

Zeitschrift: Jahrbuch der Schweizerischen Gesellschaft für Ur- und Frühgeschichte
= Annuaire de la Société Suisse de Préhistoire et d'Archéologie =
Annuario della Società Svizzera di Preistoria e d'Archeologia

Herausgeber: Schweizerische Gesellschaft für Ur- und Frühgeschichte

Band: 63 (1980)

Artikel: Bevaix NE 1917 : un monoxyle celte et ses courbes hydrostatiques

Autor: Arnold, Béat

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-116252>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 16.04.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Béat Arnold

Bevaix NE 1917: un monoxyle celte et ses courbes hydrostatiques

La baie de Bevaix NE (lac de Neuchâtel) a déjà livré de nombreuses embarcations jalonnant l'histoire de la navigation helvétique et européenne. Outre les 2 pirogues monoxyles levées en 1878 et 1879 et exposées actuellement au Musée cantonal d'archéologie de Neuchâtel, on peut signaler la découverte d'une barque gallo-romaine du 1er ou 2ème siècle de notre ère, longue de 19,40 m, et d'une rame-gouvernail de la même période (Arnold 1974, 1975, 1978; Eglhoff 1974).

A ces éléments s'ajoute un troisième monoxyle signalé en 1917 déjà et redécouvert pendant les fouilles de la barque, quelque 40 m à l'est de celle-ci (fig. 1).

C'est en 1977 que fut entrepris le relevé de cette pirogue dans le cadre d'une étude consacrée aux esquifs suisses de ce type¹. Ce monoxyle, que nous appellerons *Bevaix NE 1917*, a déjà fait l'objet de commentaires pour le moins flatteurs.

«C'est près du rivage de la Pointe du Grain que les pêcheurs ont sorti il y a quelques années la grande rame du Musée de Neuchâtel ... Près de là se voit encore maintenant, au fond de l'eau une fort belle pirogue, dont la proue est artistiquement travaillée» (ASSP 9, 1917, p. 105).

«80 m à l'Est du Bout du Grain se trouve un beau canot long d'environ 10 m, à la pointe cambrée et avec un renforcement permettant de fixer une corde à la proue» (ASSP 12, 1919-1920, p. 55).

La pirogue et son environnement

Avec une gîte de 81°, la pirogue repose entièrement sur son flanc babord (fig. 2). Le côté tribord, quant à lui, a été totalement érodé. Néanmoins, aux 2 extrémités, on distingue encore l'amorce de ce flanc, permettant une reconstitution aisée de ce dernier.

Contre le fond et le flanc conservé, on peut relever la présence d'une importante couche de galets s'étendant sur toute la longueur du bateau. En tout, 161 kg de cailloux ont pu être prélevés.

Entre la cargaison de galets et le sédiment encaissant, tout comme entre ce dernier et la face exté-

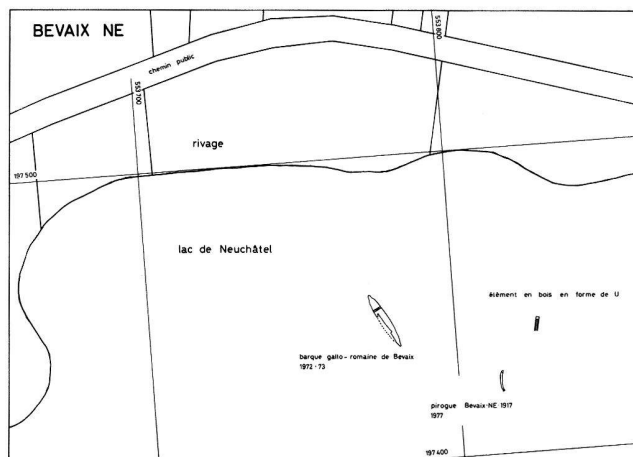


Fig. 1. Côté nord de la baie de Bevaix, lac de Neuchâtel (env. 1/2500).

rieure du fond, on trouve un dépôt sableux, contenant une multitude de feuilles à un stade de décomposition déjà assez avancé. Le débitage couche par couche de cet ensemble a révélé la présence de nombreuses feuilles de hêtre (*Fagus silvatica*), et quelques limbes de saule (*Salix* sp.), de chêne (*Quercus* sp.) et d'érable (*Acer campestre*).

La présence de ce dépôt nous permet d'affirmer que la pirogue s'est enfouie dans le fond du lac, à la fin de l'automne ou au début de l'hiver, en s'y creusant un trou sous l'action des vagues (fig. 3). Lorsque la profondeur fut suffisante et pendant une période de calme (2 à 3 jours suffisent amplement), le sédiment feuilleté s'est déposé entre la pirogue et la couche encaissante.

La présence de ce volumineux artefact a quelque peu changé la mécanique des fluides dans son voisinage. Ainsi, entre la face intérieure du fond tournée vers l'est et la face extérieure, on observe une dénivellation de 10 cm. L'origine de ce phénomène est à rechercher dans l'action des courants (et non pas des vagues) engendrés par la bise. Ces courants, qui contournent la Pointe du Grain en suivant plus ou moins la berge, viennent heurter le fond du monoxyle. A l'abri de ce rempart, une butte de craie a donc mieux résisté à l'érosion lacustre (fig. 4). L'importance de cette dernière est de l'ordre de 30 cm en cet endroit et doit être mise en parallèle avec

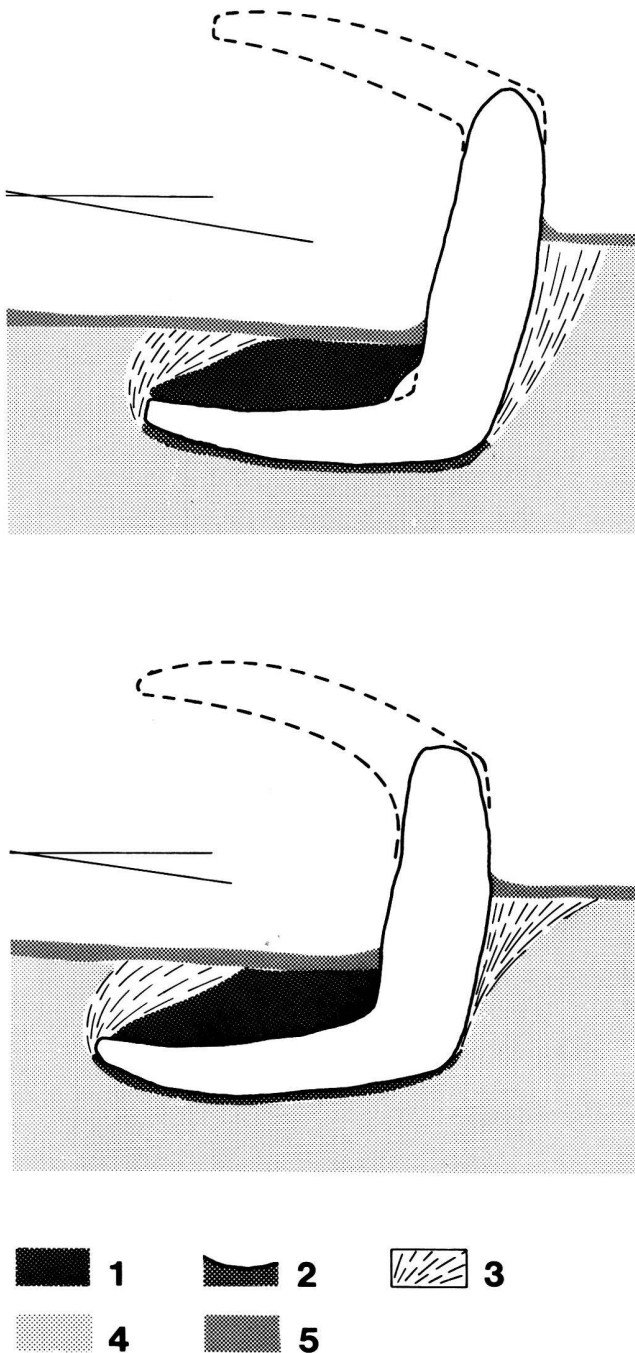


Fig. 2. Coupes transversales de la pirogue *in situ* (1/10). 1: cargaison de galets; 2: couche de gravillons située sous le monoxyle; 3: couches feuilletées; 4: sédiment encaissant (craie sableuse); 5: sable de surface, mobile au gré des vagues et des courants.

l'abaissement moyen de 2,7 m du niveau du lac de Neuchâtel il y a un siècle.

Dès le début de cette fouille il avait été décidé de laisser la pirogue *in situ*. En effet, d'une part une bonne conservation d'un objet aussi volumineux, outre les aléas qu'elle comporte, est assez onéreuse; d'autre part, il y a actuellement bien assez de pirogues monoxyles levées durant de récentes fouilles de sauvetage qui nécessitent un traitement impératif².

