. Voir J.J.G. Alexander, « The Illustrations of the *Anonymus. De rebus bellicis* », in *Aspects of the De Rebus Bellicis...*, p. 11-13.

18. Anon., *De rebus bell.* 6, 5: *uerum ne qua difficultas in excitandis armorum generibus oriatur, imaginem tormentorum nihil a uero distantem coloribus adumbratam orationi subieci, ut sit facilis imitandi confectio.*



Fig. 1 – L'illustration de la liburna dans les manuscrits du *De rebus bellicis* (Oxford, Manuscrit C: Oxon. Canonicianus 378, XV^e siècle)

et utilisé. Cependant une série d'indices montre qu'il a pu l'être bien avant l'invention de la machine à vapeur et même bien avant le IV^e siècle p.C., époque du *De rebus bellicis*: d'une part les roues à aubes, la transmission par engrenages et les manèges d'animaux sont largement répandus dans l'Antiquité; d'autre part, si l'utilisation de manèges d'animaux sur des engins flottants semble être une pratique rare, elle est attestée de façon sûre au moins au XIX^e siècle.

La roue à aubes est déjà connue au III^e siècle a.C. : Philon de Byzance décrit dans ses *Pneumatiques* une petite roue à palettes qui tourne sous l'effet de l'eau¹⁹ et une chaîne à godets automotrice²⁰. Au I^{er} siècle a.C., Lucrèce y fait allusion²¹ et Vitruve décrit des appareils automoteurs pour élever l'eau, des roues à augets équipées d'aubes :

On utilise aussi sur les rivières des roues de même type que celles décrites ci-dessus [i. e. les roues à augets manœuvrées par des hommes]. Sur tout le pourtour sont fixées des aubes qui, lorsqu'elles sont frappées par la force du courant, sont mises

19. Phil. Byz., *Pneum.* 54.

20. Phil. Byz., *Pneum.* 65. L'appareil moteur n'est pas une roue à aubes proprement dite; il s'agit d'une roue à godets dans lesquels l'eau est amenée par un conduit, mais le principe est le même que celui de la roue à aubes.

21. Lucrèce (5, 516) imagine qu'un courant d'air peut faire mouvoir la voûte céleste par sa partie inférieure, « à la manière des roues à augets que le courant fait tourner sous nos yeux » (*ut fluuios uersare rotas atque haustra uidemus*). Toutefois certains éditeurs considèrent les vers 509 à 533 comme interpolés.

en mouvement et font tourner la roue ; elles puisent ainsi l'eau par des augets et, l'élevant jusqu'au haut, sans l'action des pieds de manœuvres, mais par la seule force du courant, elles fournissent ce qui est nécessaire aux besoins²².

À la suite de ce texte, Vitruve décrit le moulin à eau qui repose, dit-il, sur le même principe (*fig. 2*). L'invention du moulin à eau, dont le schéma mécanique est exactement le même que celui de la liburne avec une inversion du sens d'application de la force motrice, remonte au I^{er} siècle a.C.²³, mais il est remarquable de constater que les témoignages littéraires et archéologiques se multiplient justement à partir du IV^e siècle p.C., c'est-à-dire à l'époque du *De rebus bellicis*²⁴.

Lors du siège de Rome en 537-538 p.C., Bélisaire a fait installer des moulins à eau sur des navires ancrés dans le Tibre²⁵, mais ce n'est pas la seule attestation de roues à aubes sur des navires : Vitruve et Héron d'Alexandrie (I^{er} siècle p.C.) décrivent déjà des compteurs de distance marins qui fonctionnent avec des roues à aubes. Le texte de Vitruve est particulièrement intéressant pour notre sujet et nous y reviendrons plus loin pour l'analyse technique (*fig. 3 et 4*) :

Sur l'eau, on procède de manière analogue, en ne modifiant que peu de choses à ce même système. On fait passer, en effet, par les flancs du navire, un essieu dont les extrémités débordent extérieurement. À ces extrémités sont emboîtées des roues de quatre pieds et demi, qui portent, fixées en saillie à leur pourtour, des aubes qui touchent l'eau. Le milieu de l'essieu, au centre du navire, porte en outre un tambour, avec une dent en saillie à sa circonférence. On place à cet endroit un châssis dans lequel est logé un tambour dont les quatre cents dents, également distribuées, engrènent sur la dent du tambour qui est monté sur l'essieu ; il a en outre, fixée latéralement, une autre dent saillant à sa circonférence. On placera au-dessus, logé dans un second châssis connexe, un tambour horizontal ayant même denture, ces dents s'engrenant avec la dent qui est fixée sur le côté du tambour placé de chant, de manière qu'en entraînant une à une, à chaque tour, les dents du tambour horizontal, la dent fasse accomplir au tambour horizontal une rotation complète. On doit avoir d'autre part des ouvertures dans le tambour horizontal, ouvertures dans lesquelles seront placés des cailloux ronds. Dans le compartiment, ou châssis, de ce tambour, on percera une ouverture unique ayant un petit conduit par où, lorsque la voie est libre, un caillou tombera dans un vase de bronze, en donnant un signal sonore. Ainsi quand le navire

