



**HAL**  
open science

## De l'épave à l'image de synthèse. Analyse des épaves au moyen de l'outil informatique

Michel Daeffler

► **To cite this version:**

Michel Daeffler. De l'épave à l'image de synthèse. Analyse des épaves au moyen de l'outil informatique. 132e congrès national des sociétés historiques et scientifiques Images et imagerie,, Apr 2007, Arles, France. p. 143-178. hal-00368300

**HAL Id: hal-00368300**

**<https://hal.science/hal-00368300>**

Submitted on 12 Jul 2018

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

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

## *De l'épave à l'image de synthèse. Analyse des épaves au moyen de l'outil informatique*

Michel DAEFFLER  
ingénieur d'étude CRHQ-CNRS,  
membre de la Société des antiquaires de Normandie

---

La connaissance de l'architecture navale ancienne peut être appréhendée au travers des sources écrites et des sources archéologiques. Ces dernières constituent une mine privilégiée dans la mesure où elles nous mettent en présence des vestiges de navires. Nous connaissons, à présent, les procédés de construction employés durant la longue histoire de l'architecture navale. La mise en œuvre des bois, le choix des essences et les techniques d'assemblage, sont de mieux en mieux compris. Les observations directes effectuées sur la charpente aboutissent ainsi à une description minutieuse de la coque. Toutefois, ces épaves nous fournissent également des informations plus subtiles, telles les méthodes de conception employées par le constructeur. Ces sources archéologiques ont leurs limites, car incomplètes. Bien souvent, seuls les fonds de carène subsistent. Les informations que l'on est susceptible d'obtenir concernent essentiellement les premiers éléments de la membrure (varangues, genoux et premières allonges). Celles-ci sont inscrites dans la charpente lors du tracé des couples par le constructeur. La recherche de ces informations nécessite un relevé précis de chaque élément de la membrure, leur forme et leur assemblage.

Pendant, une bonne connaissance de l'architecture navale ancienne est indispensable afin d'élaborer une méthode d'analyse permettant de retrouver non seulement les règles de conception, c'est-à-dire la logique ayant permis au constructeur d'aboutir aux formes de carène désirée, mais également de reconstituer les outils de tracé constitués par les gabarits ainsi que la façon de les utiliser<sup>1</sup>.

Afin de présenter ces méthodes d'analyse, nous suivons l'étude de l'épave *Calvi I*<sup>2</sup>. Datée de la fin du XVI<sup>e</sup> ou du début du XVII<sup>e</sup> siècle, elle est découverte dans le port de commerce de Calvi. Elle a fait l'objet de quatre campagnes de fouille de 1985 à 1988 par l'équipe de Pierre Villié<sup>3</sup>. Cette épave constitue une source essentielle pour la compréhension des méthodes de conception et des techniques de construction des navires de commerce italien de la fin du XVI<sup>e</sup> siècle.

### *Reconstitution des formes de carène*

Après la fouille, nous avons le choix entre plusieurs méthodes pour la reconstitution des formes de carène. Nous pouvons employer une méthode « graphique », en faisant appel à la CAO<sup>4</sup>. Cette méthode présentait l'avantage d'une grande souplesse, mais elle ne permettait pas de tenir compte des contraintes engendrées par la déformation du bois,

---

1. La seule restriction concerne les principes et les procédés de construction, ceux-ci devant être de type « charpente première », c'est-à-dire que tout ou partie de la membrure est érigée sur la quille avant la pose du bordé. Dans ce type de construction, les éléments centraux de la membrure sont tracés au moyen d'instruments appelés gabarits, comme c'est le cas dans la tradition architecturale méditerranéenne.

2. M. Daeffler, Étude des méthodes de conception des bâtiments de commerce méditerranéens, l'exemple de l'épave de *Calvi I*.

3. P. Villié, *L'épave Calvi I*.

4. Conception Assistée par Ordinateur.

chaque pièce pouvant être modelée à volonté sans prendre en compte ses limites de résistance mécanique.

Il fut décidé d'entreprendre la réalisation d'une maquette archéologique, car après la fouille, plusieurs problèmes se posaient :

- de nombreuses pièces avaient été retrouvées détachées du reste de la charpente, leur position devait être définie ;
- les formes de carène devaient être restituées ;
- les couples disparus devaient être reconstitués ;
- la logique de construction et les méthodes de conception restaient à étudier.

Résoudre ces différents points par des méthodes graphiques était possible, mais très difficile. La construction d'une maquette au un cinquième fut donc entreprise<sup>5</sup>. Le relevé des formes de carène fut effectué sur ce modèle une fois la membrure mise en place.

Un châssis rigide fut monté autour de la maquette, sur lequel une poutre pouvait coulisser transversalement. Un fil à plomb, fixé sur celle-ci, se déplace longitudinalement. Une règle graduée est fixée sur le châssis, l'origine des graduations correspondant au bord gauche de la quille. Un index placé dans l'axe de la poutre permet de connaître sa position par rapport à la quille (fig. 1).

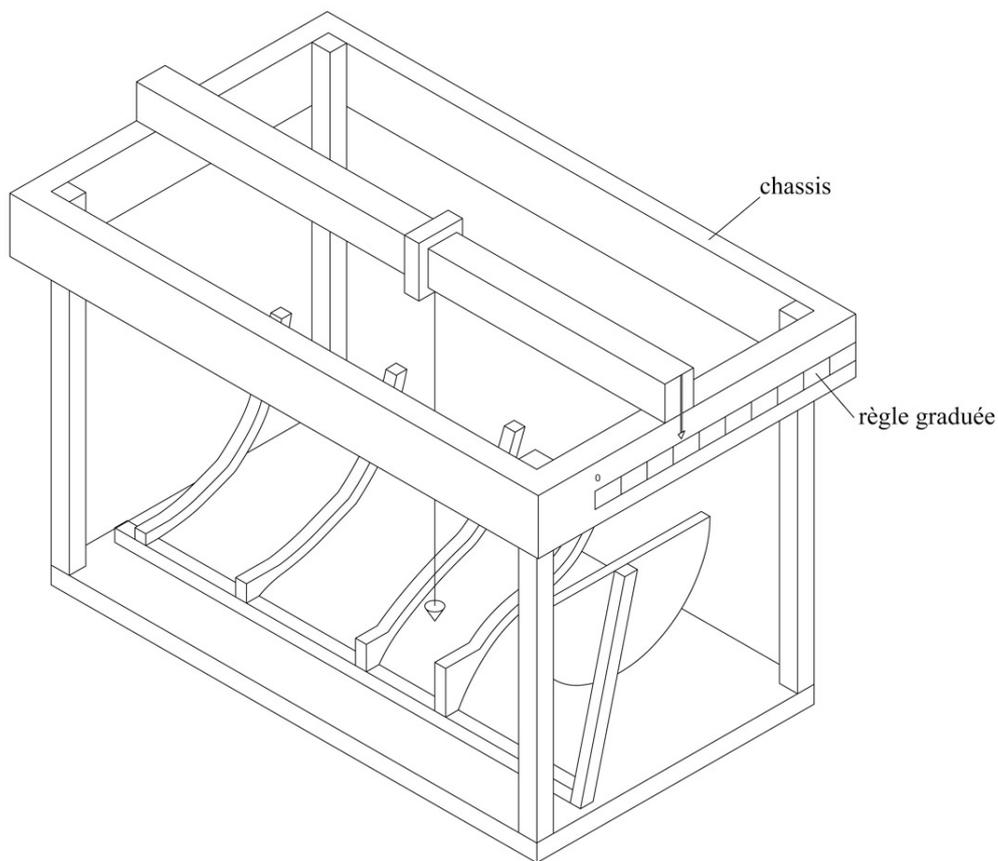


Figure 1 – Principe des relevés sur la maquette.

5. Cette maquette fut réalisée par M. Jean Thomas.

Les mesures sont effectuées de la façon suivante :

- la position de chaque couple sur la quille est relevée ;
- le repère de la poutre est placé devant l'abscisse désirée, le fil à plomb étant juste devant le couple à mesurer ;
- on mesure le long du fil à plomb la hauteur depuis le dessous de la quille jusqu'au bord extérieur du couple.

Chaque relevé est immédiatement reporté sur un calque afin qu'on puisse, en dessinant le couple, se rendre compte tout de suite de la cohérence de la mesure par rapport au tracé et donc pouvoir aussitôt la reprendre si elle paraît erronée. Les mesures sont d'abord effectuées tous les vingt millimètres jusqu'à une distance de deux cents millimètres du bord de la quille, puis tous les cinquante millimètres, pour une plus grande précision (*fig. 2*).

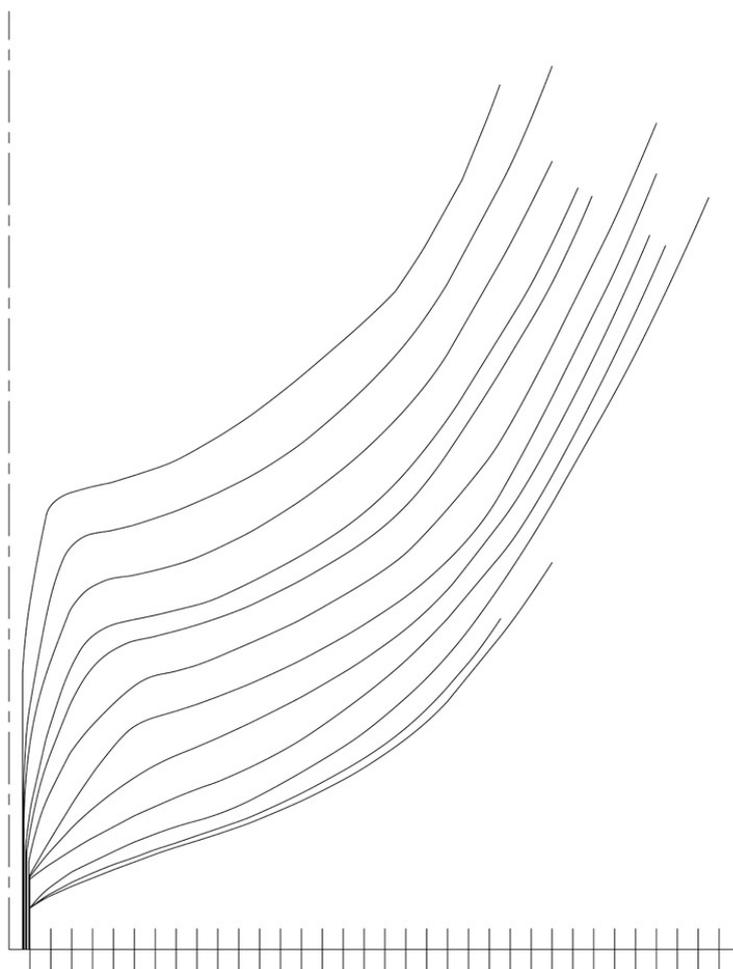


Figure 2 – Relevé des formes de carène sur la maquette.

À partir de ces relevés, un plan des formes de carène de l'épave est effectué (*fig. 3*).

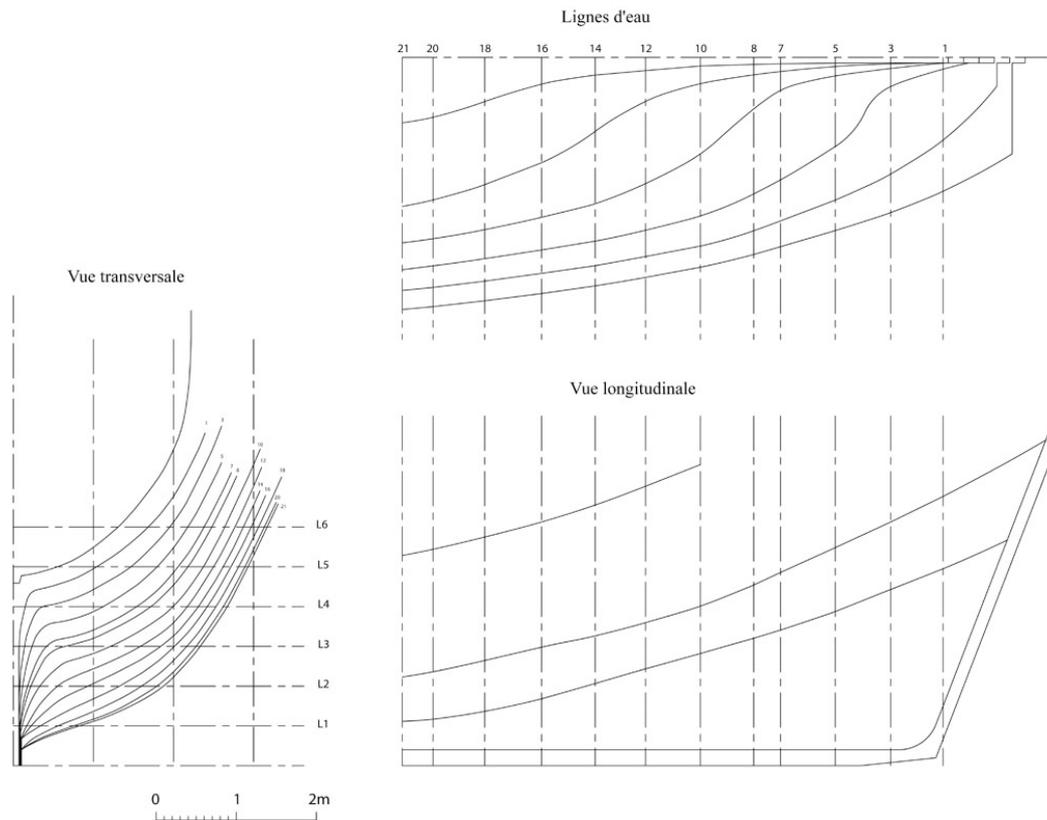


Figure 3 – Plan des formes de carène de l'épave.

## Analyse des formes de carène

### Hypothèses de travail

L'analyse des formes de carène se fonde sur des hypothèses concernant les traditions architecturales observées sur l'épave. Ce travail s'appuie sur un constant dialogue entre les sources d'archives et archéologiques. Les caractéristiques architecturales nous renseignent sur l'origine de la construction : la manière d'assembler les éléments de la charpente, les différentes essences de bois employées, la manière de placer et de fixer le bordé sur la charpente, le logique de construction et l'ordre de mise en place et d'assemblage des constituants de la coque. Ces caractéristiques sont :

- le bordé est à franc-bord, c'est-à-dire que les planches sont placées bord à bord ;
- le bordé est fixé à la charpente par des clous ;
- un couple sur deux est fixé à la quille ;
- tous les éléments des couples sont assemblés entre eux au moyen de clous ;
- tous les assemblages sont effectués au moyen de chevilles en fer et de clous, aucune cheville de bois n'est employée ;
- une préceinte basse renforce la liaison entre les fourcats et les genoux, cette préceinte, appelée « massane », n'est connue jusqu'à présent que dans la construction méditerranéenne.

La comparaison de ces caractéristiques avec celles décrites dans des traités et des mémoires consacrés à la construction navale des XVI<sup>e</sup> et XVII<sup>e</sup> siècles nous conduit à

suggérer une origine méditerranéenne<sup>6</sup>. La conception des formes de carène selon des méthodes méditerranéennes implique l'utilisation de gabarits, c'est-à-dire des « patrons » en planches fines, pour le tracé des couples centraux. Le tracé des couples est obtenu par déplacement de ceux-ci les uns par rapport aux autres. Le gabarit dit « des varangues » est soumis à deux déplacements, l'un horizontal permettant de réduire progressivement la largeur du fond de la carène, l'autre vertical, faisant remonter ce même fond. L'association de ces deux déplacements génère le pincement de la carène vers les extrémités de la coque.

D'autre part, le tracé du maître couple aux XVI<sup>e</sup> et XVII<sup>e</sup> siècles est obtenu par une combinaison de droites et d'arcs de cercle (fig. 4).