De la proue à la poupe

Découverte en 1917, la pirogue *Bevaix NE 1917* fut fouillée sous l'eau en 1977. Elle mesure 7,1 m de long (L) pour une largeur (l) de 0,56–0,58 m et une hauteur (h) de 0,50 m, au maître-bau. Rapport L/l: $12,5 \pm 0,3/1$; l/h: 1,1/1. La section est donc presque carrée. La proue s'élève, quant à elle, de 0,85 m au-dessus du fond et la poupe de 0,75 m. Le fond, épais de 0,12–0,13 m, et les flancs sont particulièrement massifs pour un bateau de cette taille (fig. 6).

Il est en général extrêmement difficile d'orienter un monoxyle, même bien conservé, en fonction de sa proue et de sa poupe. Les données ethnographiques du 19^e siècle que nous possédons pour de telles embarcations provenant de Suisse, de Bavière et du Salzkammergut nous montrent que la poupe se situe du côté de la souche de l'arbre et la proue vers la cime ou le houppier. Cette orientation semble se confirmer pour *Bevaix NE 1917*, si l'on considère les aménagements intérieurs comme les supports du banc.

La proue est taillée avec recherche et donne à l'esquif sa forme élancée. Cette extrémité, taillée dans le départ d'une branche maîtresse, s'achève par une surface rectangulaire plane de 0,17 m sur 0,07. Contre le flanc, une entaille ou mortaise, profonde de 0,01 m, permet l'insertion d'une petite poutre ou barrot large de 0,09 m. Sous cette structure, actuellement disparue, le fond présente un escalier créé lors de l'évidage. Au pied de cet escalier, l'épaisseur du fond se réduit à 0,09 m et la base du flanc tribord est arrachée, facilitant en cet endroit le prélèvement d'un échantillon pour l'analyse dendrochronologique. Pour cette dernière, pas moins de 6 prélèvements ont dû être effectués (fig. 12).

On a ainsi pu préciser que ce monoxyle a été taillé dans un chêne (*Quercus* sp.) âgé de plus de 360 ans. L'aubier est encore présent, tant sur la poupe que sur la proue, et l'on a même pu observer sur ce dernier la présence, en 2 endroits, de petites parcelles d'écorce. On a ainsi pu préciser que l'arbre utilisé avait été abattu en 39 avant J.-C. (Hollstein 1979; Egger et Orceel 1980).

La poupe, en forme de pyramide tronquée, a déjà retenu l'attention de nombreux auteurs avec sa rainure taillée sur 3 faces du monoxyle. Située à 0,3 m de l'extrémité, la profondeur de cette entaille peut être estimée à quelque 0,02 m.

Une importante mortaise, longue de 0,25 m et profonde de 0,03 m, a été aménagée entre 0,8 m et 1,05 m de la fin du bateau. Elle permet l'insertion d'un banc. Un aménagement similaire s'observe sur les pirogues du lac d'Aegeri ZG, encore en usage



Fig. 3. Sous l'action des courants engendrés par la bise, une grande quantité de feuilles s'est accumulée contre la pirogue (19.1.1973).

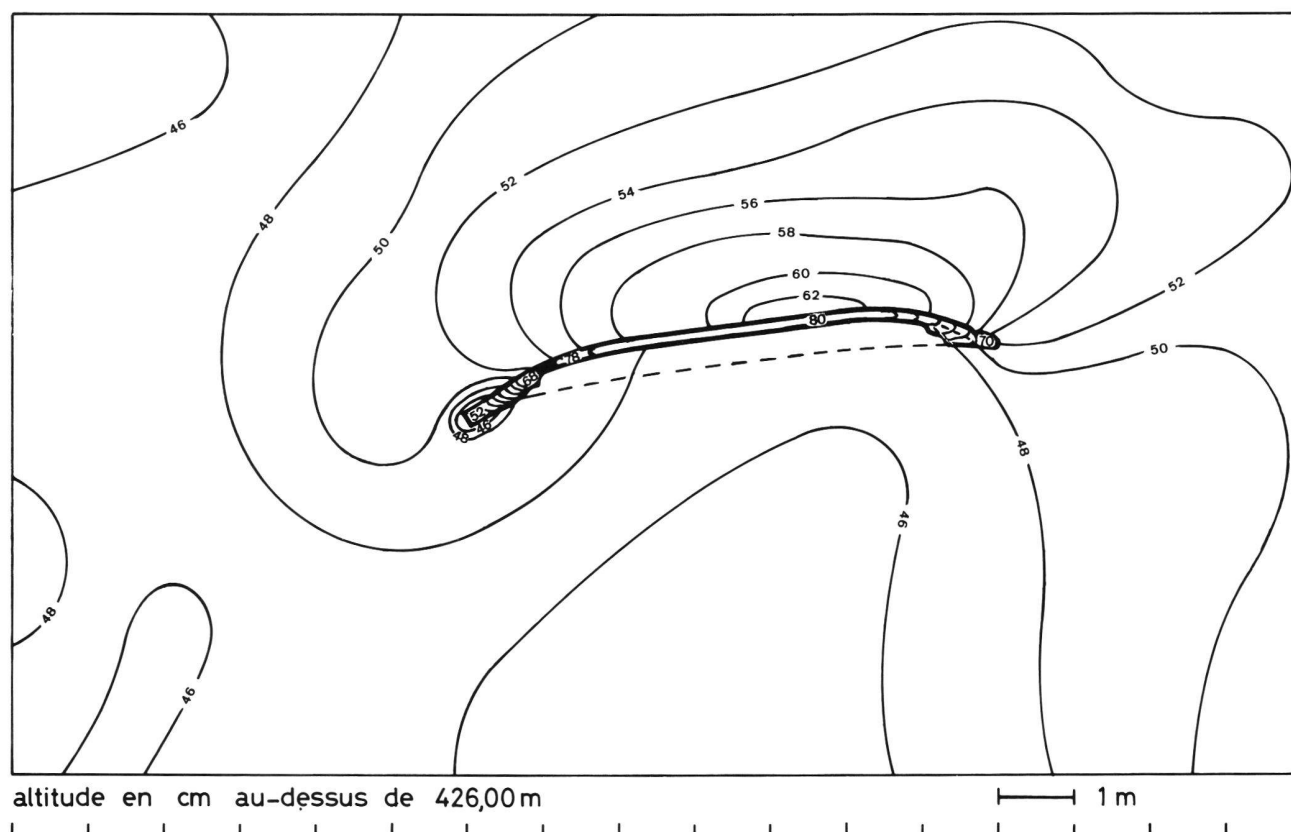


Fig. 4. En abaissant il y a un siècle la hauteur moyenne du lac de Neuchâtel, on a soumis à l'érosion des zones précédemment protégées. En cet endroit, le niveau du sol a déjà été rabaissé d'au moins 35 cm.

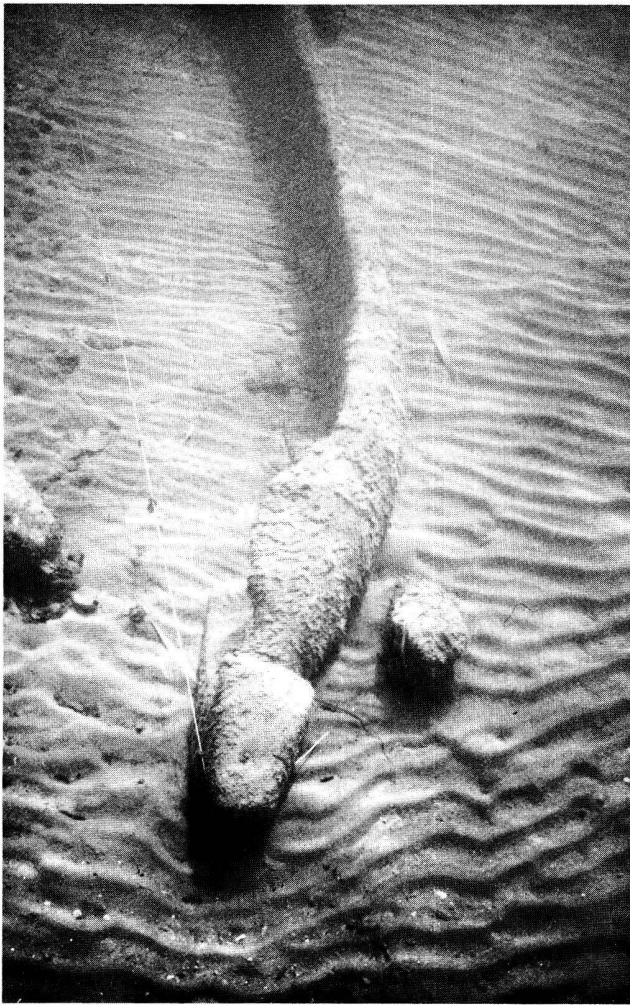


Fig. 5. Poupe de la pirogue *Bevaix NE 1917* (7.11.1977).

aujourd'hui pour la pêche. Dans ce dernier type d'embarcation, le banc n'est pas utilisé pendant la nage; le pêcheur, debout, pousse sa rame devant lui.