22. Vitr. 10, 5, 1 : *Fiunt etiam in fluminibus rotae eisdem rationibus quibus supra scriptum est. Circa earum frontes adfiguntur pinnae quae, cum percutiuntur ab impetu fluminis, cogunt progredientes uersari rotam, et ita modiolis haurientes et in summum referentes.*

23. Les premiers témoignages littéraires sur l'existence des moulins à eau viennent de Vitruve, de Strabon (12, 3, 30) et d'Antipater de Thessalonique (*Anth. Pal.* 9, 418), dont le texte montre qu'à son époque (fin du I^{er} siècle a.C. ou début du I^{er} siècle p.C.) il s'agit d'une invention récente.

24. Outre les trois références que nous avons citées plus haut, le moulin à eau est encore mentionné deux fois avant le *De rebus bellicis* : Pline, *Nat.* 18, 97 et *Edict. Diocl.* 15, 54, mais au moins huit fois aux V^e et VI^e siècles p.C. : *Cod. Theod.* 14, 15, 4 ; *Pallad.* 1, 41 ; *Prud., c. Symm.* 2, 948-950 ; *Cassian., Conl.* 1, 18 ; *Cassiod., Var.* 11, 39, 2 ; *Inst. Diu.* 1, 29 ; *Procop.* 5, 19, 8-9 ; *Greg. Tur., Franc.* 3, 19.

25. *Procop.* 5, 19, 19.

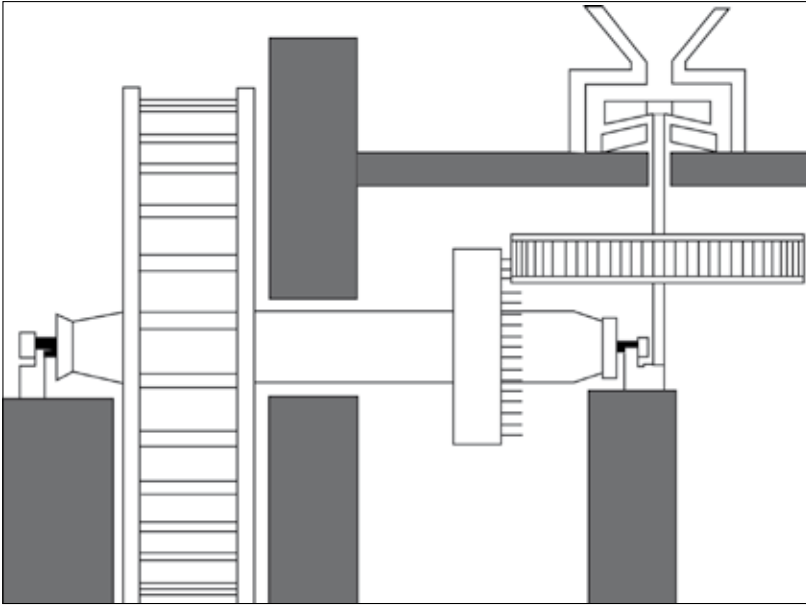


Fig. 2 – Le moulin à eau décrit par Vitruve au I^{er} siècle a.C.
(P. Fleury, *La mécanique de Vitruve*, Caen, PUC, 1993, p. 172, fig. 36)



Fig. 3 – L'hodomètre marin décrit par Vitruve au I^{er} siècle a.C.
(UCBN – Plan de Rome, France)



Fig. 4 – Le mécanisme de l'hodomètre marin de Vitruve
(UCBN – Plan de Rome, France)

sera propulsé par les rames ou par le souffle du vent, les aubes montées sur les roues, subissant, en se heurtant à l'eau, une poussée violente qui les rejette en arrière, feront tourner ces roues; et celles-ci, effectuant leur giration, mettront en mouvement l'essieu, et l'essieu le tambour, dont la dent, suivant son mouvement circulaire et entraînant à chaque tour une des dents du second tambour, détermine peu à peu sa révolution. Ainsi quand les aubes auront fait tourner quatre cents fois les roues, c'est une seule fois que le tambour, ayant accompli son mouvement circulaire, entraînera, avec la dent qui est fixée sur son côté, la dent du tambour horizontal. À mesure donc que la giration du tambour horizontal amènera les cailloux vers l'ouverture, elle leur permettra de passer par le petit conduit. Ainsi, à la fois par le bruit qu'ils font et par leur nombre, les cailloux indiqueront la distance en milles parcourue sur l'eau²⁶.

Le moulin hydraulique et l'hodomètre impliquent une transmission par engrenages et, qui plus est, une transmission coudée²⁷. Ces systèmes de transmission ont aussi été appliqués à l'élévation de l'eau, aux machines de sciage²⁸, peut-être aussi à l'élévation et à la traction des charges. Outre les sources textuelles, nous possédons pour les engrenages une documentation archéologique et iconographique qui est certes peu abondante mais qui est suffisante pour attester de leur utilisation à l'époque antique. Dans une thèse récente, Sophie Coadic en fait un inventaire complet qui, espérons-le, sera bientôt publié²⁹. Les systèmes employés couvrent à peu près tous les types

26. Vitr. 10, 9, 5-7.

27. Il a aussi existé des moulins hydrauliques avec roue à aube horizontale et transmission directe du mouvement à la meule, mais le système décrit par Vitruve implique bien une transmission coudée par engrenages.

