

Mais comment pouvait-on ramer sur les galères du Roi-Soleil ?

In: Histoire & Mesure, 1986 volume 1 - n°3-4. pp. 147-208.

Citer ce document / Cite this document :

Burlet René, Carrière Jean, Zysberg André. Mais comment pouvait-on ramer sur les galères du Roi-Soleil ?. In: Histoire & Mesure, 1986 volume 1 - n°3-4. pp. 147-208.

doi : 10.3406/hism.1986.1536

http://www.persee.fr/web/revues/home/prescript/article/hism_0982-1783_1986_num_1_3_1536

Abstract

René Burlet, Jean Carriere, André Zysberg. But However Did they Row Aboard the Sun King's Galleys? Rowing aboard a combat vessel towards the end of the 17th century was a punishment, a criminal sentence and also, a professional activity. First, the work station is studied, the bench where 5 enslaved men lived and toiled ; then the tool: the oar and the elementary operations involved, which are the galley slaves' different positions as they row. The measurement of the work is based on an ergonomics analysis. Not only is the power required to propel the ship evaluated, but also the combined strength of individual efforts, the forces of inertia in the oars and in the body of the rowers. The results contradict the image of the galley as a « fast ship ». This man-machine system, fragile and not very autonomous, was limited by the physiological capacities of the galley slaves and only worked in a highly favorable environment: calm seas and no head winds.

Résumé

René Burlet, Jean Carriere, André Zysberg. Mais comment pouvait-on ramer sur les galères du Roi-Soleil ?

Ramer sur une galère de combat, vers la fin du XVIIe siècle, représentait un châtement, une peine réprimant divers illégalismes, et aussi une activité professionnelle. On étudie d'abord le poste de travail, de banc, où vivaient et besognaient 5 hommes de chiourme ; puis l'outil, la rame, ainsi que les opérations élémentaires, qui sont les positions successives des galériens lorsque ceux-ci actionnent l'aviron. La mesure

du travail suit l'analyse ergonomique. On évalue, non seulement la puissance nécessaire à la propulsion du navire, mais aussi celle qui résulte des travaux ajoutés, comme ceux contre l'inertie de la rame et du corps des rameurs. Les résultats contredisent l'image de la galère, « navire rapide ». Ce système homme-machine, fragile et d'une autonomie médiocre, était limité par les capacités physiologiques des galériens et ne

fonctionnait que dans un environnement pleinement favorable : mer calme et aucun vent contraire.

MESURE DE L'HISTOIRE

René BURLET, Jean CARRIERE, André ZYSBERG

Mais comment pouvait-on ramer sur les galères du Roi-Soleil ?

Les méthodes et les résultats que nous présentons ici sont dus à la collaboration entre un historien, un ergonome et un physicien. Chacun venait avec ses connaissances, sa façon de poser les questions et de tenter de les résoudre. Pourtant, s'il y a eu division ou partage des tâches, l'aboutissement de cette recherche ne s'explique pas seulement par la complémentarité des savoir-faire. L'historien possédait déjà le goût et l'expérience des analyses quantitatives ; l'ergonome s'est intéressé et engagé dans cette affaire parce qu'il se passionnait depuis longtemps pour l'histoire des techniques maritimes ; quant au physicien, il s'est familiarisé avec les domaines respectifs de ses deux compagnons « de banc », auxquels il a apporté bien d'autres richesses que la seule résolution d'un problème de mécanique et d'hydrodynamique. Des hypothèses aux conclusions, l'entreprise est l'expression d'un travail commun. Suffit-il de l'affirmer en préambule ? Nombre d'historiens - ou autres praticiens des sciences humaines -, s'ils recourent volontiers aux « services » d'ingénieurs et de techniciens, répugnent à détailler les procédures de calcul qu'ils ont utilisées et surtout à justifier leur emploi. Cette attitude apparaît d'autant plus ambiguë que le choix même des méthodes, aussi bien que la mise en oeuvre de celles-ci, infléchissent les résultats. Au mieux, la « machinerie » sera entrevue dans une note infra-paginale, au rayon des accessoires, avec les références bibliographiques et archivistiques, sans oublier les remerciements d'usage... Le texte de cet article voudrait ouvrir la « boîte noire », en fournir les clés, expliciter les étapes essentielles de l'algorithme.

Aux origines de cette étude, se trouve la fascination que l'historien éprouva pour un gisement documentaire sédimenté dans les archives de la Marine : la série des matricules ou registres d'inscription des forçats. Lorsqu'il décida - pour des motifs de prestige et de domination politique en Méditerranée - de restaurer la flotte de « ses » galères, l'Etat louis-quatorzien employa tous les expédients possibles pour se procurer des

rameurs, « l'âme » des galères disait Colbert. Il en fallait 260 sur une galère ordinaire, et près de 450 sur une « Réale » ou une « Patrone ». La chiourme comprenait trois catégories d'hommes de vogue : les esclaves, que l'on appelait aussi les Turcs - même si beaucoup d'entre eux étaient originaires d'Afrique du Nord -, les rameurs volontaires ou « bonevolgies », et enfin les condamnés ou forçats. Comme les premiers, qui formaient l'élite de la chiourme, coûtaient cher, et que les seconds se recrutaient de plus en plus difficilement, le métier de galérien suscitant de moins en moins de vocations parmi les travailleurs de terre et le prolétariat des ports, le roi de France réactiva la peine des galères. La punition exemplaire des crimes s'accordant avec les besoins de la marine de guerre, des hommes, que les juridictions pourvoyeuses condamnaient « à servir sur les galères du roy », furent ainsi régulièrement expédiés à Marseille.

Combien furent-ils au juste ? d'où venaient-ils ? Qui les avait jugés et pour quel motif ? Que devenaient-ils ? Les réponses se trouvaient dans les registres d'écrou de l'administration des galères, où les scribes du « bureau des chiourmes » notaient scrupuleusement, au fil de l'arrivée de chaque convoi ou « chaîne », le « signalement » des condamnés. En marge du registre, le gratte-papier indiquait la destinée finale des forçats - mort, libération, évasion. Le projet initial - la thèse d'Etat de l'historien - visait l'exploitation exhaustive, l'ordinateur aidant, des matricules de la chiourme, afin d'en extraire une analyse quantitative de la répression judiciaire à une époque de resserrement de l'étau absolutiste (1).

Ce choix nécessita la confection d'un fichier informatique comprenant 60 000 enregistrements, lesquels correspondent à tous les forçats qui furent attachés à la chaîne entre 1680 - date de départ de la série documentaire, et 1748 - date de la suppression du corps des galères (2). C'est donc par dizaine de milliers qu'il faut dénombrer les condamnés qui se succédèrent sur les bancs des galères de France : 38 000 rien que pour les années 1680-1715, celles de l'apogée de la flotte, mais aussi 22 000 pendant la Régence et le règne de Louis XV, à l'époque de la léthargie et de la décrépitude de cette marine à rame.

La lecture statistique des matricules découvre un aspect méconnu et guère reluisant de l'Etat de justice d'Ancien Régime, avec ces magistrats « aux ordres », qui envoient dans le même cul-de-sac, voleurs, faux-sauniers, vagabonds, violents, perturbateurs du repos public, libertins, déserteurs et rebelles, cet étrange amalgame qui forma, avec les esclaves maures et turcs achetés ou rafiés sur les bords de la Méditerranée, la société des galériens du roi de France. Près des deux tiers des forçats du Roi-Soleil n'étaient pas des « criminels » - au sens actuel du terme - mais des soldats en rupture de régiment (45 %), des contrebandiers du sel (15,5 %) et des protestants qui attestaient leur fidélité à la confession réformée (3,7 %).

Parti d'un projet sur la répression judiciaire à l'époque moderne, l'historien en vint à s'intéresser au mode de vie des forçats, aux techniques et aux usages de navigation des galères. La nécessité d'expliquer la destinée finale de la population galérienne justifie cette « dérive ». La mortalité des forçats semble pour le moins déconcertante, car les taux de perte en campagne ou en mer se révèlent assez faibles,

largement inférieurs à ceux qui décimaient les équipages des vaisseaux du Ponant, tandis que la mortalité au port d'attache, durant la morte-saison de la navigation, apparaît au contraire effarante, éliminant le tiers des condamnés moins de trois ans après leur entrée dans la société des galères. On pourrait supposer que ceci résultait en bonne partie des fatigues et des coups éprouvés en mer. Or l'espérance de vie des forçats n'augmente pas après le règne de Louis XIV, quand les galères pourrissent sur place et que les galériens - qui ne sont pas encore devenus des condamnés aux travaux forcés dans les arsenaux de la Marine - ne rament plus qu'épisodiquement.

L'historien rencontre alors l'ergonome, qui a entrepris de son côté une recherche sur les chébecs, ces « cousins » des galères, et sur les grandes voiles latines. L'ergonome pose des questions prosaïques, concrètes, comme celle de l'alimentation en eau de la chiourme. Nous déchiffrons les traités de construction, de manoeuvres. A l'aide de ces documents, nous analysons le métier du galérien. Se pose bientôt le problème de la mesure de ce travail. Avec le physicien, spécialiste de l'aérodynamique des fuselages d'avion, nous construisons un modèle de la vogue afin d'évaluer l'effort produit par les rameurs. Comment un tel système fonctionnait-il ? Comment pouvait-on survivre et ramer à bord d'une galère de combat vers la fin du XVII^e siècle ? Cette démarche, qu'on pourrait qualifier d'histoire expérimentale, essaie de répondre, sans sacrifier l'exposé de la méthode, à la nécessité de produire des résultats.

La gestion de la chiourme

Les galères ordinaires comptaient 52 avirons répartis en deux rangées symétriques, à raison de 5 rameurs par banc (3) ; les « Réales » et « Patronnes », plus longues et plus larges que les précédentes, possédaient 30 à 32 paires de rames, avec 7 hommes de chiourme dans chaque banc. Il n'y avait plus sur les galères modernes qu'une rame par banc, au lieu de trois sur les galères médiévales. Ce changement s'accomplit au cours du XVI^e siècle. Il s'explique probablement par l'évolution du recrutement des « galeotti », lorsque l'enrôlement des rameurs volontaires devient de plus en plus difficile, et que ceux-ci sont peu à peu remplacés par des esclaves et des condamnés. Or la technique médiévale de la « vogue » exigeait un personnel hautement qualifié, car chaque galérien manipulait son propre aviron : au niveau même du banc, le synchronisme des mouvements devait être parfait, et les trois rameurs presque de force et de dextérité égales. En attelant désormais tous les forçats d'un même banc à une rame unique, on pouvait se permettre d'employer des éléments disparates, des hommes forts et des hommes faibles, des gens expérimentés et d'autres qui ne connaissaient encore rien à la vie en mer (4).

Les rameurs doivent occuper une position qui correspond exactement à leurs capacités physiques ou, réciproquement, chaque emplacement ou poste de vogue - les gens de métier, à bord des galères, ne disent jamais « ramer » mais « voguer » - nécessite, selon l'inclinaison progres-

sive de l'aviron vers la mer, un profil d'homme bien déterminé. Les hommes qui manient le bout de l'aviron fatiguent beaucoup plus que ceux qui se trouvent près du plat-bord ou du point d'articulation de la rame. Si vous êtes jeune, robuste et d'une taille au moins égale ou supérieure à 1,65 m, vous ferez peut-être un bon vogue-avant. On désigne ainsi le rameur empoignant l'extrémité de l'aviron. C'est le chef du banc, qui entraîne les autres. Il est d'ailleurs chargé de « dresser » les nouveaux forçats. Les vogue-avants représentaient le meilleur de la chiourme. Ils étaient choisis avec soin, le plus souvent parmi les esclaves, mais avec l'afflux de condamnés, les forçats donnaient également des vogue-avants. Quatre d'entre eux, qui occupaient un poste de confiance, se voyaient traités comme des matelots et recevaient la ration de l'équipage libre. C'étaient les deux vogue-avants (un à chaque « bande ») de la première rangée de bancs en partant de la poupe, qu'on appelait les « espaliers » à cause de la proximité de l'espale, l'entrée de la galère. Ils animaient la cadence : « quand ils relâchent, tout relâche ». Les deux vogue-avants de proue ou « conillers » tenaient aussi un poste clé, car ils étaient chargés de la manoeuvre des ancres ou « fers ».

Si vous ne possédez pas l'envergure d'un vogue-avant, et encore moins l'étoffe d'un espalier ou d'un coniller, mais que vous êtes doté d'une stature légèrement supérieure à la moyenne, d'une bonne complexion, et que vous paraissez encore dans la force de l'âge, vous serez sans doute affecté, en qualité d'apostis, juste à côté du vogue-avant. Et si votre poil grisonne, ou si encore vous êtes un petit homme, quoique jeune et vigoureux, le comite vous choisira une place de tiercerol. C'est la position médiane sur le banc et peut-être la moins incommode car, d'un côté, on ne force pas sur la rame autant qu'un vogue-avant ou un apostis ; et de l'autre, on ne courbe pas l'échine pour suivre la course de l'aviron comme les rameurs des deux derniers postes. Ceux-ci, appelés respectivement quarterol et quinterol, sont pris parmi les forçats les plus chétifs.

« L'arrangement » ou la composition d'une chiourme représentait une affaire délicate, car il fallait non seulement que chaque homme soit à sa juste place, mais encore que la force de tous les bancs soit parfaitement égale ou bien équilibrée. Suivons les conseils du sieur Masse, comite réal des galères de France vers les années 1700. « On laisse toujours au comite, écrit cet expert, le soin de la vogue. Il doit connaître la force et l'adresse de chaque homme de chiourme et les égaliser, en sorte qu'une brancade ne soit pas plus forte que l'autre. Car il est certain que le banc qui se trouve être le plus faible rompt l'arrangement de la vogue (...). Il se trouve aussi un autre inconvénient plus considérable, scavoir que lorsque vous avez quelque brancade (ou banc) plus faible (...) les bancs qui se trouvent les plus faibles ne peuvent plus aller ensemble avec les autres ; et ainsi, un seul banc peut vous faire crever deux ou trois brancades de suite, lorsqu'ils ne seront pas égaux en force, par les coups de rame qu'ils se donnent les uns aux autres au dos et à la teste (...). Ces inconvénients sont de la dernière conséquence. Pour les prévenir, il est bon de bien égaliser la chiourme, et que lorsque vous avez des forçats nouveaux, de n'en mettre qu'un à chaque banc (...) comme aussy, où il y a un bon vogue-avant, il faut y mettre un médiocre apostis, et où il y aura des vogue-avants médiocres, leur donner de bons apostis,

pour que dans la suite, ils puissent se relever, et ainsy des tiercerols, quarterols et quinterols. » (5).

La gestion intelligente des ressources de la chiourme n'excluait pas les coups et autres mauvais traitements. En désignant les rameurs d'un même banc, les gens de galère parlaient de la « brancade », employant le nom même du fer à 5, 6 ou 7 branches au moyen duquel on entravait la chiourme. Une « brancade » de galère ordinaire, sorte d'étoile de fer à cinq branches, pesait déjà un bon demi-quintal, auquel s'ajoutaient l'anneau de fer rivé au pied ou manille et la chaîne qui reliait cet anneau à la « brancade »... Représentons-nous également la fantastique exigüité d'un banc de galère : cinq hommes devaient peiner, manger et dormir à l'intérieur d'un espace rectangulaire qui ne dépassait pas 2,30 m de long sur 1,25 m de large ! L'auteur d'un poème, intitulé « la souffranso e la miseri des forcas que son en galero » (6) a décrit l'intimité d'un banc de galère :

La galero es nouestr'houstau
Plogue ou neve, sian a l'erto

N'aven ni lansou ni cuberto (...)

Dourmen quatre ou cinq dins un ban,

Que n'a pas tres pan de carruro,

Semblo tout à fet la mesuro

D'une caisso per pourta un mouert (...)

Fau que dins aquelle brancado (...)

Mangen et caguen tout ensen (...)

*La galère est notre maison,
Sommes à l'air qu'il pleuve
ou neige*

*Nous n'avons ni drap ni
couverte...*

*Dormons à quatre ou cinq
dans un banc*

*Qui n'a pas trois pans de
large,*

*Et semble tout fait à la
mesure*

*D'une caisse pour
mettre un mort*

*Il faut que dans cette
brancade...*

*Mangeons et chions tous
ensemble...*

Ceux qui trimaient le plus étaient aussi les plus mal nourris. Vers 1665-1670, la ration du galérien en mer comprenait deux livres de biscuit (980 g), 4 onces (120 g) de fèves chichement assaisonnées d'huile et de sel, « et quelquefois du vin quand ils fatiguent dans la campagne ». Il y avait là une forte disproportion entre cette grosse quantité de biscuit et l'absence d'autres aliments, hormis la traditionnelle écuelle de fèves. Le secrétaire d'Etat à la Marine, en personne, Seignelay, daigna s'intéresser à ce « détail », lorsqu'il écrivit en 1684 aux contrôleurs généraux des galères, Delafont et d'Ortières, afin de leur demander d'évaluer, moyennant une curieuse expérience, la quantité de biscuit qui était nécessaire à un galérien : « la plupart des forçats, ne pouvant manger la quantité de pain qui leur est donnée, le réservent pour le vendre, et il est même usité qu'au retour des campagnes, ils en font des réserves assez considérables qu'ils débitent dans Marseille (...) Il faut que vous preniez deux forçats de chaque galère, choisis entre ceux qui passeront pour les plus grands mangeurs, que vous les fassiez mettre dans l'arsenal sans leur expliquez pourquoy, que vous les fassiez nourrir huit jours durant en la manière accoutumée pour voir la quantité de biscuits qu'ils mangeront » (7).

Vers 1685, sous l'impulsion de l'intendant général, Michel Bégon, le régime du galérien en campagne, indigeste et mal équilibré, fut réformé. La part de biscuit diminua, passant à 26 onces (690 g). On distribuait toujours la même soupe de fèves, mais au biscuit et aux fayols s'ajoutèrent désormais, trois fois par semaine, les jours gras, 3 onces de lard (90 g) ou 4 onces de boeuf salé (120 g) et 3 onces (90 g) de riz ; les jours maigres, il y avait 2/3 de pinte de vin (620 cl). Les deux espaliers et les deux conillers avaient droit à une ration d'homme d'équipage, plus variée, comprenant du fromage et du poisson. La ration du galérien ordinaire apparaît comme une ration « théorique », distribuée sur le papier. On peut même se demander si les améliorations introduites en 1685 furent réellement appliquées. L'abbé Bion, aumônier de la Superbe au tout début du XVIII^e siècle n'y fait aucune allusion : « En campagne, écrit-il, on distribue à huit heures du matin le biscuit. Il est vray qu'ils en ont suffisamment, il est assés bon. A dix heures, on leur donne une écuelle de soupe, faite avec un peu d'huile, des fèves ou des pois, la plupart du temps moitié pourris et moisiss (...) et quand ils rament, ils ont pichonne de vin le soir et le matin » (8).

Les galériens les plus misérables se contentaient de la ration du roi, d'ailleurs probablement trompés en qualité et en quantité sur le biscuit, le vin, les salaisons et les légumes secs : ils n'avaient pas droit à la parole (9). D'autres, qui possédaient un peu d'argent, achetaient des vivres aux hommes d'équipage et se débrouillaient pour trouver des aliments frais, surtout fruits et légumes, lors des escales. « Le travail de la vogue est quelque chose d'accablant, écrivait un forçat protestant, mais on est soulagé de la moitié quand on a de quoi manger et boire. Un forçat qui a vogué toute la nuit n'attend pour son dîner que du biscuit et une poignée de fèves mal assaisonnées ; ayant mangé cela et ramant le reste du jour, il n'a pour son souper que ce qui lui est resté de pain. On lui donne une mesure de vin le matin, et une autre le soir, véritablement ; mais ce coup de vin est tant gâté par l'avarice de l'écrivain de l'équipage, que c'est très peu de chose. Imaginez-vous quel soulagement n'est-ce-pas quand on peut avoir de quoi s'acheter quelque ration des soldats ou des mariniers, ou qu'on peut envoyer chercher quelque chose aux villes qu'on aborde » (10). Le vin était le réconfort le plus prisé, avec lequel les galériens trempaient ou amollissaient leur galette de biscuit de mer. Outre le pot de vin du roi, distribué quatre jours par semaine, la chiourme était parfois gratifiée d'une rasade supplémentaire lorsqu'on avait forcé l'allure pour rejoindre un port ou chasser un bâtiment. Ce bonus s'appelait le « vin de bandière », car le signal de sa distribution était donné par la galère commandante qui hissait alors un drapeau ou « bandière ».

Il fallait surtout boire de l'eau, beaucoup d'eau. Celle-ci apparaît comme le « carburant » indispensable à la survie de la chiourme et à la marche du bâtiment. Comparable aux tâches les plus dures exécutées sous un climat tropical, telle la coupe de la canne à sucre, le travail du galérien nécessitait une hydratation substantielle et continue, sans doute au moins un litre d'eau par heure de fatigue : « Si un homme qui rame dans les grandes chaleurs ne se raffraîchit pas de temps en temps, disait un comite (ou maître d'équipage), il faut qu'il crève ou qu'il cesse de ramer » (11). Une galère emportait donc une énorme quantité d'eau qu'il

fallait bien caser quelque part. Comme il se révélait impossible de la loger dans les chambres, sous la couverte, déjà emplies de matériel, on la répartissait sur le pont, à portée de bouche des consommateurs. L'eau se stockait dans des tonneaux hauts d'environ 70 cm et larges de 35, d'une contenance de 50 litres, pesant une soixantaine de kg. Les dimensions, forme et capacité de ces récipients possédaient leur importance. Le contenu d'un tonneau correspondait à l'allocation hebdomadaire d'un galérien, ce qui donne une moyenne de 7 litres par jour et par rameur. Cette eau se soutirait avec une petite pompe de canne, « afin qu'il ne s'en répande point », pour se servir dans une pinte de bois ou de fer blanc qui, avec la « gavette » ou gamelle collective des cinq forçats et esclaves d'un même banc, constituait toute la vaisselle de la chiourme. Chacun de ces fûts se « coignait » soit debout, sous les bancs de la chiourme, soit couché à même le pont, sous la banquette, une planche servant de marchepied aux rameurs. On embarquait 500 barils d'eau, qui pesaient - à plein - environ 30 tonnes et contenaient au total 25 000 litres. Avant d'appareiller, non seulement on bondait chacun de ces tonneaux, mais on emplissait aussi à ras bord les deux chaudrons du fourneau, et même toutes les pintes des forçats, « estant de la dernière conséquence de ne rien négliger pour emporter le plus d'eau que l'on peut » (12). La chiourme en consommait les 3/5, tandis que le reste servait à la cuisine et aux besoins de l'équipage libre : officiers, maistrance, mariniers et soldats, soit presque deux cents hommes. Même soigneusement épargnée et chichement mesurée, une telle réserve d'eau ne se prolongeait pas plus d'une semaine : « Une galère ne peut guère demeurer plus de huit jours sans faire ayguade... Il ne faut jamais attendre l'extrémité » (13). Indépendamment des conditions de navigation et des aléas de la campagne, cette durée nous donne exactement l'autonomie d'une galère de combat à la fin du XVII^e siècle, et nous explique (en partie) la fréquence des escales par la nécessité de « faire l'aiguade » au moins tous les 5 à 6 jours.

Le savoir ramer

La manoeuvre de la rame exigeait expérience et habileté. « Il faut d'abord qu'on commence à faire corps nouveau, disait l'aumônier de la « Superbe », et que le dedans de la main devienne aussy dur que du bois à force de tirer la rame » (14). A quoi le capitaine Barras de la Penne ajoutait : « il y a plus d'adresse qu'on ne croit à voguer ; il faut qu'un rameur joue de tête. » (15). On n'explique rien en se bornant à peindre le sombre tableau des hommes harassés de fatigue, harcelés de coups par le comite qui va et vient de poupe à proue... Il s'agit de comprendre comment les rameurs parvenaient malgré tout à s'adapter à l'épreuve de la vogue, réalisant ce qu'on exigeait d'eux au moindre coût humain, car sans une économie de moyens dont il nous faut discerner les traits essentiels, ce système homme-machine, épuisant ou décimant la main-d'oeuvre au cours des premières semaines de navigation, n'aurait jamais pu atteindre ses objectifs, même les plus modestes. Ceci n'implique pas qu'on oublie les misères de la galère, et que l'on fasse hypocritement abstraction des contraintes et des violences qui accroissaient encore les peines de ces hommes.

Il peut sembler absurde de vouloir expliquer comment on voguait sur les galères de combat de l'âge classique à l'aide des méthodes actuelles de l'ergonomie. Nous avons pourtant affaire à une tâche qui s'apparente à une activité professionnelle. Elle en possède les principales caractéristiques :

- un poste de travail, le banc, où vivaient et besognaient cinq à sept hommes de chiourme ;
- un outil, la rame ;
- les opérations élémentaires du travail, qui correspondent aux positions successives du corps des rameurs lorsque ceux-ci actionnaient l'aviron.