Si le fond est déjà profondément marqué par l'érosion et les algues, le flanc babord montre encore de nombreuses traces de travail sous la couche de galets. Le relevé de ces éléments s'est effectué sous l'eau de la manière la plus simple. On déroule à même le bois une grande feuille de plastique transparente et souple que l'on maintient à l'aide de quelques galets. Les traces laissées par les outils sont dessinées grandeur nature à l'aide de craies grasses. On prendra soin de tendre un axe ou un fil le long de la surface à relever. Ce fil sera reporté sur le dessin, ainsi qu'une marque de mètre en mètre. Ces informations permettront de reporter plus facilement les diverses traces lors de la mise au net du dessin (cf. coupe longitudinale fig. 6).

Dans la moitié arrière de *Bevaix NE 1917*, on relève le long du bouchain, c'est-à-dire au passage du

fond aux flancs, un ensemble de profondes entailles réalisées lors de l'évidage. Toute cette série fut composée de coups donnés d'arrière en avant à l'aide d'un outil en fer, vu la largeur du tranchant.

Au milieu du bateau, on peut noter la présence d'un renfort transversal, réservé dans la masse du monoxyle, composé de 2 éléments en forme de L se faisant face, et non pas comme de coutume d'un seul et unique élément en forme de U.

Un aménagement similaire, mais disposé dans le premier tiers, a été observé sur la pirogue française de *Saint-Jean-des-Près*, près d'Abbeville (Somme; Pannier 1860; Cordier 1963, p. 306, no 1). Il fut interprété comme une hypothétique emplanture de mât, ce qui nous semble assez improbable.

Dans la partie avant, les traces de travail sont moins profondes, à l'exception d'un groupe de 3 rainures, peu profondes mais bien marquées sur le flanc et à peine visibles sur le fond. Ces éléments écartés d'environ 0,3 m les uns des autres (longueur équivalant à la distance séparant la première rainure du milieu du renfort) pourraient peut-être expliquer le mode d'évidage de ce monoxyle. Des saignées perpendiculaires (et parallèles) à l'axe longitudinal peuvent, par exemple, être effectuées à l'aide d'un pic. Les blocs de bois ainsi isolés sont ensuite séparés du fond à l'aide de coins. Cette technique a encore été utilisée récemment en Autriche pour éviter les ébauches de monoxyles du *Mondsee* (Haute-Autriche), appelées *Prügel* (Angerer 1927, fig. 7).

Il n'est pas inintéressant de signaler ici le cas du sarcophage de *Châtenay-Mâcheron* (Haute-Marne), qui présente des rainures similaires, un peu plus grandes, et date de la même période. Il est actuellement exposé au Musée des Antiquités nationales de Saint-Germain-en-Laye.

Ce sarcophage, daté par un poignard anthropomorphe de La Tène III, présente, sur le fond, des rainures transversales qui ne sont pas sans analogie avec celles de *Bevaix NE 1917* (Drioux 1921; Cordier 1963, p. 308, no. 13).

Ce sarcophage est constitué par une base monoxyle surmontée d'un couvercle, monoxyle lui aussi. De ce dernier il ne subsiste actuellement plus qu'un petit fragment, néanmoins suffisant pour permettre à une future étude dendrochronologique de préciser si le couvercle et le fond proviennent d'un seul et même tronc de chêne fendu par sa moitié. Les 2 extrémités et la cloison transversale du fond, tout comme la partie préservée du couvercle, montrent clairement que chacun de ces éléments monoxyles provient d'un demi tronc. D'autre part, la coupe transversale du sarcophage montre que ces 2 parties

Bevaix NE 1917

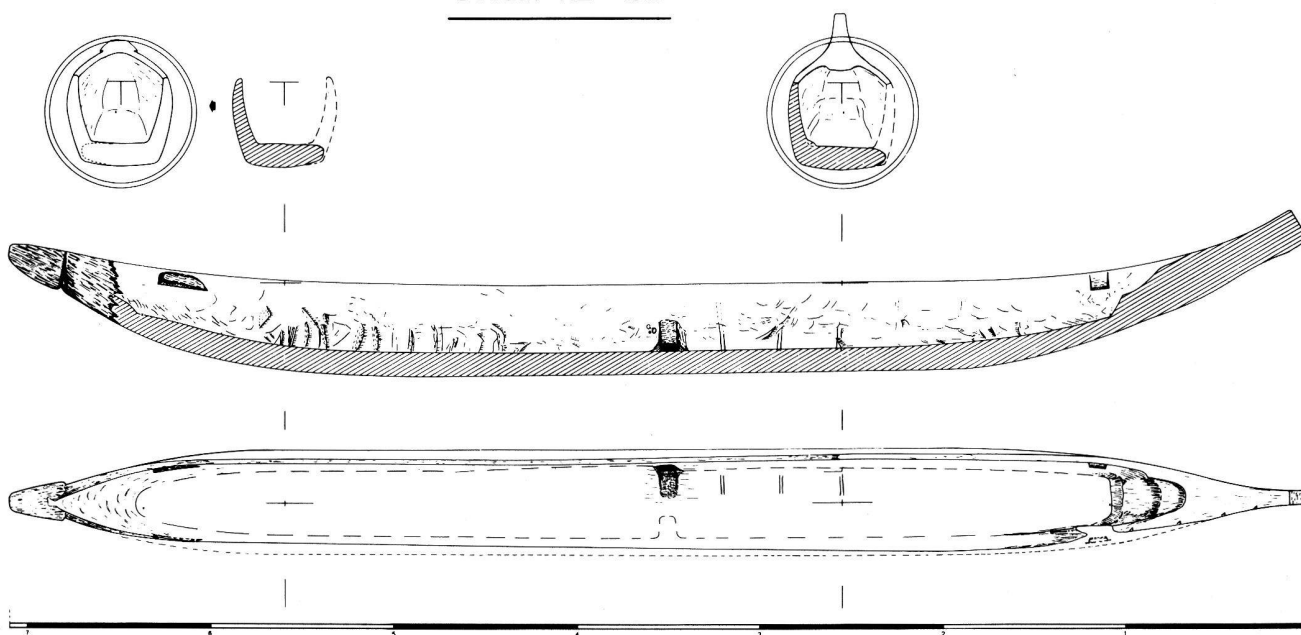


Fig. 6. La pirogue monoxyle en chêne *Bevaix NE 1917* a été fouillée en 1977. Elle mesure 7,1 m de long, 0,56–0,58 m de large et 0,50 de haut dans la partie médiane (1/40).

ont été taillées de manière à ce que la cloison du couvercle se trouve exactement à la hauteur de celle du fond. Tous les éléments actuellement utilisables tendraient plutôt à montrer qu'il s'agit là de 2 éléments fabriqués en même temps, destinés à devenir un sarcophage et non pas d'une hypothétique pirogue, ou élément d'un ferry-boat que l'on aurait secondairement coiffé d'un couvercle (Ellmers 1971, p. 104–105; à la figure publiée par Bonnard 1913, fig. 3, et reprise par Ellmers, nous préférons de beaucoup celle de Drioux 1921, fig. p. 207, exception faite de la coupe transversale). Par contre, il n'est pas impossible qu'on ait sciemment donné à cette construction une forme approchant une pirogue, pour le dernier voyage du mort.

Nous appellerons compartiment arrière la partie où reposent le squelette, l'épée dans son fourreau, le fer de lance et le poignard anthropomorphe. C'est à cet endroit que le tronc présente son plus grand diamètre. Le fond, épais de 4 cm, ne montre pas de nettes traces d'outil, à l'exception d'une rainure assez discrète s'étendant transversalement sur le fond, à chaque extrémité de ce compartiment.

La partie avant, plus étroite, possède une épaisseur du fond correspondant au double de celle de l'arrière, soit 8–9 cm. Dans cette partie, qui semble ne pas être achevée, on observe 3, éventuellement 4 rainures transversales. La première, située tout à l'avant, est large et profonde de 3–4 cm; 40 cm et 110 cm plus loin commencent la seconde et la troi-

sième rainure, peu profondes, respectivement larges de 10 cm et 8 cm. Enfin, contre la cloison, on peut encore noter la présence de quelques entailles, mais insuffisamment profondes pour former une quatrième rainure similaire aux 2 précédentes.

Une cargaison de galets

Bien que profondément incliné sur son flanc bâbord, le monoxyle *Bevaix NE 1917* contenait encore 161 kg de galets (fig. 7). Ces derniers n'ont pas été accumulés par le lac en cet endroit, comme le montre clairement l'absence de vermiculation ou d'encroûtements carbonatés, et de «galets sculptés» (Arnold & Monney 1978).

La composition de cet ensemble de galets¹, avec 52,8 % de calcaires du Jura, 7,2 % de calcaires alpins et 40 % de roches métamorphiques (dont 28,5 % de quartzites), est tout à fait similaire à celle des diverses moraines analysées dans la région. Ces galets représentent donc la cargaison du bateau, ou ont été sciemment mis dans celui-ci.