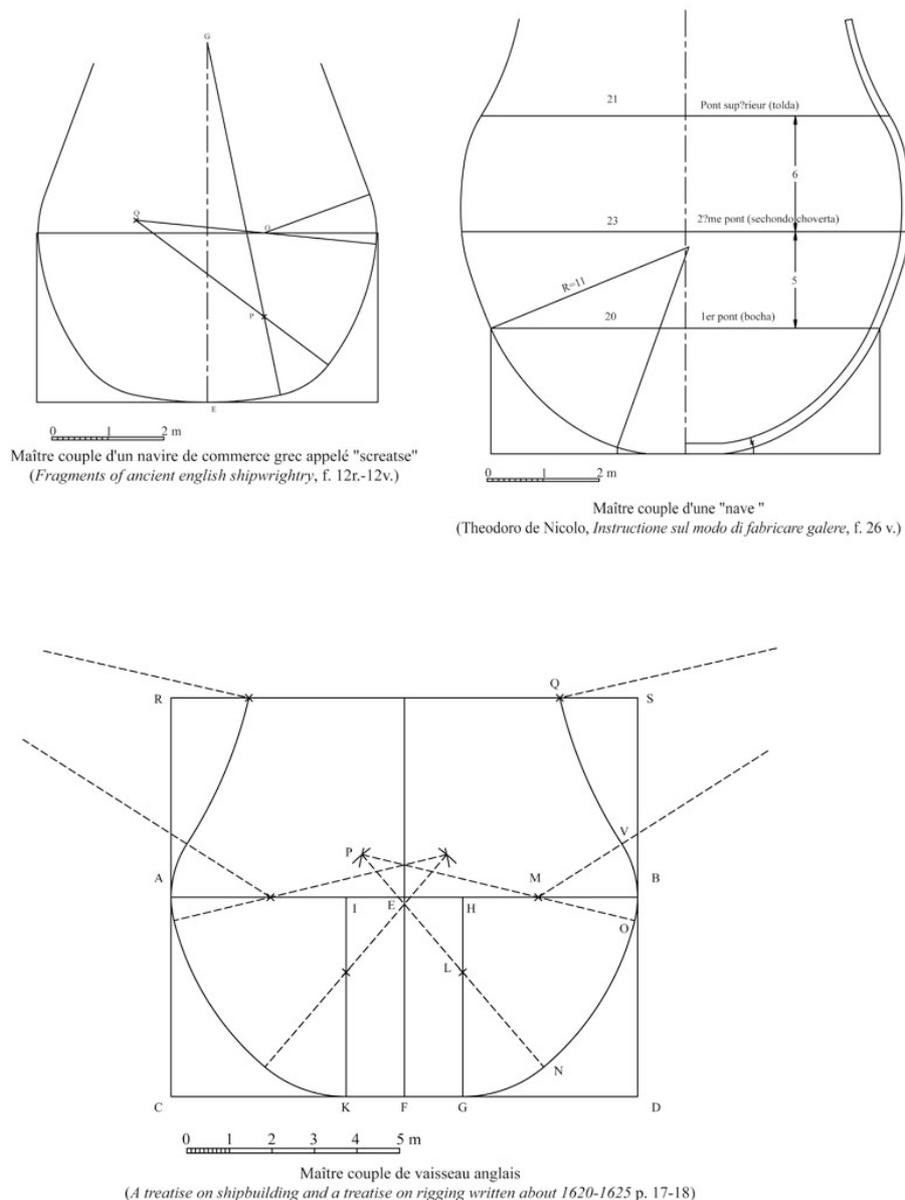


Figure 4 – Exemples de maîtres couples des XVI<sup>e</sup> et XVII<sup>e</sup> siècles.

6. P. Villié, *L'épave Calvi I*, op. cit.; M. Daeffler, *Étude des méthodes de conception des bâtiments de commerce méditerranéens...* op. cit., p. 39-53.

Cette hypothèse sur les méthodes de conception influe sur la manière d'analyser les formes de carène. Le déplacement des gabarits les uns par rapport aux autres, générant les formes de la carène, se répercute sur la position des centres des arcs composant les couples.

Le premier travail consistera donc à rechercher la décomposition des couples en éléments géométriques simples.

### Analyse géométrique des couples

Nous rechercherons, tout d'abord, les éventuels arcs de cercle composant les couples. Pour cela, chaque couple est retracé grâce à des arcs tangents entre eux, en superposition avec le tracé d'origine (fig. 5). Nous choisissons de limiter leur nombre à cinq, deux pour la partie basse, concave et trois pour les flancs. Cette partie de l'étude est déterminante car elle confirme ou infirme les hypothèses de départ. L'impossibilité de décomposer ces couples impliquerait de reprendre totalement ces hypothèses sur de nouvelles bases historiques et de rechercher d'autres modèles architecturaux.

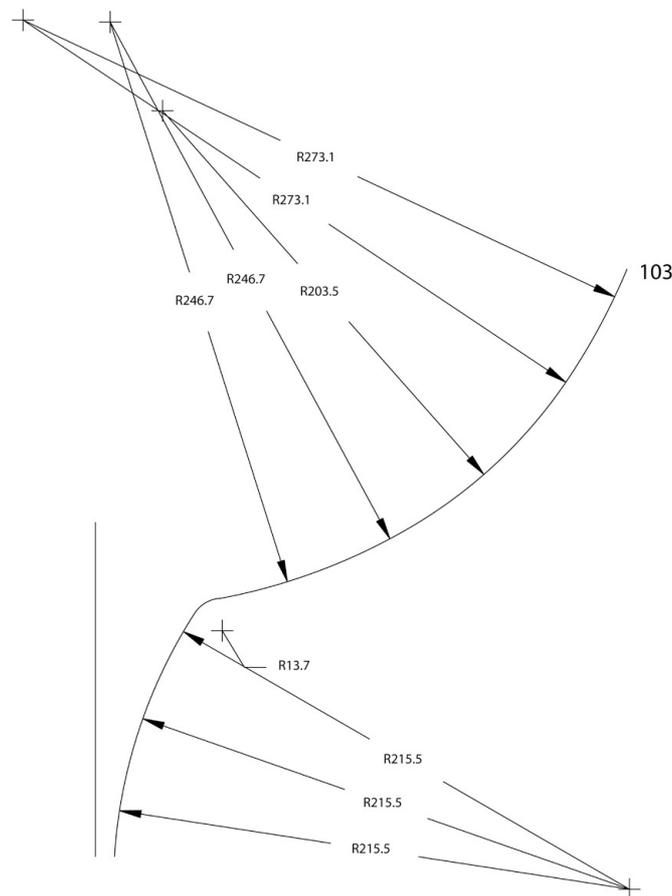


Figure 5 – Exemple de décomposition des couples en arcs de cercle.

Dans le cas de l'épave *Calvi I*, nous nous intéressons à la partie convexe des flancs et nous rechercherons les valeurs moyennes de R1, R2 et R3 (fig. 6). Ces valeurs restent constantes entre les couples C21 à C7<sup>7</sup>.

7. M. Daeffler, *ibid.*, p. 64-67.

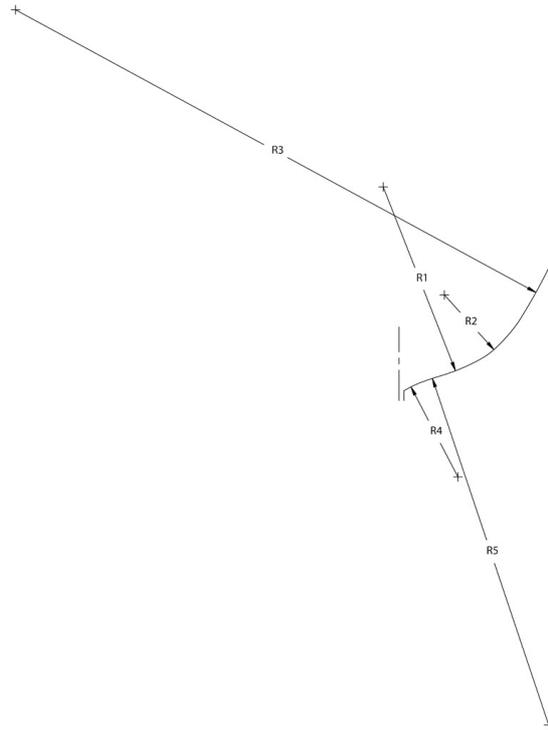


Figure 6 – Principe de tracé des couples selon des arcs.

Les couples sont alors retracés et superposés sur les couples initiaux. La bonne coïncidence de ces deux tracés permet de prendre en compte ces rayons moyens pour la suite de l'étude (fig. 7).

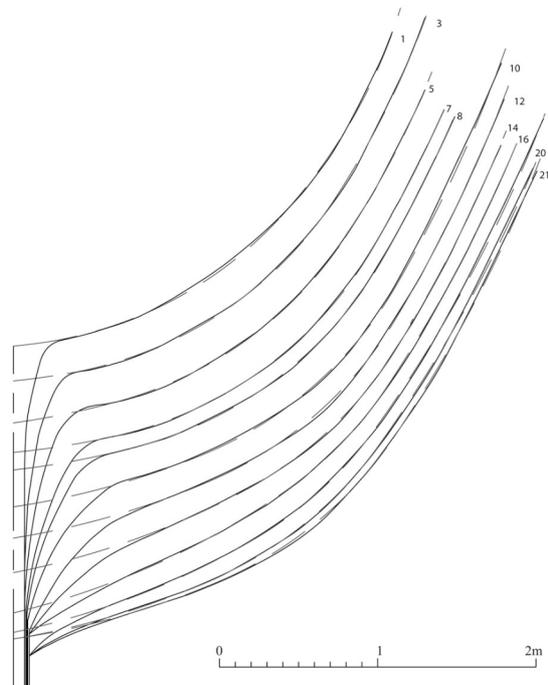


Figure 7 – Décomposition finale des couples selon des arcs de cercle.

### Analyse du déplacement des arcs composant les couples

Nous commencerons, tout d'abord, par étudier les règles déterminant l'acculement et la diminution des varangues. Aussi, la coque est divisée longitudinalement par un plan horizontal et un autre vertical (fig. 8). La position de chaque couple est repérée sur chaque plan, puis les centres des différents arcs sont projetés verticalement et horizontalement. Des courbes moyennes passant par ces points étant tracées, on obtient six graphiques, trois pour les abscisses dans le plan horizontal et trois pour les ordonnées dans le plan vertical (fig. 9).

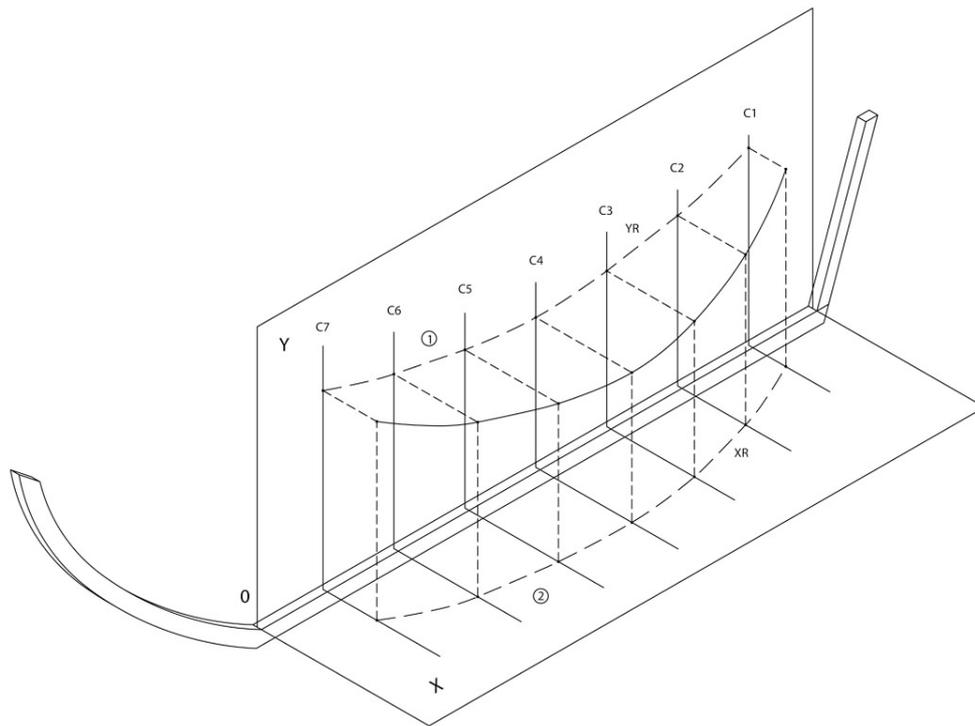


Figure 8 – Étude du déplacement des centres des arcs : recherche de leurs positions.

Un point de rebroussement est visible au niveau du couple 16, ce phénomène est particulièrement bien visible sur les courbes. Cela signifie un changement dans la façon de tracer les membrures à partir du couple C16 et traduit donc une modification des règles de conception. Dans la tradition architecturale méditerranéenne, un tel changement se produit au niveau d'un couple particulier : le couple de balancement arrière, jouant un rôle essentiel dans la conception des formes de la carène<sup>8</sup>. L'usage des gabarits pour le tracé de la membrure se limite entre les deux couples de balancement.

8. M. Daeffler, *Du traité manuscrit au plan de formes, restitution graphique d'une galère française (1685-1690) à l'aide d'un système de conception assisté par ordinateur*, p. 1-2.

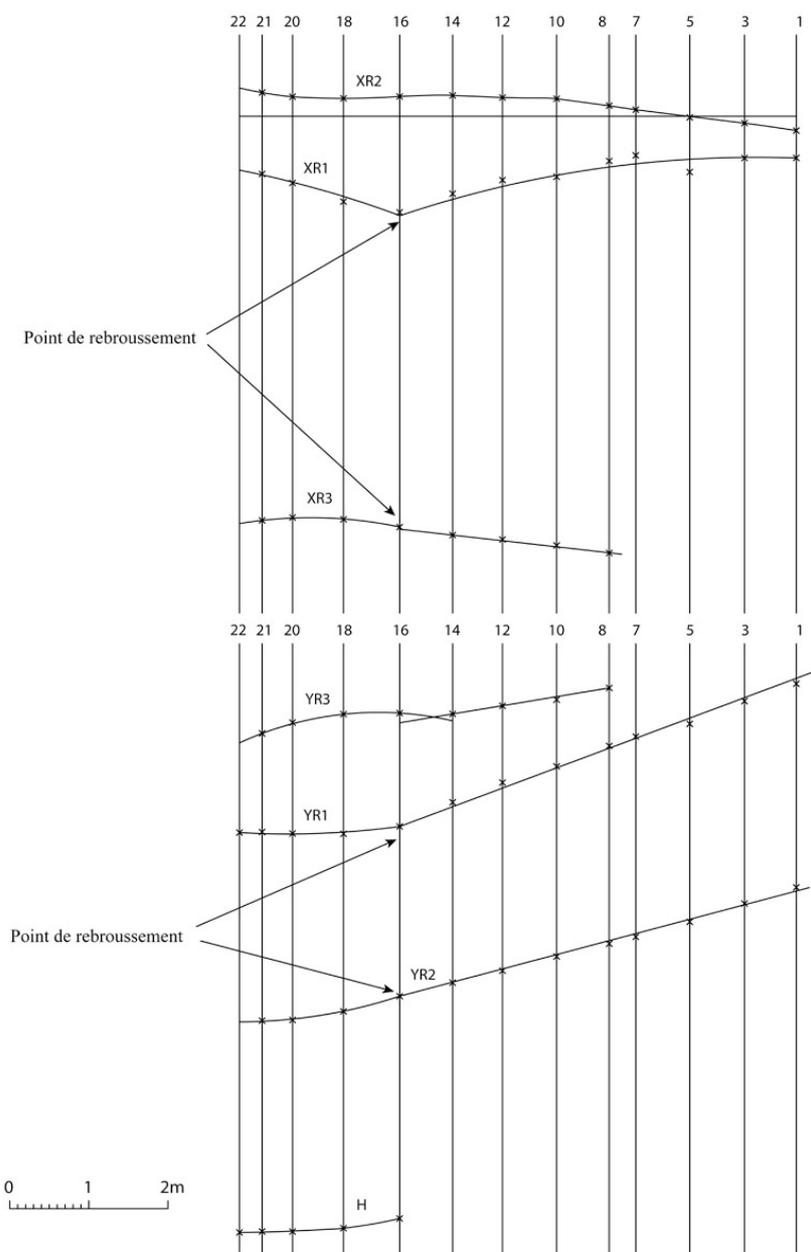


Figure 9 – Diagramme de la position des centres.