La documentation de première main ne fait pas défaut. Elle autorise une reconstitution et une analyse aussi précises et imagées que possible - dessins à l'appui - du travail de galérien. Le savoir ramer impliquait un savoir-faire à plusieurs niveaux. Jean Marteilhe, l'auteur des « Mémoires d'un protestant condamné aux galères de France pour cause de religion », se souvient des dix ans qu'il a passé sur un banc de la « Palme », entre Manche et Mer du Nord : c'est le point de vue des exécutants, des forçats (16). Le sieur Masse, comite réel durant le premier tiers du XVIII^e siècle, expose dans ses papiers et dans ses notes comment « arranger » une chiourme : voici l'oeil du contremaître (17). Un Barras de la Penne ou un de Fontette, tous deux commandant de galère vers les années 1680-1720, expriment dans leurs savants traités la perspective un peu distante de celui qui, trônant sur son fauteuil, à la poupe de sa galère, ne voit de loin qu'une « mécanique » sur laquelle il agit indirectement, sans se salir les mains (18).

Ce qu'on appelle le banc de galère comprend quatre éléments : le banc proprement dit, la banquette, la pédagne et la contrepédagne (voir planche 1, le poste de travail d'une galère ordinaire). Le banc est une robuste traverse de pin, longue de 7 pieds (2,28 m), large de 6 pouces (16 cm), d'une épaisseur de 5 pouces (14 cm). Cette pièce est arrondie sur ses bords, « afin que les vives arêtes n'incommodent point la chiourme. » (19). Elle est aussi légèrement creusée dans sa face inférieure, « pour alléger la vogue », et comme il ne doit jamais y avoir de place inutilisée à bord d'une galère, on logeait un mousquet dans la partie ainsi évidée (20). Les rameurs ne s'assoient pas sur le bois nu. Le madrier qui leur sert de siège est rembourré avec de vieux tissus que l'on ficèle en « coussinet » ; le tout s'enveloppe dans un grand cuir de vache, qui forme presque une sorte de tablier protégeant les jambes des rameurs contre les embruns. Les pieds des galériens reposent sur la banquette, une planche de sapin de même longueur que le banc, large de 17 pouces (46 cm), épaisse de 50 mm, qui surplombe le pont d'environ 50 cm. Bordant l'extrémité de la banquette, se trouve un madrier de pin, aussi long que celle-ci, large de 14 cm, épais de 8, posé à une quinzaine de cm au-dessus : c'est la pédagne. Au-delà, les galériens n'ont plus de point d'appui immédiat, et la structure du pont apparaît à nu. Il leur faudra effectuer une fente avant d'environ 50 cm pour atteindre la prochaine marche, appelée la contrepédagne, une barre de pin longue de 6 pieds (1,96 m), large de 4 pouces (10,8 cm), épaisse de 2, qui est fixée à la tête du banc suivant (21).

Lorsqu'on connaît les dimensions et l'agencement de ce poste de

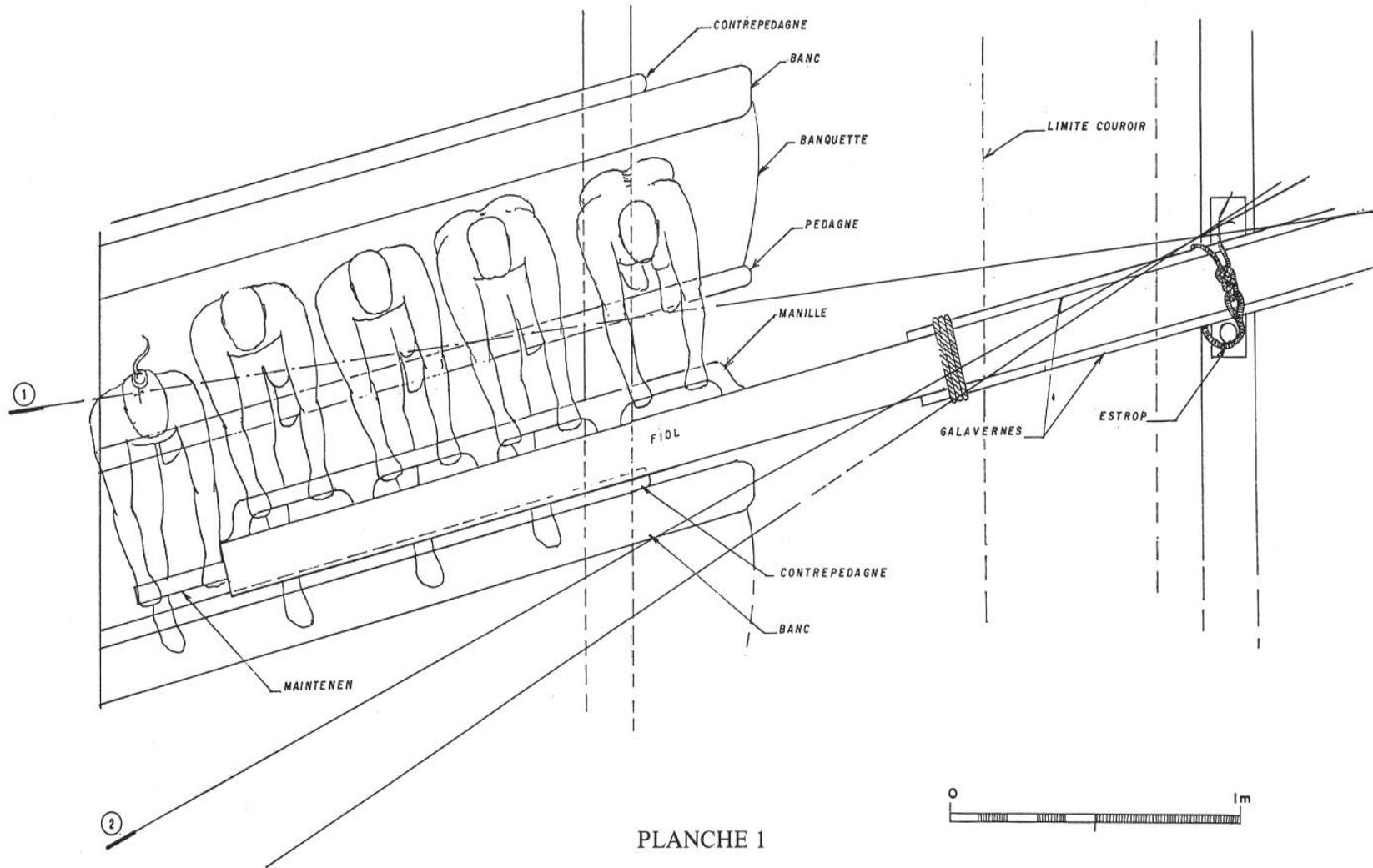


PLANCHE 1

Le poste de travail d'une galère ordinaire

- Positions extrêmes de la rame :
- 1 Position extrême arrière (axe main) en vogue ordinaire
 - 2 Position extrême avant en vogue ordinaire
 - 3 Position extrême avant en passe-vogue

René Burlet, Jean Carrière, André Zysberg

vogue, on peut se demander comment les esclaves et les forçats parvenaient à ramer. Chacun d'entre eux, quelle que soit la classe du bâtiment, galère ordinaire, « patrone » ou « réale », ne disposait que d'une assise extraordinairement étroite, d'environ 45 cm, alors que la carrure d'un homme de stature moyenne (1,60 m) est déjà égale à une quarantaine de centimètres. Ceci signifie que les galériens ne pouvaient pas déplier leurs bras latéralement, car ce mouvement, qui paraîtra naturel et indispensable à tous ceux qui ont touché un aviron, demande un espace de 85 cm. L'exiguïté du banc obligerait les galériens à voguer constamment les bras tendus, en poussant la rame vers la poupe, ce qui se conçoit fort bien, mais aussi en la tirant vers la proue du navire, afin de presser l'eau avec la pelle, ce qui semble pour le moins mystérieux ou difficilement explicable.

Bornons-nous, pour l'instant, à souligner que cette position - les bras toujours raides comme du bois - limitait nécessairement la ventilation pulmonaire, donc les possibilités de récupération pendant un effort prolongé. La chiourme, remarquait un comite, s'essouffle vite... La situation du poste de vogue impliquait encore un autre désagrément. Quand le bâtiment était lesté au maximum, les banquettes, c'est-à-dire le seuil ou le plancher des bancs ne se trouvaient qu'à 1 m de la surface d'une mer plate, et à 70 cm des dalots ou rageoles, ces ouvertures situées à un pied au-dessus de la ligne de flottaison par où s'évacuait l'eau qui ruisselait sur le pont. (Voir planche 2, profil de la vogue d'une galère ordinaire). Les galériens vivaient donc dans une humidité permanente, la peau ulcérée ou rongée par le sel marin. Dès que la Méditerranée remuait un peu, ils vogaient sans doute les pieds dans l'eau...

L'outil de la vogue, c'est la rame : « on appelle palamente l'ensemble des rames qui, comme tout le monde le sait, sont proprement les jambes de la galère » (22). Et quel outil ! L'aviron d'une galère ordinaire, auquel s'attelaient cinq hommes, mesurait 12 mètres de long et ne pesait pas moins de 130 kg ; celui d'une grosse galère à 7 rameurs par banc atteignait une envergure de 14 m pour une masse de près de 160 kg. A côté de la palamente d'une galère française de la fin du XVII^{ème} siècle, les avirons des grandes chaloupes du XIX^{ème} siècle, pourtant longs de 7,25 m, faisaient modeste figure (23). Les rames de galères se taillaient en hêtre ou fayard, qui combine les qualités de résistance et flexibilité. Le rémolat réal choisissait son bois dans les forêts du Dauphiné, du Lyonnais, du Languedoc, de Lorraine, et quelquefois, des Pyrénées (24). Les rames sont fendues sur place, un seul tronc, selon son diamètre donnant 2 à 4 ébauches que les rémolats désignent sous le nom d'estelle. On prenait la précaution élémentaire de laisser suffisamment sécher les ébauches avant de les mettre en oeuvre... Avec la section d'estelle qui se trouve la plus proche de la racine, donc la plus dense, le rémolat réal fera le « genouil » ou le « fiol », autrement dit le côté qu'empoignent les rameurs, tandis qu'avec l'autre extrémité, prise à la cime de l'arbre, il façonnera la pale ou pelle. Ce choix n'a rien d'arbitraire, car la partie de la rame qui se trouve à l'intérieur de la galère, mesurant environ 3 m de long, doit être aussi lourde que sa partie « externe », pourtant presque trois fois plus grande, afin d'équilibrer parfaitement l'aviron, de part et d'autre de son point d'appui. Le diamètre de la rame augmentera progressivement de son bout mouillé vers son bout tenu : il mesure 3

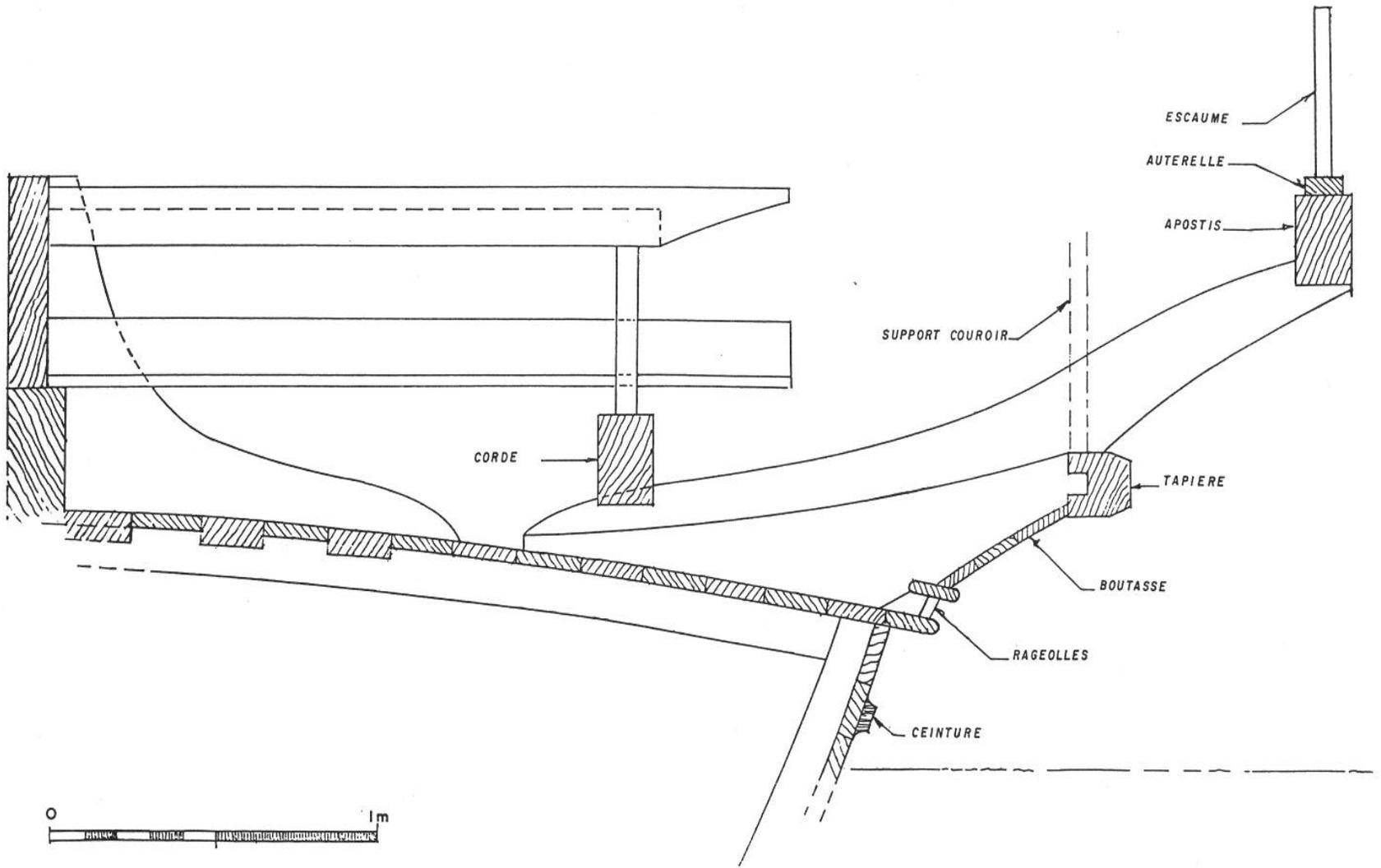


PLANCHE 2

Profil de la vogue d'une galère ordinaire

René Buriel, Jean Carrière, André Zysberg

pouces et demi de diamètre à la pelle (9,4 cm), 5 pouces et demi (14,8 cm) au point de fixation sur le plat-bord, et presque 6 pouces (15,2 cm) au « maintenén ». Quelle que soit l'habileté de l'ouvrier, il arrive néanmoins que cet équilibre soit impossible à atteindre « naturellement », car on ne peut pas trop alléger la partie de la rame qui se trouve du côté de l'eau. On le réalisera en encastrant une plaque de plomb dans l'épaisseur du fiol, ce lest pesant au maximum 5 kg sur une galère ordinaire et 7 kg sur une réale.

Lorsque ce travail est achevé, et que le rémolat s'est appliqué à donner le meilleur profil à la pale, il faut « garnir » la rame. Comme il était impossible que les galériens puissent saisir à pleine main un engin qui avait un peu plus de 50 cm de circonférence à son gros bout, le rémolat fabriquait avec du bois de hêtre une « manille », qu'il clouait sur le genou ou fiol. Il s'agit d'une poignée multiple en quelque sorte, comprenant 4 anses sur une galère ordinaire et 6 sur une réale. Pourquoi 4 et 6 alors qu'il y avait respectivement 5 et 7 rameurs ? Parce que le vogue-avant ne touchait pas à la manille et tenait, tout à fait à l'extrémité de la rame, sa poignée particulière, qu'on appelait le « maintenén », qui était simplement le bout très dégrossi - à sa main - de l'aviron. Lorsque la manille est fixée, il reste à protéger la partie de la rame qui va jouer sur le plat-bord. On cloue et lie à cet endroit, contre l'aviron, deux plaques jumelles de chêne vert, longues d'environ 6 pieds (1,90 m), larges de 9 pouces (24 cm) et d'une épaisseur d'un pouce et 8 lignes (4,5 cm), que l'on nomme les galavernes. Celles-ci possèdent une forme grossièrement fuselée, qui épouse le profil de la rame ; vers leur milieu, les galavernes s'élargissent : il leur pousse des « oreilles » qui serviront à mieux arrêter la rame sur l'apostis, le plat-bord de la galère. Comme le va-et-vient de la rame pourrait également entamer le plat-bord, on y enchâsse une pièce de chêne vert, épaisse d'environ 5 cm, qu'on appelle l'auterelle. Comment la rame se fixe-t-elle sur le bordé ? On a planté dans celui-ci une longue cheville de chêne, d'une forme légèrement courbe - presque un pieu - haute de 73 cm, baptisée escaume par les marins du Levant et tolet par ceux du Ponant : c'est le point d'articulation de la rame. La distance entre deux escaumes consécutifs est exactement égale à l'intervalle qui sépare deux bancs, soit 3 pieds 10 pouces 3 lignes (1,25 m). Un cordage de 1,63 m de long et de 9 cm de diamètre, un estrop « fourré » d'un oeillet à un bout et terminé à l'autre en « queue de rat », embrasse les « oreilles » des galavernes et serre la rame contre l'escaume. Il s'arrête en enfonçant une cheville de fer entre ses torons.

Le « système » constitué par la rame avec sa garniture et son mode d'articulation n'est pas très complexe, car il ne met en jeu qu'une demi-douzaine de pièces. Il n'empêche que la moindre déféctuosité se traduit par une fatigue accrue de la chiourme et que les défaiillances les plus graves peuvent entraîner mort d'homme. Chaque galère embarquait un ouvrier spécialisé, le rémolat, avec « douze rames de respit, quelques galavernes et manilles, du merlin pour les lier, des cloux de galavernes et des cloux de manille, dix-huit plombs et ses outils » (25). Le rémolat assurait à bord la « maintenance » de la palamente. Des petits incidents, tels qu'un mauvais équilibre de l'aviron, la fente d'une pelle ou la rupture d'une galaverne seront vite et assez aisément réparés. Lorsqu'une pelle risque de se rompre, on la « racomme » avec un « crampon » de fer, ou

bien si la pièce est jugée irrécupérable, on prend une rame de « respit ». Dans d'autres cas, c'est le profil ou « tail » de la pale qui a été mal façonné, car trop convexe ou au contraire trop plat, comme une plume d'oie mal taillée qui prendrait trop ou pas assez d'encre quand on la plonge dans l'encrier. Les galériens ressentent immédiatement cette imperfection, que le vogue-avant ne manquait pas de signaler respectueusement au comite, qui ordonnait alors au rémolat de venir avec ses outils. Mais les meilleures ficelles du métier ne redresseront pas une palamente qui est toute faussée, parce que son bois a été mal choisi ou mis en oeuvre trop hâtivement, et, pis encore, n'allongeront pas une palamente taillée trop court par un rémolat excessivement porté sur la dive bouteille (26).

Les mains soudées aux manilles, la chiourme fait corps avec la palamente qu'elle anime d'un va-et-vient monotone, prisonnière de cette cage d'écurie qu'est le banc de galère. De la force et aussi de l'habileté de ces hommes-là dépendent à chaque instant le sort du bâtiment et de son équipage. « L'on peut considérer trois temps dans l'action du rameur, écrivait Barras de la Penne (...) le premier, pour s'élever de dessus le banc, le second, pour pousser le genou de la rame vers la poupe de la galère ; alors le vogue-avant fait un pas, il monte du pied droit sur la pédagne pendant que l'autre reste appuyé sur la banquette, il allonge son corps et ses bras vers la poupe. Les autres rameurs de son banc font le même pas, plus ou moins grand selon qu'ils sont plus ou moins proches du vogue-avant (...) Au troisième temps, les rameurs tombent sur le banc en se renversant vers la proue, et tenant toujours les bras tendus, ils font décrire au genou de la rame une espèce de ligne circulaire : c'est dans ce troisième temps qu'ils plongent la pale dans la mer, laquelle presse l'eau et la pousse vers la poupe à mesure que les rameurs font plus de force en tirant le genou vers la proue » (27). Les trois temps que décrit Barras de la Penne résument clairement la cinématique d'un coup de rame. Toutefois, ce capitaine ne cherche pas à nous expliquer comment les galériens parvenaient à tirer l'aviron vers la proue, alors qu'ils étaient contraints de prendre une posture plutôt anti-ergonomique : « tenant toujours, dit-il, les bras tendus ».

Suivons un vogue-avant de la rangée de droite. L'image sera ici autant sinon plus explicite que le texte. Une série de dessins (voir planches 4 à 7) montre les positions successives qu'adopte un galérien « schématisé » (le vogue-avant) dont le corps est représenté par une suite de segments de droite qui relient ses principales articulations : poignet, épaule, hanche et cheville (planche 3). La position de départ (n° 2) le trouve debout, les bras en avant et abaissés légèrement au-dessous de ses épaules afin de maintenir la pale hors d'eau, le pied gauche - le pied enchaîné - posé sur la pédagne, tandis que la jambe libre repose toujours sur la banquette. S'il s'agissait d'un rameur de la rangée de gauche, il aurait été ferré de la jambe droite, de telle manière que ce soit toujours le pied entravé qui demeure sur la pédagne. Ce premier pas représente un déplacement de 30 cm vers l'avant et de 15 cm environ en hauteur, comme si le rameur gravissait une petite marche. En maintenant ses bras un peu en dessous de l'horizontale - toujours rame hors d'eau - le vogue-avant s'élève sur la contrepédagne pour prendre la position n° 3. Il y parvient en amenant sa jambe droite - la jambe libre - qu'il fléchit sur la contrepédagne, et en s'appuyant sur sa jambe gauche qui est désormais

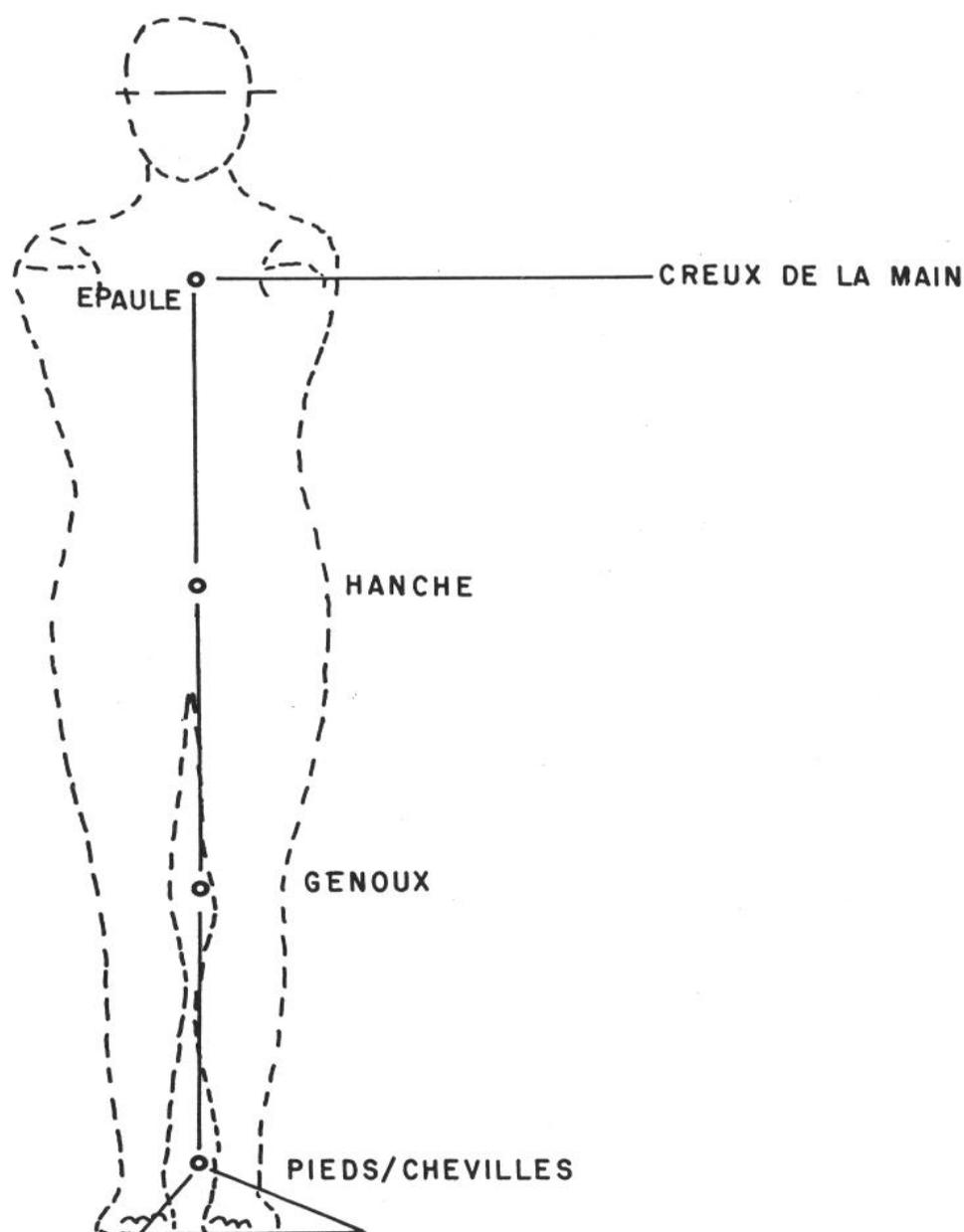


PLANCHE 3

Le Galérien schématisé

tendue sur la pédagne. Avec ce second pas, qui équivaldrait à l'ascension en une seule fois de deux marches d'un escalier « standard », le vogue-avant a achevé sa « montée » vers la poupe. Au début de la phase suivante, phase d'engagement, le vogue-avant lève progressivement les bras afin de plonger la pale dans la mer (n° 3 bis et 4) ; comme il doit fournir en un temps très bref (de l'ordre de la seconde) l'énergie nécessaire pour tirer l'aviron, le rameur se sert de sa jambe droite, qu'il