28. Cf. Auson., *Mos.* 359-364.

29. S. Coadic, *Les machines d'élévation dans le monde romain du III^e siècle a.C. au VI^e siècle p.C.*, thèse soutenue à l'université de Bordeaux III sous la direction de F. Tassaux, 2009. Voir sa communication dans le présent volume: « Les roues élévatrices d'eau antiques: du modèle de Vitruve à la variété des vestiges archéologiques », p. 69-76.

d'engrenages connus : roue dentée sur roue dentée, roue dentée sur lanterne, roue dentée sur vis, transmission parallèle, transmission perpendiculaire. Les ingénieurs de la Renaissance ont hérité de la connaissance et de l'usage de ces mécanismes dans lesquels le bois était largement employé alors qu'à l'époque contemporaine il a été supplanté par des pièces métalliques. L'exposition réalisée par l'Istituto e Museo nazionale di storia della scienza de Florence pour la Cité des sciences et de l'industrie de Paris en 1995 a offert à la fois un bilan de l'héritage et de la « renaissance » des systèmes mécaniques à cette époque et un bel exemple de l'usage de la restitution, dans une perspective à la fois scientifique et pédagogique, puisque cinquante maquettes fonctionnelles de machines conçues ou réalisées par Léonard de Vinci et les autres ingénieurs de la Renaissance ont été réalisées et exposées à cette occasion³⁰. Il y a eu du reste permanence de ces systèmes jusqu'au XX^e siècle avec les anciens moulins à vent ou à eau (fig. 5).

Les roues à aubes dont nous venons de parler sont toutes des roues motrices qui actionnent un système. En dehors du *De rebus bellicis*, nous n'avons pas d'exemple de roues à aubes mues par un moteur animal et servant à la propulsion. Cependant le type de moteur ici envisagé, le manège d'animaux, est bien connu aussi dans l'Antiquité, en particulier pour les moulins de type pompéien (fig. 6) et dans les systèmes d'élévation de l'eau. C'est le principe de la « roue perse » ou sakieh (saqiya) : un animal fait tourner une roue horizontale qui engrène sur une roue verticale dont l'axe est solidaire de la roue à élever l'eau (fig. 7) ; ce système était utilisé en Égypte dès le II^e siècle a.C.³¹. Le principe du manège d'animaux peut-il être transposé sur un navire ? Nous ne disposons d'aucun témoignage ni pour l'Antiquité, ni pour la Renaissance, hormis des élucubrations qui ont toutes été forgées en réalité à partir du *De rebus bellicis*³². Mais, au XIX^e siècle, le système est attesté en Angleterre et décrit par David Alan Stevenson, un ingénieur qui l'a vu fonctionner :

À Yarmouth le Horse Packet a une longueur de 60 pieds et un bau de 18 pieds. Il est mû par un manège de quatre chevaux qui tournent sur un cercle de 18 pieds de diamètre dans lequel ils sont trop confinés et ne travaillent ainsi qu'à moitié. L'axe de rotation porte à chaque extrémité deux roues biseautées par lesquelles le mouvement est transmis des chevaux à l'axe des roues à aubes de 7 pieds de diamètre. Le navire avance à une vitesse d'environ 6 nœuds³³.

D'autre part, l'usage de manèges de chevaux sur des radeaux est attesté en Finlande au XX^e siècle (fig. 8 et 9).

30. P. Galluzzi, *Les ingénieurs de la Renaissance, de Brunelleschi à Leonard de Vinci*, Florence, Istituto e Museo di Storia della Scienza, 1995.

31. R.J. Forbes, *Studies in Ancient Technology*, Leyde, E.J. Brill, 1956-1971 (9 vol.), p. 676.

32. Voir par exemple la liste qui a été dressée par S. Reinach, « Un homme à projets du Bas-Empire », *Revue archéologique*, 5^e série, t. 16, juillet-décembre 1922, p. 242-250.

33. D.A. Stevenson, *English Lighthouse Towers*, Londres, T. Nelson and Sons Ltd, 1946, p. 59, cité par E.A. Thompson, *A Roman Reformer and Inventor*, p. 54.



Fig. 5 – Moulin à eau du début du XX^e siècle
(Finlande, Pielisen Museo – Lieksa ; cliché P. Fleury)



Fig. 6 – Moulin pompéien (UCBN – Plan de Rome, France)



Fig. 7 – Saqiya (cliché C. Fleury)



Fig. 8 – Radeau avec cabestan mû par des chevaux, début du XX^e siècle (Finlande, Pielisen Museo – Lieksa; cliché P. Fleury)



Fig. 9 – Radeau avec cabestan mû par des chevaux – détail et maquette
(Finlande, Pielisen Museo – Lieksa; cliché P. Fleury)

La restitution de la liburne

C'est à partir de l'ensemble de ces éléments que nous avons restitué virtuellement la liburne automotrice décrite dans le *De rebus bellicis* pour voir si elle est « viable ».