La position du ou des maîtres couples est également déterminée par les courbes des centres des arcs. Le maître couple est le couple le plus large, son acculement, c'est-à-dire la hauteur des fonds par rapport au-dessus de la quille, est le plus faible. En conséquence, les courbes des centres présenteront une largeur maximum à cet endroit. Dans le cas de l'épave *Calvi I*, le maître couple a disparu. Nous pouvons cependant le retrouver en prolongeant les courbes des centres jusqu'à ce qu'elles présentent une tangente horizontale. De fait, seule la courbe XR1 peut être utilisée. Ce point de tangence est atteint au couple C30<sup>9</sup> (fig. 10). Cette position demande toutefois à être vérifiée grâce aux lisses.

9. M. Daeffler, *Étude des méthodes de conception des bâtiments de commerce méditerranéens...*, op. cit., p. 70-72.

Pour cela, son tracé doit être reconstitué en utilisant les rayons R1, R2 et R3 définis précédemment, ainsi que la courbe de l'acculement (H).

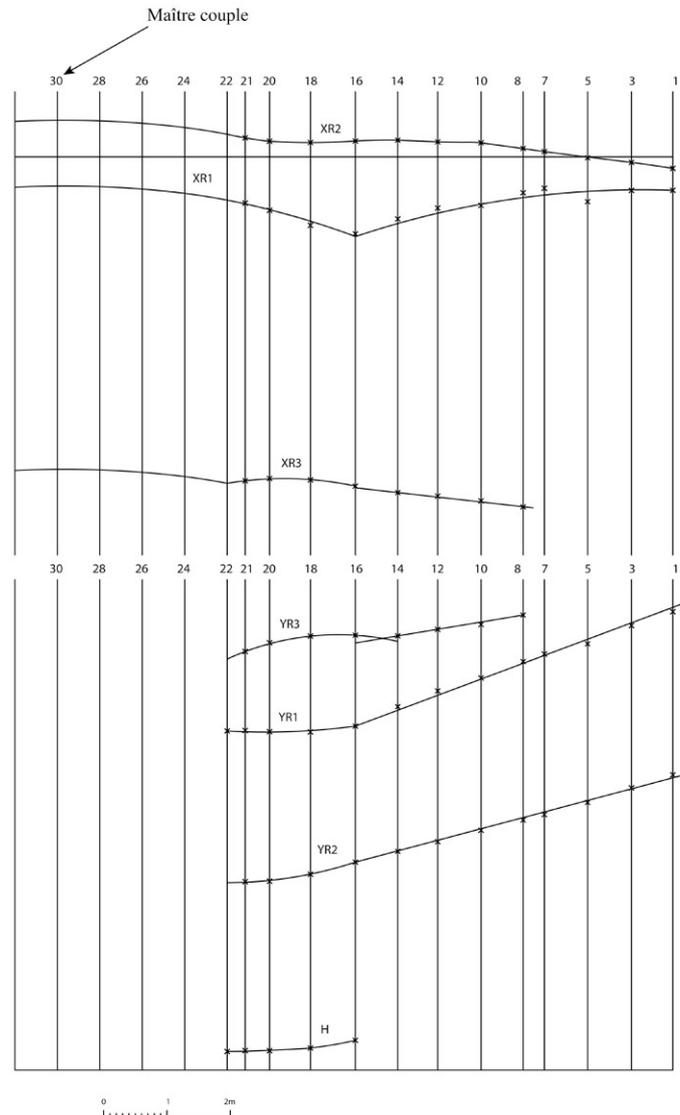


Figure 10 – Recherche du maître couple.

Dès lors, les données concernant ce couple sont :

- le couple est tracé par trois arcs de rayon :

R1 = 5,15 mètres ;

R2 = 2,53 mètres ;

R3 = 9,80 mètres ;

- l'acculement étant supposé constant à partir du couple C22, sa valeur est de 97 millimètres ;

- l'abscisse du centre du premier arc peut être mesurée sur la courbe XR1 au niveau du couple C30, sa valeur est de 464 millimètres.

Ces informations à elles seules ne sont pas suffisantes pour reconstituer le maître couple. Nous devons nous aider des informations fournies par l'épave associées à la connaissance de l'architecture navale méditerranéenne des XVI<sup>e</sup> et XVII<sup>e</sup> siècles<sup>10</sup>. Un travail de lissage est ensuite nécessaire afin de corriger ce tracé et obtenir un maître couple s'intégrant correctement dans l'ensemble de la coque (fig. 11).

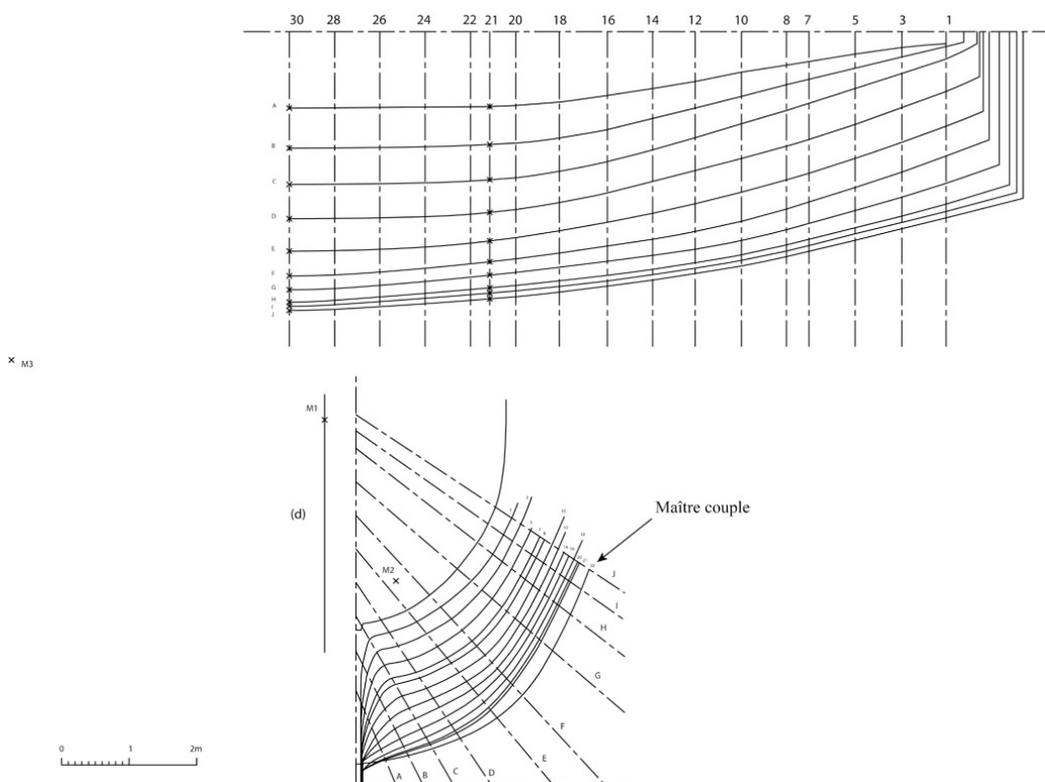


Figure 11 – Reconstitution du tracé du maître couple.

### Reconstitution des gabarits

Le tracé du maître couple est la clef pour la réalisation des gabarits. Les extrémités des varangues, genoux, allonges sont placées sur le tracé du maître couple, afin d'en dégager les limites des gabarits respectifs. Nous recherchons ensuite les arcs composant chacun de ces éléments et on vérifie que les arcs d'un même gabarit conservent leur position relative tout au long de la coque, dans la limite des couples de balancement.

L'étude du déplacement des centres indique que le gabarit des varangues subit un double déplacement, l'un vertical, appelé acculement, et un autre, horizontal, diminuant le « plat » des varangues. Ces déplacements sont obtenus grâce à des diagrammes réalisés à l'aide de formes géométriques simples tels que le triangle ou le cercle et décrits dans différents traités de construction navale<sup>11</sup>. Ces différentes règles sont converties en équation puis testées par comparaison avec les valeurs mesurées sur les couples (fig. 12).

10. *Ibid*, p. 74.

11. J. Fennis, éd., *Un manuel de construction des galères 1691*, p. 9-13 ; F. Coulomb, « Connaissance de toutes les pièces qui entrent à la construction d'un vaisseau », 1688, Archives nationales, fonds Marine, D1-61, fol. 35v-36v.

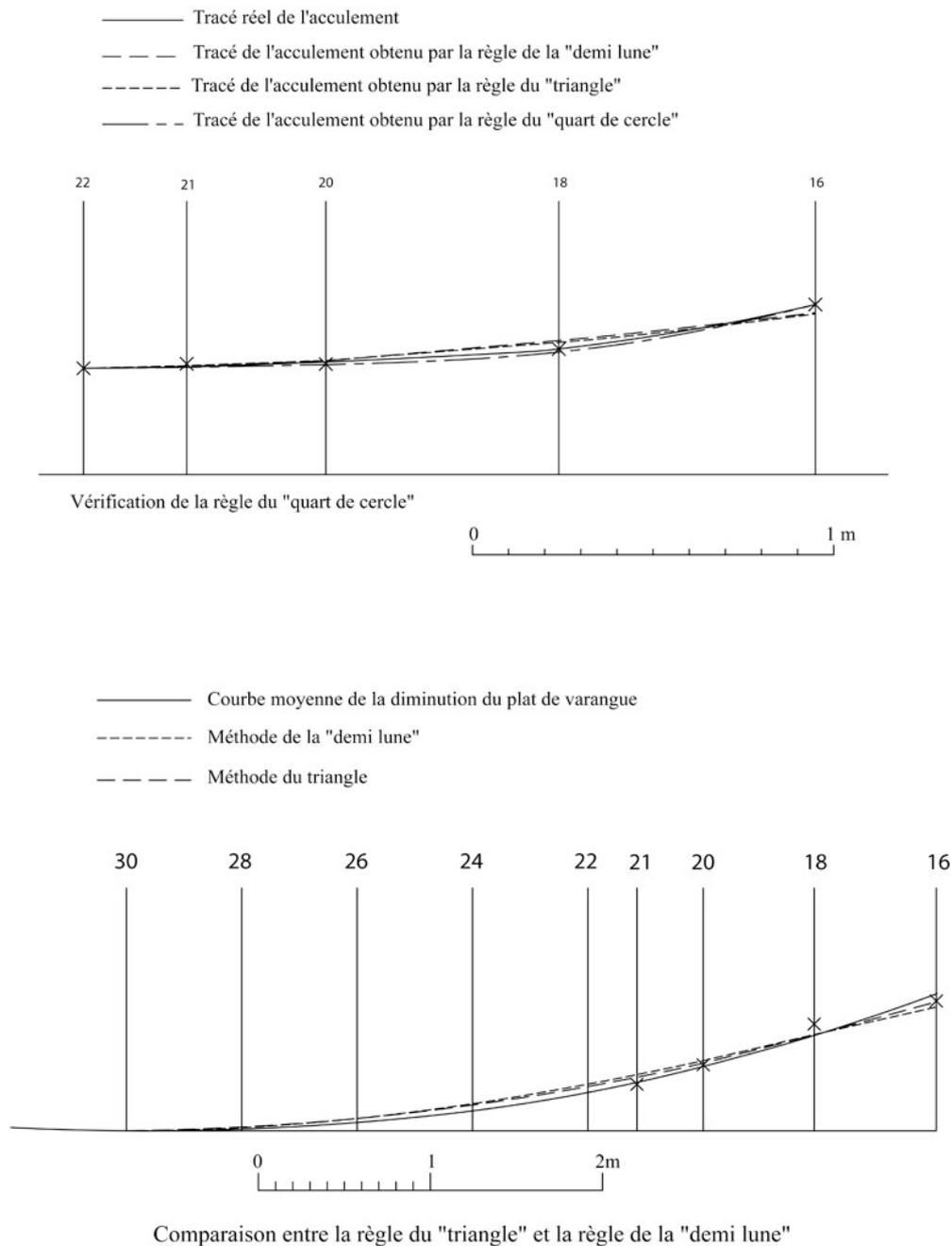


Figure 12 – Comparaison entre diverses règles déterminant l'acculement et la diminution des varangues.

La reconstitution des gabarits des genoux et des allonges est obtenue par l'étude des centres des arcs composant les couples. Les mouvements des gabarits entre eux sont mis en évidence par l'étude de la position de ces centres, ce qui permet de retrouver les graduations utilisées pour contrôler leurs déplacements respectifs (fig. 13). Des gabarits virtuels peuvent alors être reconstitués par l'informatique. Nous vérifions l'exactitude de ceux-ci en retraçant les couples et en comparant le tracé obtenu par les gabarits avec le relevé réel (fig. 14).

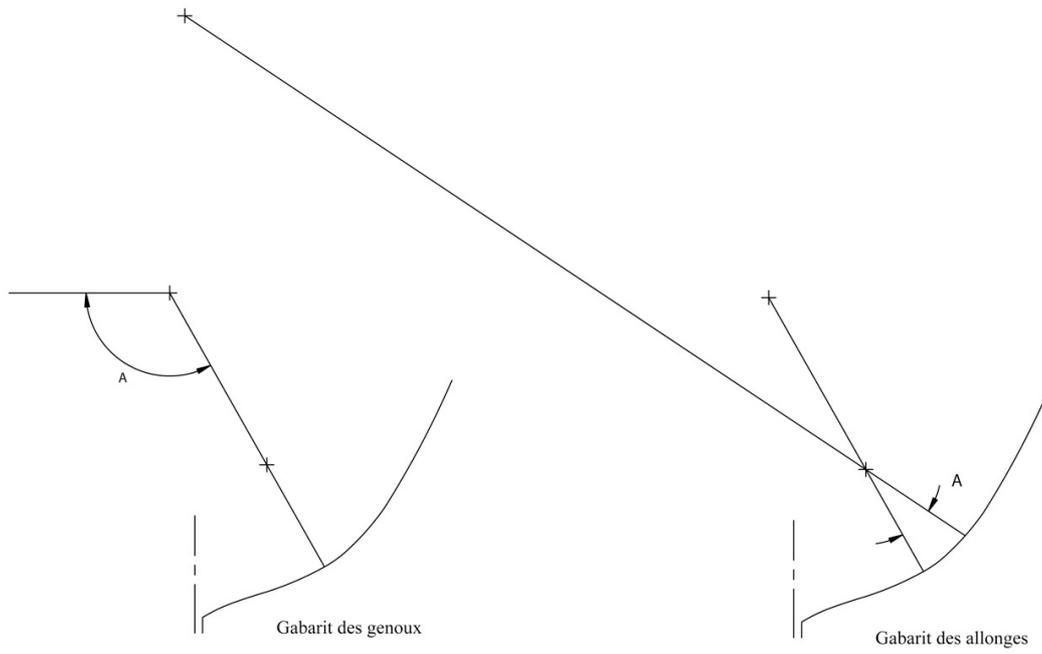


Figure 13 – Mesure des déplacements angulaires des centres des arcs composant les couples.

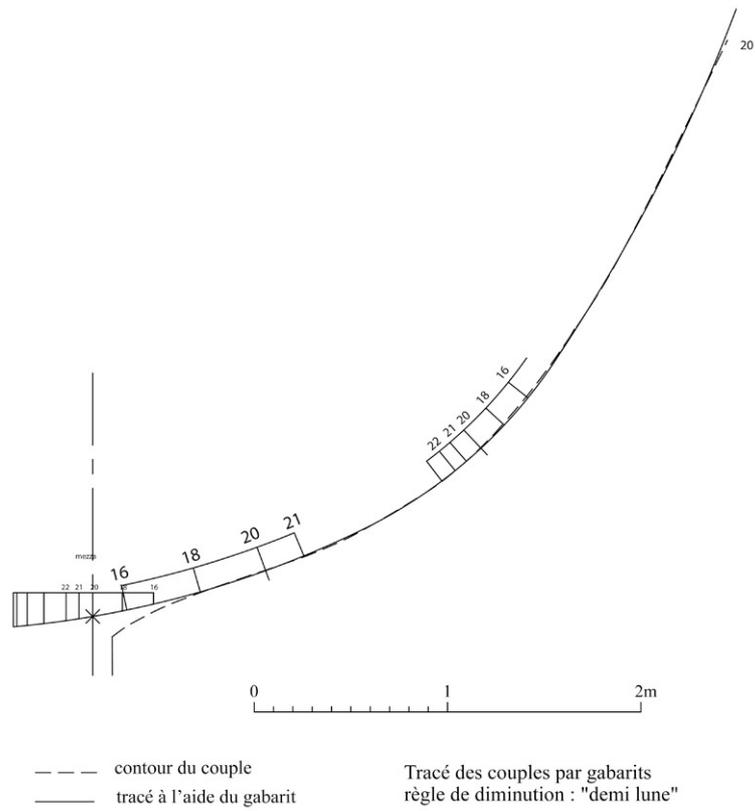


Figure 14 – Validation des gabarits par comparaison des deux tracés.