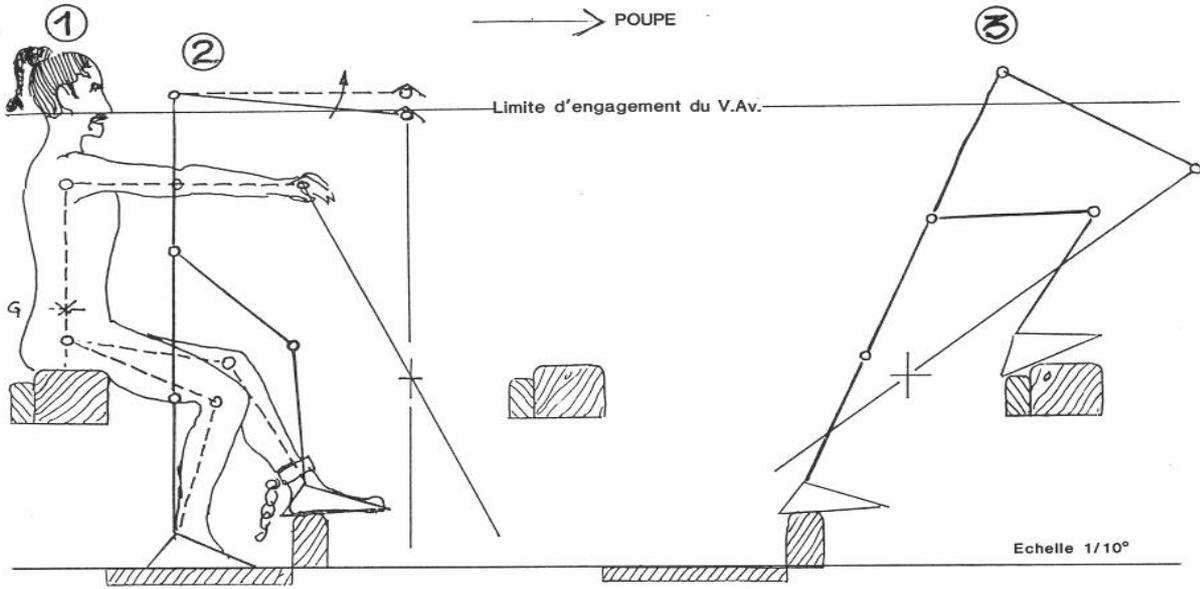


PLANCHE 4

Le cycle de voges : positions 1 à 3

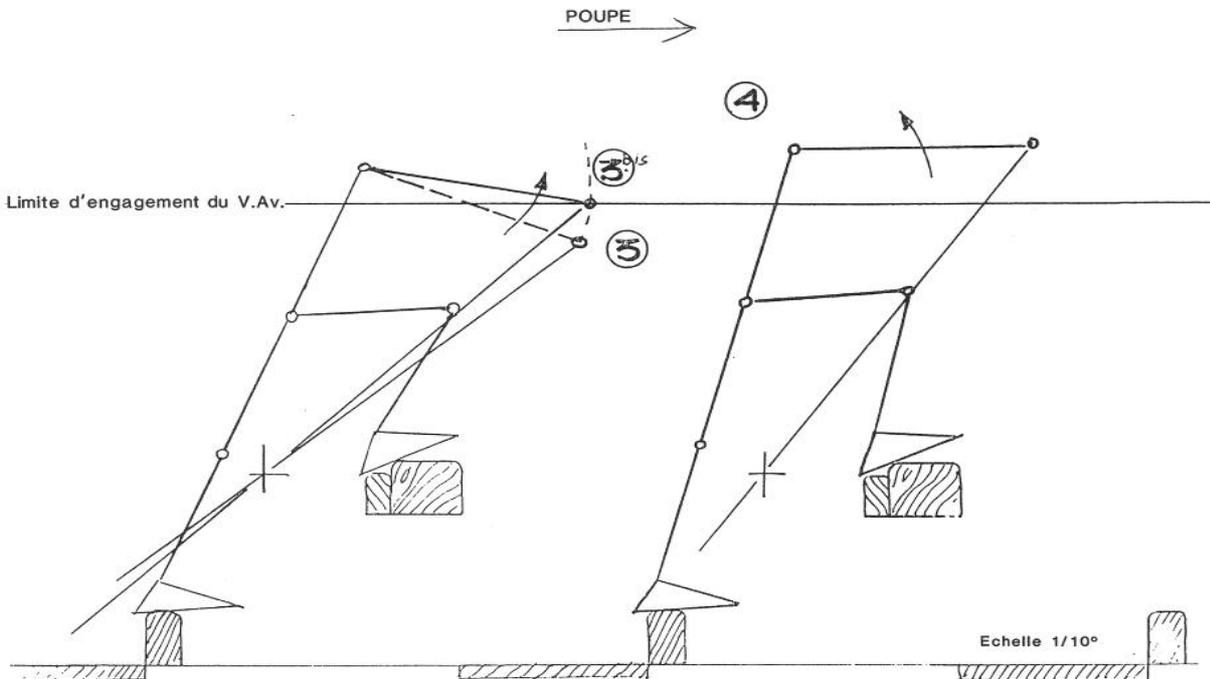


PLANCHE 5

Le cycle de voges : positions 3 à 4

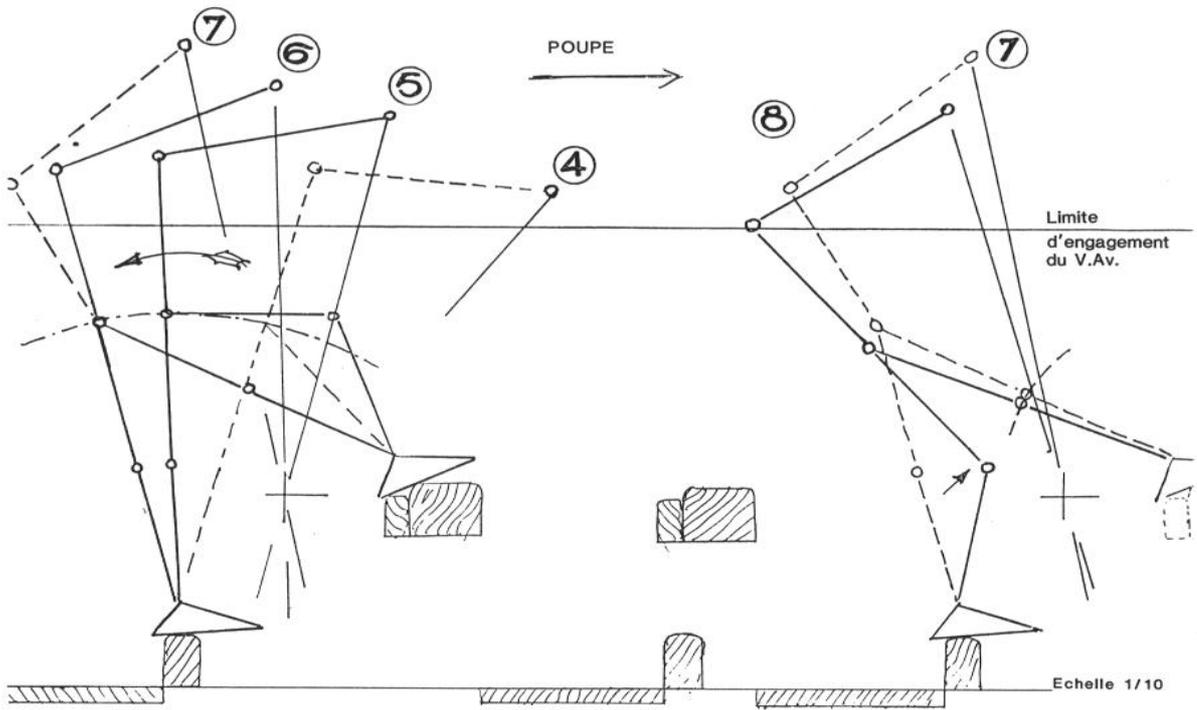


PLANCHE 6

Le cycle de voges : positions 5 à 8

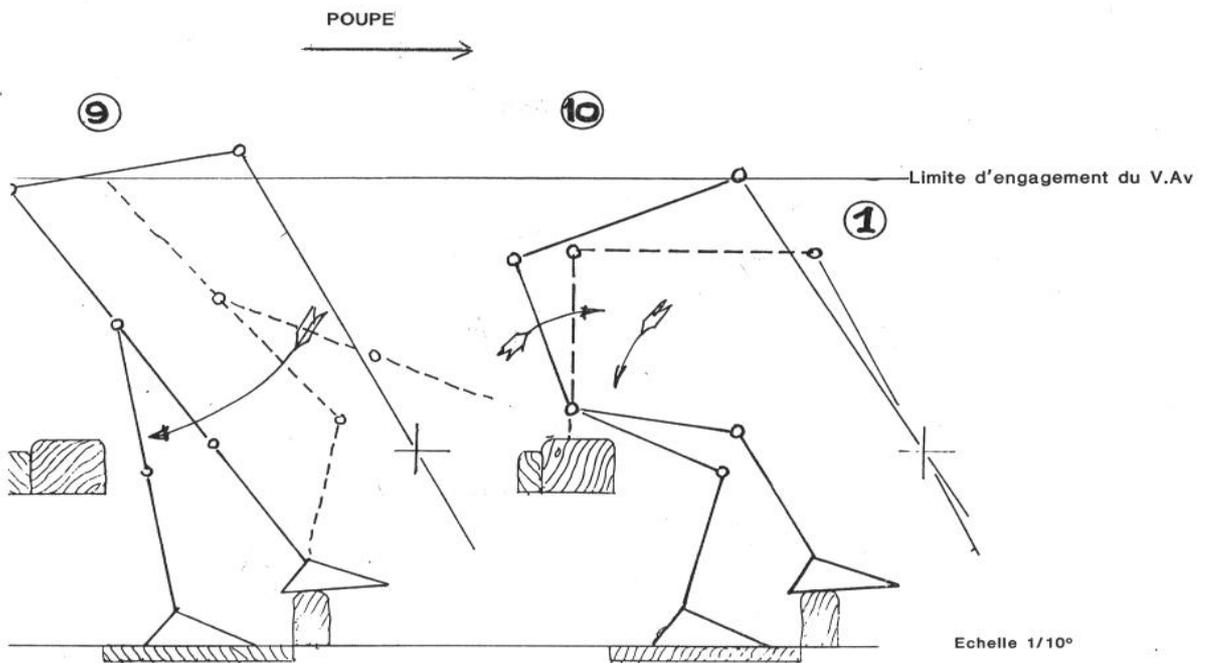


PLANCHE 7

Le cycle de voges : positions 9 et 10

arc-boute contre la contrepédagne. C'est cette détente de la jambe contre la barre de pin, et elle seule, fonctionnant presque comme une sorte de ressort, qui lui permettra de ramener et son corps et la rame vers son banc (positions 5, 6 et 7) tout en conservant les bras tendus. Quand le vogue-avant est arrivé au bout de son effort musculaire, alors qu'il a imprimé à l'aviron sa plus grande vitesse angulaire, il semble presque en perte d'équilibre, le tronc ployé en arrière, et les deux jambes tendues, l'une sur la contrepédagne, l'autre sur la pédagne. Dès lors, le vogue-avant prépare sa « descente » (position n° 8) en pliant sa jambe gauche. Cette flexion facilite le mouvement de retour : le rameur tombe sur son banc, le pied droit revenant sur la banquette, alors que le pied gauche, attaché à la brancade, n'a jamais quitté l'appui de la pédagne (positions 9 et 10). Dans le même temps, le galérien a baissé ses bras afin de dégager la pale de l'eau. Il parvient ainsi à sa position première, assis sur le banc. Un cycle s'achève, le nouveau peut commencer.

En joignant les points qui correspondent aux positions successives de la prise sur l'aviron, on obtient une courbe (voir planche 8) qui représente le cycle du vogue-avant. Son importance est essentielle, car le trajet de la pale s'en déduit par homothétie. Ce cycle est très court : l'angle balayé par la rame atteint 18° en vogue ordinaire. Ce faible débattement sera compensé par des cadences élevées, qui dépassent au moins 20 coups/minute, soit un coup de rame toutes les 3 secondes. Les 4 autres galériens de la brancade ne peuvent que suivre le vogue-avant. Les diagrammes qui décrivent leurs points de prise respectifs (voir planche 9)

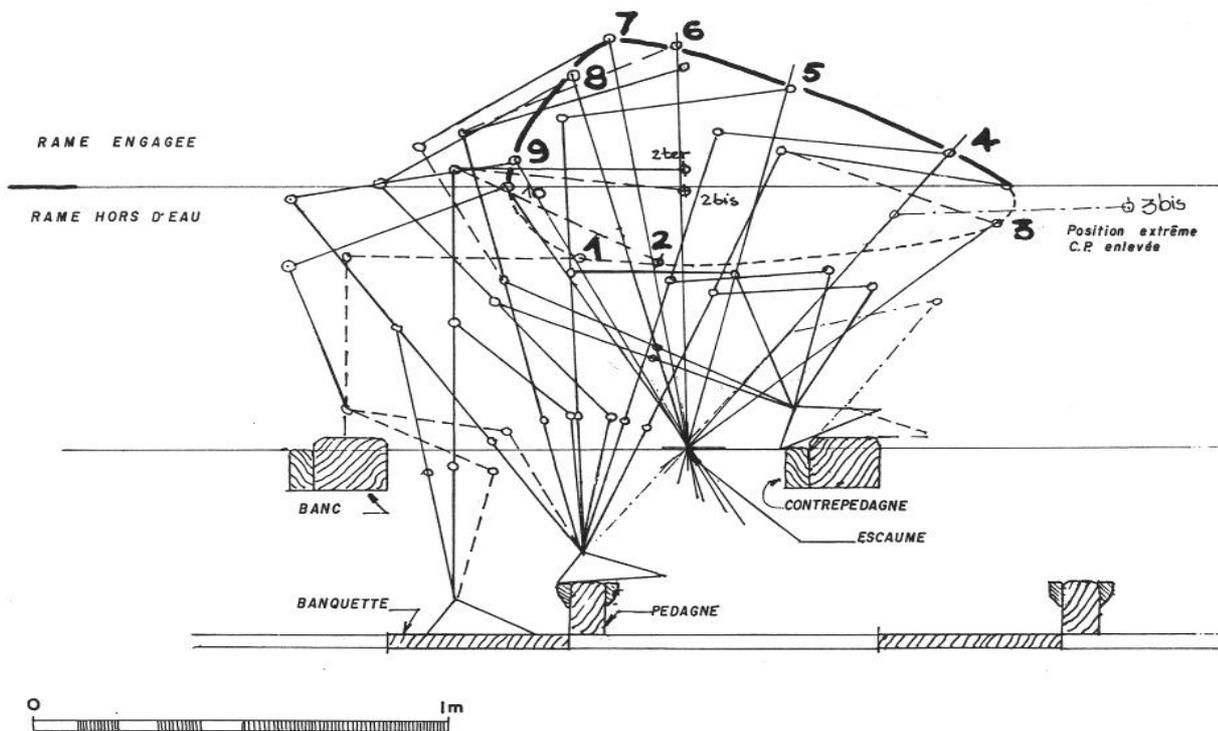


PLANCHE 8

Le travail du vogue-avant (galère ordinaire)

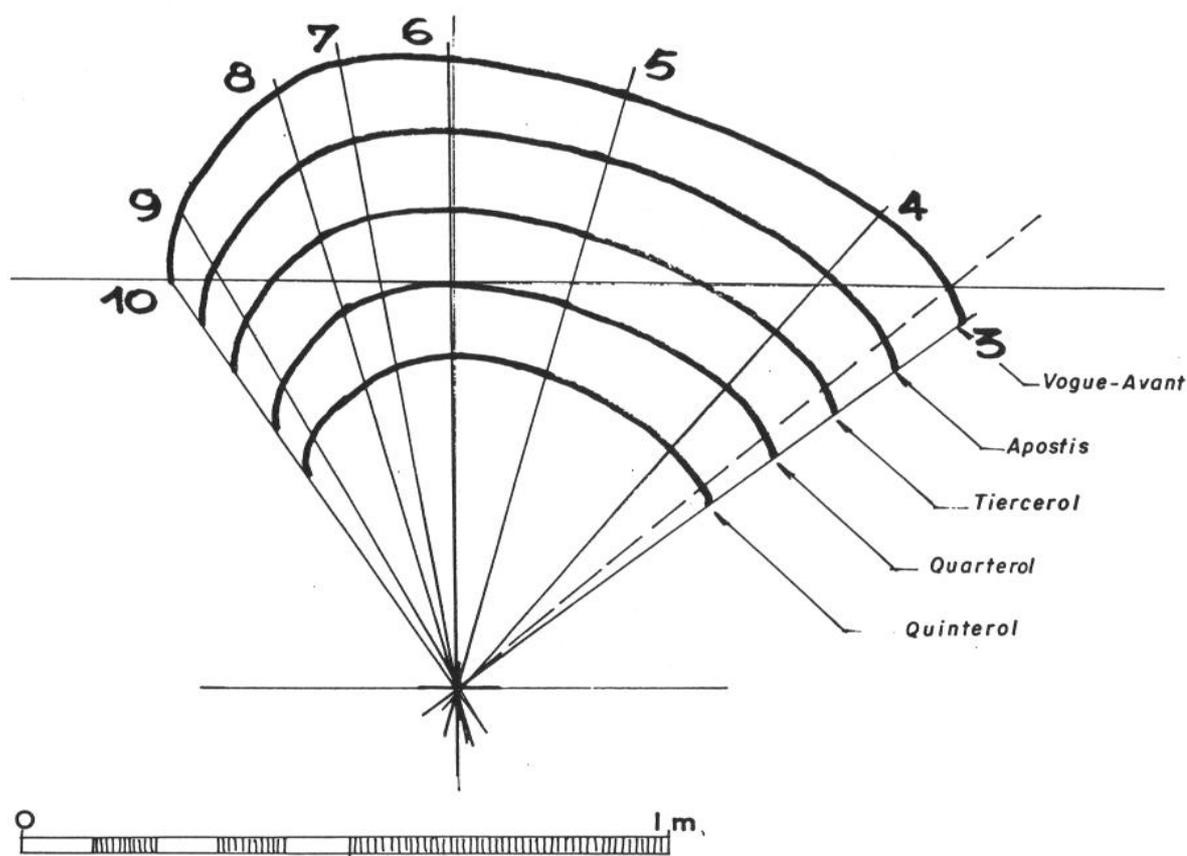


PLANCHE 9

Diagrammes de vogue d'un banc de 5 rameurs (galère ordinaire)

se déduisent là encore par homothétie, car la distance séparant chacun des rameurs du chef de banc est constante tout au long du cycle, et l'arc balayé identique (28). Plus on se rapproche de l'escaume - le point d'articulation de la rame - plus la saisie des manilles sera basse, et le travail s'exercera dans des situations de moins en moins favorables. L'apostis et le tiercerol sont encore les mieux lotis : ils demeurent debout une bonne partie du cycle, et ils reviennent à la position initiale, le tronc peu incliné vers l'avant. Le quarterol adopte une position beaucoup plus courbée, car il lui faut empoigner la rame à moins d'un mètre de la banquette, le plancher du banc. On doit cependant supposer qu'il participe encore à la propulsion de la galère. Il n'en est pas de même du dernier rameur, du quinterol, qui se tient plié en deux pendant le coup de rame. Sa contribution à l'avancement du bateau est quasiment nulle : nonobstant son inconfort, c'est le poste du moindre effort, réservé aux rameurs les plus chétifs ou à ceux qui doivent se « reposer » (voir planche 10).

Le film de la vogue nous montre que la chiourme ramait avec ses jambes et avec ses pieds. Rigoureusement parallèles durant le coup d'aviron, raidis sur les manilles, les bras ne produisaient pratiquement

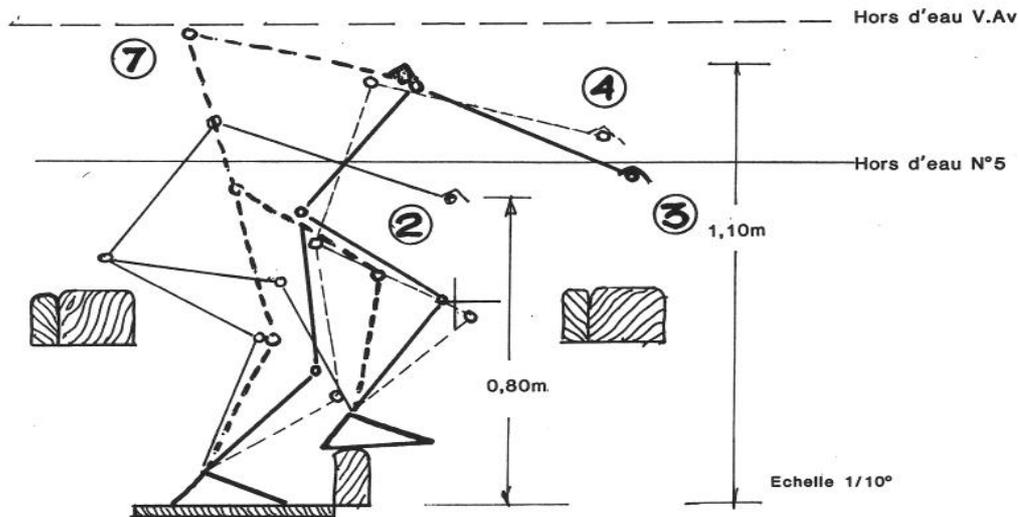


PLANCHE 10

Diagramme de vogue particulier, n° 5 galère ord., n° 6 reale

aucun effort, exception faite des déplacements verticaux de faible amplitude - de l'ordre de 20 à 30 cm - qui servaient à engager ou dégager la pale. C'était la détente violente de la jambe libre, arquée sur la contrepédagne, qui fournissait le travail essentiel, ainsi que les muscles du dos et de la ceinture abdominale, également sollicités quand les rameurs « casquaient » ou se renversaient à proue. On ne pouvait pas ramer autrement. Regardez les forçats dessinés par Cornélius de Wael, l'un des rares peintres et graveurs qui s'est intéressé à présenter autre chose que la « splendeur » des galères. Ses hommes de chiourme ont certes la poitrine maigre, mais ils possèdent des cuisses de coureurs cyclistes...

S'il n'existe qu'une seule façon de voguer, le travail de la rame suppose plusieurs variantes (voir planche 11). Quand il faut chasser un bâtiment ou au contraire prendre la fuite, le capitaine commande la passe-vogue ou vogue à passer le banc. Cette allure combine une terrible accélération de la cadence avec un allongement du coup de rame, car les galériens, auxquels on a ôté la contrepédagne, doivent poser directement leur pied non entravé sur le banc de devant. Ces moments de presse sont redoutés des forçats. La « passevogue est la peine la plus terrible qu'on puisse imaginer, se souvient Jean Marteilhe, car il faut doubler le temps ou la cadence de la vogue, ce qui lasse plus dans une heure que dans quatre d'une vogue ordinaire, sans compter qu'il est comme impossible, dans un tel passevogue, de ne pas manquer souvent le coup de rame, et pour lors, les coups de corde tombent comme de la grêle » (29). Les comites expérimentés n'apprécient guère la passe-vogue, que des capitaines exigent parfois gratuitement, pour donner du « spectacle » à leurs invités de marque. « Je trouve cette vogue la moindre de toute et la plus mauvaise, dont je ne voudrais jamais me servir, écrit Masse, parce qu'elle fatigue fort la chiourme et ne fait pas mieux avancer la galère (...)