Pour maintenir sous l'eau ce monoxyle en chêne de 460 kg (575 dm³ de bois), il suffit d'y appliquer une force verticale de 115 kgp (kilogramme-poids). En tenant compte de la densité moyenne des galets (2,67; Arnold & Monney 1978, fig. 1) et de la poussée d'Archimède, ce sont donc quelque 190 kg de galets qui seraient nécessaire. Cette dernière valeur

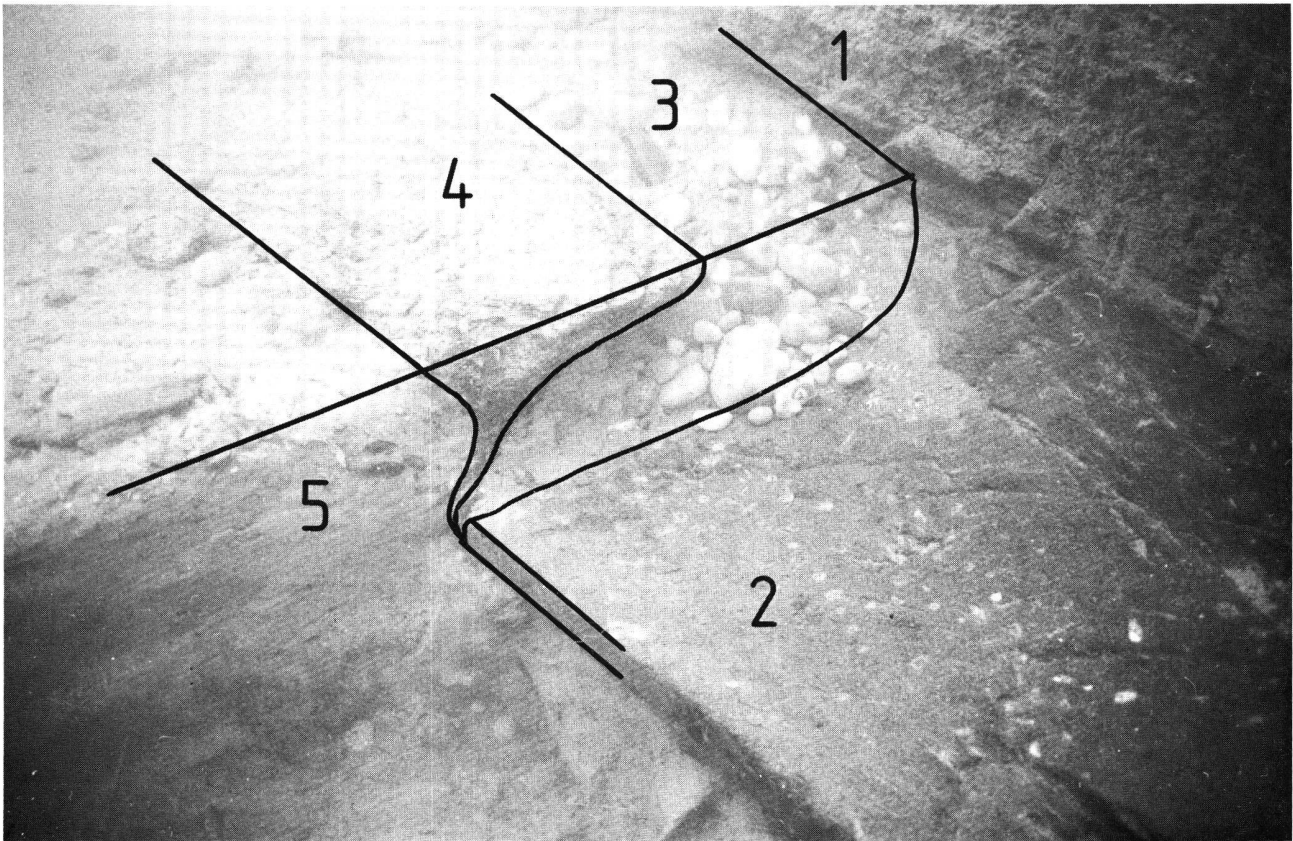


Fig. 7. La pirogue et sa cargaison de galets. 1: fond du monoxyle; 2: flanc babord; 3: cargaison de galets; 4: sédiment composé surtout de feuilles mortes; 5: sédiment encaissant formé d'une craie sableuse dans laquelle s'est enfoncée la pirogue sous l'action des vagues (2.1.1977).

est assez proche des 160 kg de galets prélevés, d'autant plus que le reste a pu disparaître depuis fort longtemps, vu la gîte du bateau.

Dans le Mondsee, on coulait volontairement et systématiquement les pirogues monoxyles à l'état d'ébauche ou *Prügel*. Ces dernières avaient la forme de l'embarcation définitive mais les flancs et le fond présentaient une épaisseur double, soit 18 cm pour le fond et 6 cm pour les flancs. Après un séjour de 5 à 20 ans, le pêcheur retirait son ébauche du fond du lac, la séchait pendant un hiver puis enlevait, tant sur le pourtour intérieur qu'extérieur, la couche de bois dégradée par l'eau. Ainsi construite, l'embarcation doublait aisément la durée de son service actif (Kunze 1968; Werner 1973).

Cette hypothèse pourrait expliquer l'épaisseur anormale du fond de *Bevaix NE 1917* mais reste assez peu compatible avec les aménagements intérieurs (supports pour un banc et un barrot).

Cette pirogue n'est d'ailleurs pas le seul monoxyle chargé de cailloux découvert en Suisse. En 1865 déjà, on avait levé une autre embarcation de ce genre: *Saint-Pierre BE 1865* (Keller 1854, p. 97).

Longue de 15 m, cette dernière est la plus grande

trouvée en Suisse. Elle n'est malheureusement plus conservée, ce qui empêche maintenant toute tentative de datation. Dans ce contexte, il est intéressant de signaler qu'on avait relevé la présence de 8 ou 12 agrafes métalliques destinées à réparer une fente située dans le fond du monoxyle.

Les raisons du naufrage, volontaire ou non, de cette ou ces pirogues restent encore incertaines: accident, stockage de courte durée (pendant la mauvaise saison par exemple) ou de longue durée (dans le cas d'une ébauche).

On pourrait aussi analyser la possibilité d'une relation avec la migration des Helvètes qui quittèrent leur territoire en 58 av. J.-C. en incendiant villes et villages, et en détruisant tout ce qu'ils ne pouvaient emporter (César, de Bello Gallico, I. 3 et I. 5).

L'hypothèse d'un accident n'est pas non plus à exclure. Ainsi, sur le lac de Zoug, les pêcheurs transportaient parfois dans leurs barques une cargaison de galets qu'ils déversaient sur les frayères, afin d'entretenir certains lieux particulièrement propices à des pêches fructueuses (Hürlimann 1944, p. 11).

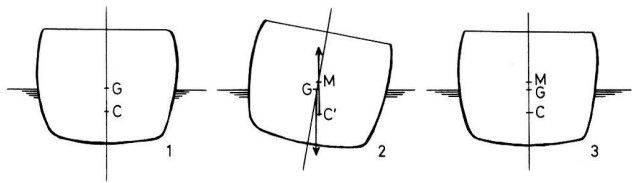


Fig. 8. Métacentre transversal initial (M), centre de gravité (G) et centre de carène (C).

Centre de gravité, centre de carène et métacentre initial

Tout corps flottant subit une poussée hydrostatique appliquée au centre de gravité C du volume immergé, ou *centre de carène*, faisant équilibre à une force représentant le poids du corps, appliquée en son *centre de gravité* G. C et G se trouvent sur une même verticale. La poussée est égale au poids du volume d'eau déplacé (principe d'Archimède) qui sera donc égal au poids du corps flottant (fig. 8/1).

Pour que le flotteur soit stable il faut que G soit situé en-dessous de C. Or, en général, dans tous les bateaux de service, G se trouve au-dessus de C. L'équilibre est donc instable, mais cette instabilité n'est qu'apparente, car dès que le bateau s'incline, le centre C se déplace du côté de l'inclinaison en C' (fig. 8/2), faisant ainsi un couple de forces de redressement.

La verticale passant par C' coupe l'axe du bateau au point M. Le couple de redressement est proportionnel à la distance MG. Il importe donc de déterminer la position du centre de gravité G et la position du point M, auquel on donne, pour de petits angles d'inclinaison, le nom de *métacentre initial*.

La position du métacentre initial ne dépend que de la forme de la partie immergée, en particulier de la position du centre de carène C. Pour évaluer la stabilité, toujours très précaire dans le cas d'un monoxyle, il faut donc connaître la position des points G, C et M (fig. 8/3). Les courbes hydrostatiques

Les courbes hydrostatiques

L'application de courbes hydrostatiques pour caractériser numériquement les performances d'embarcations découvertes lors de fouilles archéologiques se sont rapidement développées depuis les travaux de Timmermann (1956 et 1957-58) et, pour les monoxyles, de McGrail (1977 et 1978).

Malheureusement, dans ce domaine, un profond fossé existe entre les ingénieurs navals qui considèrent ces calculs comme élémentaires et les archéologues qui estiment que l'application de telles formules n'est pas à leur portée¹.

C'est ce fossé que nous essayerons de combler partiellement ici, en travaillant sur un exemple concret. Deux instruments sont nécessaires pour ce travail, un petit planimètre et une calculatrice de poche, en plus de bonnes coupes transversales effectuées à des endroits judicieusement choisis (coupes transversales 1 à 9, fig. 13).