Le navire, support du système, ne fait pas partie du projet de recherche ici présenté dans une première version ; sa restitution est donc sommaire et peu détaillée. Végèce, qui est à peu près contemporain de l'anonyme, utilise le mot *liburna* au sens de « navire de guerre ». Il considère que c'est le type de bâtiment adopté par la marine romaine depuis la bataille d'Actium en 31 a.C.³⁴. Pour lui, il en existe de toutes les tailles :

En ce qui concerne la taille, les plus petites liburnes ont un seul rang de rames, celles qui sont un peu plus grandes en ont deux ; les mesures appropriées permettent de répartir les rangs de nage en trois ou quatre niveaux, parfois en cinq³⁵.

On se défiera donc de certaines définitions modernes déterminant la liburne comme un navire « bas et rapide » ou de définitions d'auteurs plus éloignés de l'anonyme que Végèce, comme Lucain ou Appien, qui l'assimilent à un navire à deux rangs de rames³⁶. En fait le mot générique utilisé par l'anonyme ne nous renseigne pas sur la taille du navire, mais la première phrase du chapitre 17 (« Une liburne adaptée au combat naval, qu'en raison de sa taille la faiblesse humaine empêchait d'une certaine manière d'être manœuvrée à bras d'hommes... ») laisse plutôt penser à un navire d'un fort tonnage, même s'il faut tenir compte de l'exagération rhétorique. Du reste Prudence, un autre des contemporains du *De rebus bellicis*, parle de *turritas... liburnas*³⁷, c'est-à-dire de liburnes équipées d'une tour, donc de navires de taille déjà respectable³⁸. Pour l'expérimentation virtuelle, nous avons modélisé un navire de 35,75 m de long avec un bau maximal de 5 m. Nous avons gardé de chaque côté les caisses de rames : elles servent de structures de maintien aux axes des roues à aubes. La largeur hors-tout, y compris les caisses de rames et les roues à aubes, est de 7,5 m.

34. Veg., *Mil.* 4, 33.

35. Veg., *Mil.* 4, 37: *Quod ad magnitudinem pertinet, minimae liburnae remorum habent singulos ordines, paulo maiores binos, idoneae mensurae ternos uel quaternos interdum quinos sortiuntur remigio gradus.*

36. Lucan. 3, 533-534: *Lunata classe recedunt / ordine contentae gemino creuisse liburnae* / « Dans la flotte en croissant de lune sont en retrait les liburnes qui se contentent de s'élever en un double rang de rameurs » ; Appianus, *Ill.* 3: Ῥωμαῖοι τὰ κοῦφα καὶ ὀξέα δίκροτα Λιβυρνίδας προσαγορεύουσιν / « Les Romains appellent leurs navires à double rang, légers et fins, liburnes ».

37. Prud., c. *Symm.* 2, 530-531: *institerant tenues cumbae fragilesque faseli / inter turritas Memfitica rostra Liburnas.*

38. Pour les navires de guerre romains, voir C.G. Starr, *The Roman Imperial Navy, 31 B.C. – 324 A.D.* [1941], 2^e éd., New York, Barnes & Noble, 1960 ; L. Casson, *Ships and Seamanship in the Ancient World*, Princeton, Princeton University Press, 1971 ; M. Reddé, *Mare Nostrum. Les infrastructures, le dispositif et l'histoire de la marine militaire sous l'Empire romain*, Rome, École française de Rome (BEFAR ; 260), 1986. Pour une étude exhaustive du mot *liburna*, voir S. Panciera, « *Liburna*. Rassegna delle fonti, caratteristiche della nave, accezioni del termine », *Epigraphica*, 18, 1956, p. 130-156.