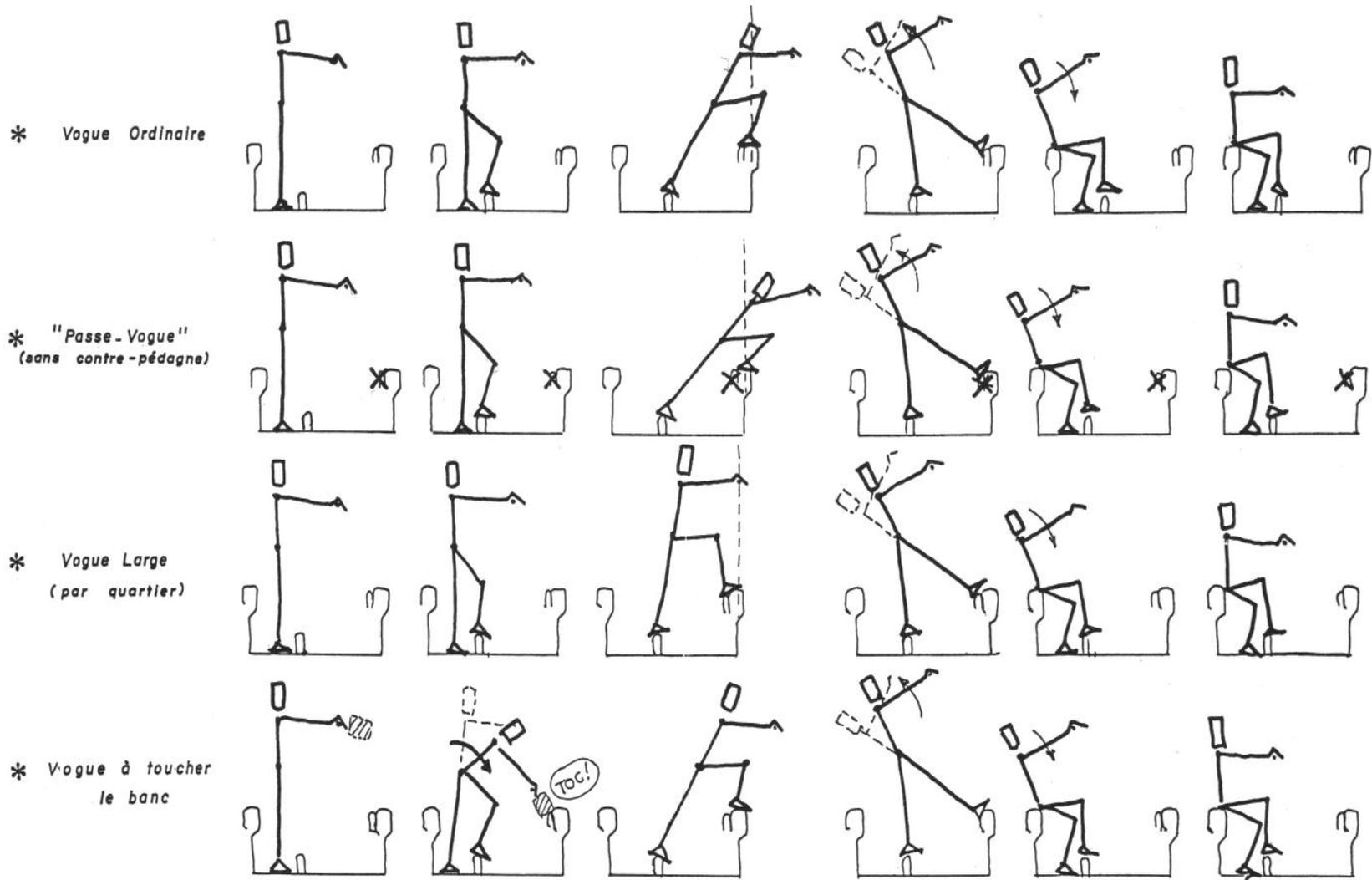


PLANCHE 11

Les différentes allures de vogue

car, pour peu de chemin que vous ayez à faire en peu de temps, vous mettez votre chiourme hors d'aleine et toute essoufflée. Ainsi, je dis que la passe vogue n'est bonne que dans une petite cource d'une heure ou plus » (30). Les officiers expriment un point de vue différent. Certes, « il faut ménager la chiourme, explique le capitaine de Fontette, ne la point forcer que dans les occasions qui le demandent, comme de donner chasse ou de prendre un port quand le temps presse (...) Il est pourtant bon, pour que les chiourmes soient faites au passevogue, de leur en faire faire une tous les matins d'une heure quand on navigue ; cela les endurecit au travaille (sic) ; ils s'en portent mieux par la sueur que l'effort qu'on leur fait faire leur cause ; après quoy, on leur fait donner le vin » (31).

Il valait bien mieux ramer « à quartier ». La chiourme se divisait en deux équipes qui se relayaient à tour de rôle. Sur une galère ordinaire, le « quartier de poupe » comprenait les douze premières rangées de banc en partant de l'arrière, et le quartier de proue, les quatorze rangées suivantes. Selon le trajet, chaque quartier ramait pendant deux à trois « ampoulettes » - tel était le nom donné à un sablier d'une durée d'une demie-heure - soit une heure à une heure et demie de vogue alternée. C'était la meilleure façon de marcher par mer belle et route longue, quand il n'y avait aucune nécessité de voguer « avant tout ». Cette vogue à quartier représentait la vogue « économique » par excellence, celle du bon « mesnage » de la chiourme, car le temps de travail des galériens, qui n'excédait pas une heure et demie par relai, égalait leur temps de repos ou de récupération.

Le modèle de la vogue

Quelles étaient les performances de ces bâtiments lorsque ceux-ci marchaient exclusivement à force de rame ? A une ou deux exceptions près, les sources ne disent à peu près rien là-dessus, et nous n'avons pas voulu nous contenter de citer telles quelles, sans vérification, les rares indications sur la vitesse des galères (32). On peut recourir aux journaux de bord, quand ils donnent, d'un mouillage à l'autre, les heures approximatives de partance et d'arrivée ; mais le calcul de vitesses moyennes aboutit à des résultats contestables, car au cours d'une même route les galères combinaient souvent différents modes de navigation et différents types de vogue : marche à la rame et à la voile, à la voile seule, à la rame seule, vogue « avant tout » ou « à quartier », sans que l'on sache exactement de quelle manière telle ou telle partie du trajet avait été couverte.

Nous avons eu l'idée d'obtenir « expérimentalement » ce que les documents nous laissaient ignorer. Il n'était pas question de reconstituer une galère et d'y faire ramer un équipage de « volontaires »... (33). Les données de l'expérience, ce sont nos acquis de l'étude ergonomique sur le banc, la rame et le mouvement de la vogue. En distinguant la phase de « montée » du cycle de vogue, rame hors d'eau, et la phase d'engagement, rame dans l'eau, nous avons essayé d'évaluer le travail effectivement fourni par le vogue-avant - le galérien qui produisait le plus gros effort -, non seulement le travail nécessaire à l'avancement du navire, quel que soit son mode de propulsion, mais aussi tous les travaux ajoutés

qui sont intrinséquement liés à la manoeuvre de la rame et aux gestes des rameurs, comme ceux contre l'inertie de l'aviron, contre l'inertie du corps et contre la pesanteur. Au lieu de nous polariser sur la recherche de la vitesse de la galère, qui n'avait aucune signification en soi, nous avons considéré que celle-ci n'était qu'un élément du problème, et qu'il fallait l'associer à tous les autres paramètres : l'état de la coque (lisse ou rugueux), la vitesse du vent (nulle ou contraire), la cadence de nage (le nombre de coups d'aviron par minute), ainsi que le type de vogue (avant tout ou à quartier). Au moyen d'une analyse des travaux au niveau le plus élémentaire, celui du rameur, nous nous sommes peu à peu orientés vers la mise au point d'un « modèle » qui fonctionne pour chacun des cas étudiés. Ce modèle s'applique à une galère ordinaire, à 5 hommes par banc, propulsée par une palamente de 51 avirons (ou 25 dans le cas d'une vogue à quartier), qui aurait été bâtie dans l'arsenal de Marseille vers les années 1680-1690. Faute de plan, ce navire de référence sera conforme aux dessins d'un album de la fin du XVII^{ème} siècle qui montre les étapes successives de la construction d'une galère (34).

Ce modèle de la vogue utilise différentes catégories de valeurs : des mesures, des estimations, des coefficients et des lois numériques. Par « mesure », on entend des mesures au sens strict du terme, extraites de sources manuscrites ou effectuées sur des dessins d'époque comportant une échelle. Les estimations sont déduites arithmétiquement ou géométriquement de ces mesures. Prenons deux exemples. Aucun document ne donne la surface mouillée d'une galère ordinaire (SM_{GO}) ou surface de la partie immergée de la coque. Nous connaissons toutefois les principales dimensions du bâtiment, notamment sa longueur à la flottaison (L) et sa largeur au maître-couple (b), ainsi que la surface mouillée d'une Réale de la même époque, calculée approximativement d'après le plan au 1/75^{ème} qui a été publié par le Musée de la Marine à Paris. En supposant que la forme des deux carènes soit identique, on peut établir une règle de proportionnalité entre la surface mouillée d'une galère Réale (SM_{GR}) et celle d'une galère ordinaire (SM_{GO}) :

$$\frac{SM_{GR}}{b_{GR} \times L_{GR}} = \frac{SM_{GO}}{b_{GO} \times L_{GO}} .$$

On en tire l'estimation suivante :

$$SM_{GO} = SM_{GR} \times \frac{b_{GO} \times L_{GO}}{b_{GR} \times L_{GR}} ;$$

$$\text{d'où } SM_{GO} = 322 \times \frac{6.045 \times 42.52}{6.52 \times 50.1} = 253.37 \text{ m}^2 .$$

De même, les sources ne disent rien sur l'amplitude du déplacement de la pelle pendant le coup d'aviron, information essentielle pour le calcul des travaux au niveau de la rame. Grâce à l'étude ergonomique, on peut estimer, par projection linéaire, que le poignet du vogue-avant parcourt une distance de 2,43 m pendant un cycle de vogue. Comme il s'agit d'une rotation de la rame qui commence et s'achève au même point, on vérifie que la course de la rame dans l'eau est d'une longueur égale à la course « hors d'eau ». Si nous connaissons la longueur totale du

déplacement « hors d'eau » ou « dans l'eau » du poignet du vogue-avant (DEPVA = 2,43 : 2 = 1,215 m), la distance entre le bout de la pelle et l'escaume ou tolet (LR), et la distance entre le « maintenén » et l'escaume (LG), nous pouvons en déduire l'amplitude du déplacement de la pale, rame hors d'eau ou dans l'eau (DEPALE) :

$$\frac{\text{DEPALE}}{\text{DEPVA}} = \frac{\text{LR}}{\text{LG}} ;$$

$$\text{d'où } \text{DEPALE} = \frac{\text{DEPVA} \times \text{LR}}{\text{LG}} = \frac{1.215 \times 8.045}{3.76} = 2.60 \text{ m.}$$

Mesures et estimations sont récapitulées dans le tableau I.

TABLEAU I

Mesures et estimations pour le modèle de la vogue sur une galère ordinaire

	Dimension	Type de donnée Mesure (M) ou Estimation (E)	Nom symbolique employé dans les calculs
<i>La galère</i>			
longueur à la flottaison	42,52 m	M	L
largeur au maître-couple	6,045 m	M	b
surface mouillée	253 m ²	E	SM
surface des superstructures	63 m ²	E	SS
<i>La rame</i>			
longueur du maintenén à l'escaume ou tolet	3,76 m	M	LG
distance de l'escaume au bout de la pelle	8,045 m	M	LR
largeur maximale du bout de la pelle ou corde	0,179 m	M	CD
masse totale	130 kg	E	—
moment d'inertie	1 096 m ² × kg	E	IR
amplitude du déplacement de la pelle, rame hors d'eau ou rame dans l'eau	2,60 m	E	DEPALE
<i>Le rameur</i>			
Amplitude du déplacement du poignet du vogue-avant, rame hors d'eau ou rame dans l'eau	1,215 m	E	DEPVA
distance du poignet du vogue-avant à l'escaume ou tolet	3,76 m	M	l ₁
distance du poignet de l'apostis à l'escaume ou tolet	3,28 m	E	l ₂
distance du poignet du tiercerol à l'escaume ou tolet	2,84 m	E	l ₃
distance du poignet du quarterol à l'escaume ou tolet	2,40 m	E	l ₄
distance du poignet du quinterol à l'escaume ou tolet	1,96 m	E	l ₅
masse du corps du vogue-avant	65 kg	E	MvA

Les coefficients servent au calcul des différentes résistances à l'avancement du navire et à l'action de la rame dans l'eau. Ce sont des nombres « sans dimension » (calculés sans unité de mesure) qui varient avec la vitesse, les dimensions et aussi la « rugosité » des différents objets auxquels ils se rapportent. On distinguera :

1) à l'échelle du navire

a) le coefficient de résistance aérodynamique (CA). Il exprime la résistance à l'air opposée par les superstructures du navire : château de poupe, rambarde, mâts, antennes ou vergues, cordages, tente et rames. On l'estime égal au rapport entre la superficie frontale des superstructures (SS) et la surface mouillée (SM), pondéré par 10^{-3} :

$$CA = \frac{63}{253} \times 10^{-3} = 0,00025 . \quad (35)$$

b) le coefficient de résistance visqueuse de la galère (CV). C'est l'une des composantes de la résistance hydrodynamique. On parle de résistance visqueuse car l'eau, comme tous les autres fluides possède une certaine viscosité. On évalue d'abord un coefficient qui exprime la traînée du frottement (CF). Celle-ci dépend d'un nombre sans dimension, appelé nombre de Reynolds, proportionnel au produit de la vitesse du bateau par sa longueur à la ligne de flottaison, et d'un autre nombre sans dimension qualifiant la rugosité de la coque. Le CF fluctuera donc selon nos hypothèses sur la vitesse du navire et la « propreté » de sa carène. Ses valeurs sont présentées dans le tableau II ci-dessous.

TABLEAU II
Valeurs du coefficient de la traînée de frottement
(d'après le nombre de Reynolds)*

Vitesse (en nœuds)	Hauteurs de rugosité (en mm)				
		0,15	0,2	0,5	1
2		0,00254	0,00254	0,00296	0,00416
3		0,00238	0,00246	0,00301	0,00416
3,5		0,00235	0,00244	0,00305	0,00416
4		0,00233	0,00244	0,00309	0,00416
4,5		0,00233	0,00244	0,00311	0,00416
5		0,00233	0,00244	0,00313	0,00416
5,5		0,00233	0,00244	0,00314	0,00416
6		0,00233	0,00245	0,00315	0,00416
7		0,00233	0,00247	0,00316	0,00416

* D'après : Architecture du Voilier par Pierre Gutelle. (Editions Maritimes et d'Outre-Mer). Tome 1 - Théorie. - fig. 2-7, page 43.

Ce coefficient de frottement ne s'applique pas à un type de navire en particulier, mais à une « plaque plane ». Pour déterminer le coefficient de résistance visqueuse propre à la galère, on pondère le coefficient de frottement par un facteur de forme (1 + PHI) qui a été estimé à 1,08 (36), d'où :

$$CV = CF \times (1 + PHI).$$

Par exemple, à 5 noeuds, avec une rugosité de 0,2 mm, le coefficient de résistance visqueuse sera égal à :

$$CV = 0,00244 \times (1 + 0,08) = 0,002635.$$

c) le facteur de résistance de vague (KW). On considère ici la résistance engendrée par le mouvement ondulatoire de l'eau lorsqu'elle est fendue par l'étrave du navire. A faible vitesse, la résistance de vague est négligeable ; à forte vitesse, elle devient prépondérante parmi les différentes composantes de la résistance hydrodynamique. Aussi, nous n'en tiendrons compte qu'à partir de 5,5 noeuds, en multipliant le coefficient de résistance visqueuse par un facteur (KW) qui a été calculé d'après les valeurs du nombre de Froude (37). Jusqu'à 5 noeuds, KW est égal à 1 ; puis il vaut 1,031 à 5,5 noeuds, 1,082 à 6 noeuds et enfin 1,136 à 7 noeuds. Le coefficient global de la résistance hydrodynamique (CH) sera donc égal à : $CH = CV \times KW$. En fait, pour la presque totalité de la plage de vitesse qui nous intéresse $CH = CV$, car KW conserve la valeur 1.

2) à l'échelle de la rame

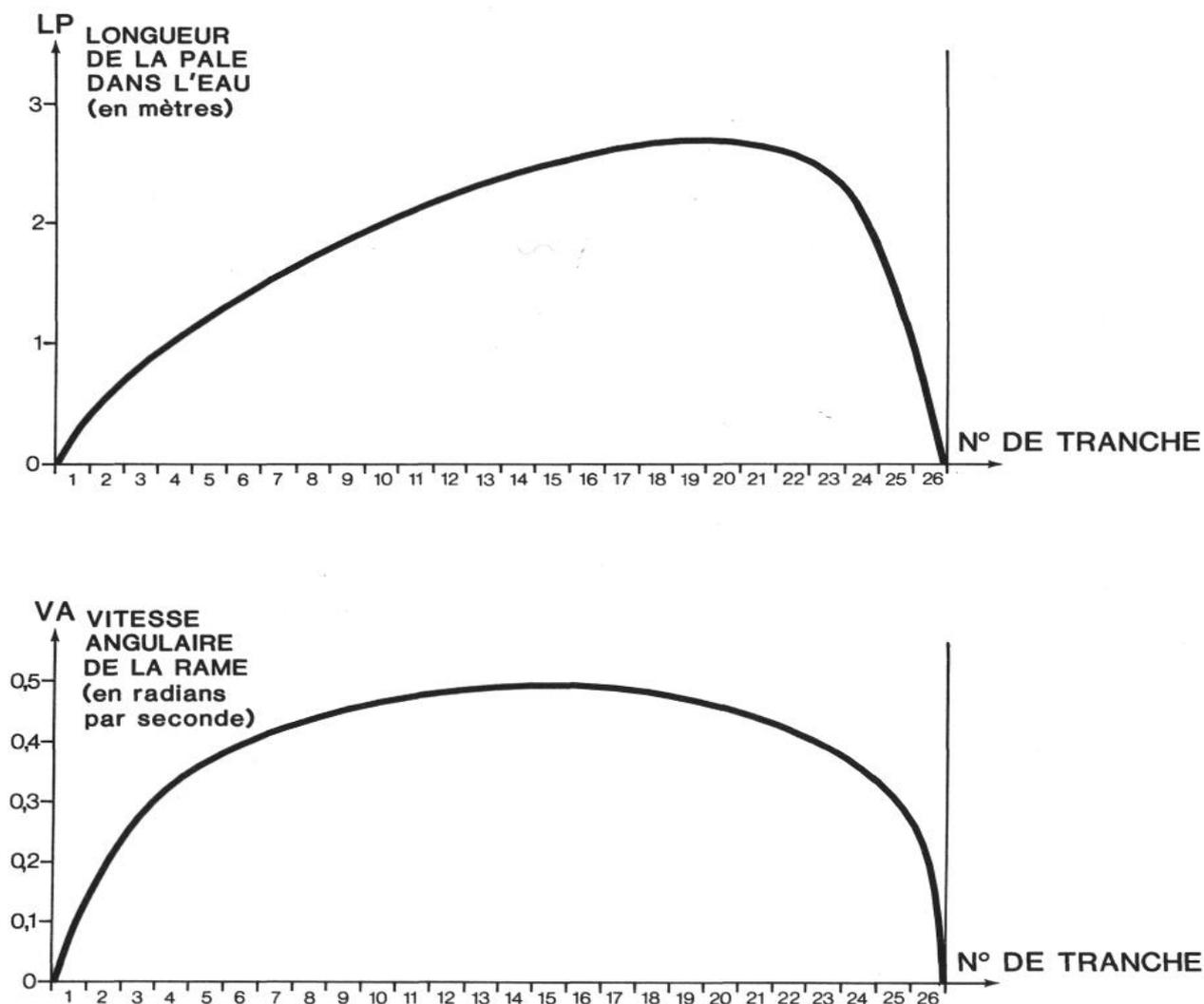
Le coefficient de résistance hydrodynamique de la pelle (CX) sert à calculer la résistance opposée par l'eau au mouvement de la rame. Le CX de la pelle est lié à son allongement, autrement dit au rapport entre la longueur (nécessairement variable) de la partie immergée de l'aviron et la largeur considérée (constante) de la pale ou corde (CD) (38). Les valeurs CX de la pale sont fournies ci-dessous avec celles des lois numériques sur la rame (voir tableau III).

Le calcul des travaux au niveau de la rame pendant la phase d'engagement requiert deux séries de valeurs, que nous appelons lois numériques :

- la loi de la longueur de pale dans l'eau (voir graphique 1),
- la loi de la vitesse angulaire de l'aviron. Comme ni l'une ni l'autre ne figurent dans les documents d'époque (!), et qu'on ne peut pas les déduire directement des mesures que nous avons collectées, il a fallu construire empiriquement ces deux lois. L'une d'entre elles nous est déjà connue : c'est le diagramme de vogue du poignet du vogue-avant, qui nous donne par homothétie, à l'autre bout de la rame, le diagramme de déplacement de la pale. Lors de la phase d'engagement de la rame, à chacun des points de cette courbe, correspond une certaine longueur de pale dans l'eau : notre inconnue ou plutôt nos inconnues, car il existe a priori une infinité de points. Nous nous sommes contentés d'en rechercher 26, divisant pour cela en 26 tranches égales la course parcourue par l'aviron (2,60 m : 26 = 0,10 m), et estimant graphiquement pour chaque tranche, selon la forme de la courbe de déplacement de la pale, la longueur moyenne de sa partie immergée. Ces valeurs ne sont pas arbitraires : elles supposent une connaissance des dimensions de la rame

et une analyse rigoureuse du travail effectué par les galériens. Néanmoins, ces valeurs ne sont pas exactes, car elles impliquent une marge d'incertitude dépendant de la fidélité du diagramme de vogue, dont nous devons mesurer l'incidence sur nos résultats à l'aide de calculs de dispersion. Ayant ainsi estimé les longueurs successives de l'immersion de la pale, on peut maintenant déterminer pour chacune des 26 tranches les 26 valeurs correspondantes du CX de la pale (voir tableau III).

La définition de la loi de vitesse angulaire de la rame constitue une affaire beaucoup plus délicate, car on ne peut pas déduire la courbe de la vitesse angulaire de l'aviron de celle du déplacement de la pale. En effet, l'accélération de la rotation de la rame doit précéder de quelques fractions de seconde l'accroissement de l'immersion de la pelle, si bien que la vitesse angulaire a déjà atteint sa valeur limite quand les galériens, au plus dur de leur effort, plongent au maximum la rame dans l'eau.



GRAPHIQUE 1

Lois numériques pour un modèle de vogue ordinaire

TABLEAU III

Lois numériques pour un modèle de vogue ordinaire

Numéro de la tranche	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
LP : Longueur de la pelle dans l'eau (en m)	0,3	0,6	0,82	1,03	1,24	1,43	1,6	1,76	1,92	2,05	2,17	2,28	2,38
CX de la pelle (sans dimension)	1	1,2	1,35	1,49	1,63	1,76	1,87	1,98	2	2	2	2	2
VA : Vitesse angulaire de la rame (en radian par seconde)	0,165	0,25	0,31	0,352	0,386	0,413	0,435	0,45	0,462	0,472	0,48	0,487	0,493

Numéro de la tranche	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
LP : Longueur de la pelle dans l'eau (en m)	2,46	2,53	2,6	2,64	2,67	2,69	2,7	2,68	2,61	2,46	2,18	1,38	0,45
CX de la pelle (sans dimension)	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1,72	1,06
VA : Vitesse angulaire de la rame (en radian par seconde)	0,498	0,5	0,5	0,495	0,485	0,472	0,457	0,439	0,417	0,387	0,345	0,28	0

Ces deux mouvements seront donc décalés chronologiquement ; leurs courbes ne seront donc pas homothétiques, et elles ne posséderont pas la même forme. Au moyen de tâtonnements ou d'approximations successives, on a donc recherché une série de 26 valeurs - une pour chaque tranche - qui suivent au plus près l'évolution de la vitesse angulaire que nous avons définie : accélération très rapide de la rotation de la rame au début de la phase d'engagement, maintien de la vitesse maximale sur cinq ou six tranches médianes, décroissance lente puis décélération brutale en fin de cycle, la dernière valeur étant nulle.