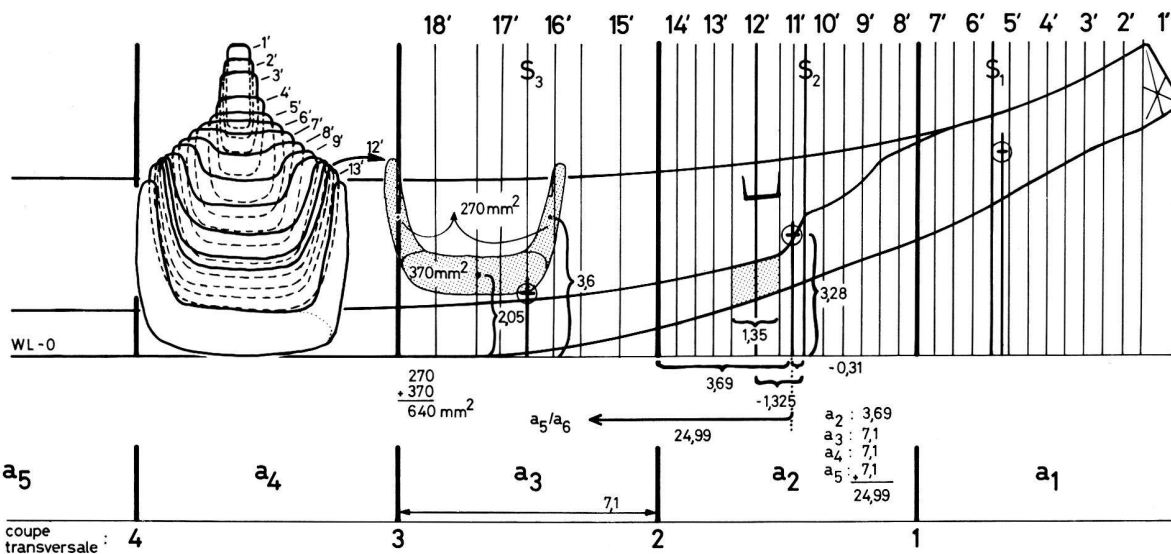


Fig. 9. La proue et les diverses coupes transversales utilisées pour calculer le poids et le centre de gravité du monoxyle.

nous fournissent, pour différents tirants d'eau, celle des points C et M. La position du centre de gravité du monoxyle vide G_0 doit être calculée à part.

Recherche du centre de gravité G_0

Plusieurs possibilités existent pour calculer le poids d'un bateau et situer l'emplacement de son centre de gravité à l'air libre G_0 .

On peut, par exemple, décomposer un bateau en un ensemble de planches et de poutres, puis déduire géométriquement pour chaque élément son centre de gravité et calculer son poids et son volume. Ce procédé n'est cependant guère applicable aux monoxyles.

La notion de physique utilisée dans cette étude est le moment d'une force; soit le produit d'une force (dans notre cas, on peut choisir le poids; si l'on travaille avec un matériau homogène comme un monoxyle, le volume du bois considéré peut suffire) par la distance entre un point de référence fixe choisi et la ligne d'action de cette force, passant par le centre de gravité du morceau de bois considéré. Dans le cas d'un monoxyle, le centre de gravité se situe généralement dans le plan de symétrie longitudinal. Aussi travaillerons-nous graphiquement à l'aide d'une coupe longitudinale (fig. 9).

Pour fractionner le volume des calculs, nous subdiviserons la pirogue en 10 tronçons ($a_1, a_2, a_3 \dots a_{10}$) d'égale longueur et établirons, pour chaque tronçon, son centre de gravité et son poids.

Pour obtenir la position en hauteur des centres de gravité, nous prendrons comme référence la ligne d'eau zéro, soit WL-0. La somme des moments de tous les tronçons de bois d'un ensemble (par exemple, de l'un des a ou de tout le monoxyle), divisée par le poids de cet ensemble, nous donnera exactement la hauteur du centre de gravité de cet élément au-dessus de WL-0 (fig. 10, partie droite).

Pour obtenir la position longitudinale du centre de gravité, nous prendrons un plan de référence situé vers le milieu de l'élément considéré (fig. 9: S_1 pour a_1 , S_2 pour a_2 , etc.). Pour l'ensemble du monoxyle (calcul de G_0), lorsque les opérations pour chaque a auront été effectuées, on prendra la limite a_5/a_6 ou la coupe transversale 5. Les bras de levier situés du côté de la proue (à droite sur les dessins) seront comptés positivement; ceux du côté poupe négativement.

Dans le cas de *Bevaix NE 1917*, les tronçons a_4, a_5, a_6 et a_7 seront considérés comme similaire entre eux. Leur calcul est assez simple: la surface planimétrée des coupes transversales nous donne 920

mm² sur un dessin au 1/10, donc 9,2 dm² pour la pirogue originale. Pour obtenir la hauteur du centre de gravité de cet ensemble au-dessus du plan de référence WL-0, il faut d'abord subdiviser la surface de la coupe transversale en 2 parties (le fond et les 2 flancs, soit 5 et 4,2 dm²). La hauteur du centre de gravité de chacune de ces 2 parties est estimée géométriquement (ici respectivement 0,75 et 2,85 dm; cf. a_4 , fig. 10).

On calcule ensuite le moment de chacun de ces 2 éléments; soit, pour le fond, le produit du volume du bois ($5 \times 7,1 = 35,5$ dm³; 7,1 dm représentant la longueur du tronçon considéré) par la distance de son centre de gravité au point (ou plan) de référence choisi (0,75 dm). La hauteur du centre de gravité est alors obtenue en divisant la somme de ces 2 moments (111,61 dm⁴) par le volume de l'ensemble considéré (65,32 dm³). Dans les figures 9 et 10, ce type d'opération a été mis en évidence pour la coupe transversale 12' de a_2 . Aux extrémités, on subdivise chacun des éléments a_1, a_2, a_3, a_8, a_9 et a_{10} en tronçons plus courts (généralement entre 1 et 2 dm) dont la mesure est effectuée de la même manière que pour chaque élément de la série a_4 à a_7 . La position du centre de gravité (x par rapport à $S_{1,2,3} \dots$ et y par rapport à WL-0; fig. 10) de ces éléments a est alors obtenue en divisant la somme des moments des divers tronçons (par exemple 8' à 14' pour a_2 ; fig. 9 et 10) par le volume du tronçon considéré (soit 55,56 dm³ pour a_2).

Une fois le centre de gravité établi pour chaque tronçon a , on calcule l'emplacement du centre de gravité du bateau vide, soit G_0 , en tenant compte des bras de levier (par exemple, 24,99 dm par rapport à la coupe transversale 5 pour a_2 et 3,28 dm par rapport à WL-0; fig. 9 et 10). Ce dernier est ensuite reporté sur le plan du bateau (fig. 6).

A ce stade, il existe un moyen très rapide pour vérifier une partie des résultats obtenus. On reporte sur un axe perpendiculaire à l'axe longitudinal du bateau les surfaces des diverses coupes transversales planimétrées pour les calculs de la figure 10. On mesure la surface ainsi construite (fig. 11), soit l'image du volume du bois du monoxyle. On établit ensuite le centre de gravité de cette surface. Sa position sur l'axe longitudinal doit correspondre à celle de G_0 calculée précédemment.

Avec ses 575 dm³ de bois de chêne (bas fig. 10), la pirogue *Bevaix NE 1917* pèse à vide quelque 460 kg (densité du chêne: 0,8 d'après McGrail 1977, p. 122).