Après validation des règles de conception, les différents gabarits sont entièrement reconstitués en tenant compte de l'épaisseur des membrures (fig. 15), puis ceux-ci sont utilisés afin de retracer les varangues genoux et allonges afin de mieux comprendre leur utilisation et valider une dernière fois ces outils reconstitués (fig. 16).

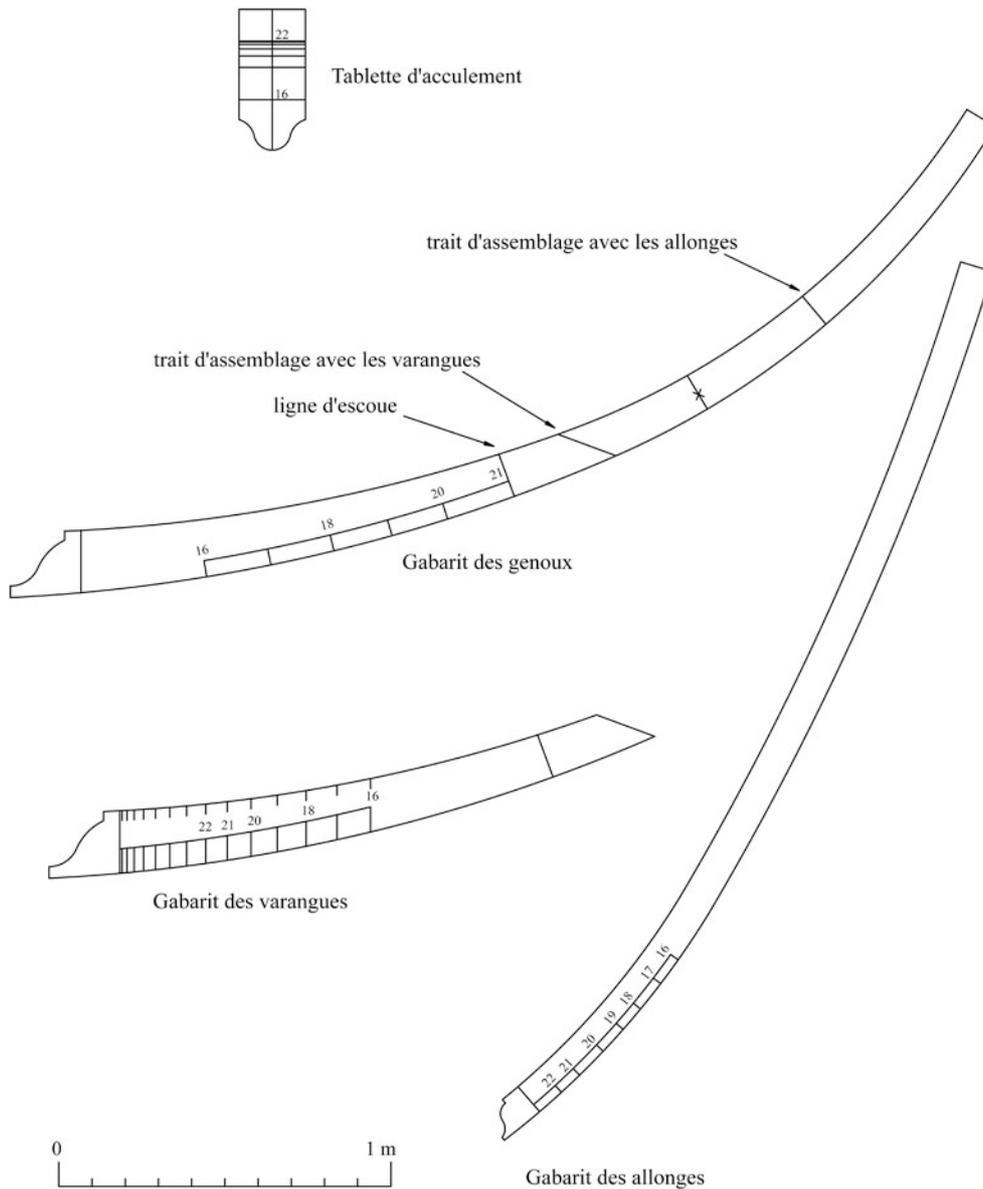


Figure 15 – Gabarits reconstitués de l'épave Calvi I.

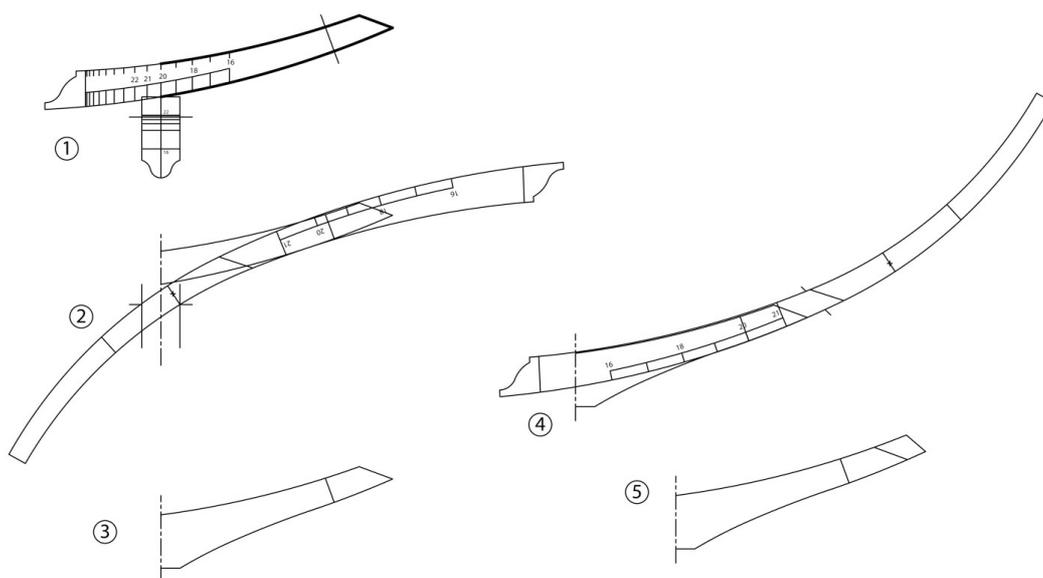


Figure 16 – Reconstitution de l'usage des gabarits pour le tracé des couples.

### La conception de la partie arrière de la coque

Des lisses sont utilisées pour la conception des formes de carène, entre le couple de balancement et l'étambot. La recherche de celles-ci se fait essentiellement par une étude précise des vestiges archéologiques. L'exemple de l'étude de l'épave de Red Bay a montré que l'observation attentive du cloutage sur les couples permet de retrouver certaines lisses<sup>12</sup>.

Le relevé complet du cloutage n'ayant pu être effectué sur l'épave *Calvi I*, nous travaillons sur le relevé des couples.

Des gabarits associés aux lisses ont pu être utilisés, on vérifiera donc si les rayons des arcs composants ces fourcats genoux et allonges restent constants.

La recherche de la lisse des fourcats fait appel aux relevés de l'épave, cette lisse matérialisant l'extrémité supérieure de ces fourcats (*fig. 17*). L'étude de la géométrie des fourcats nous apprend qu'un seul arc a été utilisé pour leur tracé, indiquant l'usage probable d'un gabarit (*fig. 18*).

12. B. Loewen, Le baleinier basque de Red Bay, Labrador (XVI<sup>e</sup> siècle). Étude du cloutage dans les murailles de la coque.

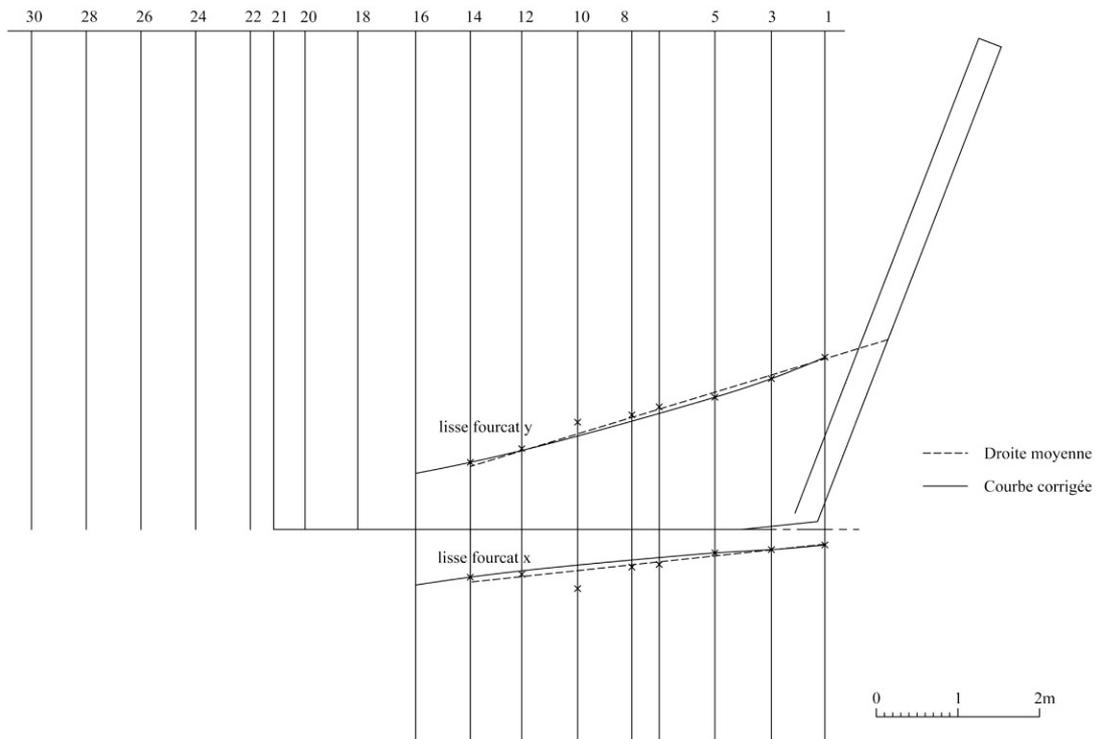


Figure 17 – Recherche des lisses des fourcats.

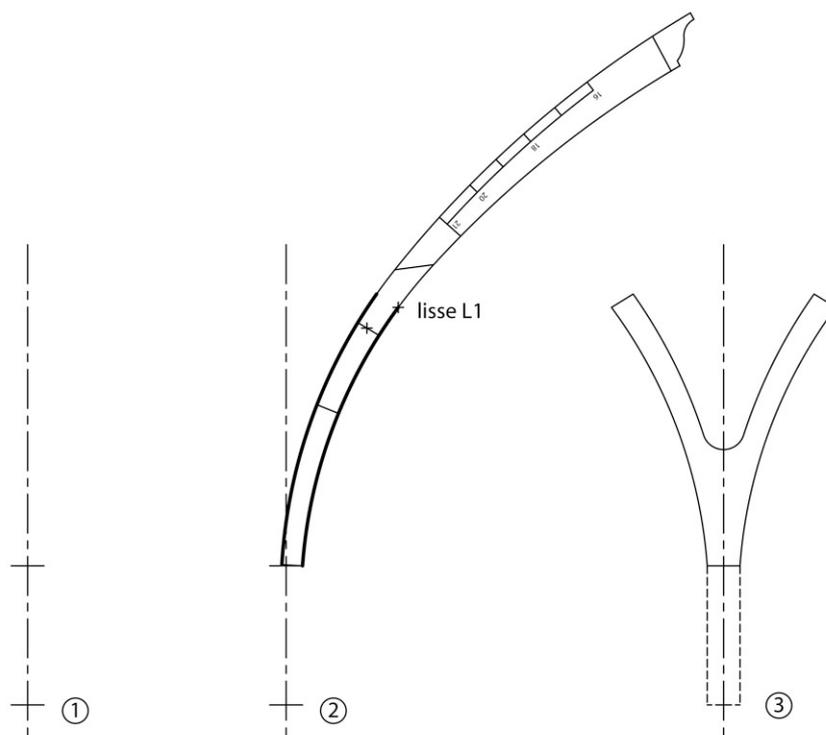


Figure 18 – Tracé des fourcats par lisse et gabarit.

Les genoux sont généralement tracés grâce à deux ou trois lisses selon qu'un gabarit est utilisé ou non. La lisse inférieure peut être recherchée aux environs du changement de courbure du couple. La lisse supérieure doit être circonscrite à la limite supérieure des genoux. Dans ce cas également, l'analyse des vestiges archéologiques joue un rôle primordial. L'analyse géométrique des genoux indique que ceux-ci sont tracés à l'aide des mêmes arcs que ceux employés au maître couple indiquant l'usage probable d'un gabarit.

En nous appuyant sur les méthodes de tracé en usage sur les galères du XVII<sup>e</sup> siècle<sup>13</sup>, et sur l'étude des arcs composant les genoux nous pouvons trouver la lisse inférieure et reconstituer le gabarit. Cette lisse se situe à un point particulier appelé point de rebroussement entre deux arcs<sup>14</sup> (fig. 19).

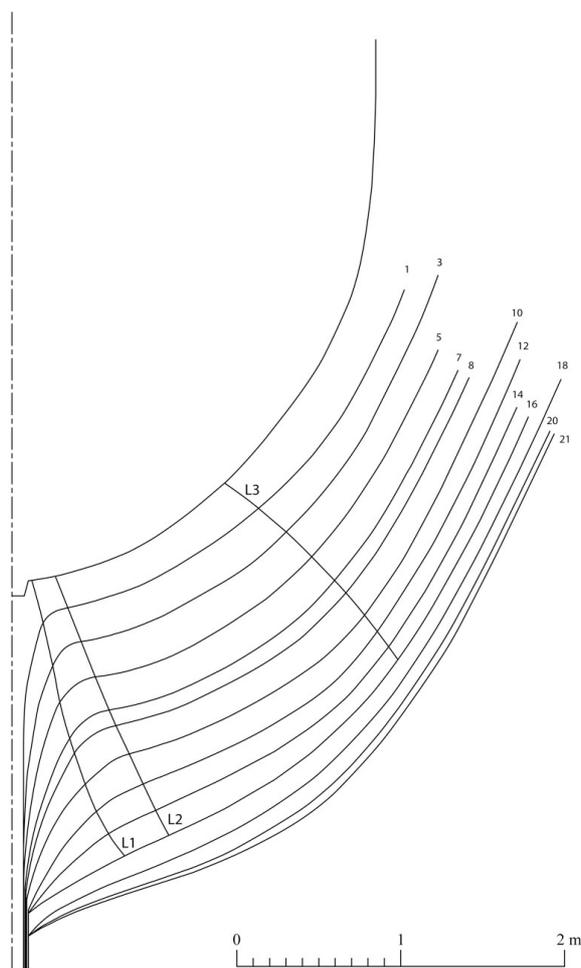


Figure 19 – Position des lisses L1, lisse des fourcats, L2 et L3, lisses des genoux.

La recherche du gabarit se fait de façon similaire à l'étude de la partie centrale de la coque, en mesurant les déplacements angulaires des arcs (fig. 20). La reconstitution du gabarit indique un réemploi probable de celui utilisé pour la partie centrale de la coque (fig. 21).