La suite de nombres que nous avons ainsi obtenue (voir tableau III) correspond à un cas « moyen » : celui d'une galère voguant à 5 noeuds et à 21 coups de rame par minute. Or, comme la vitesse angulaire de la rame dépend également de la vitesse du bateau et de la cadence, notre série de valeurs ne s'adapte pas à toutes les hypothèses sur la marche du bateau. On réalisera donc l'ajustement des termes de la série sur la vitesse angulaire de la rame, en les multipliant par un coefficient de pondération, qui variera selon chaque « cas ». Cet ajustement entre nos hypothèses sur l'allure du bateau et la loi de vitesse angulaire de la rame constitue la clé du modèle de la vogue. Sa mise en oeuvre nécessite de suivre pas à pas le déroulement des algorithmes qui permettent le calcul des travaux. Tous les cas ont été traités à l'aide de l'informatique. Outre sa puissance de calcul, l'ordinateur a stimulé la création même du modèle, ainsi que l'exploration méthodique de ses possibilités et de ses limites. A défaut d'une « intelligence artificielle », nous aurions probablement envisagé le problème d'une façon complètement différente, sans avoir la certitude d'aboutir car la seule résolution d'une suite d'équations, - soit une approche exclusivement algébrique et non numérique, aurait peut-être conduit à une impasse ou à un formidable « casse-tête »...

Rappelons que nous sommes partis de l'idée qu'il existait une différence sensible entre la puissance nécessaire à l'avancement de la galère et la puissance réellement fournie par les rameurs. Le rapport entre puissance « théorique » et puissance « réelle » n'est autre que le rendement du « moteur »... Le calcul des travaux se déroulera sur 3 plans : bateau, rame et rameur. Au premier d'entre eux, on évaluera la puissance nécessaire, aux second et troisième, on recherchera la puissance réellement produite pour actionner une rame, celle qui donnera, par comparaison avec les possibilités physiologiques des galériens, les limites de ce système homme-machine. Afin de rendre plus « concret » l'exposé des calculs, et peut-être de faciliter sa compréhension, on suivra un cas de vogue dont les hypothèses sont les suivantes :

- vitesse du bateau (VB) = 5 noeuds ou 2,572 m/s (39) ;
- vitesse du vent (VV) = 0 ;
- rugosité de la coque (h) = 0,2 mm ;
- cadence (CAD) = 21 coups de rame par minute ;
- nombre de rames (NR) = 51.

Toutes les données du problème (mesures, estimations, coefficients et lois numériques) ont déjà été explicitées dans les tableaux II, III et IV.

Vitesses et résistances

Commençons par estimer la puissance nécessaire pour propulser la galère. On considère deux types de résistance à l'avancement d'un navire.

a) La résistance hydrodynamique pour la partie mouillée du bâtiment, qui est donnée par la relation de Froude.

$$R_H = \frac{1}{2} \times R_O \times S_M \times C_H \times V_B^2, \quad \text{où :}$$

- R_O est la masse volumique de l'eau de mer, soit 1026 kg/m^3 ;
- S_M est la surface mouillée de la coque ;
- $C_H = C_V \times K_W$, le coefficient de résistance hydrodynamique est égal au produit du coefficient de résistance visqueuse par le facteur de résistance de vague ;
- V_B est la vitesse du bateau par rapport à l'eau (en m/s) ;
- R_H , la résistance hydrodynamique, est une force qui se mesure en newtons.

b) La résistance aérodynamique pour la partie hors d'eau du navire, également donnée par une expression dérivée de la relation de Froude.

$$R_A = \frac{1}{2} \times R_O \times S_M \times C_A (V_B + V_V)^2, \quad \text{où :}$$

- C_A est le coefficient de résistance aérodynamique ;
- V_V est la vitesse du vent contraire (m/s).

On cherche alors l'énergie dépensée pour faire avancer la galère pendant une durée T . Elle se décompose de la manière suivante.

a) Energie dépensée pour vaincre la résistance hydrodynamique. A la durée T , correspond un déplacement D_1 du bateau par rapport à l'eau. Nous aurons donc, selon l'équation fondamentale de la mécanique :

$$E_H = R_H \times D_1 \quad (E_H \text{ est un travail exprimé en joules}).$$

Comme $V_B = \frac{D_1}{T}$ (donc $D_1 = V_B \times T$), on peut écrire :

$$E_H = R_H \times V_B \times T ;$$

de même, si nous remplaçons R_H par son expression, nous aurons :

$$E_H = \frac{1}{2} R_O \times S_M \times C_H \times V_B^3 \times T .$$

b) Energie dépensée pour vaincre la résistance aérodynamique. A la durée T, correspond un déplacement D2 du bateau par rapport à l'air. On écrira :

$EA = RA \times D2$ (EA est un travail exprimé en joules). Selon la loi de composition des vitesses, la vitesse des superstructures du bateau par rapport à l'air est égale à $VB + VV$: c'est aussi la vitesse du vent par rapport au bateau ; d'où :

$$VB + VV = \frac{D2}{T} \text{ (donc } D2 = (VB + VV) \times T \text{).}$$

On écrira ainsi : $EA = RA (VB + VV) \times T$; et si nous remplaçons RA par l'expression qui calcule sa valeur :

$$EA = \frac{1}{2} RO \times SM \times CA \times (VB + VV)^3 \times T .$$

L'énergie totale (ET) qui est dépensée pour propulser le bâtiment est égale à : $ET = EH + EA$; d'où :

$$ET = \left[\frac{1}{2} RO \times SM \times CH \times VB^3 \times T \right] + \\ + \left[\frac{1}{2} RO \times SM \times CA (VB + VV)^3 \times T \right]$$

Si nous mettons, d'une part $\left(\frac{1}{2} RO \times SM \right)$ et d'autre part (T) en facteur, nous aurons :

$$ET = \frac{1}{2} RO \times SM [CH \times VB^3 + CA (VB + VV)^3] \times T .$$

La puissance est égale au rapport de l'énergie et du temps : $WN = \frac{ET}{T}$;

$$WN = \frac{\frac{1}{2} RO \times SM [CH \times VB^3 + CA (VB + VV)^3] \times T}{T} .$$

En éliminant T au numérateur et dénominateur de la fraction, nous obtenons :

$$WN = \frac{1}{2} RO \times SM [CH \times VB^3 + CA (VB + VV)^3]$$

Si nous développons $(VB + VV)^3$, nous avons :

$$(VB + VV)^3 = VB^3 + 3 VB \cdot VV^2 + VV^3 + 3 VV \cdot VB^2$$

d'où :

$$\begin{aligned} WN &= \frac{1}{2} RO \times \\ &\times SM[CH \times VB^3 + CA(VB^3 + 3 VB \cdot VV^2 + VV^3 + 3 VV \cdot VB^2)]. \end{aligned}$$

On peut retirer VB^3 de l'expression entre parenthèses :

$$\begin{aligned} WN &= \frac{1}{2} RO \times SM[CH \times VB^3 + CA \times VB^3 + \\ &\quad + CA(3 VB \cdot VV^2 + VV^3 + 3 VV \cdot VB^2)]; \end{aligned}$$

puis mettre VB^3 en facteur :

$$\begin{aligned} WN &= \frac{1}{2} RO \times SM[(CH + CA) VB^3 + \\ &\quad + CA(3 VB \cdot VV^2 + VV^3 + 3 VV \cdot VB^2)]; \end{aligned}$$

en supprimant les « crochets », nous aurons :

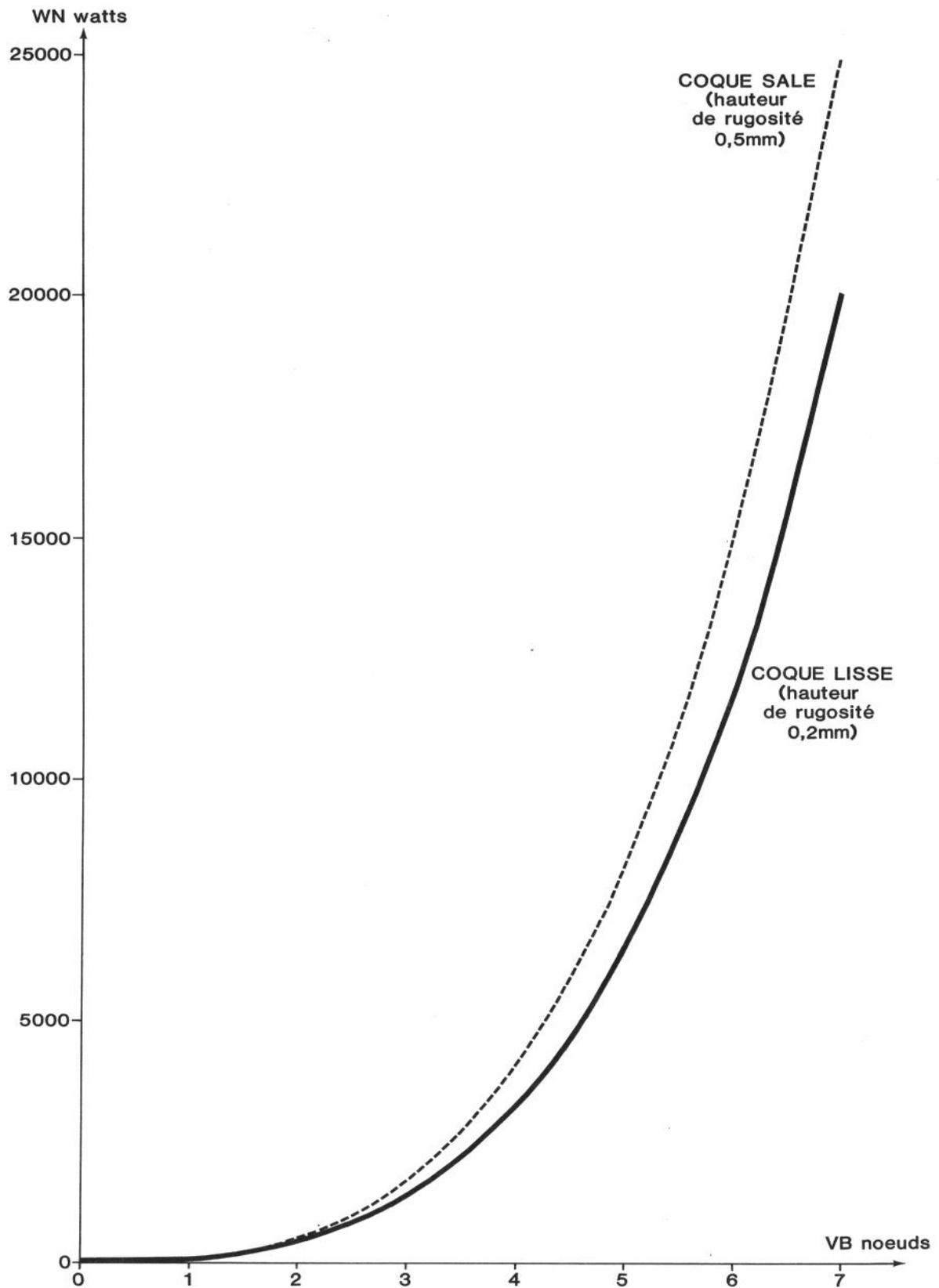
$$\begin{aligned} WN &= \frac{1}{2} RO \times SM(CH + CA) VB^3 + \\ &\quad + \frac{1}{2} RO \times SM \times CA (3 VB \cdot VV^2 + VV^3 + 3 VV \cdot VB^2). \end{aligned}$$

Cette dernière équation nous donne l'expression définitive qui permet de calculer la puissance nécessaire à l'avancement du navire, soit par vent nul ($VV = 0$), soit par vent contraire ($VV > 0$). Si nous prenons en compte la vitesse du vent, il faudra évaluer l'expression entière et nous aurons bien :

$$\begin{aligned} WN &= \frac{1}{2} RO \times SM(CH + CA) VB^3 + \\ &\quad + \frac{1}{2} RO \times SM \times CA (3 VB \cdot VV^2 + VV^3 + 3 VV \cdot VB^2). \end{aligned}$$

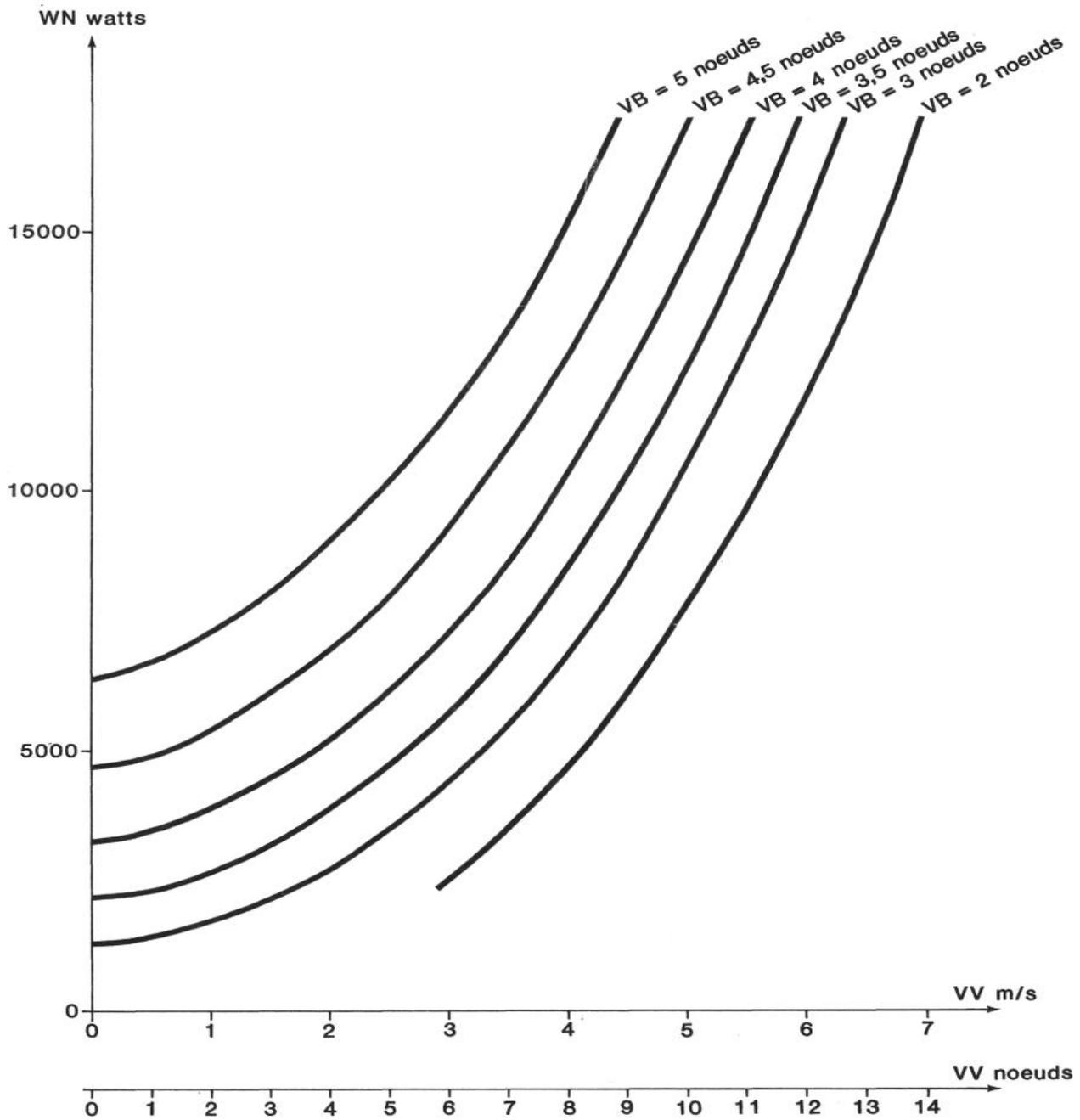
Lorsque $VV = 0$, tous les termes de l'expression qui sont multipliés par VV s'annulent, et WN sera égal à :

$$WN = \frac{1}{2} RO \times SM(CH + CA) VB^3.$$



GRAPHIQUE 2

Puissance nécessaire à l'avancement du bateau par vent nul en fonction de la vitesse



GRAPHIQUE 3

Puissance nécessaire à l'avancement du bateau
en fonction de la vitesse du vent (VV)

Calculons la valeur de WN pour l'exemple que nous suivons :

$$WN = \frac{1}{2} 1026 \times 253 (0.002635 + 0.00025) \times 2.572^3 .$$

Histoire & Mesure

WN = 6371 watts (environ). (Voir tableau IV).

TABLEAU IV
Puissance nécessaire à l'avancement de la galère

Vitesse du bateau (nœuds)	VB (m/s)	WT (watts)	
		h = 0,2 mm	h = 0,5 mm
3	1.543	1 387	1 670
3,5	1.800	2 191	2 691
4	2.058	3 262	4 055
4,5	2.315	4 646	5 815
5	2.572	6 371	8 016
5,5	2.829	8 729	11 019
6	3.087	11 883	15 000
7	3.601	19 887	25 013

VB (nœuds)	5	4,5	4	3,5	3	2,5
VB (m/s)	2.572	2.315	2.058	1.800	1.543	1.029
VV = 0	6 371	4 646	3 262	2 191	1 387	
VV = 1 m/s	7 298	5 424	3 907	2 714		
VV = 2 m/s	8 920	6 849	5 147	3 782	2 711	
VV = 3 m/s	11 432	9 114	7 178	5 590	4 310	2 510
VV = 4 m/s	15 029	12 415	10 193	8 333	6 794	4 515
VV = 4,5 m/s	17 295					
VV = 5 m/s		16 944	14 388	12 204	10 357	7 498
VV = 5,5 m/s			16 988			
VV = 6 m/s				17 400	15 193	11 656
VV = 6,5 m/s					18 150	14 236
VV = 7 m/s						17 182

Le travail nécessaire (TN) est égal au produit de la puissance nécessaire (WN) par le temps ou période (PER).

$$TN = WN \times PER$$

Le temps, c'est celui d'un coup de rame ou durée élémentaire d'un cycle de vogue (d'où le nom de période). Il se calcule en divisant l'unité de temps (1 minute ou 60 secondes) par le nombre de coups de rame ou cadence (CAD) :

$$PER = \frac{60}{CAD}$$

Avec une hypothèse de 21 coups d'aviron par minute,
 $PER = \frac{60}{21} = 2.857 \text{ sec.}$ d'où $TN = 6 371 \times 2.857 = 18 202 \text{ joules.}$

En supposant que chaque rame produise un effort identique, le

travail nécessaire par rame serait égal à : $TNR = \frac{TN}{NR}$ (où NR est le nombre de rames). Ainsi, dans notre exemple,

$$TNR = \frac{18\,202}{51} = 356.9 \text{ joules .}$$

Le travail nécessaire par rame est ici déduit de la puissance nécessaire à l'avancement du bateau ; si nous le recherchions en étudiant le problème à l'échelle de la rame, nous devrions retrouver la même valeur pour TNR. On s'intéressera d'abord au travail au cours de la phase d'engagement, ainsi dénommée parce qu'elle couvre l'intervalle de plongée de la pelle dans l'eau, depuis le moment où les galériens ont achevé de pousser l'aviron vers la poupe, jusqu'à l'instant où ils retombent sur leur banc. Il faudrait d'ailleurs parler « des » travaux. Nous calculerons en outre les travaux « ajoutés », liés aux mouvements de la rame et du corps du rameur, qui s'additionneront au travail nécessaire pour constituer le travail total pendant la phase d'engagement. Ultérieurement, on analysera les travaux de la phase de montée, quand les galériens se lèvent en posant leurs pieds sur la pédagne et la contrepédagne, « montant » au niveau du banc qui se trouve immédiatement devant eux. Enfin, la somme des travaux de la montée et de l'engagement nous donnera le travail qui aura été fourni durant tout le cycle de vogue.

En partant de la rame, on calcule d'abord la résistance opposée par l'eau au mouvement de la pale :

$$RHR = \frac{1}{2} RO \times SPAL \times CXPAL \times VR^2 ; \text{ où :}$$

- RHR est la résistance hydrodynamique de la rame (mesurée en newtons) ;
- RO, la masse volumique de l'eau de mer ;
- SPAL, la surface immergée de la pelle ;
- CXPAL, le coefficient de résistance hydrodynamique de la partie immergée de la pelle ;
- VR, la vitesse de la rame par rapport à l'eau.

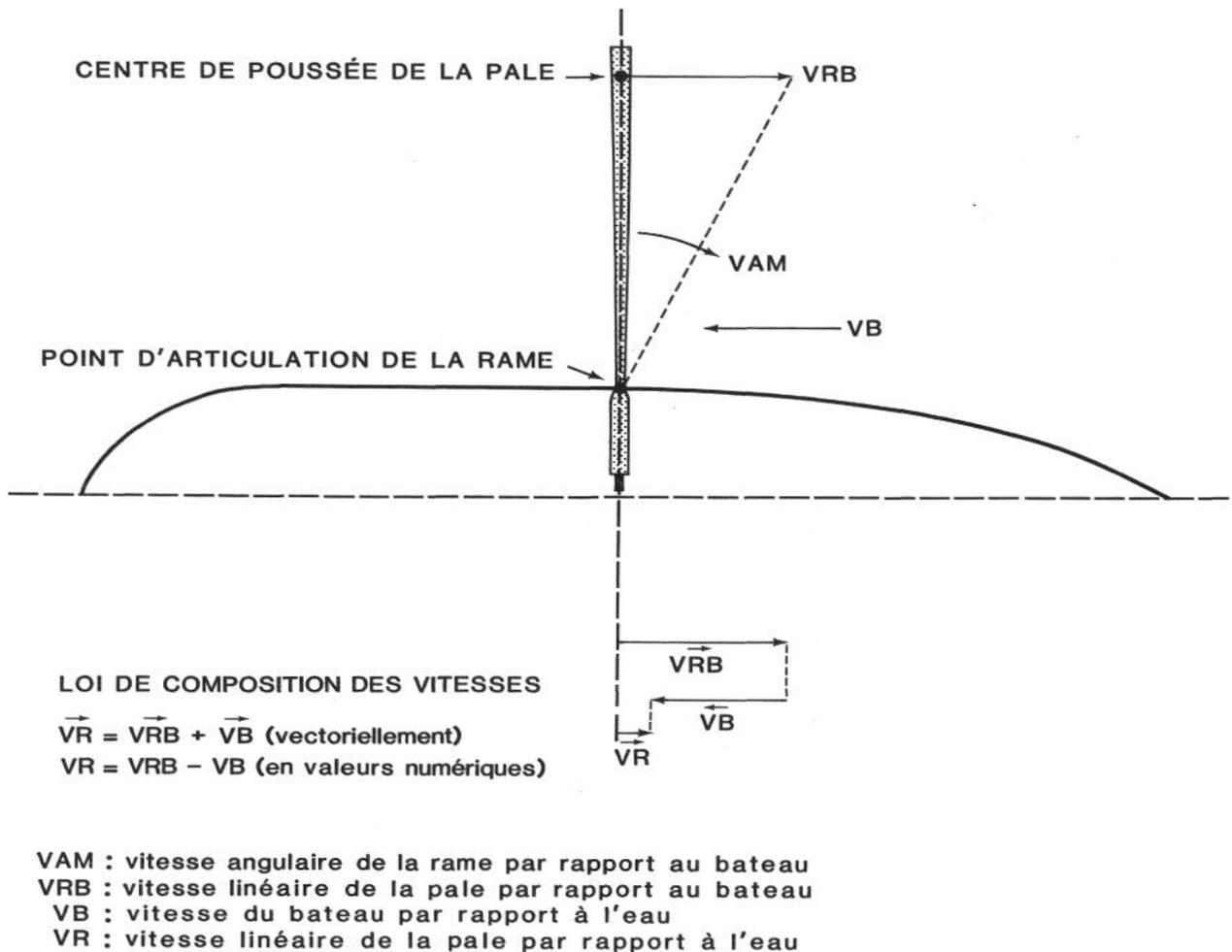
Cette équation est donnée par la relation de Froude, que nous avons déjà utilisée pour calculer la résistance hydrodynamique du bateau. Or, cette fois, à l'exception de RO, aucun des paramètres de l'expression n'est constant : tous varient selon le moment de la phase d'engagement de la rame dans l'eau... On retrouve ici l'usage de nos deux lois numériques, l'une sur l'immersion de la pale, l'autre sur la vitesse angulaire de la rame. Aussi ce n'est pas un seul calcul de RHR que nous devons effectuer, mais 26, un pour chacune des 26 tranches, qui correspondent à un déplacement élémentaire de la rame dans l'eau, ainsi qu'aux valeurs respectives de la longueur immergée de la pelle et de la vitesse angulaire de la rame. Nous emploierons désormais des expressions indicées lorsqu'un calcul s'inscrira dans une tranche et l'indice, variant de 1 à 26, sera dénommé « i ».

La surface immergée de la pale est égale au produit de la largeur de celle-ci ou corde (qui demeure constante) par la longueur (variable) de la partie immergée : $SPAL_{(i)} = CD \times LPI_{(i)}$.