CALCUL DU CENTRE DE GRAVITE DES TRONCONS a_1, a_2 ET a_4

Tronçon	Surface planimétrée mm ²	Surface réelle (dm ²) Epaisseur du tronçon dm	Volume du tronçon dm ³	Bras de levier par rapport à S Volume (ou poids)	X	Bras de levier par rapport à WL-0 Volume (ou poids)	Y
1'	(130)		0,9	(4,4) 0,9 = 3,96		(7,1) 0,9 = 6,39	
2'	160	1,6 (1) = 1,6		(3,5) 1,6 = 5,6		(7,25) 1,6 = 11,6	
3'	180	1,8 (1) = 1,8		(2,5) 1,8 = 4,5		(6,6) 1,8 = 11,88	
4'	260	2,6 (1) = 2,6		(1,5) 2,6 = 3,9		(6,05) 2,6 = 15,73	
5'	390	3,9 (1) = 3,9		(0,5) 3,9 = 1,95		(5,5) 3,9 = 21,45	
6'	560	5,6 (1) = 5,6		(- 0,5) 5,6 = - 2,8		(5,1) 5,6 = 28,56	
7'	720	7,2 (1) = 7,2		(- 1,5) 7,2 = -10,8		(4,75) 7,2 = 34,2	
a₁			23,6		+ 6,31	129,81	
8'	820	8,2 (1,1) = 9,02		(2,6) 9,02 = 23,45		(4,5) 9,02 = 40,59	
9'	880	8,8 (1) = 8,8		(1,5) 8,8 = 13,2		(3,9) 7,7 (1) = 30,03	
10'	910	9,1 (1) = 9,1		(0,5) 9,1 = 4,55		(5,25) 1,1 (1) = 5,78	
11'	770	7,7 (0,65) = 5,0		(- 0,35) 5,0 = - 1,75		(3,1) 7,3 (1) = 22,63	
						(4,7) 1,8 (1) = 8,46	
						(2,6) 5,1 (0,65) = 8,62	
						(4,1) 2,6 (0,65) = 6,93	
a₂			55,56		-17,20	182,44	
12'	640	6,4 (1,35) = 8,64		(-1,325) 8,64 = -11,45		(2,05) 3,7 (1,35) = 10,24	
13'	730	7,3 (1) = 7,3		(- 2,5) 7,3 = -18,25		(3,6) 2,7 (1,35) = 13,12	
14'	770	7,7 (1) = 7,7		(- 3,5) 7,7 = -26,95		(1,75) 3,8 (1) = 6,65	
						(3,3) 3,5 (1) = 11,55	
						(1,5) 4 (1) = 6	
						(3,2) 3,7 (1) = 11,84	
a₄	920	9,2 (7,1) = 65,32		au milieu		(0,75) 5 (7,1) = 26,62	
						(2,85) 4,2 (7,1) = 84,99	
						111,61	

$x_1 = \frac{+6,31}{23,6} = +0,27 \text{ dm}$
 $y_1 = \frac{129,81}{23,6} = 5,50 \text{ dm}$
 $x_2 = \frac{-17,20}{55,56} = -0,31 \text{ dm}$
 $y_2 = \frac{182,44}{55,56} = 3,28 \text{ dm}$
 $x_4 = \frac{111,61}{65,32} = 1,71 \text{ dm}$

CALCUL DU CENTRE DE GRAVITE DU MONOXYLE

	Volume	Bras de levier par rapport à la coupe 5	Bras de levier par rapport à WL-0	
a ₁	23,6	23,6 x 30,67 = 723,81	23,6 x 5,5 = 129,8	Le centre de gravité se situe à $\frac{4295,79 - 4630,35}{574,75} = -0,58 \text{ dm}$ de a_5/a_6 ; en direction de a_{10} .
a ₂	55,56	55,56 x 24,99 = 1388,44	55,56 x 3,28 = 182,24	
a ₃	70,96	70,96 x 17,7 = 1255,99	70,96 x 1,73 = 122,76	
a ₄	65,32	65,32 x 10,65 = 695,66	65,32 x 1,71 = 111,70	
a ₅	65,32	65,32 x 3,55 = 231,89	65,32 x 1,71 = 111,70	
		4295,79		
a ₆	65,32	65,32 x 3,55 = 231,89	65,32 x 1,71 = 111,70	Le centre de gravité se situe à $\frac{1355,66}{574,75} = 2,36 \text{ dm}$ au-dessus du plan WL-0.
a ₇	65,32	65,32 x 10,65 = 695,66	65,32 x 1,71 = 111,70	
a ₈	72,1	72,1 x 17,7 = 1276,17	72,1 x 1,9 = 136,99	
a ₉	58,18	58,18 x 24,06 = 1399,81	58,18 x 2,44 = 141,96	
a ₁₀	33,07	33,07 x 31,05 = 1026,82	33,07 x 5,9 = 195,11	
	574,75	4630,35	1355,66	Poids du monoxyle 574,75 x 0,8 = 459,8 kg

Fig. 10. Exemple pratique pour le calcul du centre de gravité d'un monoxyle.

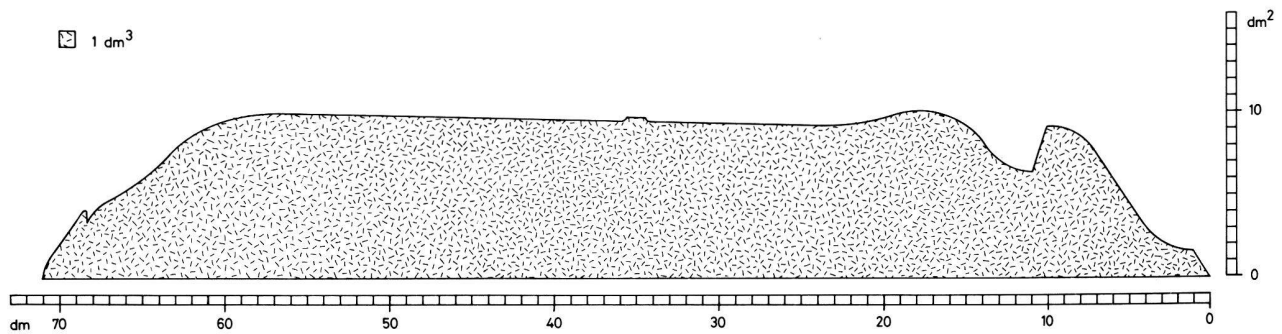


Fig. 11. Image bidimensionnelle du volume du bois de *Bevaix NE 1917*.

Etablissement des courbes hydrostatiques

Le centre de gravité G_0 une fois établi, une grande partie du travail est achevée. La seconde étape consiste à subdiviser la partie mouillée du monoxyle en un nombre pair de tronçons d'égale longueur (bas fig. 9).

Nous avons pris arbitrairement comme début de la partie mouillée la limite a_1/a_2 (coupe transversale



Fig. 12. La proue cambrée du monoxyle a été taillée dans le départ d'une branche maîtresse du houpier. Les prélèvements effectués pour les analyses dendrochronologiques (bandes noires) sont nettement visibles (7.11.1977).

1) et comme fin la limite a_9/a_{10} (coupe transversale 9). La longueur des tronçons, soit Δx , sera de 7,1 dm. On dessine ensuite la face extérieure du fond de ces 9 coupes transversales et l'emplacement des différentes lignes d'eau (WL; fig. 13). Enfin, on mesure systématiquement les surfaces comprises entre la face extérieure du fond et la WL considérée (Y) à l'aide du planimètre, la largeur (y) de la coque au niveau de la ligne d'eau (WL) considérée, et on reporte ces valeurs dans un tableau. Ce dernier est illustré ici pour les WL-2 et WL-3 à la figure 14. Il ne reste plus qu'à effectuer les diverses opérations (cf. fig. 14) en tenant compte des facteurs de Simpson S et des bras de levier B.

Les facteurs de Simpson (S) ont pour valeurs $\frac{1}{2}$, 2, 1, 2, 1 ... 2, 1, 2, $\frac{1}{2}$ et les bras de levier (B) 4, 3, 2, 1, 0, 1, 2, 3, 4; le monoxyle étant subdivisé longitudinalement, comme nous l'avons signalé ci-dessus, en un nombre pair de tronçons d'égale longueur, dans notre cas, de a_2 à a_9 , nous avons travaillé avec 8 tronçons (a_1 et a_{10} sont en effet plus ou moins hors de l'eau).

Pour toutes ces opérations, il faut donc considérer que l'ensemble des valeurs calculées d'une WL, par exemple WL-3, forme un ensemble clos. La synthèse de ces divers ensembles sera constituée par les courbes hydrostatiques (fig. 16). La publication systématique de ces dernières, pour chaque monoxyle étudié et bien conservé, de même que le dessin du point G_0 , dans la coupe longitudinale (fig. 6), permettra une comparaison beaucoup plus efficace des divers monoxyles (McGrail 1977, p. 123-125).

Dans cette étude, tout comme pour la recherche du point G_0 nous avons travaillé de préférence avec des décimètres (dm). On évite ainsi l'utilisation d'une trop grande quantité de chiffres non significatifs avant ou après la virgule. De même les dm^3 obtenus se transposent directement en kilogrammes de déplacement en eau douce, permettant d'évaluer la charge en kg, si l'on tient compte du poids du

monoxyle, de son armement et de son équipage. Pour les trajets en eau salée, il faut prendre en considération la densité de cette dernière et corriger la courbe de déplacement en multipliant le déplacement (kg; fig. 15) par le coefficient 1,025 pour un tirant d'eau donné.

Valeur du volume d'eau déplacé (courbe Δ , fig. 15 et 16):

$$V = \frac{2}{3} \cdot \Delta\chi \cdot \Sigma_3, \text{ pour WL-3 on a } V_3 = \frac{2}{3} \cdot 7,1 \cdot 149,3 = 707 \text{ dm}^3$$

La distance CO, entre WL-O (O) et le centre de carène (C) pour la WL considérée, c'est-à-dire le centre de gravité du volume d'eau déplacé, est obtenue en reportant les diverses valeurs de V sur un graphe et en traçant la courbe de déplacement Δ (fig. 15 et 16). On mesure ensuite avec le planimètre les diverses surfaces $S^1, 2, 3 \dots$ et l'on procède au calcul exposé sur la figure 15. Pour WL-3 nous avons:

$l^3 = \frac{S^3}{l_3}$ et $OC_3 = L_3 - l^3$, soit $l^3 = \frac{450}{35} = 12,9$ et $OC_3 = 30 - 12,9 = 17,1$; S_3 se mesure en mm² de dessin, l_3, L_3, l^3 et OC_3 en mm sur le dessin (fig. 15). OC_3 peut, en fonction de l'échelle du dessin, être converti en cm ou dm réels ($OC_3 = 1,71$ dm).