13. J. Fennis, *op. cit.*, p. 19-26.

14. M. Daeffler, *Étude des méthodes de conception des bâtiments de commerce méditerranéens...*, *op. cit.*, p. 118-123.

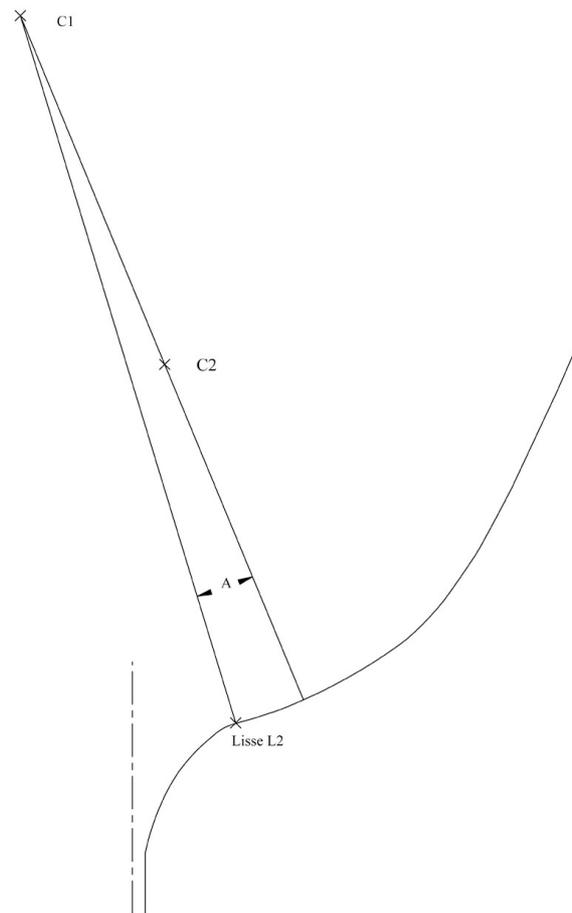


Figure 20 – Mesure du déplacement angulaire des arcs des genoux arrière ou « de revers ».

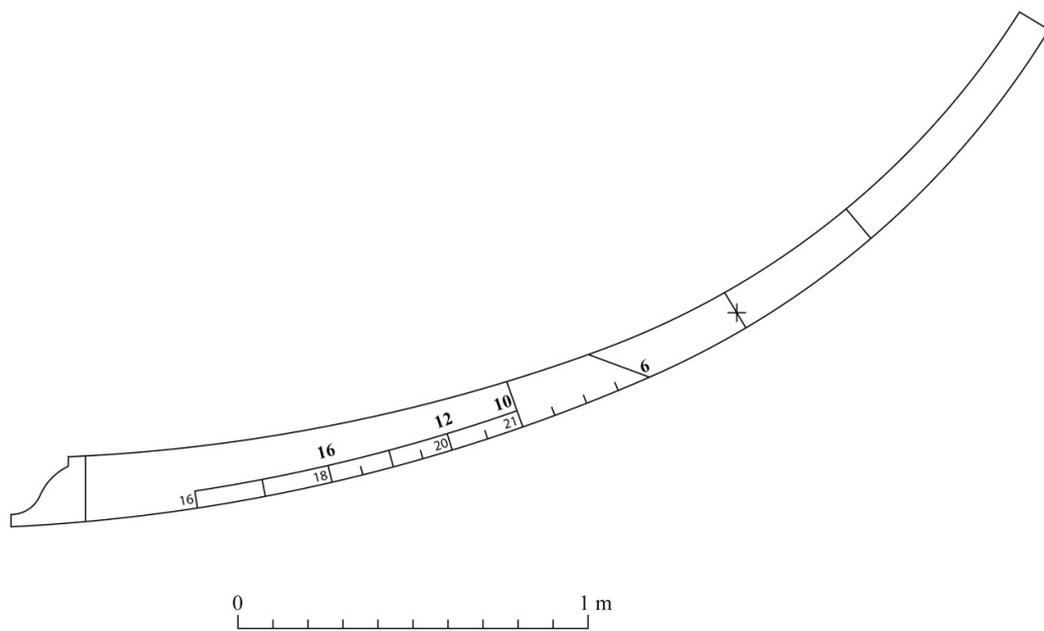


Figure 21 – Reconstitution du gabarit des genoux de revers.

L'étude des déplacements angulaires des arcs composant les allonges nous permet de reconstituer leur gabarit (fig. 22). Nous remarquons également un réemploi du gabarit utilisé dans la partie centrale du navire (fig. 23).

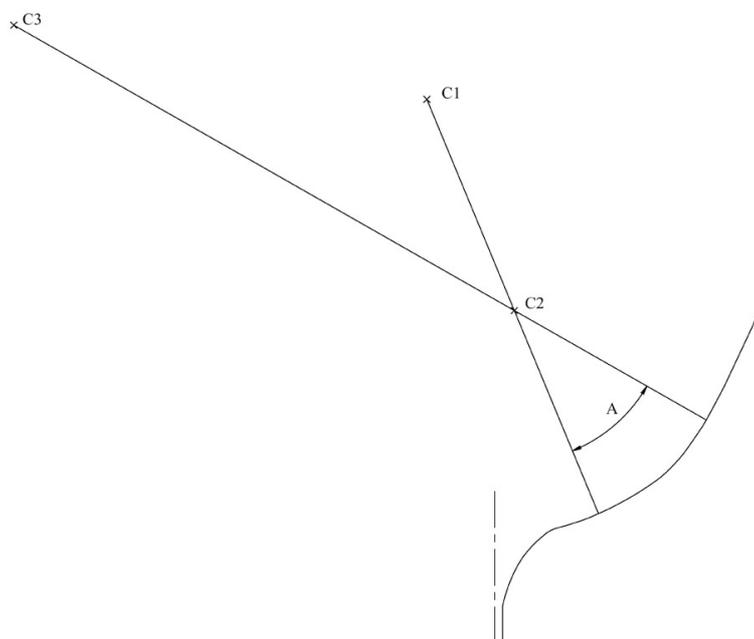


Figure 22 – Mesure des déplacements angulaires des arcs composant les allonges de l'arrière.

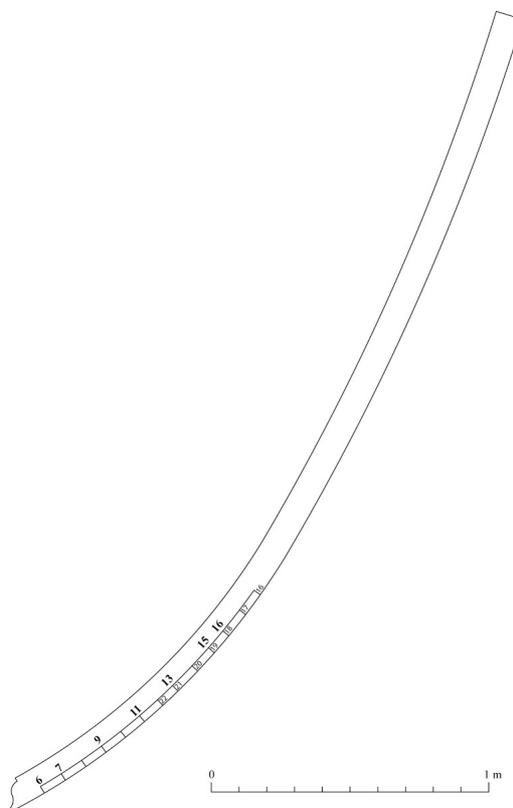


Figure 23 – Reconstitution du gabarit des genoux de revers et de leurs allonges.

Le travail de vérification est ensuite effectué afin de valider les méthodes de conception reconstituées pour la partie arrière de la coque. Ces différents gabarits sont employés pour le tracé des fourcats, des genoux et des allonges, puis comparés avec les relevés de l'épave (*fig. 24*).

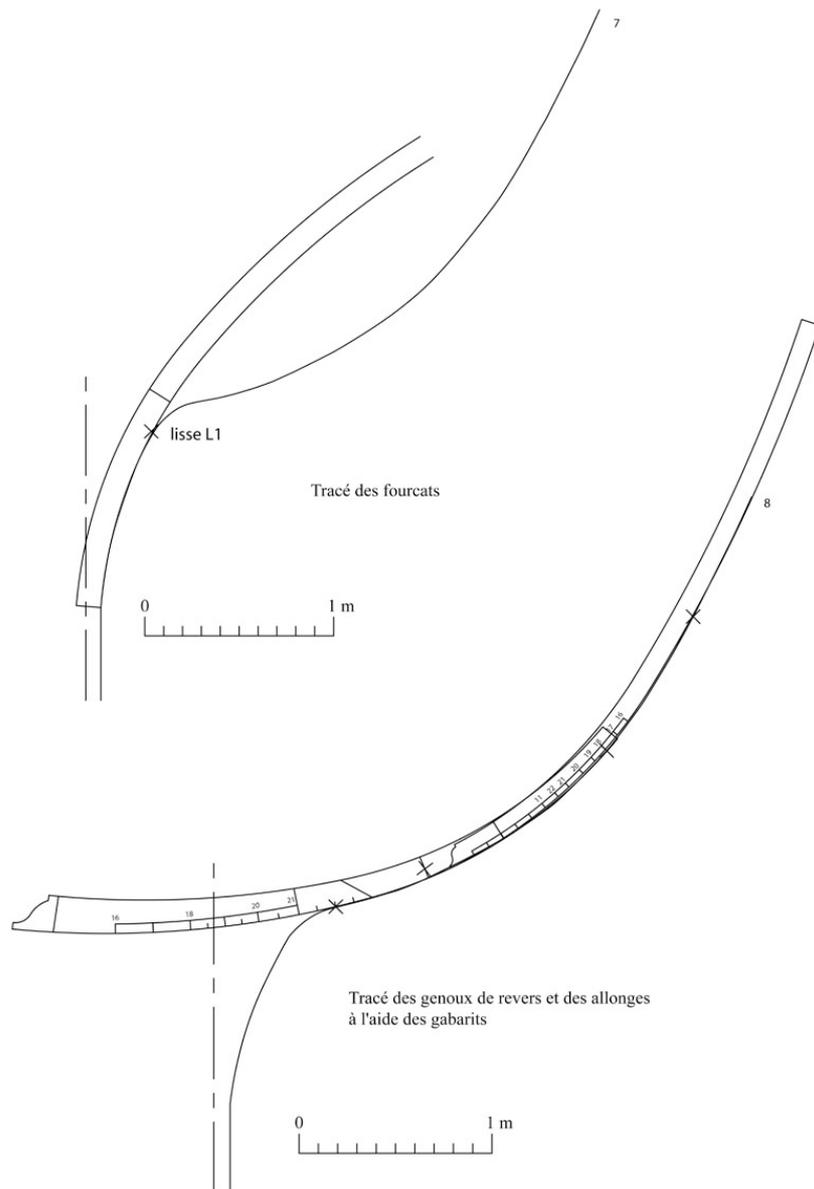


Figure 24 – Tracé des membrures arrière à l'aide des gabarits.

Par un dialogue constant entre les sources d'archives et archéologiques, il a été possible de mettre au point une méthode permettant de « lire » dans la charpente d'une épave les indices permettant de retrouver les méthodes de conception d'un charpentier de la fin du XVI<sup>e</sup> siècle. Ces méthodes de conception reconstituées peuvent, à présent, être employées pour tenter de restituer l'ensemble du navire.

## Reconstitution du navire

### Reconstitution tridimensionnelle

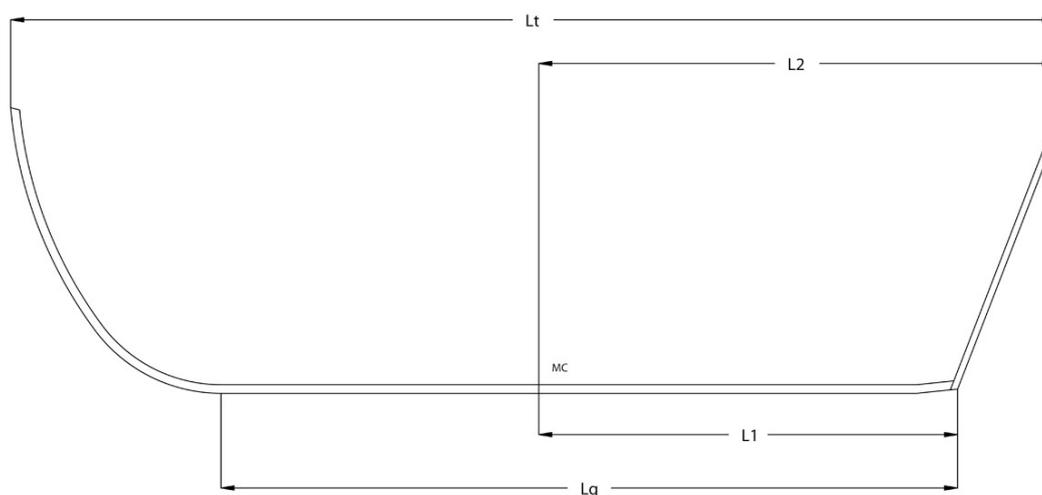
Avant d'entamer la reconstitution de l'ensemble de la coque, nous devons retrouver les principales caractéristiques du navire :

- longueur de la quille ;
- longueur de l'étrave à l'étambot ;
- largeur au maître couple ;
- creux ou hauteur depuis le dessus de la quille jusqu'au bord supérieur du bau ;
- nombre et position des ponts.

Pour cela, nous nous référerons de nouveau aux sources écrites et archéologiques et confronterons les données fournies par ces dernières à celles fournies par l'épave.

### Détermination des longueurs du navire

Pour ce travail de reconstitution, nous nous basons, d'une part, sur la position du maître couple par rapport au talon de la quille et, d'autre part, sur sa position par rapport à l'extrémité de l'étambot (fig. 25). La longueur de la quille ( $Lq$ ) est déduite de la proportion  $L1/Lq$ ,  $L1$  étant la distance entre le maître couple et le talon de quille. La longueur de l'étrave à l'étambot ( $Lt$ ) sera déduite de la proportion  $L2/Lt$ ,  $L2$  étant la distance depuis le maître couple jusqu'à l'extrémité de l'étambot.



- Modèle 1 : nao de 155 toneladas (Instruccion Nautica, 1587)
- Modèle 2 : nao de 100 toneladas (Instruccion Nautica, 1587)
- Modèle 3 : nao de 400 toneladas (Instruccion Nautica, 1587)
- Modèle 4 : nave méditerranéenne (Nautica méditerranea, 1607)
- Modèle 5 : nave vénitienne (Instruccion sul modo di fabricare galere, 1550)
- Modèle 6 : nao portugaise (Livro da fabrica das naos, 1570)

Figure 25 – Reconstitution dimensionnelle : données de base.

Nous utiliserons pour cette étude plusieurs modèles provenant de sources italiennes, espagnoles et portugaises.

La première de ces sources est un ouvrage écrit par le juriste espagnol Diego Garcia de Palacio et publié à Mexico en 1587 : *Instruccion nautica para navegar*. Cet ouvrage, le premier traité imprimé sur l'architecture navale, décrit, entre autres, trois bâtiments de commerce, une nao de quatre cents toneladas, une nao de cinquante à cent toneladas et une nao de cent cinquante-cinq toneladas. Ces trois navires constituent nos trois premiers modèles.

Le quatrième modèle sera fourni par l'ouvrage de Bartolomeo Crescentio, *Nautica mediterranea*, publié en 1607 dans lequel il décrit notamment un grand bâtiment de commerce.

Le cinquième modèle est obtenu à partir de données du manuscrit vénitien *Instructione sul modo di fabricare galere*, écrit vers 1550 par le constructeur Pre Theodoro de Nicolo. Le folio 27 décrit un bâtiment de commerce ou « nave » de dix pas de quille<sup>15</sup>.

Le dernier modèle est fourni par un manuscrit portugais écrit par le père Fernando Oliveira vers 1580 : *O livro da fabrica das naos*. Cet ouvrage divisé en neuf chapitres décrit au huitième chapitre, la construction d'un grand navire de charge.

Les valeurs de longueur entre l'étrave et l'étambot et de la longueur de quille obtenues à partir de ces modèles sont ensuite reportées sur deux graphiques. Ces derniers, l'un concernant les longueurs de quille et l'autre les longueurs entre l'étrave et l'étambot (fig. 26), nous donnent deux limites entre lesquelles se situent les longueurs recherchées.

### Détermination du creux, de la largeur et du nombre de ponts

Le premier pont étant conservé, il est aisé de retrouver le creux par prolongement de sa courbure et en recherchant une tangence horizontale au niveau du maître couple.