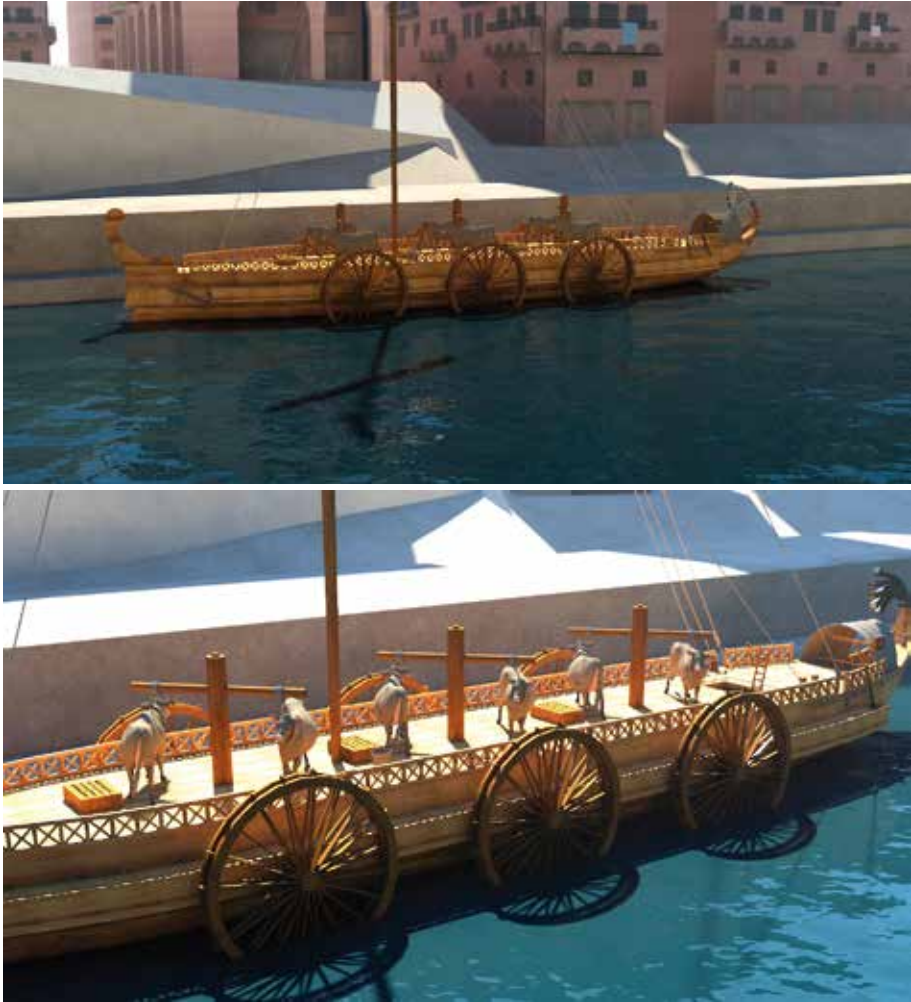


Fig. 10 – Restitution virtuelle de la liburne (UCBN – Plan de Rome, France)

Ces dimensions permettent de placer trois manèges de deux bœufs (fig. 10), comme sur l'illustration des manuscrits. Dans cette première version de la modélisation et comme sur l'illustration des manuscrits, nous avons placé les bœufs sur le pont du navire pour permettre une meilleure visualisation du système, mais il est plus probable qu'ils étaient en fait situés en dessous. Placer les manèges à l'intérieur de la coque offre un triple avantage : 1) les animaux sont protégés des projectiles lancés par l'ennemi ; 2) le centre de gravité du navire est abaissé ; 3) le pont est libre pour les soldats. C'est du reste ce que laisse entendre l'anonyme avec l'expression *In cuius alueo uel capacitate*, « dans la coque, c'est-à-dire dans l'espace libre intérieur ». Mais quelle que soit la position du manège, au-dessus ou au-dessous du pont, le principe de transmission