La position du métacentre transversal initial (M_t) est obtenue par la relation $M_t C = \frac{I_t}{V}$ avec le moment d'inertie transversal $I_t = \frac{2}{3} \cdot \frac{2}{3} \cdot \Delta\chi \cdot \Sigma_4$.

Pour WL-3, on a $I_{t3} = \frac{2}{3} \cdot \frac{2}{3} \cdot 7,1 \cdot 241,06 = 760,7 \text{ dm}^4$

et $M_{t3} C_3 = \frac{I_{t3}}{V_3} = \frac{760,7}{707} = 1,08 \text{ dm}$. Enfin nous avons $OM_{t3} = OC_3 + C_3 M_{t3} = 1,71 + 1,08 = 2,79 \text{ dm}$.

La distance du centre de gravité de la flottaison, par rapport à la coupe transversale 5, est:

$$\zeta' = \Delta\chi \frac{\Sigma_2 - \Sigma'^2}{\Sigma_1}; \text{ soit pour WL-3: } \zeta'_3 = 7,1 \cdot \frac{27 - 31,2}{31,47} = -0,95 \text{ dm}$$

La distance du centre de carène, par rapport à la coupe 5, est:

$$\zeta'' = \Delta\chi \cdot \frac{\Sigma_6 - \Sigma'^6}{\Sigma}; \text{ soit pour WL-3: } \zeta''_3 = 7,1 \cdot \frac{121,2 - 132,6}{149,3} = -0,60 \text{ dm}$$

La position du métacentre initial longitudinal, permettant de situer l'assiette du bateau, est donnée par la relation:

$$M_l C = \frac{I_l}{V} \text{ avec } I_l = I_{l \max} - (\text{surface de flottaison}) \cdot (\zeta')^2, \text{ soit } I_l = \left[\frac{2}{3} \cdot (\Delta\chi)^3 \cdot \Sigma_3 \right] - \left[2 \cdot \frac{2}{3} \cdot \Delta\chi \cdot \Sigma_1 \right] \cdot \left[\Delta\chi \cdot \frac{\Sigma_2 - \Sigma'^2}{\Sigma_1} \right]^2$$

Pour WL-3 nous avons:

$$I_{l3} = \left[\frac{2}{3} \cdot (7,1)^3 \cdot 143,7 \right] - \left[2 \cdot \frac{2}{3} \cdot 7,1 \cdot 31,47 \right] \cdot [-0,95]^2 = 34019$$

et $M_{l3} C_3 = \frac{I_{l3}}{V_3} = \frac{34019}{707} = 48,12 \text{ dm}$ et $OM_{l3} = OC_3 + C_3 M_{l3}$.

Bevaix NE 1917

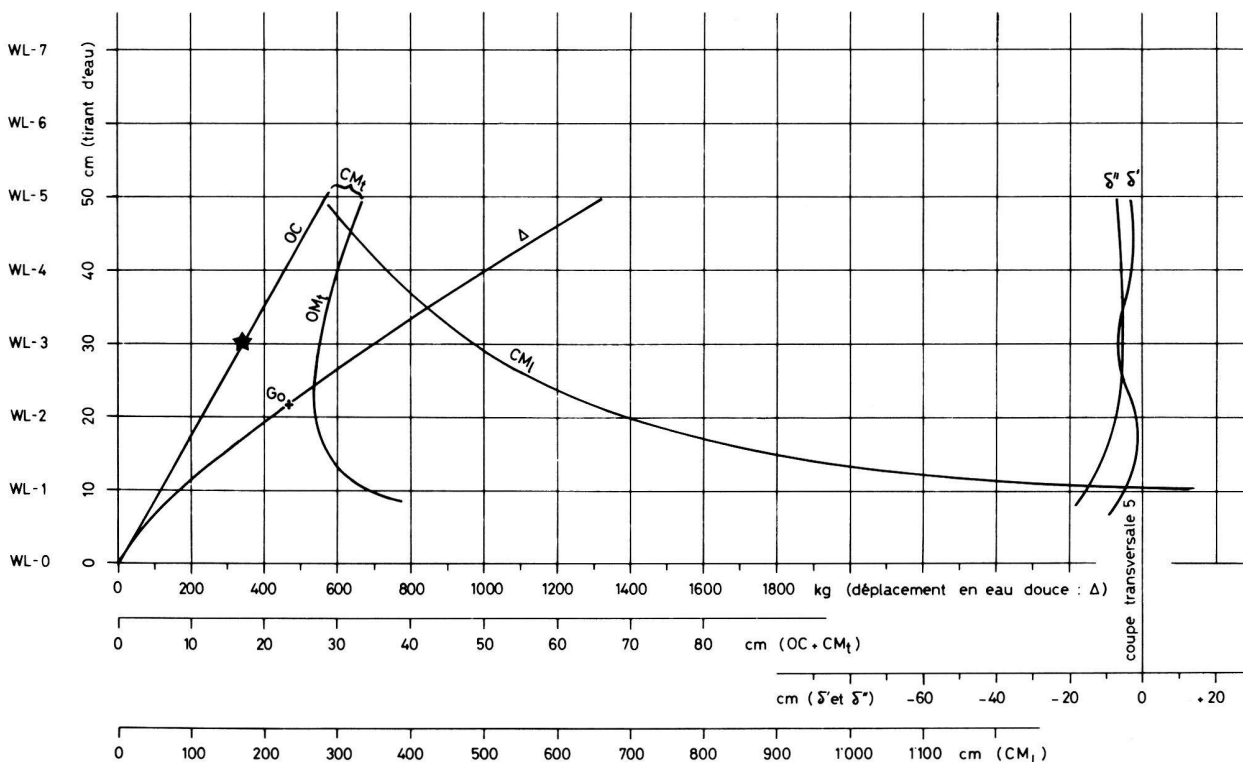


Fig. 16. Courbes hydrostatiques de Bevaix NE 1917.

Une embarcation bien instable

La pirogue *Bevaix NE 1917* pèse quelque 460 kg et sa charge utile, avec un nautonier et un franc-bord de 15 cm, n'est que de l'ordre de 300 kg. Chargée d'une seule personne, même assise (c'est-à-dire en mettant son centre de gravité le plus bas possible), l'embarcation devient théoriquement instable: le centre de gravité de l'ensemble coïncide avec le métacentre transversal; et ce dernier est bien en dessous du centre de gravité de l'ensemble si l'homme est debout (pour les constantes cf. McGrail 1978, p. 131-132).

$$\frac{(\text{Poids pirogue}) (\text{OG}) + (\text{Poids d'un homme}) (\text{hauteur de son centre de gravité} + \text{épaisseur du fond})}{\text{Poids pirogue} + \text{Poids d'un homme}} =$$

$$= \frac{(460)(2,36) + (60)(4 + 1,5)}{460 + 60} = \frac{1085,6 + 330}{520} = 2,72 \text{ dm}$$

Or nous avons sur la figure 15, pour un déplacement de 520 kg, un tirant d'eau de 2,35 dm, ce qui donne pour OM_t : 27 cm.

Par contre en chargeant l'embarcation d'une cargaison à forte densité, par exemple des galets, on augmente sensiblement la stabilité. Cependant, même en chargeant la pirogue avec une quantité maxi-

male de galets (320 kg avec 15 cm de franc-bord), la présence d'un homme debout rend l'ensemble encore théoriquement instable.

Les fonctions de cette élégante pirogue restent donc limitées; le nautonier devant toujours équilibrer l'ensemble en déplaçant son propre centre de gravité, comme un funambule sur son câble.