La largeur du navire et le nombre de pont sont relativement liés. La forme du maître couple étant connue, la largeur dépend de la hauteur à laquelle cette forme doit être prolongée. Afin de retrouver le nombre de ponts, la comparaison avec d'autres sources peut nous apporter des informations complémentaires. Tout d'abord, des sources archéologiques, telle l'épave de Red Bay, fouillée de 1978 à 1985 par l'équipe de Parks Canada<sup>16</sup>. Cette épave est celle d'un navire baleinier basque naufragé au Labrador en 1565, d'une dimension voisine de l'épave de Calvi.

15. 1 pas = 5 pieds, 1 pied vénitien = 0,3477 mètre, donc une quille de 10 pas correspond à une longueur de 17,38 mètres.

16. R. Grenier, *The basque whaling ship from Red Bay, Labrador*, p. 269.

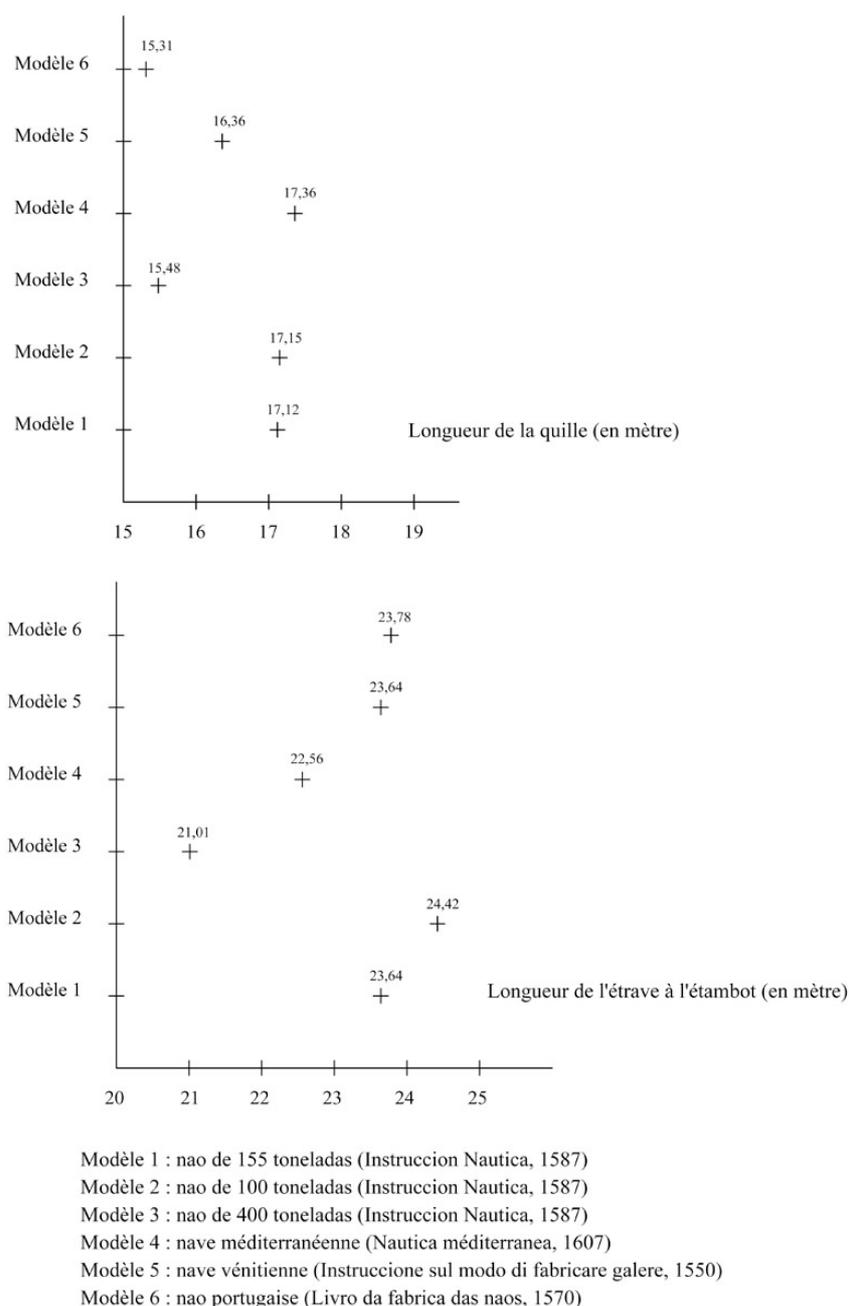


Figure 26 – Détermination des longueurs de la coque.

Les sources d'archives sont également mises à contribution, tel le carnet de notes du constructeur vénitien Pre Theodoro de Nicolo, afin d'obtenir des informations sur des navires non seulement vénitiens et italiens, mais également basques et portugais<sup>17</sup>. L'étude de ces différentes sources aboutissant à la possibilité d'un navire à trois ponts, nous nous tournons vers une étude graphique afin de vérifier si cette hypothèse architecturale peut s'inscrire dans la coque en cours de reconstitution (*fig. 27* et *fig. 28*). La largeur de la coque est dès lors obtenue en la mesurant sur le maître couple reconstitué.

17. M. Daeffler, *Étude des méthodes de conception des bâtiments de commerce méditerranéens...*, *op. cit.*, p. 153-157.

Nous disposons à présent de tous les éléments pour reconstituer l'ensemble des formes de carène.

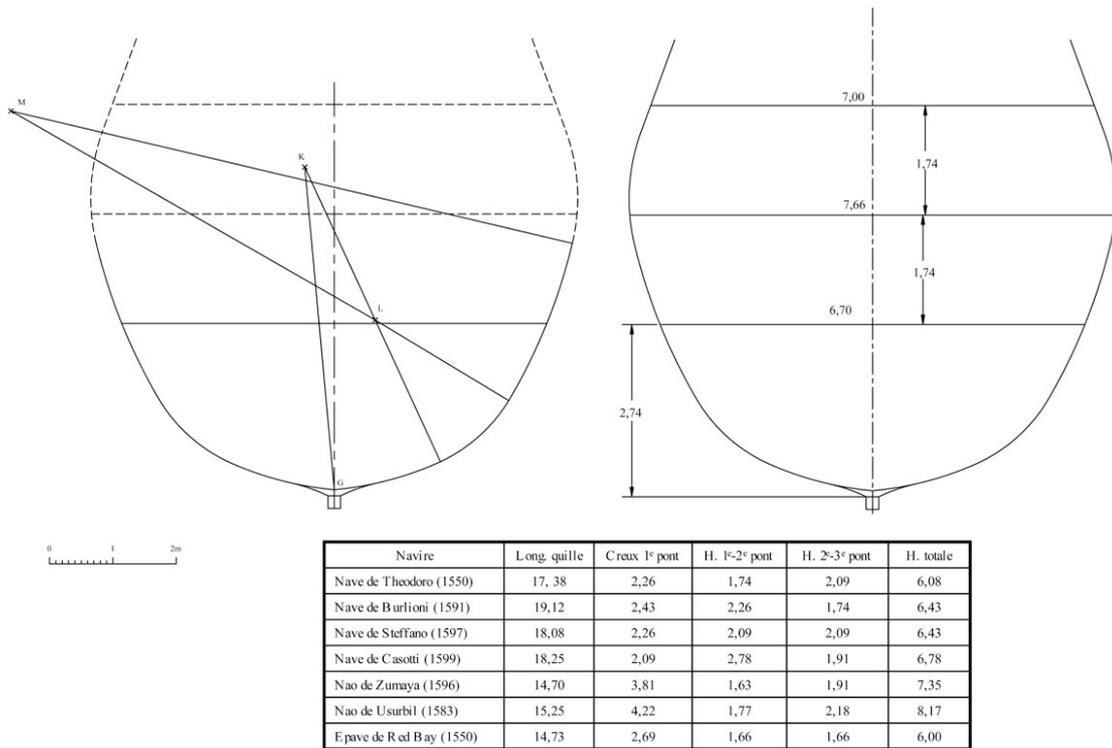


Figure 27 – Reconstitution de l'ensemble du maître couple.

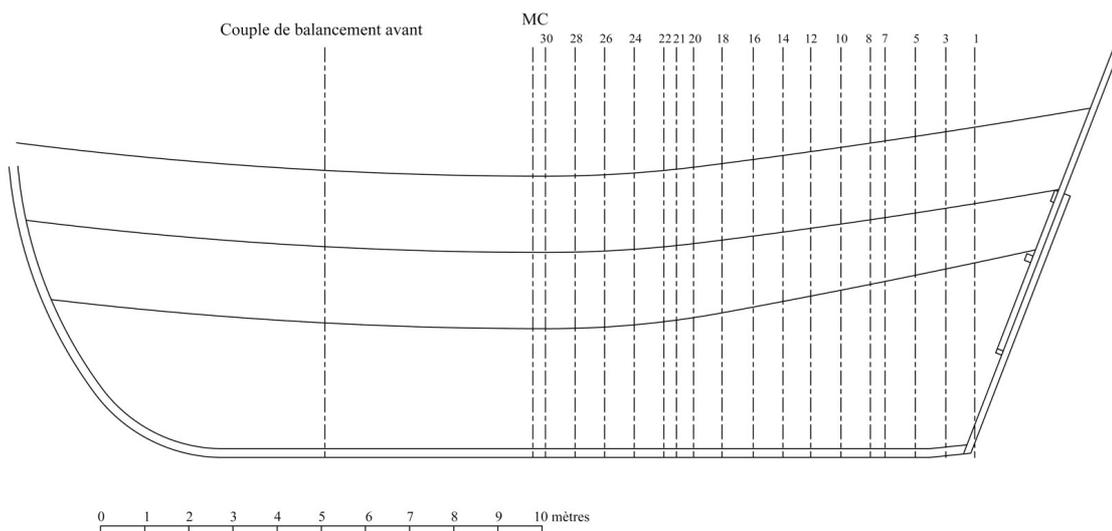


Figure 28 – Hypothèse de tracé des ponts.

## Reconstitution des formes de carène

Ayant restitué les principales dimensions du navire, la reconstitution des formes de l'ensemble de la carène peut être tentée.

La méthode de conception étant reconstituée pour l'arrière du navire, il est possible de restituer les formes en avant du maître couple en s'aidant des règles de conception décrites dans plusieurs traités méditerranéens du XVI<sup>e</sup> et du XVII<sup>e</sup> siècles<sup>18</sup>. Nous reconstituons tout d'abord le couple de balancement avant. Nous nous basons pour cela sur les règles de conception découvertes pour la partie arrière du navire. La comparaison avec les informations fournies par le traité de Pre Theodoro de Nicolo nous permet de définir les données de base pour tracer ce couple essentiel : largeur au plus large, largeur du fond et creux (*fig. 29* et *fig. 30*). La position de ce couple nous étant donnée par Theodoro de Nicolo, la reconstitution des formes de carène s'effectue d'abord grâce à un travail de lissage des œuvres vives de la coque, puis par les œuvres mortes (*fig. 31*). La reconstitution finale peut alors être achevée et aboutir à un plan des formes de carène (*fig. 32*).

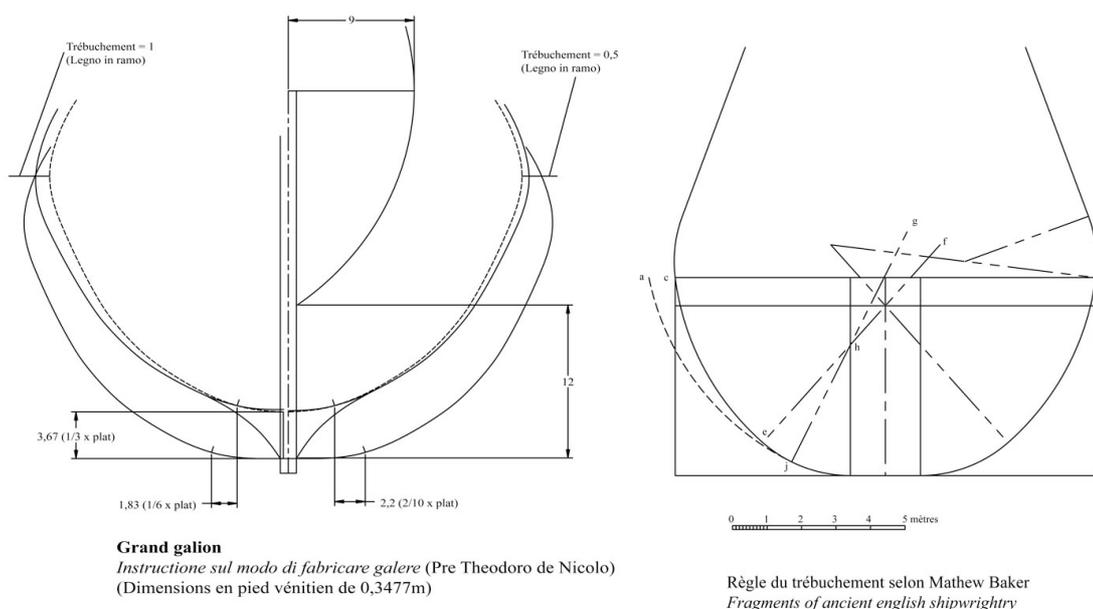


Figure 29 – Règle de tracé du couple de balancement d'après des sources du XVI<sup>e</sup> siècle.

18. Nous nous sommes principalement fondés sur le manuscrit de Theodoro de Nicolo, *Instructione sul modo di fabricare galere*, Ms. It. IV. 26 (= 5131), biblioteca nazionale marciana, Venise ; le carnet de notes du constructeur anglais Mathew Baker, *Fragments of ancient english shipwrighty*, PL 2820, Magdalene College, Cambridge, et le traité sur les galères françaises de la fin du XVII<sup>e</sup> siècle, *Traité de la construction des galères*, SH 134, archives de la Marine, Vincennes.

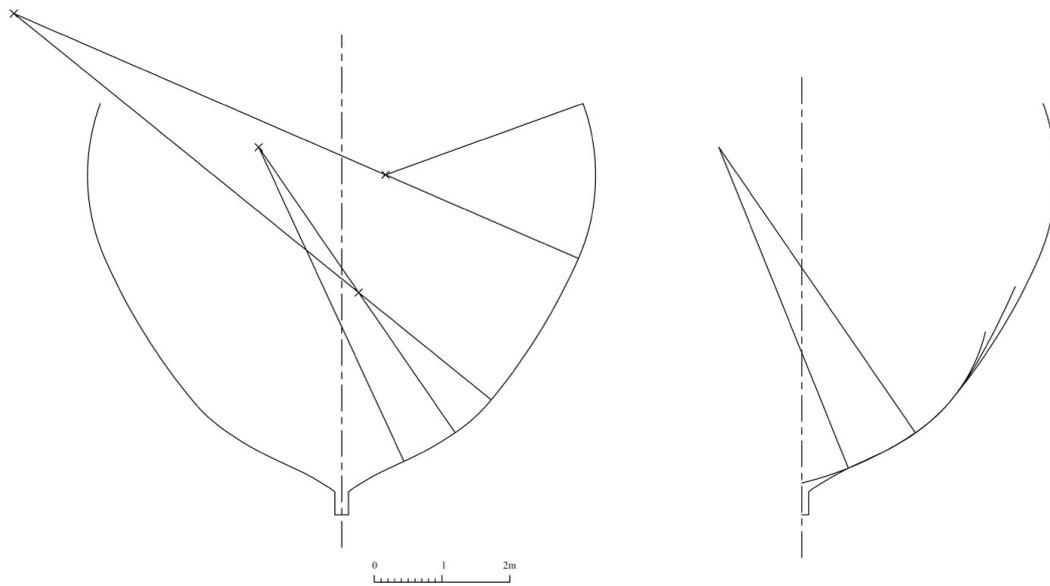


Figure 30 – Reconstitution du couple de balancement avant.