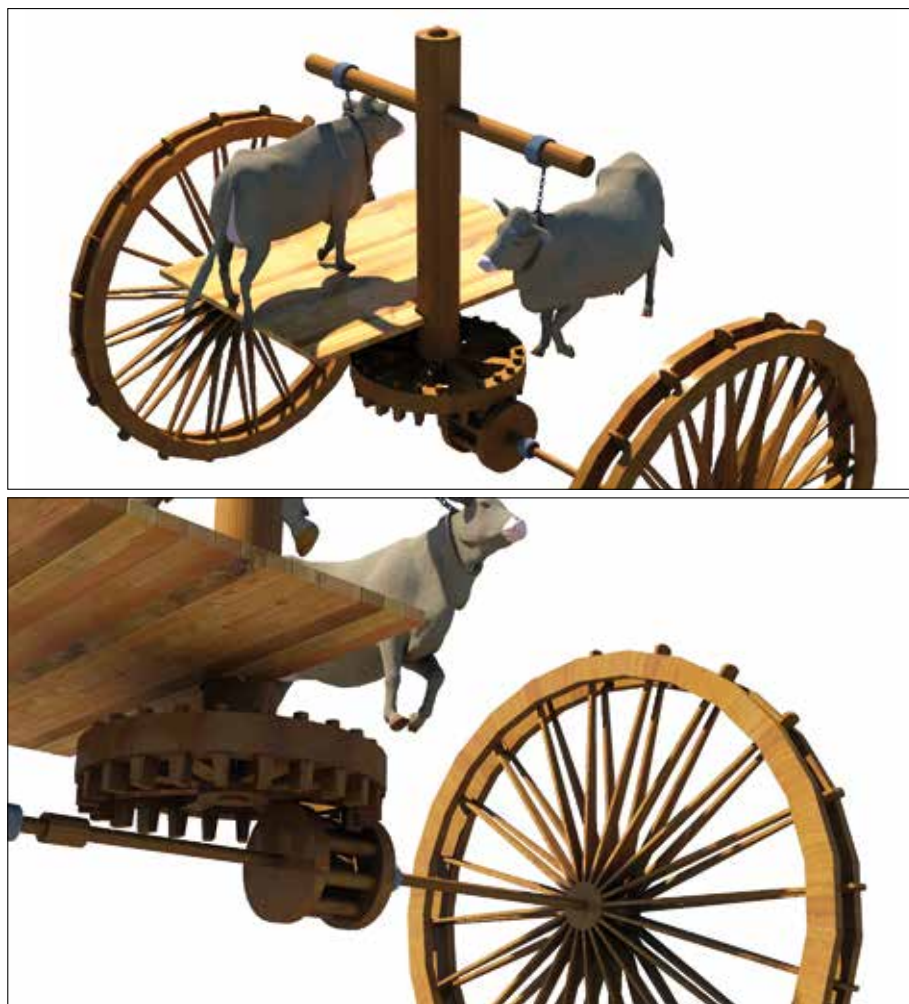


Fig. 11 – Mécanisme de la liburne virtuelle (UCBN – Plan de Rome, France)

mécanisme ne change pas : il s'agit de transformer une rotation sur plan horizontal en rotation sur un plan vertical. Nous proposons donc de fixer sur l'axe de rotation des manèges de bœufs une roue dentée en bois qui entraîne une lanterne, solidaire elle-même des roues à aubes fixées de chaque côté du navire (*fig. 11*).

L'analyse technique du système peut se faire selon deux approches différentes. La première consiste à ne prendre en compte que des paramètres de vitesse et à suivre un raisonnement analogue à celui de Vitruve pour l'hodomètre marin³⁹. Le navire de

39. Voir *supra*.

Vitruve est propulsé par des voiles ou par des rames et les roues à aubes sont entraînées par cette force motrice : leur vitesse de rotation est déterminée par la vitesse du navire. Le périmètre de la roue tangent avec la surface de l'eau détermine la distance parcourue pour un tour de roue : si l'on suppose un quart de pied d'enfoncement des aubes dans l'eau, le diamètre du cercle tangent à l'eau est de quatre pieds, sa circonférence est donc de 12,5 pieds. Lorsque la roue à aubes a fait un tour, cela signifie que le navire a parcouru 12,5 pieds, lorsqu'elle en a fait quatre cents (c'est-à-dire lorsque la grande roue dentée en fait un), cela signifie que le navire a parcouru un mille. Le système d'engrenages décrit par Vitruve fait que, tous les quatre cents tours effectués par la roue à aubes, un caillou tombe dans un récipient et, à la fin du voyage, le nombre de cailloux dans le récipient donne le nombre de milles parcourus. Dans le cas de la liburne, le système est inversé : ce ne sont plus les roues à aubes qui sont entraînées par le navire, au contraire ce sont elles qui entraînent le navire. Nous avons restitué des roues dont le diamètre du cercle tangent à l'eau est de 3,5 m, soit une circonférence de 11 m. L'anonyme dit qu'une liburne de ce type est « très rapide » (*uelocissimum liburnae genus*⁴⁰) et qu'elle engage le combat avec « puissance » (*tanto uirium fremitu*⁴¹). La difficulté pour situer la liburne du *De rebus bellicis* par rapport à ses concurrents est que nous manquons de données précises sur la vitesse des navires de cette époque. Pour l'évaluation, nous utilisons à la fois les données d'une reconstitution expérimentale, celle de la trirème Olympias⁴² (vitesse maximale de 9 nœuds, vitesse de croisière de 2,5 nœuds) et des reconstitutions théoriques (celle de P. Gille⁴³ par exemple : 3,6 à 5,2 nœuds pour les navires à rames de l'Antiquité). Prenons comme hypothèse une vitesse de patrouille de 5 nœuds et une vitesse d'éperonnage de 8 nœuds⁴⁴. Pour atteindre la vitesse de 5 nœuds, les roues doivent tourner à une vitesse de 842 tours/heure, pour 8 nœuds à une vitesse de 1347 tours/heure. Le cercle parcouru par les bœufs a 3 m de diamètre, soit une circonférence de 9,424 m. Sachant qu'un bœuf, selon sa race et son poids, peut marcher à une vitesse moyenne comprise entre 2 et 3 km/h et fournir un effort instantané jusqu'à 4,5 km/h⁴⁵, nous avons multiplié la vitesse par trois avec le système d'engrenages (la roue dentée a 24 alluchons, la lanterne a 8 fuseaux). Pour faire avancer la liburne à 5 nœuds, les bœufs doivent donc marcher à 2,6 km/h, pour la faire avancer à 8 nœuds, ils doivent marcher à 4,2 km/h⁴⁶.

40. Anon., *De rebus bell., Praef.* 12.

41. Anon., *De rebus bell.* 17.

42. J.S. Morrison, J.F. Coates, N.B. Rankov, *The Athenian Trireme. The History and Reconstruction of an Ancient Greek Warship*, 2^e éd., New York, Cambridge University Press, 2000.

43. P. Gille, « Les navires à rames de l'Antiquité, trières grecques et liburnes romaines », *Journal des savants*, 1965, 1, p. 36-72.

44. Le « nœud » représente le nombre de milles marins modernes (1 852 m) parcourus en une heure : 5 nœuds équivalent donc à 9,26 km/h, 8 nœuds à 14,81 km/h.