Que vaut VR ? Selon la loi de composition des vitesses, la vitesse de la rame par rapport à l'eau est égale à la différence entre la vitesse de la rame par rapport au bateau (VRB) et la vitesse du bateau (VB) :

$$VR_{(i)} = VRB_{(i)} - VB. \text{ (Voir graphique 4).}$$

VB étant donné par hypothèse, nous recherchons la valeur de VRB. Comme la rame décrit autour de son point d'articulation un arc de cercle, on estime sa vitesse linéaire au bout de la pelle en effectuant le produit de sa vitesse angulaire par la distance entre l'extrémité de la rame et son point d'articulation sur le bord de la galère. Les valeurs de ces deux derniers paramètres sont connues. Toutefois, nous n'allons pas nous servir des données d'origine pour calculer VRB, mais de données



GRAPHIQUE 4

Vitesse de la pale par rapport à l'eau

corrigées. Ainsi, au lieu de prendre la vitesse angulaire de la rame (VA), telle qu'elle est énoncée dans la loi numérique, nous estimerons la vitesse angulaire en milieu de tranche (VAM), soit un affinement qui permettra de mieux évaluer l'effort moyen pendant la tranche.

Pour la première tranche :

$$VAM_{(1)} = VA_{(1)} : 2 ;$$

et pour les 25 tranches suivantes :

$$VAM_{(i)} = (VA_{(i)} + VA_{(i+1)}) : 2.$$

D'autre part, au lieu de calculer la vitesse de la rame en bout de pale, on la calcule à partir du centre de poussée de celle-ci. En effet la vitesse n'est pas la même sur toute la partie immergée de la pelle : elle décroît depuis son extrémité jusqu'à son bord à fleur d'eau. Cet écart n'est pas très grand. Néanmoins, on choisira en quelque sorte un moyen terme en estimant la vitesse de la rame au centre de poussée de la pale. Si LPI est la longueur (variable selon les tranches) de la partie mouillée de la rame et LR la distance entre l'escaume et le bout de la pelle, LCP, la distance entre l'escaume et le centre de poussée de la pelle (40) sera égale à :

$$LCP_{(i)} = \sqrt{\frac{1}{3} [LR^2 + LR(LR - LPI_{(i)}) + (LR - LPI_{(i)})^2]}.$$

Si nous calculons la vitesse de la rame par rapport au bateau (VRB) avec ces données corrigées, nous aurons donc :

$$VRB_{(i)} = VAM_{(i)} \times LCP_{(i)},$$

$$VR_{(i)} = VRB_{(i)} - VB.$$

Connaissant ainsi les 26 valeurs de SPAL, CXPAL et VR, nous pouvons maintenant calculer RHR :

$$RHR_{(i)} = \frac{1}{2} RO \times SPAL_{(i)} \times CXPAL_{(i)} \times VR_{(i)}^2.$$

Nous obtenons ainsi une série de valeurs dont certaines sont négatives : pourquoi ? Au début de la phase d'engagement, la vitesse angulaire de la rame est assez faible ; donc, à ce moment-là la vitesse du bateau (VB) est encore supérieure à la vitesse de la rame par rapport au navire (VRB) et l'expression $VRB_{(i)} - VB$ donnera une valeur négative à la vitesse de la rame (VR) pour les trois premières tranches. Cela n'a rien de surprenant, car les rameurs s'aident de la force d'inertie du bateau pour mettre l'aviron en mouvement. Il faudra en tenir compte lorsque nous estimerons le travail nécessaire pour l'ensemble des 26 tranches, de telle façon qu'on puisse déduire - et non additionner - les travaux qui sont dus à l'inertie du bateau. Or RHR est toujours positif,

car il est proportionnel au carré de VR qui est nécessairement un nombre positif... On introduira donc dans l'algorithme deux instructions complémentaires, l'une « testant » le signe de $VR_{(i)}$, l'autre inversant le signe de $RHR_{(i)}$ quand $VR_{(i)}$ est négatif.

Venons-en au calcul proprement dit du travail nécessaire au niveau de la rame (TNR) : il est égal au produit d'une force par un déplacement. La force, c'est ici la résistance hydrodynamique de la rame (RHR) et le déplacement sera le déplacement élémentaire du centre de poussée de la pale (DCP). Au moyen d'une règle de proportionnalité, on peut écrire :

$$\frac{DCP_{(i)}}{DEP} = \frac{LCP_{(i)}}{LR} ;$$

d'où nous tirons les valeurs respectives de DCP :

$$DCP_{(i)} = DEP \times \frac{LCP_{(i)}}{LR} .$$

TNR_(i) sera donc égal à :

$$RHR_{(i)} \times DEP \times \frac{LCP_{(i)}}{LR} .$$

Nous obtenons ainsi une suite de 26 valeurs pour TNR, les unes négatives, les autres positives, dont la somme algébrique nous donne le total du travail nécessaire par rame (STNR) :

$$STNR = \sum_i^n TNR .$$

Si, d'emblée, notre modèle fonctionnait correctement, le travail nécessaire par rame qui a été trouvé au niveau du bateau, devrait être égal à celui que nous avons calculé au niveau de la pelle. Or, en prenant toujours le même exemple, nous avons :

- TNR = 356,9 joules,
- STNR = 261,9 joules...

Ceci signifie que la loi numérique sur la vitesse angulaire de la rame n'est pas adaptée à nos hypothèses sur la vitesse du navire et la cadence de la vogue. Au moyen d'itérations, on recherche alors un coefficient, K, tel que la pondération de la loi de vitesse par ce coefficient réalise le bon ajustement, et nous donne, à l'échelle de la rame, un total du travail nécessaire (STNR) qui soit identique à celui que nous avons calculé au niveau du bateau. Avec notre exemple (VB = 5 noeuds, CAD = 21), K = 1,0313. Ceci implique que nous n'utiliserons plus désormais les 26 valeurs initiales de la vitesse angulaire de la rame (VA), mais les 26 valeurs pondérées par K, que nous appellerons VAP. On trouve toujours une valeur pour K... Toutefois, plus on s'éloigne des cas moyens, et plus

la pondération de la loi de vitesse s'accroît ; ainsi pour les cas limites, vitesse du bateau très faible ou très élevée, notre modèle part à la dérive : « justes » algébriquement, les résultats sont alors aberrants...

On peut maintenant envisager les calculs des travaux ajoutés pendant la phase d'engagement de la rame. Ce ne sont pas des travaux nécessaires, en ce sens qu'ils ne servent pas directement à l'avancement du navire, mais ils n'en sont pas moins intrinsèquement liés à son mode de propulsion - la rame ; et ils occasionnent un surcroît de fatigue non négligeable, que nous devons prendre en compte dans le bilan des travaux. Examinons d'abord le travail contre le moment d'inertie de la rame. La rame possède une certaine inertie qu'il faut vaincre pour la mettre en mouvement (41). Cette inertie se définit par un moment d'inertie (IR) qui s'exprime en $m^2 \times kg$. Si ω est la vitesse angulaire de la rame, celle-ci possède une énergie cinétique de rotation égale à

$$\frac{1}{2} IR\omega^2 .$$

Lorsque la vitesse angulaire de la rame s'accroît et passe d'une valeur $\omega_{(1)}$ à $\omega_{(2)}$, il faut fournir à celle-ci une énergie égale à $\frac{1}{2} IR(\omega_{(2)}^2 - \omega_{(1)}^2)$; et lorsque la vitesse angulaire décroît ($\omega_{(1)} > \omega_{(2)}$), c'est la rame qui restitue une énergie égale à :

$$\frac{1}{2} IR(\omega_{(1)}^2 - \omega_{(2)}^2) .$$

Appliquons ce raisonnement à nos données. On calcule d'abord le travail contre l'inertie de la rame (TIR) pour la première tranche :

$$TIR_{(1)} = \frac{1}{2} IR \times VAP_{(1)}^2 ;$$

puis, pour les tranches suivantes :

$$TIR_{(i)} = \frac{1}{2} IR \times (VAP_{(i)}^2 - VAP_{(i-1)}^2) .$$

Examinons les valeurs successives de TIR que nous obtenons avec le cas qui nous sert d'exemple (voir tableau V). On observe que le travail contre l'inertie de la rame dans l'eau croît positivement jusqu'à la 3ème tranche, qu'il diminue ensuite pour devenir nul à la 16ème, alors que la vitesse angulaire de la rame a atteint son maximum ; puis il augmente à nouveau jusqu'à la fin de l'engagement de la pelle, mais cette fois en changeant de signe. Au début de la phase d'engagement, la résistance hydrodynamique est négative ou faible - on a vu que les rameurs utilisent l'inertie du bateau - et inversement l'énergie cinétique de la rame doit être la plus élevée possible, de telle façon que la rame « emmagasine » l'inertie qui lui sera nécessaire lorsque la résistance hydrodynamique

TABLEAU V

Les travaux pendant la phase d'engagement
Résultats intermédiaires d'un cas de vogue ordinaire *

Numéro de la tranche (i)	Travail nécessaire par rame (TNR)	Travail contre l'inertie de la rame (TIR)	Travail contre la masse ajoutée (TMA)	Travail contre l'inertie du vogue-avant (TIVA)	Somme des travaux par vogue-avant (TVA)	Durée de la tranche (DT)
1	-9.763	15.868	8.949	5.913	10.516	0.0516
2	-5.321	20.559	-5.773	7.661	10.556	0.0581
3	-1.295	19.583	-2.920	7.297	11.997	0.0430
4	0.000	16.205	0.052	6.038	11.010	0.0364
5	1.131	14.624	2.036	5.449	10.890	0.0327
6	4.323	12.573	3.306	4.685	10.863	0.0302
7	8.998	10.873	4.015	4.052	11.356	0.0284
8	14.238	7.737	3.475	2.883	10.666	0.0272
9	18.469	6.379	3.231	2.377	10.964	0.0264
10	22.217	5.444	3.005	2.028	11.407	0.0258
11	25.510	4.439	2.586	1.654	11.603	0.0253
12	28.381	3.945	2.395	1.470	12.088	0.0249
13	30.956	3.427	2.154	1.277	12.450	0.0246
14	33.233	2.888	1.865	1.076	12.693	0.0243
15	34.598	1.163	0.627	0.433	11.561	0.0242
16	34.651	0.0	-0.207	0.0	10.533	0.0241
17	33.072	-2.900	0.0	-1.080	8.147	0.0242
18	29.122	-5.712	0.0	-2.128	5.031	0.0246
19	23.697	-7.251	0.0	-2.702	2.327	0.0252
20	17.921	-8.122	0.0	-3.026	-0.030	0.0259
21	12.327	-9.400	0.0	-3.503	-2.607	0.0269
22	7.179	-10.976	0.0	-4.090	-5.251	0.0282
23	2.777	-14.058	0.0	-5.238	-8.688	0.0300
24	0.142	-17.919	0.0	-6.677	-12.113	0.0329
25	-0.784	-23.617	0.0	-8.823	-16.303	0.0386
26	-8.864	-45.694	0.0	-17.027	-33.711	0.0861

* VB = 2.572 m/s, VV = 0, CAD = 21, h = 0,2 mm.

jouera à plein. Vers la fin de la phase d'engagement, la rame « libère » de l'énergie et le sens du travail contre l'inertie est alors négatif. Travaux positifs et travaux négatifs s'équilibrent d'ailleurs : la somme algébrique du travail contre l'inertie de la rame est nulle.

Le mouvement même de la rame dans l'eau entraîne un autre travail que nous appelons travail contre la masse ajoutée (TMA). Lorsqu'elle brasse la mer, la pelle « transporte » une certaine masse d'eau dont le volume est égal à celui d'un cylindre qui serait circonscrit à la surface de la pelle. Cette masse d'eau est accélérée en même temps que la rame, et son volume varie selon l'immersion de la pelle. Même si les valeurs successives du travail contre la masse ajoutée sont relativement faibles, elles entreront néanmoins en ligne de compte dans l'évaluation du travail fourni pendant la phase d'engagement (42). En additionnant tranche par tranche le travail nécessaire (TNR), le travail contre l'inertie de la rame (TIR), et le travail contre la masse ajoutée (TMA), nous obtenons le travail « réel » au niveau de la rame (TRR) pour chaque déplacement élémentaire de celle-ci :

$$\text{TRR} : \text{TNR}_{(i)} + \text{TIR}_{(i)} + \text{TMA}_{(i)}.$$

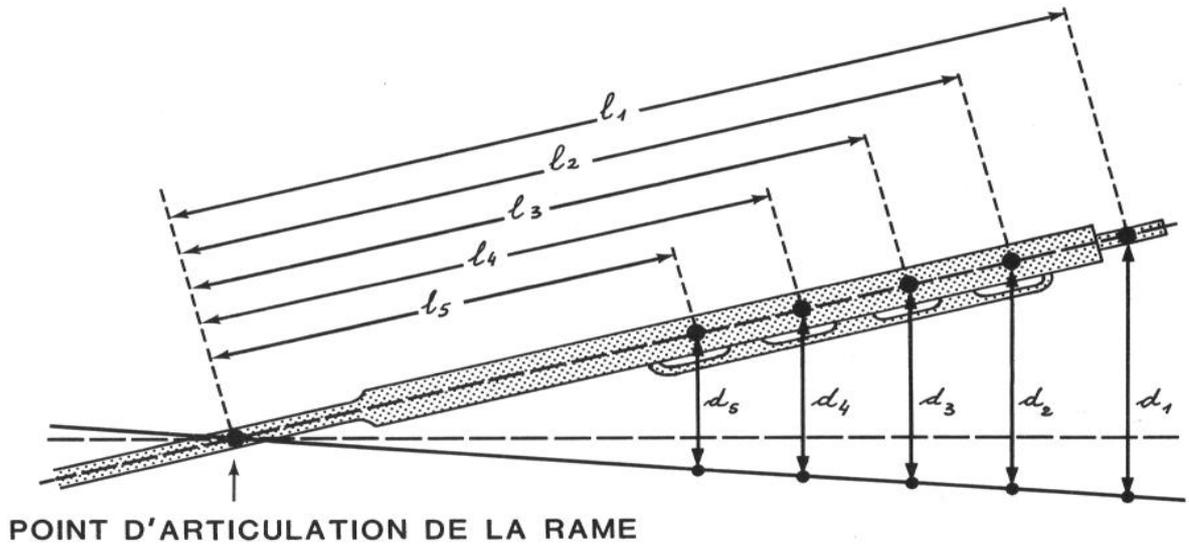
De la rame au rameur

Or cette expression nous donne le travail réel par rame, alors que nous voudrions parvenir à calculer le même travail au niveau du rameur. La solution la plus fruste et la moins acceptable consisterait à diviser le travail réel sur la rame par le nombre de rameurs, soit cinq dans le cas de la galère ordinaire. Ceci reviendrait à considérer que les galériens d'un même banc effectuaient un travail identique, soit une hypothèse invraisemblable qui contredirait ce que nous avons déjà exposé au sujet du mouvement de la vogue... On peut rechercher une autre solution à la fois plus élégante et plus conforme à nos données. Un travail (T) est égal au produit d'une force (F) par un déplacement (d) de même direction que la force nécessaire à ce travail : $T = F \times d$. Si nous supposons équivalente la force des rameurs, et que nous appelons d_1, d_2, d_3, d_4 et d_5 les déplacements élémentaires d'un vogue-avant, d'un apostis, d'un tiercerol, d'un quarterol et d'un quinterol on peut écrire :

$$\begin{aligned} T_1 &= F \times d_1 \\ T_2 &= F \times d_2 \\ T_3 &= F \times d_3 \\ T_4 &= F \times d_4 \\ T_5 &= F \times d_5 ; \text{ où bien sûr } T_1 > T_2 > T_3 > T_4 > T_5 \text{ (voir graphique 5).} \end{aligned}$$

En négligeant le travail du cinquième rameur qui, du fait de sa position, jouait le rôle d'un galérien supplétif, le travail total (T) vaudra :

$$\begin{aligned} T &= T_1 + T_2 + T_3 + T_4 ; \\ T &= (F \times d_1) + (F \times d_2) + (F \times d_3) + (F \times d_4) ; \end{aligned}$$



$l_1 l_2 l_3 l_4 l_5$: DISTANCES DU POIGNET DE CHAQUE RAMEUR AU POINT D'ARTICULATION DE LA RAME

$d_1 d_2 d_3 d_4 d_5$: DEPLACEMENTS DU POIGNET DE CHAQUE RAMEUR

GRAPHIQUE 5

Le déplacement du poignet du rameur est proportionnel à la longueur du bras de levier

si nous mettons F en facteur :

$$T = F (d_1 + d_2 + d_3 + d_4) ;$$

si nous sortons d_1 de l'expression entre parenthèses :

$$T = F \times d_1 \left(1 + \frac{d_2}{d_1} + \frac{d_3}{d_1} + \frac{d_4}{d_1} \right).$$

Nous connaissons la longueur du bras de levier ou la distance entre le poignet d'un rameur et le point d'articulation de la rame, que nous appelons l_1 , l_2 , l_3 et l_4 . Or le déplacement du poignet du rameur est proportionnel au bras de levier de la rame. On peut écrire :

$$\frac{d_2}{d_1} = \frac{l_2}{l_1} ; \quad \frac{d_3}{d_1} = \frac{l_3}{l_1} ; \quad \frac{d_4}{d_1} = \frac{l_4}{l_1}$$

donc $T = F \times d_1 \left(1 + \frac{l_2}{l_1} + \frac{l_3}{l_1} + \frac{l_4}{l_1} \right).$

Et si nous remplaçons l_1 , l_2 , l_3 et l_4 par leurs valeurs respectives (voir tableau 2) :

$$T = F \times d_1 \left(1 + \frac{3.28 + 2.84 + 2.40}{3.76} \right);$$

$$T = F \times d_1 (1 + 2.27).$$

Or $F \times d_1$, c'est le travail fourni par le vogue-avant : $F \times d_1 = \text{TVA}$.
D'où

$$T = \text{TVA} (1 + 2,27). \text{ En développant :}$$

$$T = \text{TVA} + 2,27 \text{ TVA};$$

$$T = 3,27 \text{ TVA}.$$

Mesurée à l'aune du vogue-avant, le travail dépensé par rame vaut 3.27 TVA, autrement dit, le travail des 4 rameurs efficaces d'un banc équivaut à celui qui serait fourni par 3.27 vogue-avants théoriques. Dès lors, on pourra écrire que l'intensité du travail du vogue-avant pour chacun des déplacements élémentaires de l'aviron est égale à $\text{TRR}_{(i)}$: 3.27 ou $(\text{TNR}_{(i)} + \text{TIR}_{(i)} + \text{TMA}_{(i)})$: 3.27.

Nous avons franchi une étape essentielle, car nous nous situons maintenant au niveau du rameur, en l'occurrence le vogue-avant d'une galère ordinaire. Outre le travail nécessaire pour actionner la rame dans l'eau et les travaux supplémentaires que ce mouvement occasionne, le vogue-avant doit également fournir un effort pour lancer son corps quand il accélère l'aviron dans la mer : c'est le travail contre l'inertie du rameur (TIVA). Un corps de masse m , qui se déplace à une vitesse linéaire v , possède une énergie cinétique de translation égale à $\frac{1}{2} mv^2$.

En passant d'une vitesse v_1 à une vitesse v_2 ($v_2 > v_1$), le déplacement de la masse m exigera une énergie égale à $\frac{1}{2} m(v_2^2 - v_1^2)$;

et quand la vitesse diminue ($v_2 < v_1$), la masse m restituera une énergie égale à $\frac{1}{2} m(v_1^2 - v_2^2)$.

On comprend que pendant la première partie de la phase d'engagement, tant que la vitesse angulaire de la rame s'accroît, le galérien doit lutter contre l'inertie de son corps qui « suit » nécessairement l'accélération de la vitesse de la rame : TIVA sera donc positif. Inversement, quand la vitesse angulaire de la rame diminue, et que le galérien amorce sa retombée sur le banc, il s'aide de son propre « poids » pour « tirer » la rame : TIVA sera négatif. « v » représente ici la vitesse linéaire au centre de gravité du corps du rameur. Elle est égale au produit de la vitesse angulaire de la rame (VAP) par la longueur du bras de levier du vogue-avant (LG), produit que nous pondérons par le rapport $\frac{1}{1.5}$, parce que le centre de gravité du corps du rameur se situe plus bas que le point de préhension de l'aviron. On calculera d'abord TIVA pour la première tranche :

$$\text{TIVA}_{(1)} = \frac{1}{2} 65 \times 3.76 \times \frac{1}{1.5} \times \text{VAP}_{(1)}^2 ;$$

puis pour les 25 tranches suivantes :

$$TIVA_{(i)} = \frac{1}{2} \times 65 \times 3.76 \times \frac{1}{1.5} \times (VAP_{(i)}^2 - VAP_{(i-1)}^2) .$$

Si nous appelons TVA, la somme algébrique de tous les travaux fournis par le vogue-avant au cours de chaque tranche, celle-ci sera égale à :

$$TVA_{(i)} = [(TNR_{(i)} + TIR_{(i)} + TMA_{(i)}) : 3.27] + TIVA_{(i)} .$$

TVA est donc calculé 26 fois pour chaque déplacement élémentaire ou pour chaque tranche. Nous possédons désormais tous les éléments nécessaires pour estimer le travail du vogue-avant pendant la totalité de la phase d'engagement de l'aviron : il suffira d'additionner les valeurs successives de TVA. Or si nous observons celles-ci dans l'exemple qui nous sert de guide (voir Tableau V), on voit que les valeurs des sept dernières tranches sont des nombres négatifs. Tout se passe comme si, à la fin de la phase d'engagement, la majeure partie de l'énergie restituée par la rame et par le corps du rameur n'était plus « récupérée » ou « absorbée » par des travaux de sens opposé ou positif. En d'autres termes, lorsqu'un cycle de vogue s'achève, environ 28 % du travail produit par le vogue-avant l'aurait été en pure perte... On peut supposer que le rameur emploie ce surcroît d'énergie pour freiner l'aviron en fin de course. Or cette explication n'apparaît pas complètement convaincante, car les rameurs savaient probablement fort bien doser leur effort afin de fournir le moins de travail possible, et il faut bien constater que notre modèle ne fonctionne pas correctement tout au long de la période d'engagement, peut-être parce que la diminution de la vitesse angulaire a été établie de façon trop brutale... On s'aperçoit toujours qu'on pourrait mieux faire vers la fin de l'analyse (43). Quoi qu'il en soit, ces travaux négatifs ont été effectivement produits et dépensés, et à ce titre nous ne pouvons pas les déduire du total du travail « positif » qui a été fourni par le vogue-avant durant la phase d'engagement de la rame. Aussi nous n'effectuerons pas la somme algébrique des valeurs de TVA, mais la somme de ses valeurs absolues :

$$TTVAENG = \sum_{i=1}^n |TVA| ; \text{ avec notre exemple ,}$$

$$TTVAENG = 275.36 \text{ joules .}$$

Connaissant le travail total du vogue-avant (TTVAENG), rame dans l'eau, on recherche maintenant la puissance moyenne que ce travail a nécessitée (WENG). Toutefois, il nous manque encore un paramètre essentiel : la durée de la phase d'engagement. Afin de l'obtenir, on calculera d'abord la durée de chaque tranche, correspondant à un déplacement élémentaire de la pale.

$$VRB_{(i)} = \frac{DCP_{(i)}}{DT_{(i)}} .$$

La vitesse de la rame par rapport au bateau (VRB) est égale au rapport d'un déplacement élémentaire mesuré au centre de poussée de la pelle (DCP) par un temps élémentaire (DT) ; d'où

$$DT_{(i)} = \frac{DCP_{(i)}}{VRB_{(i)}}.$$

On se souvient que pour le calcul de la vitesse de la rame dans l'eau, nous avons considéré deux types de déplacement élémentaire : à partir de l'extrémité de la pale (DEP) et à partir du centre de poussée (DCP) ; de même nous avons considéré deux longueurs de bras de levier : la première, mesurée à partir de l'extrémité de la pale (LR), la seconde estimée à partir du centre de poussée (LCP). Ces deux séries de mesures étant proportionnelles entre elles, nous pouvons écrire :

$$\frac{DCP_{(i)}}{DEP} = \frac{LCP_{(i)}}{LR}; \quad \text{d'où} \quad DCP_{(i)} = \frac{DEP \times LCP_{(i)}}{LR}.$$

Si nous remplaçons DCP par cette dernière expression pour le calcul de $DT_{(i)}$ nous aurons donc :

$$DT_{(i)} = \frac{DEP \times LCP_{(i)}}{VRB_{(i)} \times LR}.$$

La durée totale de la période d'engagement de la rame (DURENG) sera égale à la somme de toutes les durées élémentaires de chacune des 26 tranches :

$$DURENG = \sum_{i=1}^n |DT|.$$

On peut calculer maintenant la puissance moyenne fournie par le vogueur pendant la phase d'engagement de la rame dans l'eau

$$WENG = \frac{TTVAENG}{DURENG}.$$

Avec notre exemple, nous aurons $WENG = \frac{275.36}{0.850} = 323.95$ Watts.

Nous avons achevé les calculs relatifs à la phase d'engagement de la rame, et il faut désormais évaluer les travaux que les galériens effectuaient pendant la phase de montée, pelle hors d'eau. Ce sont tous des travaux « ajoutés » en ce sens qu'ils ne servent pas directement à la propulsion de la galère, mais ce ne sont pas des travaux négligeables, bien au contraire...