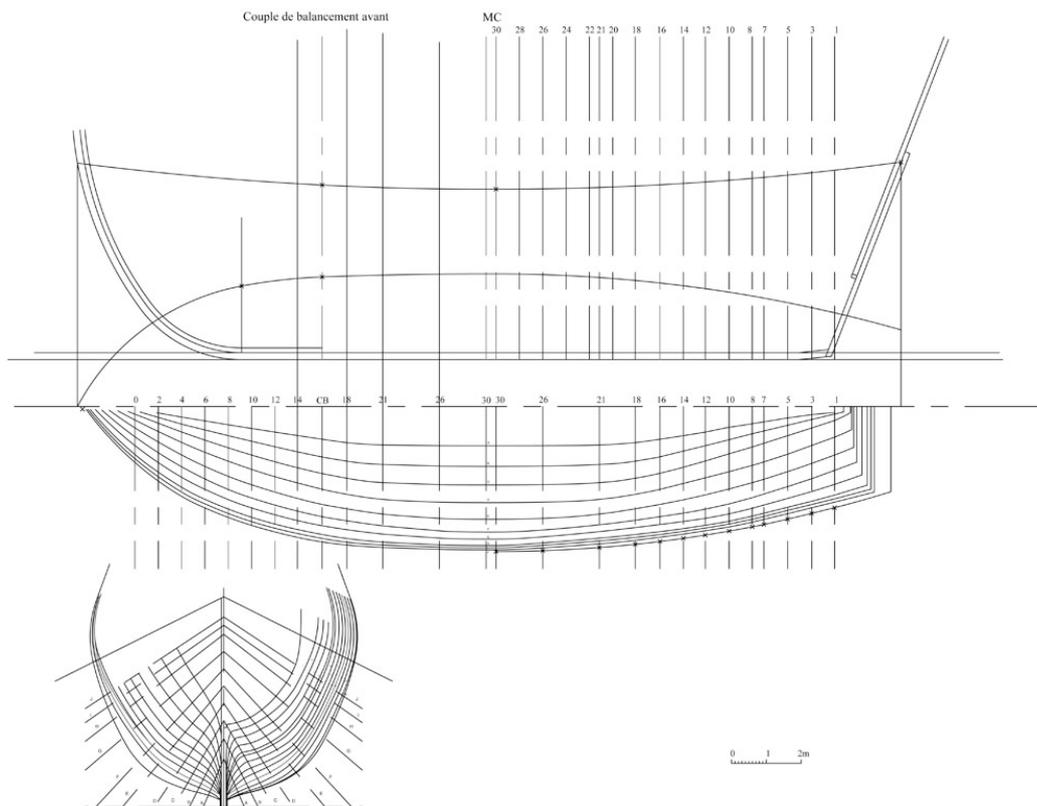


Figure 31 – Lissage des formes de la carène.

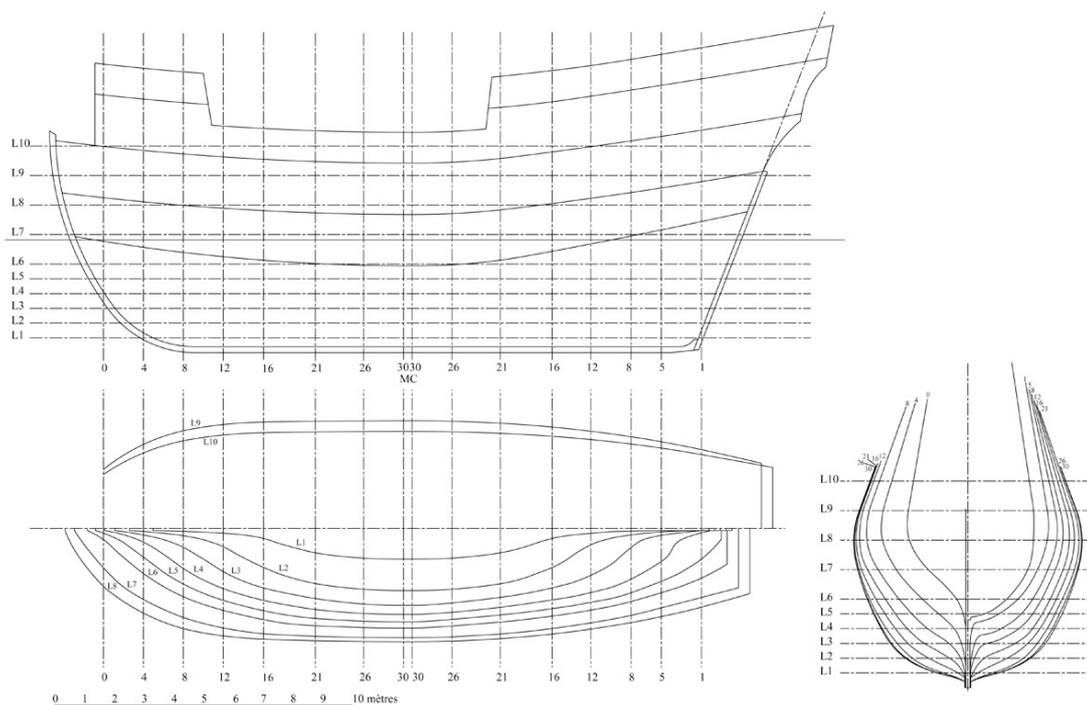


Figure 32 – Plan des formes de carène du navire reconstitué.

### Analyse du navire reconstitué

Nous disposons de logiciels d'architecture navale conçus pour réaliser des navires actuels, calculer leur structure, répartir les masses avec précision à l'intérieur de la coque, calculer leur stabilité dans différentes conditions de mer et de navigation. Ces outils peuvent également servir à l'étude des navires anciens dont nous pouvons analyser les caractéristiques nautiques de la même manière qu'un navire moderne<sup>19</sup>.

Le logiciel employé, Maat 2005, a été développé par Marc Pommelet. Il permet, entre autres choses, de concevoir et de tracer des carènes en trois dimensions. Nous obtenons également les courbes hydrostatiques, le calcul de la stabilité du navire. Dans cette étude, Maat 2005 est employé pour tester le modèle de coque reconstitué avec Autocad grâce notamment à ses possibilités de simulation. Nous pouvons faire évoluer, d'une part, la position du centre de gravité de la coque dans le cas de chargements différents du navire et, d'autre part, la position de sa ligne de flottaison, dans le cas d'une masse du navire plus ou moins importante. Nous pouvons ainsi vérifier les limites de stabilité du modèle reconstitué et ainsi mieux comprendre les choix du constructeur dans la conception de son navire afin qu'il remplisse au mieux la fonction pour laquelle il a été construit.

Cette analyse est effectuée en collaboration avec l'architecte naval Philippe Thomé. Cette association entre l'historien et l'architecte naval est essentielle pour mener à bien cette étude. L'historien apporte les données d'archives concernant la manière de charger le navire et ses conditions d'utilisation. L'architecte naval apporte toute sa compétence, son expérience et ses connaissances dans le choix des paramètres pour l'analyse de la carène.

19. M. Daeffler, *Formes de carène et navires de combat*, p. 181-229 ; U. Alertz, *The venetian merchant galley and the system of partisoni. Initial steps towards Modern ship design* ; U. Alertz, *The naval architecture and oars systems of medieval and later galleys*.

Ce travail est un incessant dialogue permettant de déterminer les différents paramètres de chargement du navire, puis d'interpréter les résultats obtenus.

Le modèle d'analyse en trois dimensions est tout d'abord réalisé par Philippe Thomé à partir du plan de formes en 2D tracé sous Autocad. Le navire virtuel en 3D sert de base pour la création de la surface de la coque, comme si nous plaçons sur cette structure une peau élastique épousant les formes de la coque (fig. 33). Le modèle utilisé pour le calcul apparaît ensuite sous la forme d'une succession de sections transversales (fig. 34). Avec ce modèle, le menu « hydrostatique » apparaît à l'écran, mettant à notre disposition les commandes d'analyse de la coque. Nous commençons notre analyse par celle des caractéristiques hydrostatiques de la carène, permettant d'effectuer des comparaisons avec d'autres navires de la même période, à l'aide de plusieurs coefficients.

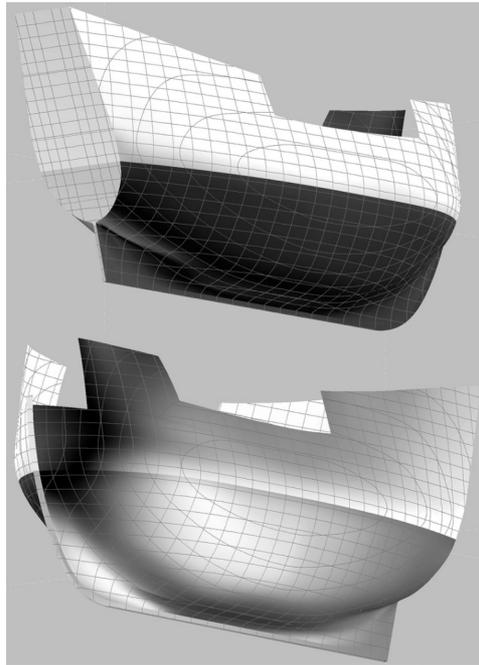


Figure 33 – Modèle d'analyse 3D, réalisé à partir du plan de formes.

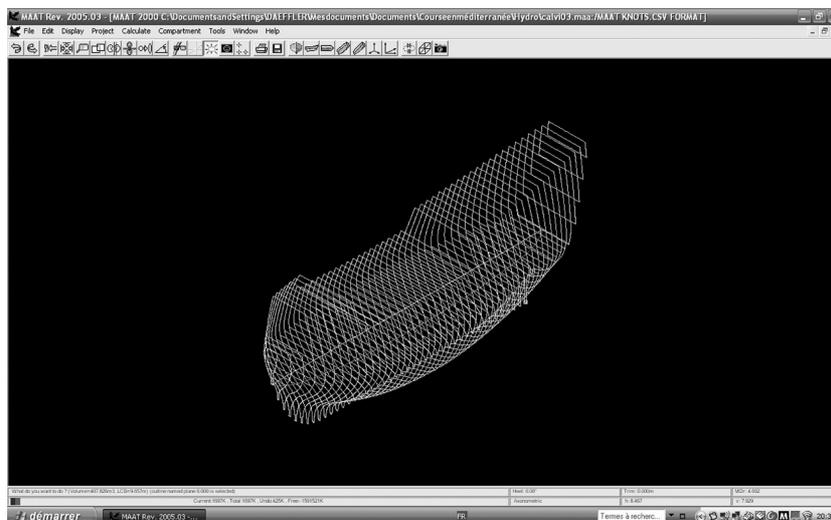


Figure 34 – Modèle pour les calculs des caractéristiques hydrostatiques et de la stabilité.

Le coefficient prismatique (CP) représente le rapport entre le volume de la carène et celui d'un cylindre ayant même longueur et même section que la partie immergée du maître couple.

Le coefficient bloc (CB) est le rapport entre le volume immergé et le parallélogramme circonscrit.

Le coefficient de finesse correspond au rapport entre la longueur de la flottaison et la racine cubique du déplacement.

$$\Psi = \frac{\text{Longueur flottaison}}{\sqrt[3]{\text{déplacement}}}$$

Nous définissons tout d'abord la position de la ligne de flottaison, celle-ci n'ayant pas pu être déterminée sur l'épave (fig. 35). Pour cela, nous nous tournons vers d'autres études effectuées sur des bâtiments semblables<sup>20</sup>. Avec le choix de ces paramètres, nous entrons dans une phase expérimentale de notre « navire virtuel » où nous pouvons nous permettre de le placer dans des situations critiques.

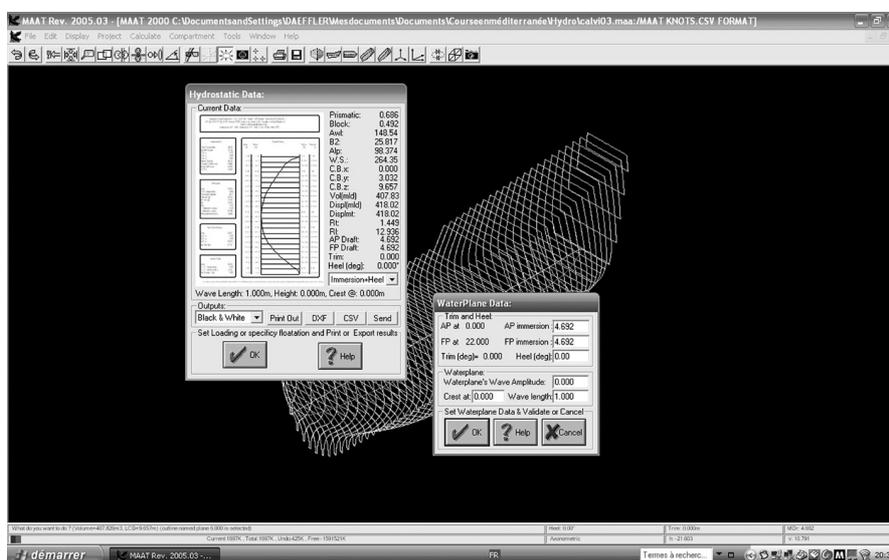


Figure 35 – Détermination de la ligne de flottaison pour le calcul des caractéristiques hydrostatiques.

Le choix de la flottaison effectué, nous obtenons plusieurs caractéristiques de notre carène, comme le déplacement, les coefficients bloc, prismatique, de finesse... Ces dernières peuvent alors être comparées avec celles d'autres navires connus ou d'autres études<sup>21</sup> (fig. 36).

20. G. Wilson, Computer documentation and analysis of historic ship design ; R. Bulet et E. Rieth, Essai de restitution d'une carène d'un bâtiment de quatre cents toneladas, d'après Diego Garcia de Palacio (1587), p. 480 ; M. Daeffler, *Formes de carène et navires de combat*, op. cit., p. 193-194.

21. M. Daeffler, Portrait d'une victime : la « nave » de commerce méditerranéenne du XVI<sup>e</sup> siècle.

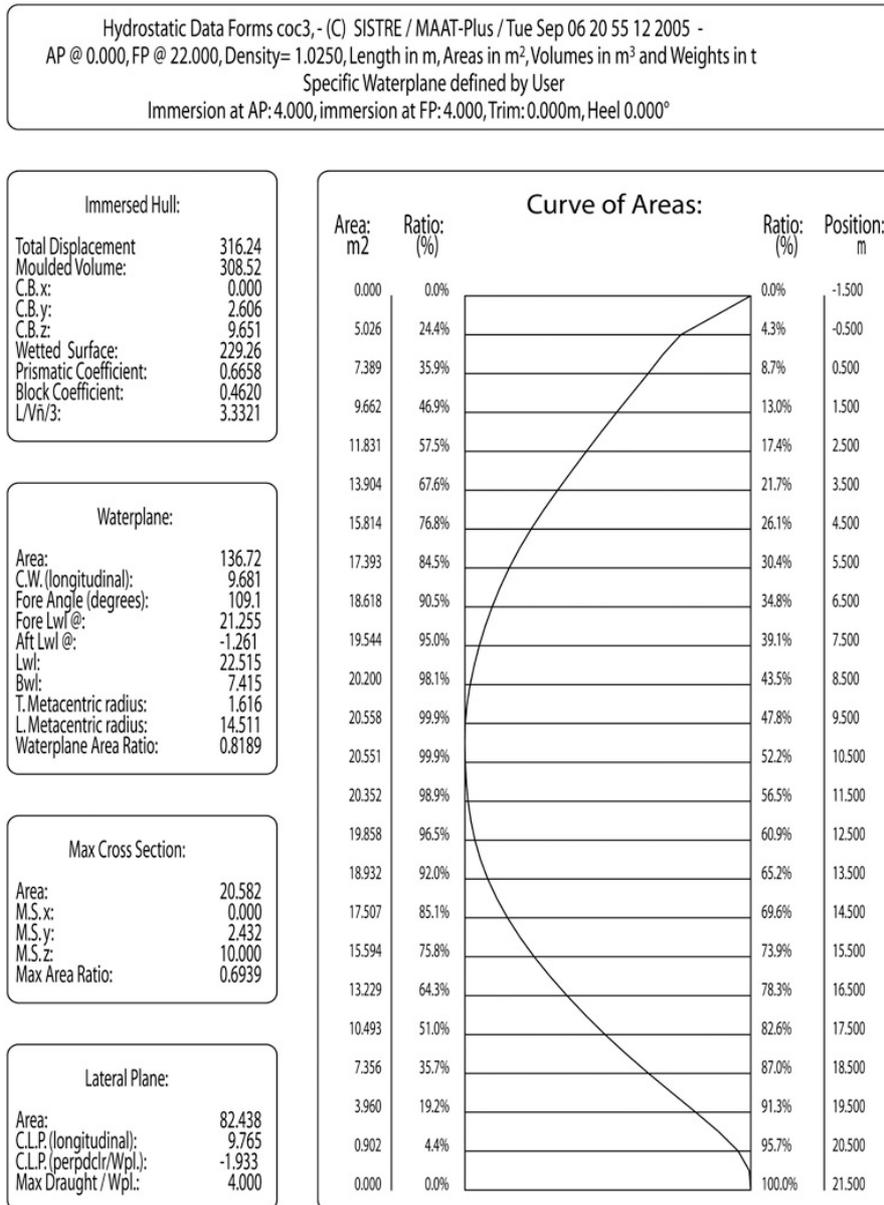


Figure 36 – Caractéristiques hydrostatiques pour une flottaison donnée.