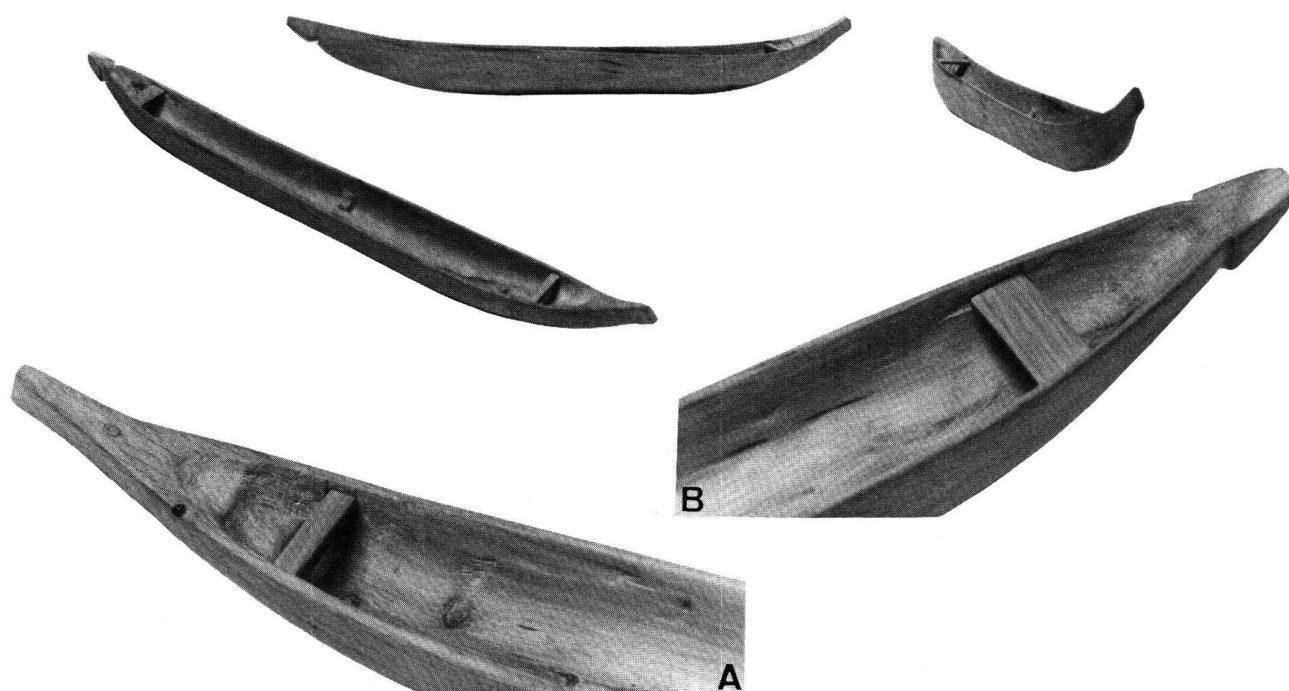


Fig. 17. Maquette de la pirogue *Bevaix NE 1917*, avec la proue (A) et son barrot, avec la poupe (B) et son banc.

Résumé

La construction du monoxyle en chêne *Bevaix NE 1917* débuta en 39 av.J.-C. par l'abattage du tronc-mère et la pirogue coula, avec une cargaison d'au moins 161 kg de galets, à la fin d'un automne ou au début d'un hiver.

Cette pirogue, longue de 7,1 m, large de 0,56–0,58 m, haute de 0,50 m, possède un fond particulièrement épais (0,12–0,13 m). Elle présente une paire de mortaises, destinées à recevoir un banc, vers l'arrière et une seconde, plus modeste, un barrot à l'avant.

La poupe, en forme de pyramide tronquée, est ornée d'une rainure taillée sur 3 faces du monoxyle. La proue, cambrée, est aménagée dans le départ d'une branche maîtresse.

L'établissement systématique des courbes hydrostatiques des divers monoxyles découvertes permettra de caractériser numériquement les performances de ces embarcations et faciliter leur classement. Ainsi la pirogue *Bevaix NE 1917* pèse quelque 460 kg et sa charge utile, avec un nautonnier et un franc-bord de 0,15 m, n'est que de l'ordre de 300 kg. Chargée d'une seule personne, même assise, la pirogue devient, théoriquement, instable: le centre de gravité de l'ensemble coïncide ou se trouve au-dessus du métacentre transversal.

Béat Arnold
Musée cantonal
d'archéologie
Avenue du Peyrou 7,
2000 Neuchâtel.

Notes

¹ Nous tenons ici à remercier M. Michel Egloff, archéologue cantonal, pour la bienveillante attention dont il a entouré ces recherches; M. Marcel Joos (Laboratorium für Ur- und Frühgeschichte der Universität Basel) pour ses identifications pétrographiques; enfin, et tout particulièrement, M. Gérard Cornaz, auteur d'une importante monographie sur les barques du Léman, qui m'a permis d'aborder toutes les notions d'ingénieur naval et a bien voulu revoir cette partie du présent article.

² Au vu des résultats obtenus lors des travaux de 1977, et en particulier des dommages causés par les bateaux de plaisance ancrés les week-ends dans cette portion de la baie de Bevaix, le Service cantonal d'archéologie de Neuchâtel a enlevé ce monoxyle de sa situation critique pour le transporter plus loin et le déposer par quelque 10 m de fond.

Bibliographie

- Angerer, F. (1927) Über den Mondseer Einbaum. Materialien zur Urgeschichte Österreichs 3, p. 99–104.
- Arnold, B. (1974) La barque gallo-romaine de la baie de Bevaix. Cahiers d'archéologie subaquatique 3, p. 133–150.
- (1975) The Gallo-Roman boat from the Bay of Bevaix, Lake Neuchâtel, Switzerland. International Journal of Nautical Archaeology and Underwater Exploration 4, p. 123–126.
- (1976) La pirogue d'Auvernier Nord 1975 (Bronze final). Contribution à la technologie des pirogues monoxyles préhistoriques. Cahiers d'archéologie subaquatique 5, p. 75–84.
- (1978) Les barques celtiques d'Abbeville, de Bevaix et d'Yverdon. Archéologia 118, p. 52–60.
- Arnold, B., Monney, C. (1978) Les amas de galets du village littoral d'Auvernier-Nord (Bronze final; lac de Neuchâtel): études géologique et archéologique. Bulletin de la Société neuchâteloise des Sciences naturelles 101, p. 153–166.
- ASSP: Annuaire de la Société suisse de Préhistoire et d'Archéologie.
- Bonnard, L. (1913) La navigation intérieure de la Gaule à l'époque gallo-romaine. Paris.
- Cordier, G. (1963) Quelques mots sur les pirogues monoxyles de France. Bulletin de la Société préhistorique française 60, p. 306–315.
- Drioux, G. (1921) Une restitution d'état civil, le poignard anthropoïde dit «de Chaumont». Bulletin de la Société historique et archéologique des Langres 8, p. 205–212.
- Egger, H., Orceel, C. (1980) Analyse dendrochronologique de la pirogue monoxyle, Bevaix NE 1917. ASSP 63.
- Egloff, M. (1974) La barque de Bevaix, épave gallo-romaine du lac de Neuchâtel. HA 19–20, p. 82–91.
- Ellmers, D. (1971) Keltischer Schiffbau. JbRGZ 16–1969, p. 73–122.
- Hollstein, E. (1979) Bauholzdaten aus Augusteischer Zeit. AKB 9, p. 131–133.
- Hürlimann, K. (1944) Mein Rötelpfahl. Zum hundertjährigen Jubiläum der Fischer-Gesellschaft Walchwil, p. 10–14.
- Keller, F. (1854) Die keltischen Pfahlbauten in den Schweizerseen. MAGZ 9, p. 67–101.
- Kunze, W. (1968) Der Mondseer Einbaum. Jahrbuch des Oberösterreichischen Musealvereins 113.
- McGrail, S. (1977) Search for pattern among the logboats of England and Wales (in McGrail, S., ed.: Sources and Techniques in Boat Archaeology, British Archaeological Report S-29, p. 115–135).
- (1978) Logboats of England and Wales with comparative material from European and other countries. British Archaeological Report 51.
- Pannier, E. (1860) Pirogue gauloise trouvée à Saint-Jean-des-Prés. Mémoires de la Société d'Emulation d'Abbeville 9, p. 621–627.
- Timmermann, G. (1956) Vom Einbaum zum Wikingerschiff. Schiff und Hafen 8, p. 130–138, 218–226, 336–342, 403–412, 545–549, 602–612.
- (1957–1958) Zur Typologie der Einbäume. Offa 16, p. 109–112.
- Werner, W. (1973) Einbäume auf österreichischen Seen. Das Logbuch 9, p. 43–50.

Zusammenfassung

Die Herstellung des Eicheneinbaums *Bevaix NE 1917* begann im Jahre 39 v. Chr. mit dem Fällen des dazu benötigten Baumes. Der Einbaum sank später mit einer Kiesladung von mindestens 161 kg Ende Herbst / Anfang Winter eines unbekanntes Jahres.

Dieser Einbaum – Länge 7,1 m, Breite 0,56–0,58 m, Höhe 0,50 m – weist einen erstaunlich dicken Boden von 0,12–0,13 m auf. Weiter besitzt er zwei Paar eingearbeitete Nuten. Das hintere Paar diente als Stützfläche für eine Sitzbank, während im vorderen ein kleiner Balken auflag.

Das pyramidenstumpfförmige Heck verziert eine auf drei Seiten eingeschnittene Nut. Der gewölbte Bug wurde aus einem Astansatz gehauen.

Die systematische Herleitung der hydrostatischen Kurven, der verschiedenen bis heute bekannten Einbäume, erlaubt eine numerische Charakterisierung der Qualitäten dieser Boote und erleichtert ihre Klassierung.

Der Einbaum *Bevaix NE 1917* wog ungefähr 460 kg und hatte eine Nutzlast inklusive Bootsführer von ca. 300 kg, wobei noch ein Freibord von 0,15 m blieb. Mit einer einzigen, sogar sitzenden Person war das Gefährt theoretisch instabil, denn in dieser Situation fällt der Schwerpunkt mit dem transversalen Metazentrum zusammen oder liegt sogar knapp darüber.