45. Voir *Agriculture africaine et traction animale*, G. Le Thiec (dir.), Montpellier, CIRAD, 1996, p. 193.

46. Nous négligeons ici l'effet de glissement : à la différence des roues sur la terre ferme, les roues à aubes « patinent » légèrement dans l'eau et les vitesses réelles sont un peu inférieures aux calculs théoriques.

La deuxième approche est celle des calculs théoriques de puissance. Autrement dit, six bœufs peuvent-ils propulser un navire de cette taille aux vitesses que nous venons d'évoquer ? Alain Hairie, ingénieur physicien retraité de l'université de Caen Basse-Normandie, membre de notre équipe de recherche, a effectué des calculs en se fondant sur une comparaison avec les péniches dites de la norme « Freycinet », du nom de l'ingénieur qui a établi en 1879 les gabarits des canaux de navigation. Il se trouve que les dimensions de la liburne restituée sont très proches de cette norme (38,5 x 5,05 m). Ces péniches avaient un poids à vide de 50 t et transportaient 300 t de fret pour un enfoncement d'environ 1 m. La charge de la liburne est beaucoup plus faible : supposons six bœufs de 350 kg, une cinquantaine d'hommes de 70 kg (moitié équipage, moitié soldats) et 1,5 t de matériel divers, cela donne environ 7 t de charge. Les flancs de la liburne peuvent donc être beaucoup moins hauts que ceux d'une péniche et A. Hairie suppose que le poids total en charge pourrait n'être par exemple que de 20 t. La propulsion d'une péniche de 350 t demandait une puissance de 35 kW, soit 50 ch, pour atteindre 3,24 nœuds (6 km/h), la vitesse maximale autorisée sur les canaux⁴⁷. On déduit de ces chiffres que le coefficient de résistance hydrodynamique de la péniche Freycinet était $C_x = 0,33$. Celui de la liburne, plus fine, devait être inférieur, mais compte tenu des pertes dues aux engrenages et aux roues à aubes, on peut garder la même valeur. On sait par ailleurs qu'un homme attelé à une « bricole »⁴⁸ peut haler une péniche de 300 t à 1 km/h. Il développe alors une puissance de 45 W. On estime la puissance de travail d'un mammifère à 1 W/kg pour un travail journalier de l'ordre de six heures. Six bœufs de 350 kg peuvent donc développer 2,1 kW et une puissance spécifique rapportée au poids total estimé à 20 t de $2,1/20 = 0,105$ kW/t. Pour 1 km/h, nous avons vu avec l'homme un exemple à $45 \text{ W}/300 \text{ t} = 0,15$ W/t. Pour calculer la vitesse de la liburne en kilomètres/heures, nous prenons la racine cubique du rapport $105/0,15 = 700$, qui vaut 8,88 km/h, soit 4,75 nœuds. Selon les calculs d'A. Hairie, la liburne automotrice avec six bœufs pourrait donc soutenir une vitesse de près de 5 nœuds, pour une patrouille de six heures. Pour un effort de durée réduite, par exemple d'une demi-heure, la puissance de travail peut être portée à 3 W/kg. Lors d'un éperonnage, on peut donc estimer la vitesse obtenue avec six bœufs à 12,7 km/h, soit 7 nœuds. Ces chiffres viennent à peu près confirmer ceux déterminés plus haut par la première approche (5 nœuds en patrouille, 8 nœuds pour l'éperonnage), mais l'estimation à 20 t du poids de la liburne en charge reste très hypothétique. Prenons un autre élément de comparaison, celui de la reconstitution physique de la trirème *Olympias*⁴⁹, et un autre mode de calcul. La trirème *Olympias* est un peu plus grande que la liburne que nous avons restituée (36,9 x 5,5 m contre 35,75 x 5 m). Elle a un poids total en charge de 70 t et est mue par 170 rameurs. Cela nous donne 2,5 hommes par tonne de déplacement. Si l'on considère qu'un bœuf de

47. Le « marocain » par exemple était une péniche de gabarit Freycinet, très effilée, propulsée par un moteur Bolinder qui ne développait que 45 ch.