On estime d'abord la durée de la phase de montée. Celle-ci est théoriquement égale à la différence entre la période (PER) ou temps d'un coup de rame et la durée totale de la phase d'engagement (DURENG). Toutefois, nous devons aussi déduire deux temps intermédiaires :

- la durée du petit mouvement vertical nécessaire pour engager la rame dans l'eau à la fin de la « montée »,
- la durée de la retombée sur le banc à la fin de l'engagement.

En évaluant chacun de ces petits temps à 0.1 seconde, la durée de la montée sera égale à

$$\text{DURMONT} = (\text{PER} - \text{DURENG}) - 0.2.$$

Ainsi dans notre exemple,

$$\text{DURMONT} = (2.857 - 0.85) - 0.2 = 1.807 \text{ sec.}$$

Ce résultat permet de chercher la vitesse angulaire moyenne durant la phase de montée. Il s'agit d'une vitesse « moyenne », car il n'est pas nécessaire, cette fois, de considérer un déplacement élémentaire de la rame : tous les calculs concernant la « montée » porteront immédiatement sur l'ensemble de la phase. Exprimée en radians par seconde, la vitesse angulaire se définit comme le rapport d'un déplacement angulaire et d'un temps. Dans le cas qui nous intéresse, comme l'angle est très petit, on peut remplacer sa valeur par celle de sa tangente. La vitesse angulaire moyenne de la rame au cours de la montée (VAMONT) sera donc égale à :

$$\text{VAMONT} = \frac{\text{DEPALE}}{\text{LR} \times \text{DURMONT}},$$

où $\frac{\text{DEPALE}}{\text{LR}}$ est la tangente du déplacement angulaire de la rame. Avec notre exemple :

$$\text{VAMONT} = \frac{2.60}{8.045 \times 1.807} = 0.179 \text{ rad./sec.}$$

On peut maintenant calculer le travail contre l'inertie de la rame durant la montée (TIRM). Ce travail est double, car les galériens doivent lancer la rame vers la poupe, puis l'arrêter en bout de course, juste avant d'engager la rame dans l'eau. Ces deux travaux possèdent une intensité égale, et si nous voulons obtenir le travail au niveau du rameur, il faudra en outre diviser le résultat par le nombre de vogue-avants théoriques, soit 3.27 :

$$\text{TIRM} = 2 \left(\frac{1}{2} \text{IR} \times \text{VAMONT}^2 \right) : 3.27 \quad \text{ou}$$

$$\text{TIRM} = \frac{\text{IR} \times \text{VAMONT}^2}{3.27}.$$

Avec notre exemple nous aurons

$$\text{TIRM} = \frac{1096 \times 0.179^2}{3.27} = 10.7 \text{ joules .}$$

On considère aussi le travail contre l'inertie du corps du rameur. Son estimation nécessite le calcul de la vitesse linéaire moyenne du rameur au cours de la phase de montée (VLMONT). Elle sera égale au produit de la vitesse angulaire moyenne de la rame (VAMONT) par la longueur du bras du levier, autrement dit - s'il s'agit du vogue-avant - par la distance entre le « maintenant » et le point d'articulation de la rame (LG). Le résultat sera pondéré par le rapport

$\frac{1}{1.5}$ car le centre de gravité du corps du rameur se situe plus bas que la prise de la rame :

$$\text{VLMONT} = \frac{1}{1.5} \times \text{LG} \times \text{VAMONT}$$

$$\text{VLMONT} = \frac{1}{1.5} \times 3.76 \times 0.179 = 0.449 \text{ m/s .}$$

Le travail contre l'inertie du corps du rameur (TIC) représente l'énergie à fournir lors du déplacement horizontal du galérien vers la poupe. Ce travail est double car on suppose que le galérien produit également un effort pour retenir son corps en fin de montée :

$$\text{TIC} = 2 \left(\frac{1}{2} \times \text{MVA} \times \text{VLMONT}^2 \right) \text{ ou } \text{TIC} = \text{MVA} \times \text{VLMONT}^2$$

$$\text{TIC} = 65 \times 0.179^2 = 13.1 \text{ joules .}$$

Comme le rameur se déplace aussi verticalement lorsqu'il se lève de son banc, il faut encore prendre en compte le travail contre la pesanteur (TPES) (44).

$\text{TPES} = \text{MVA} \times g \times h$, où g est l'accélération de la pesanteur (9.81 m/sec^2) et h l'amplitude du déplacement vertical, que nous avons évalué à 0.35 m . TPES restera constant, quelles que soient les hypothèses de vogue, et nous observons immédiatement que ce n'était pas le moindre travail :

$$\text{TPES} = 65 \times 9,81 \times 0,35 = 223,2 \text{ joules}$$

Le travail total pendant la montée (TTVAMONT) est donc égal à la somme de tous les travaux que nous avons évalués pour cette phase :

$$\text{TTVAMONT} = \text{TIRM} + \text{TIC} + \text{TPES}.$$

En suivant notre exemple :

$$\text{TTVAMONT} = 10,7 + 13,10 + 223,2 = 247 \text{ joules.}$$

On pourra également calculer la puissance fournie par le voguier-avant durant la montée :

$$WMONT = \frac{TTVAMONT}{DURMONT}$$

$$WMONT = \frac{247}{1.807} = 136.69 \text{ joules} \quad (\text{même exemple})$$

Nous voici enfin parvenus à l'étape du bilan des travaux et des puissances. Tous les éléments de ce bilan sont calculés au niveau du rameur, en l'occurrence le voguier-avant d'une galère ordinaire, celui qui donnait la cadence aux autres galériens de son banc et fournissait l'effort le plus rude. Ce bilan résume nos résultats numériques (voir Tableau VI). Il comprend, pour chaque « cas » de vogue :

- le travail total pendant la « montée », rame hors d'eau (TTVAMONT) ;

- le travail total pendant l'engagement, rame dans l'eau (TTVAENG) ;

- le travail total pendant la période ou coup de rame :

$$TTVAPER = TTVAMONT + TTVAENG ;$$

- le rendement de la phase d'engagement :

$$RENG = TNVA : TTVAENG ;$$

- le rendement pour toute la période :

$$RPER = TNVA : TTVAPER ;$$

- la puissance totale pendant la montée :

$$WMONT = \frac{TTVAMONT}{DURMONT} ;$$

— la puissance totale pendant l'engagement :

$$WENG = \frac{TTVAENG}{DURENG}$$

— la puissance totale pendant la période :

$$WPER = \frac{TTVAPER}{PER} .$$

Un système homme-machine poussif et archaïque

Quelle est la « fiabilité » des résultats que nous avons obtenus ? Un exercice traditionnel, qui suit la résolution de tout problème de physique, consiste à se demander comment les résultats auraient varié selon la plus ou moins grande précision des données. Cette démarche apparaissait d'autant plus indispensable que nos calculs ne reposaient pas, pour

TABLEAU VI

Le modèle de la vogue : hypothèses et résultats

	VOGUE AVANT-TOU				VOGUE A QUARTIER		
	vent nul		vent contre		vent nul		
Vitesse de la galère (en nœuds)	4	5	6	4	2	3.5	4
Vitesse de la galère (en m/s)	2.058	2.572	3.086	2.058	1.029	1.8	2.058
Cadence (coup/minute)	23	21	26	21.8	22	20.5	23
Vitesse du vent contraire (en m/s)	0	0	0	3	5	0	0
Hauteur de rugosité (en mm)	1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Durée de la période ou cycle de vogue (en s)	2.609	2.857	2.308	2.752	2.727	2.927	2.609
Durée de la phase de montée (en s)	1.366	1.807	1.403	1.549	0.907	1.857	1.649
Durée de la phase d'engagement (en s)	1.043	0.850	0.705	1.003	1.620	0.87	0.760
Travail nécessaire par rameur (en joules)	83.9	109.1	164.4	118.5	122.6	78.4	104.1
Travail total par rameur pendant la montée (en joules)	264.8	247	262.7	255.5	317.5	235.8	239.3
Travail total par rameur pendant l'engagement (en joules)	192.6	275.4	405	231.4	161.4	162.3	214
Travail total pendant la période (en joules)	457.4	522.4	667.7	486.9	478.9	398.1	453.3
Puissance totale par rameur pendant la montée (en watts)	194	137	187	164.9	349.9	127	145
Puissance totale par rameur pendant l'engagement (en watts)	185	324	574	230.7	99.6	187	282
Puissance totale par rameur pendant la période (en watts)	175	183	289	176.9	175.6	136	174
Rendement pendant la phase d'engagement	0.44	0.4	0.41	0.51	0.76	0.48	0.49
Rendement pendant la période	0.18	0.21	0.25	0.24	0.26	0.2	0.23

l'essentiel, sur des « mesures », mais sur des estimations et des déductions algébriques et géométriques. Nous avons évalué l'incidence sur les résultats de quatre types d'erreurs :

- sur la surface mouillée,

- sur les coefficients de résistance hydrodynamique et aérodynamique,
- sur le moment d'inertie de la rame,
- sur la longueur de pale dans l'eau.

Au moyen de calculs de dispersion, on fait varier chacun de ces quatre paramètres à partir d'un cas « moyen » (nous avons pris toujours le même exemple d'une vogue ordinaire à 5 noeuds et 21 coups de rame par minute) et on observe les fluctuations correspondantes des résultats. Soumis à cette épreuve, ceux-ci bougent peu ou prou. En supposant des erreurs sensibles, de l'ordre de 10 % sur la surface mouillée de la coque, les coefficients de résistance et le moment d'inertie de la rame, le résultat principal : la puissance totale fournie par le vogue-avant, manifeste une remarquable stabilité : elle augmente ou diminue à peine de 2 % (voir

TABLEAU VII

Erreurs et dispersions pour un cas de vogue ordinaire *

A) Erreur sur la surface mouillée

	- 10 %	- 5 %	0 %	+ 5 %	+ 10 %
Puissance totale par vogue-avant (en watts)	178.7	180.8	182.8	185	187.2
Variation par rapport à la valeur d'origine (en %)	- 2.24	- 1.09	—	+ 1.2	+ 2.4

B) Erreur sur le moment d'inertie de la rame

	- 5 %	0	+ 5 %	+ 10 %
Puissance totale par vogue-avant (en watts)	181.5	182.8	184.2	185.6
Variation par rapport à la valeur d'origine (en %)	- 0.7	—	+ 0.8	+ 1.5

C) Erreur sur le coefficient de résistance totale (résistance hydrodynamique plus résistance aérodynamique)

	- 5 %	0	+ 5 %
Puissance totale par vogue-avant (en watts)	180.8	182.8	185
Variation par rapport à la valeur d'origine (en %)	- 1.1	—	+ 1.8

D) Erreur sur la longueur d'immersion de la pelle

Variation de l'immersion de la pelle (en %)	Puissance totale du vogue-avant (en watts)	Variation par rapport à la valeur d'origine
0	182.8	—
- 5	182.1	- 0.4
- 10	181.5	- 0.7
- 15	180.9	- 1
- 20	180.4	- 1.3
- 25	180	- 1.5
- 30	179.8	- 1.6
- 35	179.8	- 1.6
- 40	180.3	- 1.4
- 45	181	- 1
- 50	182.1	- 0.4

* Vitesse de la galère = 2.572 m/s, vitesse du vent = 0, cadence = 21 coups/minute.

Tableau VII). Nous avons voulu aller plus loin en vérifiant l'influence de l'immersion de la pale dans l'eau, car il s'agissait d'une loi numérique dont les valeurs étaient, au sens propre du terme, tout à fait « hypothétiques ». Nous avons donc envisagé des changements de grande amplitude, effectuant des calculs de dispersion jusqu'à 50 % de variation sur la longueur de pale dans l'eau. Or, même dans ce dernier cas, la modification de la loi d'immersion de la pale joue un rôle presque négligeable dans le calcul du travail pendant la phase d'engagement. Néanmoins, on observe qu'avec un pourcentage « d'erreurs » compris entre -30 et -35 %, on obtient une autre loi, « meilleure » que celle d'origine qui semble mieux optimiser les efforts des rameurs. Ceci voudrait dire qu'il aurait peut-être fallu adapter la loi d'immersion de la pelle (au moyen d'un coefficient), aux différentes hypothèses de vitesse et de cadence. Nous raffinons... et nous ne devons pas oublier l'essentiel, à savoir que des erreurs sensibles au sujet du bateau et du mouvement de la rame n'exercent qu'une influence minimale sur l'évaluation du travail et de la puissance. La structure même des algorithmes explique ce constat, car ce sont les hypothèses sur la vitesse linéaire du bateau et sur la vitesse angulaire de la rame qui font « courir » notre modèle. Lorsque la vitesse de la galère double, passant de 3 à 6 noeuds, la puissance nécessaire à l'avancement du navire est multipliée par dix...

Si nous savons qu'à une vitesse de 5 noeuds, par vent nul, avec une

cadence de 21 coups de rame par minute, le vogue-avant d'une galère de combat devait produire, durant une période ou cycle de vogue d'environ 3 secondes, une puissance moyenne de 183 watts, quelle signification peut-on donner à cette dernière valeur ? Se pose maintenant le problème de la comparaison de nos résultats avec d'autres informations sur les possibilités physiologiques des rameurs, car autrement les séries de chiffres que nous avons alignées ne serviraient strictement à rien.

Le métier de galérien représentait un travail lourd, analogue à des tâches aussi pénibles et éprouvantes que la coupe de la canne à sucre ou l'abattage manuel de charbon au fond d'une mine. Dans un tel contexte, les spécialistes de physiologie du travail (45) ont calculé qu'un homme ordinaire pouvait fournir une puissance de :

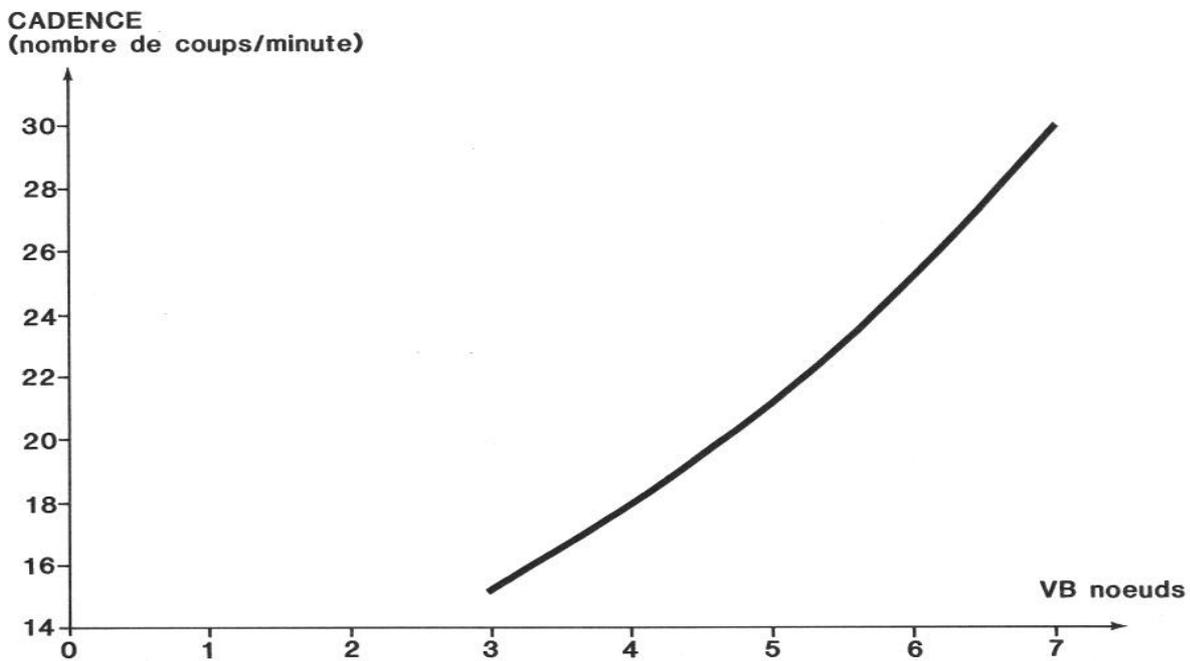
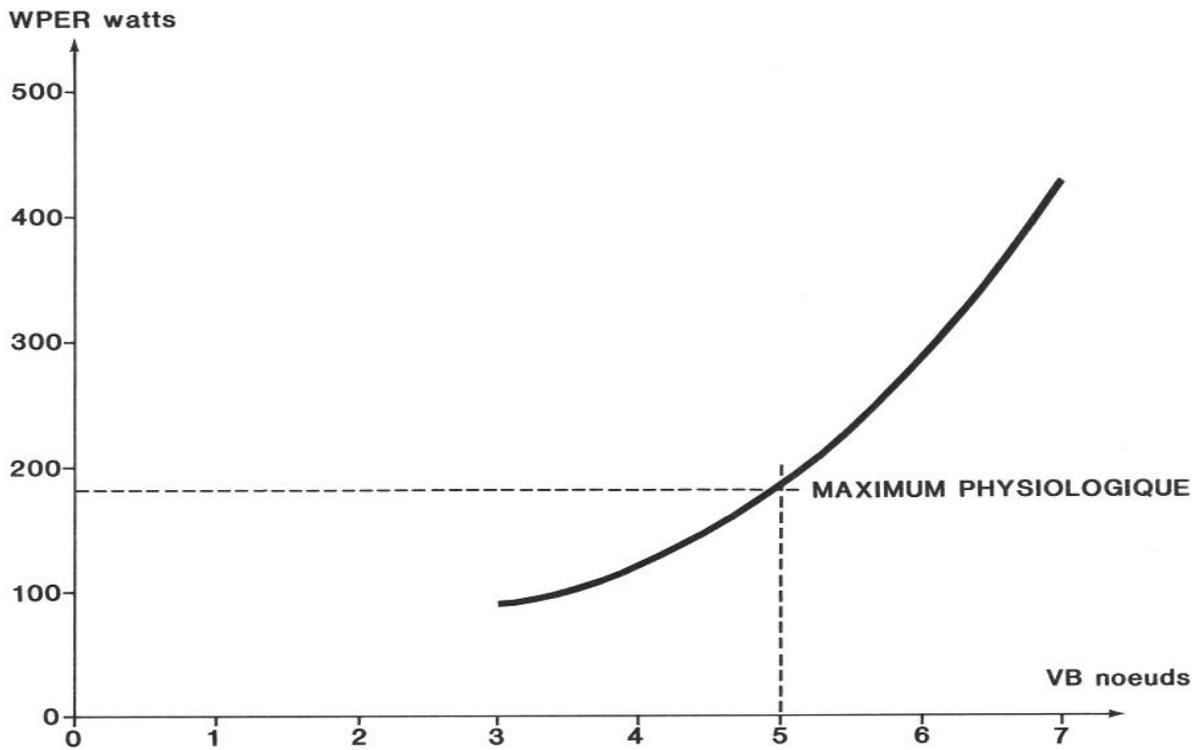
- 140 watts pendant 10 heures,
- 170 watts pendant 4 heures,
- 200 watts pendant 1 heure.

Telles sont les données que nous avons retenues afin de les comparer avec les résultats numériques sur le travail de la vogue. Il s'agit de maxima. Il faudrait même envisager des limites plus faibles, car nous avons vu que l'exiguïté du poste de travail ne permettait pas aux galériens d'employer pleinement leurs ressources respiratoires.

Envisageons le cas d'une galère ordinaire avançant par vent nul avec l'ensemble de sa palamente - 51 rames -, la carène encore propre et bien graissée - soit une hauteur de rugosité de 0.2 mm. On observe immédiatement (voir graphique 6) que la « barre » des 200 watts, c'est-à-dire la limite extrême des possibilités d'un rameur pendant une heure de travail est largement franchie au-delà d'une vitesse moyenne de 5 noeuds ou environ 9 km/h. « En sortant du port, disait le comite réel, supposez que le temps soit calme, l'usage des galères du roy est de faire voguer avant tout pendant quatre orloges, ce qui fait deux heures ». En appliquant à nos résultats la recommandation du sieur Masse, l'on voit que notre galère « modèle » pouvait peut-être « filer » 5 noeuds pendant la première heure de vogue, ce qui entraînait déjà l'épuisement rapide des réserves disponibles et nécessitait une puissance de 183 watts par vogue-avant. Il n'était sans doute plus question de maintenir une telle allure au cours de la deuxième heure, la vitesse retombant alors probablement aux alentours de 4 noeuds.

Voilà pour la vitesse de « croisière ». Si nous raisonnons en terme de vitesse de pointe, une chiourme poussée à bout parvenait peut-être à franchir le « mur » des 200 watts. Au prix d'une formidable accélération de la cadence, au moins 26 coups par minute, soit un coup de rame toutes les 2.3 secondes, une galère atteignait ainsi 6 noeuds (certainement pas 7) ; vitesse qui exigeait déjà 300 watts par vogue-avant et par coup de rame : un demi cheval-vapeur ! Une telle allure ne se conservait pas durant plus de 15 minutes... A ce rythme-là, un capitaine risquait effectivement de « crever » une chiourme en un quart d'heure sans avoir l'assurance de toucher au but.

La bonne vogue, celle qui correspondait le mieux aux capacités des rameurs, c'était la vogue à quartier : le temps de travail, qui ne dépassait guère une heure et demie, égalait le temps de repos, tandis que la galère,



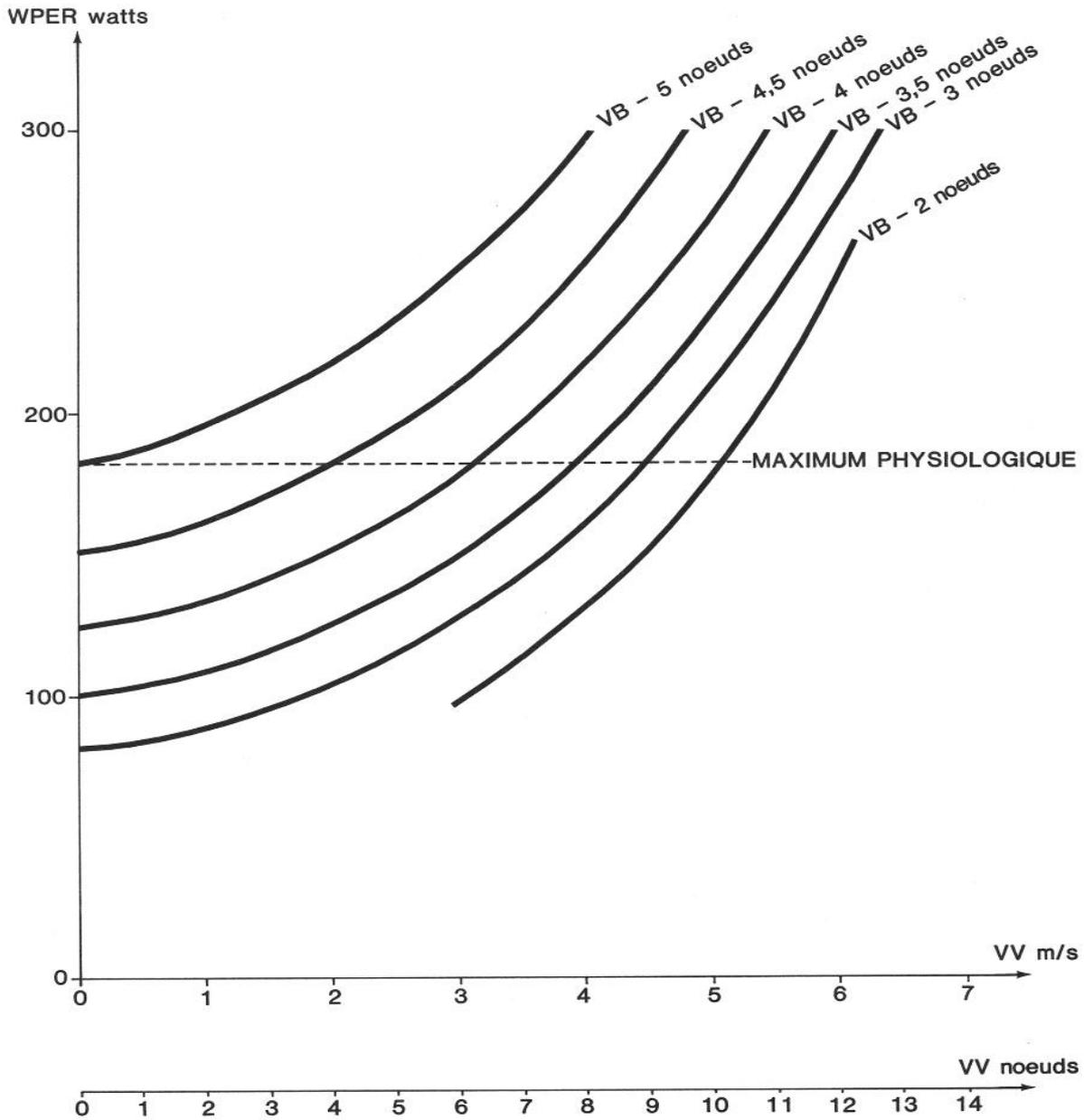
GRAPHIQUE 6

Puissance fournie par rameur pendant un coup d'aviron
en fonction de la vitesse du bateau (coque lisse, vogue ordinaire, vent nul)

propulsée alternativement par l'équipe de proue ou l'équipe de poupe, poursuivait sa route. Alors qu'en ramant « avant tout » à 5 noeuds, on atteignait presque les limites des galériens au bout d'une heure de course, la vogue à quartier permettait de soutenir une allure légèrement moins rapide pendant une dizaine d'heures sans épuiser pour autant la chiourme. Avec une cadence de 23 coups/minute et une vitesse de 4 noeuds, une vogue à quartier consommait 174 watts par vogue-avant, ce qui représente déjà un gros effort, se situant au-dessous néanmoins de la barre des 200 watts, mais les rameurs pouvaient se reposer, manger et boire durant 1 H 30 à 2 H., avant de se remettre aux manilles... Si la chiourme était très fatiguée, un comite avisé se contentait d'une vogue à quartier de 20 coups/minute à 3.5 noeuds : celle-ci ne coûtait que 136 watts par vogue-avant.