48. Harnais passant sur l'épaule.

49. Voir *supra*.

350 kg vaut 5 hommes en puissance⁵⁰, il faudrait en théorie 34 bœufs pour obtenir les mêmes performances... Comment expliquer l'écart avec les calculs précédents? D'abord par la différence considérable dans l'estimation du poids total en charge : 70 t contre 20 t. Cet écart est probablement à réduire. L'Olympias est un peu plus grande que notre liburne et sa charge (205 hommes d'équipage au total contre 50 hommes et 6 bœufs) est plus importante. Considérons 10 t de moins pour la différence de taille et 10 t de moins pour la charge vivante, nous aboutissons à un poids total en charge de 50 t. Ensuite le rendement est meilleur avec des roues à aubes qu'avec des rames. L'action des rames est en effet intermittente : si l'on représente par une courbe le mouvement de l'extrémité de la pelle d'une rame (l'extrémité opposée à la poignée), on voit que seule la partie inférieure de la courbe (c'est-à-dire le temps où l'extrémité de la pelle est immergée) a une action propulsive. Pendant tout le reste de la courbe, l'effort du rameur consiste à déplacer la rame dans l'air. P. Gille, dans une étude très précise de la mécanique de la propulsion à rames⁵¹, estime à 1/3 la partie propulsive de la courbe et à 2/3 la partie effectuée dans l'air. De plus, pendant la partie non propulsive, le navire est soumis à une action retardatrice hydrodynamique. Lors de la partie propulsive suivante, le rameur doit donc à la fois compenser la résistance de l'eau et donner une accélération rétablissant la vitesse initiale. Avec les roues à aubes, l'effort est continu et cela peut expliquer que, sur les manuscrits des ingénieurs de la Renaissance, on trouve des représentations de petites embarcations où les rames sont remplacées par des roues à aubes mues par des hommes tournant des manivelles⁵².

*
* * *

Nous n'en sommes là qu'à une première version de la restitution, qui se veut la plus fidèle possible aux illustrations des manuscrits, et à une première étape de l'expérimentation virtuelle. D'autres paramètres techniques seront à prendre en compte, par exemple les particularités du travail en manège. Des expériences réelles montrent en effet que l'efficacité d'un travail circulaire est de 20 % inférieure à l'efficacité d'un travail en ligne droite et que, dans le cas d'utilisation de plusieurs animaux, il faut tenir compte en plus du manque de simultanéité des efforts (coefficient 1,86 pour 2 animaux)⁵³. Tout cela devra être inclus dans les calculs précédents, mais par ailleurs il faudra aussi tester s'il est possible d'augmenter le nombre de bœufs au travail dans les dimensions d'une coque « raisonnable », car, si les illustrations des manuscrits

50. Si l'on garde la valeur universelle d'1 W/kg pour les mammifères.

51. P. Gille, « Les navires à rames de l'Antiquité... », p. 43-50.

52. Par exemple Léonard de Vinci, *Cod. Atl.* f° 384 r° ou *Ms B.* f° 83 r°. Ce système semble aussi utilisé par les Chinois au XII^e siècle : voir E.A. Thompson, *A Roman Reformer and Inventor*, p. 53 et 78.

53. T. Duchenne, « Le point sur le harnais pour la traction animale », *Les dossiers « Le point sur »*, n° 5, 1984, Paris, GRET (Groupe de recherche et d'échanges technologiques) / GRDR (Groupe de recherche et de réalisations pour le développement rural dans le Tiers-Monde), p. 35.

représentent trois paires de bœufs, le texte ne précise pas ce chiffre, il parle simplement de *bini boues machinis adiuncti*, de « paires de bœufs attelés à des machines ». À l'évidence, le moteur est un peu « faible » avec trois paires de bœufs qui ne sont que l'équivalent de 3 cv pour un travail de six heures, mais, après tout, quatre chevaux (bien réels cette fois...) propulsaient le navire décrit par D.A. Stevenson (18,30 x 5,5 m) à 6 nœuds⁵⁴ pour un service régulier dans le port de Yarmouth en 1818. Quoi qu'il en soit, la restitution a permis de montrer que la liburne avance (peut-être pas aussi vite et avec autant de puissance que l'anonyme le dit) et que le système n'était pas « fou » ou « purement imaginaire ». Elle a donc pu être construite réellement. Pourquoi le système n'a-t-il pas fait fortune ? Pourquoi faudra-t-il attendre le moteur à vapeur pour voir le navire à roues à aubes se développer réellement ? Sans entrer dans des considérations générales concernant l'histoire des techniques dans son ensemble et l'intérêt du moteur mécanique par rapport au moteur animal, il est à noter que l'invention de l'anonyme ne pouvait avoir qu'une utilisation limitée dans la marine militaire, d'abord parce que le système des roues à aubes est encombrant et vulnérable au combat. Même au moment de l'introduction de la propulsion à vapeur dans la marine de guerre au XIX^e siècle, les navires à roues à aubes ne feront qu'une brève apparition et ils seront très vite remplacés par des navires à hélice⁵⁵. Ensuite le navire du *De rebus bellicis* n'est pas fait pour la haute mer : les bœufs (ou tout autre animal) ne peuvent travailler que sur une eau plate alors que les rameurs peuvent affronter tangage et roulis, même si les combats navals de l'Antiquité ne se déroulaient que par temps relativement calme. Cela limite pratiquement son utilisation aux rivières, à leur embouchure et aux baies abritées. Mais, après tout, peut-être était-ce, à cette époque, le principal domaine d'intervention de la marine romaine ?

Philippe FLEURY

ERLIS – ERSAM

Université de Caen Basse-Normandie

54. Voir *supra*.

55. Voir A. Reussner, « Les répercussions techniques, politiques, économiques et sociales de l'application de la vapeur à la navigation », in *Les origines de la navigation à vapeur*, M. Mollat (dir.), Paris, PUF, 1970, p. 9.