Jusqu'à présent, nous avons raisonné comme si les conditions de navigation à la rame étaient les meilleures : vent nul et faible rugosité de la coque. Considérons maintenant des cas moins favorables, et en premier l'hypothèse d'un vent contraire. On imagine le « scénario » suivant. Une escadre a « serpé » - levé l'ancre - pour s'engager dans une assez longue traversée d'environ 30 milles nautiques. Parvenue à mi-chemin, alors que les chiourmes ont vogué « paisiblement » à quartier durant la presque totalité du trajet, l'escadre rencontre un faible vent contraire, d'une vitesse de 2 mètres/seconde, qui vient directement par proue. La route exige que l'on conserve néanmoins le même cap, en naviguant au plus près, alors qu'il est impossible de faire voile. Les comites ont sifflé « avant tout », car ce petit vent oblige déjà à faire travailler toutes les rames. Plus question de voguer à quartier... La chiourme fatiguera au bout d'une heure, peut-être moins, sans l'espérance d'un temps de récupération, le bon mouillage se situant à plus de trois heures de route. La brise devient alors un vrai vent contraire, de 3 m/s puis de 4 m/s et enfin de 5 m/s. Ce qui serait de la broutille pour un quelconque vaisseau rond, ne méritant même pas la moindre mention sur le journal de bord, devient un événement fâcheux et inquiétant pour les galères. En produisant toujours le même effort, presque à la limite des capacités du vogue-avant, soit environ 180 watts, et avec un vent contraire passant de 3 à 5 m/s, la vitesse moyenne de la galère tombe à 4 noeuds, 3.5 noeuds puis 2 noeuds. Si ce maudit vent contraire forçait encore, atteignant les 6 m/s, le bâtiment n'avance presque plus tandis que les galériens baissent les bras sans que les coups de corde changent quoi que ce soit... Dès lors, il ne reste plus qu'à donner l'ordre de revirer. Retenons la leçon essentielle : avec un vent pleinement contraire supérieur à 5 m/s, ce qui ne représentait pas vraiment une bourrasque à écorner les chèvres, une galère ne pouvait plus marcher à la rame (Voir graphique 7).

L'état de la carène constituait également un élément non négligeable. A une vitesse de 5 noeuds, si la hauteur de rugosité passait de 0.2 mm (coque assez lisse et propre) à 0.5 mm (coque sale) la puissance totale fournie par les rameurs s'accroissait de 15 %. On comprend pourquoi les gens de galère insistaient tous sur la nécessité de renouveler l'espalmage au moins une fois par mois durant la campagne. « Quant une galère est espalmée à plein, écrivait Nicolas Arnoul, elle va bien plus gayement, et soulage la chiourme comme un carosse gressé » (46).



GRAPHIQUE 7

Puissance fournie par rameur pendant un coup d'aviron
en fonction de la vitesse du vent (coque lisse et vogue ordinaire)

En examinant l'incidence des différentes hypothèses de vogue, nous avons surtout envisagé la variation de la puissance globale fournie par le vogue-avant pendant un coup de rame. Il n'est pas superflu de regarder également les résultats intermédiaires. On retrouvera ici le « cas » qui nous a déjà servi à expliquer le déroulement des algorithmes. Avec une cadence de 21 coups d'aviron par minute et une vitesse moyenne de 5 noeuds (2.572 m/s), il fallait un travail de 109 joules par vogue-avant pour vaincre la résistance hydrodynamique de la carène. Or le travail total qui

est dépensé pour propulser la galère à la rame se montait à 522 joules... L'écart, ou plutôt le fossé entre ces deux valeurs provient des travaux ajoutés : essentiellement la lutte contre la pesanteur et l'inertie, soit de l'aviron, soit du corps du rameur. Le seul mouvement assis-debout du galérien exigeait 223 joules, soit deux fois plus que le travail strictement nécessaire à l'avancement du navire ! 80 % de l'énergie dépensée par le vogue-avant ne servait pas à maintenir la galère en vitesse, mais était consommée par les travaux ajoutés, ce qui induit un rendement particulièrement médiocre. Lorsqu'elles étaient exclusivement mues à la rame, les galères de combat de la fin du XVII^e siècle se révèlent comme des bâtiments lents, poussifs, formidablement archaïques, qui ne pouvaient jamais dépasser plus de 4 à 5 noeuds en vitesse de croisière. Ce système homme-machine, très fragile, ne fonctionnait que dans un environnement pleinement favorable : mer belle, peu ou prou de vent contraire. Enfin, les capacités physiologiques des rameurs, déjà amoindries par l'exiguïté et la précarité du poste de travail, dictaient la médiocre autonomie du navire.

Faut-il alors s'étonner si seulement 1 à 2 % des forçats de Louis XIV, à l'époque de la pleine activité de la flotte, vers les années 1680-1700, moururent en campagne ? Celles-ci dépassaient rarement une soixantaine de jours, et, sauf exception, chaque galère n'effectuait qu'une seule campagne par an, plus ou moins éprouvante selon la destination. Le temps de la navigation des galères est donc un temps très court, comparé à celui des vaisseaux du Ponant qui accomplissaient ordinairement des expéditions de 200 à 300 jours. Les chiourmes n'étaient pas frappées par le scorbut, cette peste des marins, qui décimait les équipages lors des grandes traversées. Tandis que les navires de haut-bord croisent sur l'océan durant plusieurs mois d'affilée, sans toucher terre, les galères ne demeurent jamais en mer plus de deux à trois jours. Il ne faut pas oublier que ces bâtiments à rame étaient aussi dotés d'un gréement latin de vaste dimension : leurs journaux de bord en témoignent, 20 % des trajets s'effectuaient exclusivement à force de rame, très souvent en voguant à quartier, 20 % à la voile seule et 60 % à la voile et à la rame (47). La destinée de la plupart des forçats s'est donc nouée au port de Marseille. L'entrée dans la société des galères représentait un énorme choc pour les condamnés les plus faibles, les plus démunis, les plus « innocents ». Epuisés par le voyage de la « chaîne », battus et dépouillés par leurs argousins et aussi par leurs compagnons de banc, ils ne supportent pas longtemps cette misère et cette oppression. Disparaissent ainsi, avec une effarante rapidité ceux que les capitaines désignent avec mépris comme le « rebut ». La plupart ne seront jamais incorporés dans une chiourme d'active et ne connaîtront pas les épreuves de la vie en mer. La peine des galères, que ces galères naviguent ou non, c'était beaucoup plus la violence, la corruption et les privations qui régnaient à bord de ces geôles flottantes, que le travail de la rame.

L'ergonome, René BURLET

Le physicien, Jean CARRIERE

L'historien, André ZYSBERG

I.H.M.C.

NOTES

1. Voir André ZYSBERG, *Les galères de France et la société des galériens (1660-1748)*, thèse d'Etat, E.H.E.S.S., 1986, 2 vol., 808 pages.

2. Les données sur les galériens sont actuellement conservées au CIRCE (le centre informatique CNRS de la région parisienne) et stockées sur une bande magnétique au « label » IBM. La version qui a servi à l'exploitation statistique comprend deux fichiers : DATGAL1, avec 38.036 enregistrements, correspond aux matricules des années 1680-1715 ; DATGAL2, avec 22.365 enregistrements, correspond aux matricules des années 1716-1748. La longueur de l'enregistrement est de 80 caractères, son format « fixe bloqué ». Les informations sont codées sous une forme numérique :

Positions	Désignation du champ
1-2	Age d'entrée aux galères
3-6	Juridiction qui a prononcé la sentence en dernier ressort
7-9	Motif de la condamnation
10-11	Mois de condamnation
12-15	Année de condamnation
16-18	Durée théorique de la peine
19-21	Destinée ou type de sortie des galères
22-23	Mois de sortie
24-27	Année de sortie
28	Niveau CSP
29-30	Mois d'arrivée aux galères
31-34	Année d'arrivée aux galères
35-38	Intervalle entre la date de condamnation et la date d'arrivée aux galères (calculé)
39-42	Temps passé aux galères (calculé)
43-47	Numéro d'individu
48	Numéro de fichier
49-53	Référence de l'enregistrement sur une version

antérieure au fichier.

seul DATGAL2 comprend les champs suivants :

54-56	Lieu de naissance (diocèse)
57	Militaire ou non
58-60	Métier
61-64	Ressort géographique de la juridiction qui a prononcé la sentence
65	Célibataire, marié ou veuf.

Le lieu de naissance, le métier ainsi que le ressort de la juridiction furent d'abord saisis en « clair », tels qu'ils se présentaient sur le registre. Le codage s'est effectué par programme, à l'aide de l'édition du vocabulaire de chaque champ. Si l'on estime que le codage n'est pas bon, avec cette méthode, il est possible de le recommencer autant de fois que l'on veut. Ces fichiers ont été conçus pour une analyse quantitative, et elle seule. S'ils comprennent tous les forçats qui furent inscrits sur les matricules de la chiourme entre 1680 et 1748, toutes les informations du document d'origine n'y figurent pas. N'ont pas été collectés, pour l'essentiel, les noms et prénoms des condamnés, ceux de leurs parents, ainsi que leur signalement anthropologique.

3. Il n'y avait en fait que 51 avirons, car l'un des bancs de la rangée de gauche était occupé par le « fougou », le fourneau de la galère. Nous en tiendrons compte lors de la mesure du travail des galériens.

4. Sur l'évolution des galères de combat et du recrutement de leurs équipages, entre la fin du moyen âge et le début de l'époque moderne, voir : M. AYMARD, « Chiourmes et galères dans la Méditerranée du XVI^e siècle », dans *Mélanges en l'honneur de Fernand Braudel*, Paris, 1973, pp. 49-64 ; J.-C. HOCQUET, « Gens de mer à Venise... », dans *Le genti del mare Mediterraneo*, XVII^e colloque international d'histoire maritime, Naples, 1981, pp. 103-168 ; A. LUTRELL, « Late-medieval oarsmen », dans *Le genti del mare*

Mediterraneo, op. cit., pp. 87-101 ; E. FASANO-GUARANI, « Au XVI^e siècle : comment naviguent les galères », *Annales E.S.C.*, 1961, pp. 279-296.

5. Bibliothèque municipale de Marseille, Ms 967, f. 445-446.

6. Publié dans « Lou jardin deys musos prouvençalos », Aix-en-Provence, 1666, pp. 47-57, et traduit en français grâce à l'obligeance de Laurent DAMONTE.

7. Archives Nationales, B⁶ 16, f. 16, 30 janvier 1684.

8. Jean-François BION, *Relation des tourments qu'on fait souffrir aux protestants qui sont sur les galères de France*, ed. P.M. Conlon, Genève, 1966, pp. 83-84 (éd. originale, Londres, 1708).

9. Fournies par un munitionnaire, les rations étaient distribuées à bord par un commis des vivres, employé du munitionnaire, qui arrondissait sa pelote aux dépens de l'équipage libre et de la chiourme. Certaines techniques de prélèvement sont connues. « Tout le pain se pèse dans les galères avec une romaine, écrit le sieur de Goimpy, mais soit par la méchante intention de celui qui pèse ou la conjoncture de la navigation, il y a toujours du profit pour celui qui fait la distribution aux dépens de celui qui reçoit ; et c'est pour cela qu'on ne devrait point se servir de romaines, mais seulement de balances à coupes ». (Archives nationales, B⁴ 9, f. 293, 1682). Il arrivait aussi que lors d'une escale, le commis vende les vivres de bonne qualité pour leur substituer des produits avariés ou plus médiocres.

10. Bibliothèque de la Société de l'histoire du protestantisme français, Collection Court, N 11, t. 1, f. 741, 6 novembre 1692.

11. Bibliothèque municipale de Marseille, Ms 967, f. 220-221.

12. Idem, f. 444.

13. Idem, f. 220-221.

14. Jean-François BION, op. cité, p. 81.

15. Bibliothèque nationale, MF 9177, f. 187, sd.

16. Jean MARTEILHE, *Mémoires d'un protestant condamné aux galères de France pour cause de religion*, La Haye, 1778. Marteilhe a servi dans l'escadre de 6 galères (construites à Rochefort en 1690) du Ponant qui étaient basées à Dunkerque lors de la guerre de Succession d'Espagne.

17. « Mémoires du sieur Masse fils, comite réal, pour bien manoeuvrer une galère à la mer et la tenir dans sa véritable estive par de bons et justes arrimages », Bibliothèque Municipale de Marseille, Ms 967, f. 424-496.

18. BARRAS de la PENNE, « La science des galères », Bibliothèque nationale, MF 9176-9179, sd. ; de FONTETTE, « Traité des manoeuvres des galères et comment remédier aux accidents qui arrivent dans un mauvais temps ou dans un combat », Bibliothèque municipale de Marseille, Ms 967, f. 343-420, sd.

19. Service historique de la Marine, SH 134, f. 155, sd.

20. Idem.

21. D'un traité à l'autre, les indications sur les dimensions du poste de vogue diffèrent légèrement. Nous avons suivi les mesures données par l'auteur anonyme d'un traité de construction des galères qui est conservé au Service historique de la Marine (SH 134).

22. Bibliothèque municipale de Marseille, Ms 967, f. 313.

23. Remarque de E. JURIEN de la GRAVIÈRE, *Les derniers jours de la marine à rame*, Paris, 1885, p. 190.

24. Bibliothèque municipale de Marseille, Ms 967, f. 324.

25. Idem, f. 231.

26. Nicolas Arnoul, intendant général des galères, licencia ainsi un nommé Truc, rémolat réal : « Je l'ay osté, écrit-il à Colbert, après l'avoir adverty bien des fois de prendre garde à luy. Il se laisse prendre de vin, outre que je le soubçonnais de laisser prendre du bois ; et ce qui me l'a fait changer (...) c'est qu'il ne s'attachait pas à sa charge. Il a fait cette année les rames de la galère Valeur trop courtes, ce qui m'obligea de la renvoyer au port, tuant la chiourme » (Archives nationales, B⁶ 78, f. 259).

27. Bibliothèque nationale, MF 9177, f. 187.

28. Il faut ajouter que les courbes décrites par les poignets de ces 4 rameurs sont toutes décalées horizontalement de 17 cm. C'est la distance qui sépare l'axe des manilles de l'axe du maintien, le bout de la rame tenu par le vogue-avant (voir planche 1). Ce décalage justifiait sans doute le nom de vogue-avant qui était donné au chef du banc, car celui-ci

ou, sous forme de coefficients sans dimensions

$$CT = \frac{RT}{1/2 \times RO \times SM \times VB^2}$$

$$CT = CW(F) + CV \left(NU, \frac{L}{h} \right) + CA$$

avec

- L : longueur à la flottaison
- h : hauteur de rugosité moyenne
- NU : viscosité cinématique de l'eau
- $F \frac{VB}{\sqrt{gl}}$: nombre de FROUDE
- VB : vitesse du bateau
- g : accélération de la pesanteur
- SM : surface mouillée
- RO : masse volumique de l'eau de mer

La résistance aérodynamique ne représente pas plus de 2 à 3 % de la résistance globale même pour un bâtiment de commerce à château.

- Parts respectives de RW et RV dans RH. Le cours de S. Bindel, op. cité, p. 37 donne l'ordre de grandeur de la résistance hydrodynamique spécifique

$\frac{RH}{\Delta}$ (où Δ est le déplacement en tonnes du bateau), en fonction du nombre de Froude, pour les navires classiques.

Pour connaître les parts respectives de RW et RV dans RH, on procède habituellement comme suit :

- a) on mesure RH sur maquette, en bassin de carène,
- b) on calcule RV (assimilation à plaque plane et utilisation d'un facteur de forme) d'où $RW = (RH)_{\text{mesuré}} - (RV)_{\text{calculé}}$

La mesure sur maquette en bassin ne nous étant pas accessible on estimera le rapport

$$\frac{RW}{RH}$$

dans les cas de navigation de la galère, par référence aux résultats expérimentaux obtenus sur des navires classiques. Le tableau de S. Bindel (op. cité, p. 37) donnant $\frac{RW}{RH}$

en fonction du nombre de FROUDE montre que pour les navires classiques :

- la résistance de vagues est négligeable pour $F = 0,1$
- elle devient prépondérante par rapport à RV pour des valeurs élevées de F, donc de VB.

On peut en tirer le tableau de valeurs suivantes :

VB nœuds	F Froude	RW RH	KW
2	0.050	0	1
3	0.076	0	1
4	0.101	0	1
5	0.126	< 0.01 \cong 0	1
5.5	0.139	0.030	1.031
6	0.151	0.076	1.082
7	0.176	0.120	1.136

Ce tableau donne aussi le facteur KW par lequel il faut multiplier RV (ou CV) pour obtenir RH (ou CH)

$$RH = KW \times RV \quad CH = KW \times CV$$

38. Coefficient C_x de la pale. La pale est assimilée à une plaque plane de largeur constante C (corde) et de longueur immergée L_i variable, se déplaçant perpendiculairement à l'eau. Dans ces conditions le C_{xp} de la pale (cf.ref. infra) est défini par la loi suivante :

Si λ est l'allongement de la partie immergée de la pale

$C_{xpale} = 1$ pour L_i faible

$$C_{xpale} = 2 \text{ pour } \lambda = \frac{2 L_i}{C} \geq 20$$

C_{xpale} linéaire de 1 à 2 pour $0 < \lambda < 20$.

Voir *Résistance à l'avancement dans les fluides*, par S.F. HORNER, Editions Gauthier-Villars, 1965.

39. Un bateau comme la galère, propulsé par des rames, ne navigue pas à vitesse constante : la vitesse est constamment modulée et oscille autour d'une valeur moyenne. Quand les rames sortent de l'eau la vitesse est maximale (V_{max}). Pendant la montée, il y a décélération due à l'addition des résistances hydrodynamique et aérodynamique ; la vitesse diminue et passe par une valeur minimale (V_{min}) au moment où l'action positive des rames dans l'eau commence à se faire sentir (très peu après le début de l'engagement). Pendant l'engagement, le travail des rameurs fait accélérer la vitesse de V_{min} à V_{max} .

On démontre, soit mathématiquement soit en utilisant un programme de décélération sur ordinateur, que la loi de décélération est pratiquement linéaire. On peut également démontrer, en faisant des hypothèses simplificatrices que pendant une période, le travail nécessaire pour faire passer le bateau de V_{min} à V_{max} pendant la phase accélérée est pratiquement égal à celui nécessaire pour faire avancer la galère à vitesse moyenne

$$\text{constante } VB = \frac{1}{2} (V_{min} + V_{max}).$$

Cette remarque montre que les algorithmes et le programme de calcul exposés ultérieurement ne s'appliquent qu'à une navigation à vitesse moyenne constante VB .

Soit $\Delta V = V_{max} - V_{min} \cdot VB = 5$ nœuds, la perte de vitesse pendant la montée est $\frac{\Delta V}{VB} = 0. \%$. La vitesse modulée ne varie que de $\pm 0.45 \%$ autour de cette

valeur moyenne. Ce très faible écart est dû à la masse importante de la galère : 214 tonnes. C'est pour cette raison que nous n'avons pas pris en compte la vitesse réelle ou modulée, mais la vitesse moyenne VB .

40. Centre de poussée de la partie immergée de la pale. On écrira que la distance du centre de poussée de la partie immergée de la pale à l'axe d'articulation est le rapport entre le moment d'inertie de surface de cette partie immergée par rapport à cet axe et la valeur de la surface immergée.

$$SI = LPI \times C = \text{Surface immergée} = C \times [LR - (LR - LPI)]$$

$Lu =$ distance de l'élément de surface ($ds = c \times dL$) à l'axe

$$SI \times \overline{LCP^2} = \int_{LR-LPI}^{LR} C \times Lu^2 \times dL = \left[\frac{C \times Lu^3}{3} \right]_{LR-LPI}^{LR}$$

$$\overline{LCP^2} = \frac{[LR^3 - (LR - LPI)^3] \times C}{3 SI} = \frac{C}{3 C} = \frac{[LR^3 - (LR - LPI)^3]}{LR - (LR - LPI)}$$

$$\overline{LCP^2} = \frac{1}{3} LR^2 + (LR - LPI) LR + (LR - LPI)^2$$

$$LCP = \sqrt{\frac{1}{3} [LR^2 + LR(LR - LPI) + (LR - LPI)^2]}.$$

41. Le moment d'inertie d'une masse élémentaire dm distante de l d'un axe, lié à cet axe et tournant autour de lui, est $I = dm \times l^2$. Pour calculer le moment d'inertie d'un solide de forme allongée autour d'un axe, on le décompose en masses élémentaires dm_i distantes de l_i de l'axe. On calcule les moments d'inertie élémentaires dI_i :

$$dI_i = dm_i \times l_i^2 .$$

Le calcul peut se faire en décomposant le solide en formes géométriques simples (trons de cônes, cylindres permettant des calculs algébriques. En effectuant ces calculs on doit retrouver la masse totale m :

$$m = \sum_{i=1}^n dm_i .$$

Si nous prenons pour la rame de galère une masse volumique = 750 kg/m^3 , on a trouvé par une méthode algébrique :

$$I = 1\,095,5 \text{ m}^2 \times \text{kg}$$

$$m = 133,2 \text{ kg}$$

Le moment d'inertie $IR = 1\,095 \text{ m}^2 \times \text{kg}$ retenu est une estimation à laquelle on affectera des erreurs de q 5 à q 10 % dans les calculs de variations.

42. La masse ajoutée est la masse d'eau qui accompagne la partie immergée de la rame et qui est accélérée en même temps que celle-ci. Sa valeur a été calculée d'après l'ouvrage suivant : « Notions d'hydrodynamique instationnaire par J.C. DERN - Bassin d'Essai des carènes de la STCAN - Cours de perfectionnement à l'ENSTA, Janvier 1977 ».

On a pris pour masse ajoutée la masse d'eau comprise dans un cylindre de révolution, de longueur égale à la longueur immergée de la pale, et de diamètre égal à la corde de la pale.

43. Remarques sur les problèmes de sortie d'eau. Si l'on se réfère au cas de base (cf. Tableau V), quand la vitesse angulaire VAM de la rame passe par son maximum (tranche 16), la rame a accumulé une énergie cinétique de 145,7 joules (somme des 15 premières tranches de TIR). La vitesse angulaire redevient nulle quand la rame sort de l'eau. Cette énergie cinétique doit être restituée d'une façon ou d'une autre.

En examinant les résultats du tableau V on voit qu'une partie du travail contre l'inertie de la rame, soit 43,5 joules, est convertie en travail utile, alors que le reste, 104 joules (plus des 2/3) devra être absorbée par le freinage de la rame en fin d'engagement, dont 69 joules pour les 2 dernières tranches, soit 9,3 cm de déplacement horizontal du poignet du VA. Ce déplacement est trop faible pour le travail qui reste à dépenser et imposerait des efforts trop grands aux rameurs qui doivent également amortir une partie de leur énergie cinétique de déplacement.

44. Remarques sur le travail fourni par les rameurs en montée (travail contre la pesanteur). Dans le cas d'une navigation à rameurs toujours debouts (gondoliers, godilleurs, ou pour certaines chaloupes) ou à rameurs toujours assis (chaloupes, barques, embarcations de sport nautique) le travail contre la pesanteur concernant le corps du rameur est nul. Pour les galériens, ce travail inhérent à leur façon de ramer va pénaliser le bilan énergétique.

45. SCHERRER, J., et coll., *Précis de physiologie du travail*, Paris, 1981.

46. Archives nationales, B⁶ 78, f. 59, 1666. L'opération de l'espalmage consiste à enduire la carène d'une couche de suif chaud.

47. Ces pourcentages sont des approximations. Ils ont été calculés d'après les journaux de bord du premier tiers du XVIII^e siècle, ceux tenus par Harancourt, officier des galères de France entre 1713 et 1743 (Bibliothèque nationale, MF 14283).