Nous définissons ensuite les paramètres pour le calcul de la stabilité transversale : la charge du navire en tonnes et la position du centre de gravité. Dans ce cas également, l'expérience de l'architecte naval est essentielle car, sans connaître la répartition des masses dans la coque, il n'est pas possible de définir précisément la position du centre de gravité. Nous nous aidons également de traités anciens, tel les *Éléments de l'architecture navale* de Duhamel du Monceau<sup>22</sup> et d'études récentes, tel que *Le Vaisseau de 74 canons* de Jean Boudriot<sup>23</sup>. Un compromis a pu être obtenu en établissant le centre de gravité au niveau de la flottaison (fig. 37).

22. H.-L. Duhamel du Monceau, *Éléments de l'architecture navale ou traité pratique de la construction des vaisseaux*, p. 437.

23. J. Boudriot, *Le vaisseau de 74 canons*, p. 30-31.

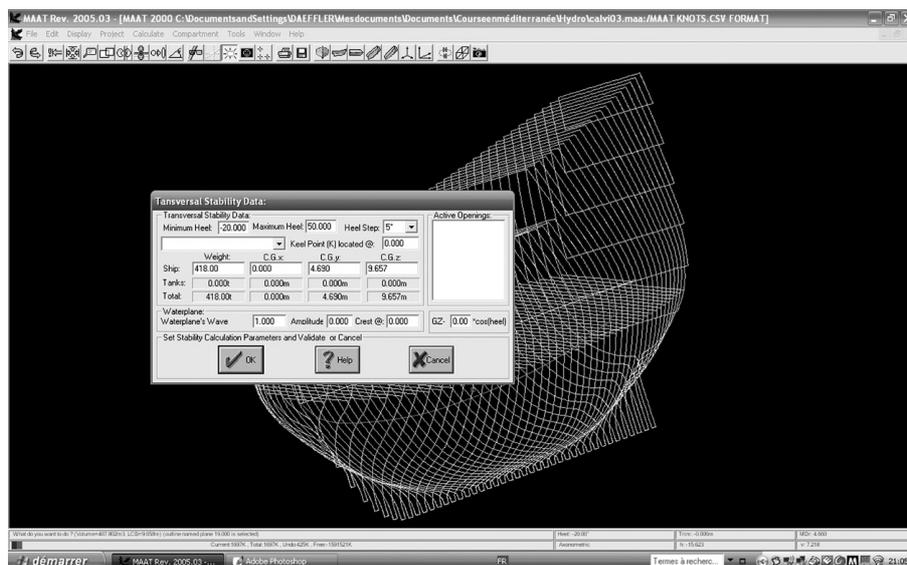


Figure 37 – Détermination du chargement du navire pour le calcul de la stabilité.

Le calcul effectué, le logiciel nous donne les résultats de la simulation et la courbe de stabilité (fig. 38). L'analyse de cette courbe, selon qu'elle est positive ou négative, révèle un bâtiment stable ou instable. D'autres simulations de stabilité peuvent être effectuées, en faisant évoluer les paramètres précédents. Par exemple, dans le cas de l'épave *Calvi I*, trois conditions de chargement ont été testés (fig. 39) :

- chargement des œuvres vives jusqu'au deuxième pont et embarquement de pièces d'artillerie pour la défense ;
- chargement maximum du navire, la ligne de flottaison étant au niveau du fort ;
- la ligne de flottaison toujours au niveau du fort, mais avec un chargement lourd sous le deuxième pont et des marchandises plus légères entre les deuxième et troisième ponts, le navire n'étant pas armé.

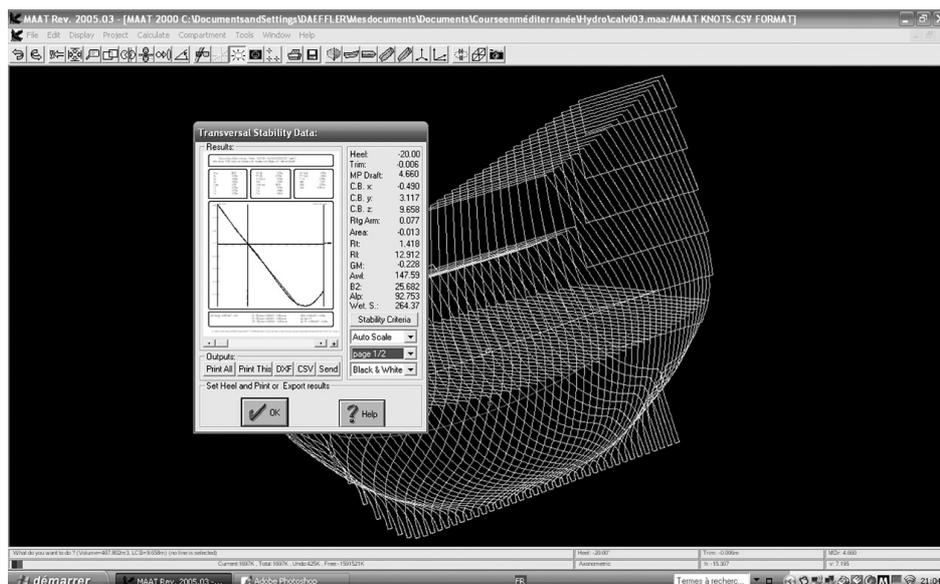


Figure 38 – Résultat du calcul de la stabilité et courbe de stabilité.

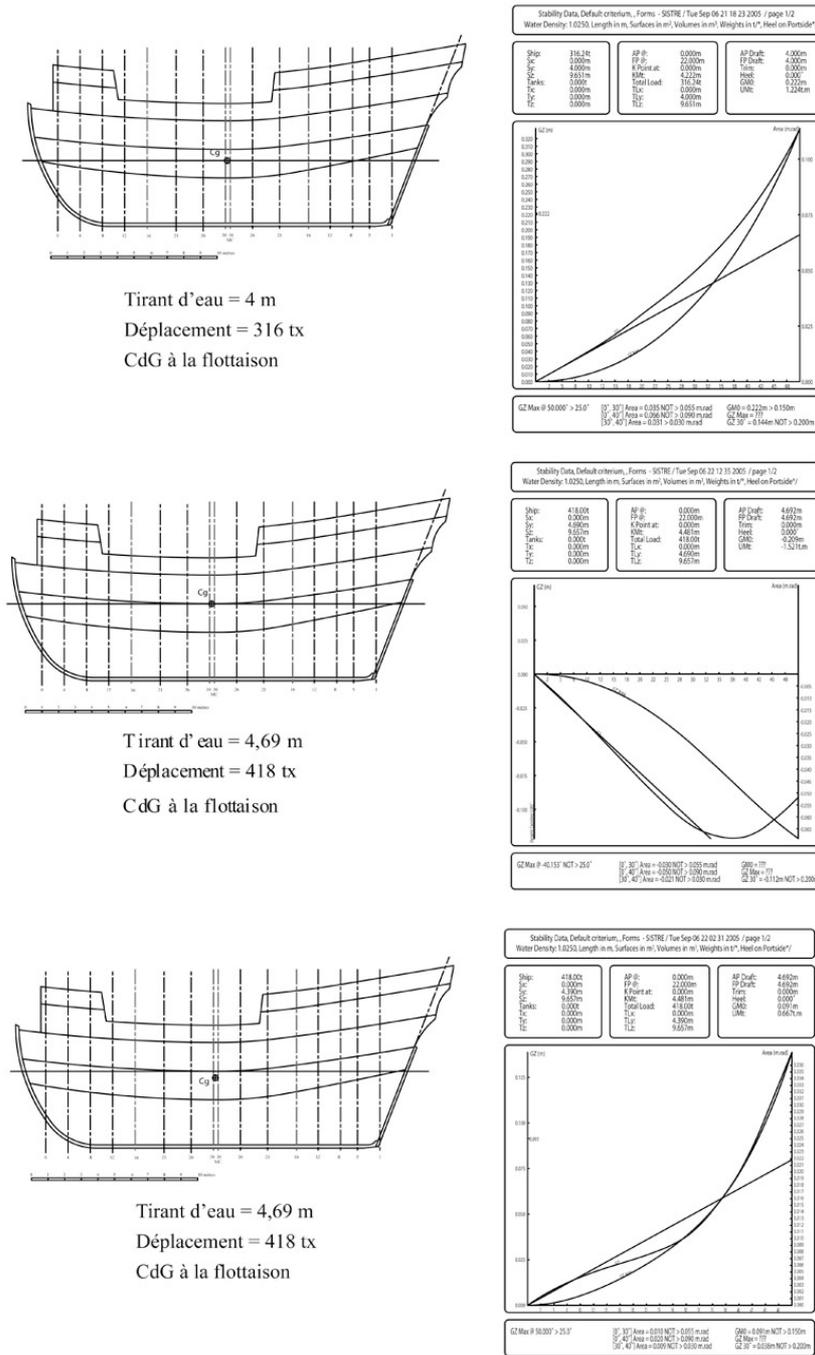


Figure 39 – Exemples de simulation de chargement du navire et les conséquences sur la stabilité.

La connaissance de l'architecture navale ancienne a fait de grand progrès depuis ces dernières années grâce à l'archéologie navale. Les épaves constituent des sources privilégiées dans la mesure où elles représentent les navires eux-mêmes. Nous sommes en mesure, grâce aux nouveaux outils informatiques, de les faire « parler », à l'aide des relevés appropriés pris lors de la fouille et adaptés à l'étude que l'on se propose de

mener. Une bonne connaissance « théorique » de l'architecture navale de l'époque médiévale et moderne ainsi que des sources archéologiques est indispensable afin d'établir les hypothèses de base nécessaires pour l'étude de l'épave. Cette méthode d'analyse fait appel, en outre, à des connaissances géométriques et mathématiques appliquées à l'architecture navale.

En l'absence de marques laissées par le charpentier, cette méthode étudie les caractéristiques géométriques des couples du navire afin d'en extraire les données permettant de reconstituer les méthodes de conception employées par le constructeur. Grâce aux logiciels de CAO, nous pouvons analyser la membrure et mesurer ses caractéristiques géométriques. Il est possible, dès lors, de reconstituer les gabarits puis, par des simulations informatiques, de les utiliser afin de valider les hypothèses émises lors de l'étude. Nous retrouvons ainsi la logique et le raisonnement d'un constructeur du XVI<sup>e</sup> ou du XVII<sup>e</sup> siècle dans l'élaboration des formes de carène de son navire. Nous accédons ainsi aux règles de conception employées sur les chantiers, données complémentaires et non contradictoires avec celles fournies par les sources d'archives, accroissant ainsi notre connaissance de l'architecture navale des XVI<sup>e</sup> et XVII<sup>e</sup> siècles. Les méthodes de conception, découvertes lors de cette étude, peuvent être mises en application pour la reconstitution du navire. Celui-ci constitue alors la base d'une nouvelle étude : estimer les qualités nautiques d'un navire disparu depuis quatre ou cinq siècles. Cette reconstitution aboutit à un modèle d'analyse en trois dimensions grâce à un logiciel d'architecture navale. Cette nouvelle étude est menée à bien grâce à l'association des compétences de l'historien et de l'architecte naval. Dès lors, plusieurs simulations sont effectuées. Nous pouvons ainsi expérimenter et appréhender le comportement du navire dans diverses configurations de navigation.

### *Résumé*

L'étude de l'architecture navale ancienne requiert des outils permettant d'analyser les sources, d'expérimenter les hypothèses architecturales, de réaliser des modèles d'étude (maquettes virtuelles) et de les « tester » en les soumettant à différentes conditions d'utilisation du navire et d'environnement maritime. Une telle méthode peut être appliquée à diverses recherches archéologiques ou historiques. L'exemple de l'épave *Calvi I*, datée de la fin du XVI<sup>e</sup> siècle, en est un bon exemple. L'usage de la conception assistée par ordinateur (CAO) a permis de rechercher les méthodes de conception des formes de carène, grâce à une analyse géométrique et topologique de l'ensemble des couples. Ce type d'analyse a permis de reconstituer les outils de tracé de la membrure et de les utiliser comme de véritables instruments virtuels pour la reconstitution de la coque.

L'emploi de logiciels d'architecture navale facilite beaucoup l'étude des anciennes charpentes navales. En nous appuyant sur des sources archéologiques, telles que les épaves de Saint-Vaast-la-Hougue et des documents d'archives, nous pouvons reconstituer en trois dimensions chaque pièce de charpente et les « manipuler » pour leur mise en place dans la coque. Nous pouvons ainsi mieux comprendre la mise en œuvre des bois et les techniques d'assemblage par la réalisation d'une maquette d'arsenal virtuelle.

Ces reconstitutions numériques sont alors « testées » en faisant varier différents paramètres de chargement et de tirant d'eau afin de mieux appréhender leur stabilité et leur comportement en mer.

### **Bibliographie**

- ALERTZ Ulrich, The venetian merchant galley and the system of partisoni – Initial steps towards Modern ship design, *Boats, ships and shipyards*, Oxford, Oxbow books, 2003, p. 212-221.
- ALERTZ Ulrich, The naval architecture and oars systems of medieval and later galleys, dans John S. Morrison, *The age of the galley. Mediterranean oared vessels since pre-classical times*, London, Conway Maritime Press, 1995, p. 142-162.
- BARTOLOMEO Crescentio, *Nautica Mediterranea*, Rome, Bartolomeo Bonfadino, 1607.
- BELLABARBA Sergio, The ancient methods of designing hulls, *The Mariner's mirror*, vol. 79, n° 3, p. 274-292.
- BOUDRIOT Jean, *Le vaisseau de 74 canons*, t. 1, Paris, Collection archéologie navale française, 1977.
- BURLET René et RIETH Éric, Essai de restitution d'une carène d'un bâtiment de quatre cents toneladas, d'après Diego Garcia de Palacio (1587), *Histoires et mesures*, 1988, III-4, p. 463-489.
- CASTRO Filipe Vieira de, *The pepper wreck, a portuguese indiaman at the mouth of the Tagus river*, College Station, Texas A&M University Press, 2005.
- DAEFFLER Michel, *Étude des méthodes de conception des bâtiments de commerce méditerranéens, l'exemple de l'épave de Calvi I*, mémoire présenté en vue du diplôme de l'EHESS, 1991.
- DAEFFLER Michel, *Du traité manuscrit au plan de formes, restitution graphique d'une galère française (1685-1690) à l'aide d'un système de conception assisté par ordinateur*, mémoire présenté en vue du DEA, EHESS, 1992.
- DAEFFLER Michel, Deux exemples de conception des navires de commerce de la seconde moitié du XVI<sup>e</sup> siècle, *Cahiers d'archéologie subaquatique* n° 11, 1993, p. 141-158.
- DAEFFLER Michel, *Formes de carène et navires de combat*, Caen, Centre de recherche d'histoire quantitative, 2004 (Histoire maritime ; 1), 574 p.
- DAEFFLER Michel, Portrait d'une victime : la « nave » de commerce méditerranéenne du XVI<sup>e</sup> siècle, dans *Course, corsaires et forbans en Méditerranée, XIV<sup>e</sup>- XX<sup>e</sup> siècles*, Actes du colloque tenu à Toulon, 15, 16 et 17 septembre 2005 (à paraître).
- DUHAMEL DU MONCEAU Henri-Louis, *Éléments de l'architecture navale ou traité pratique de la construction des vaisseaux*, Paris, rue Dauphine : chez Charles Antoine Jombert, 1758.
- GRENIER Robert, The basque whaling ship from Red Bay, Labrador ; a treasure trove of data on iberian atlantic shipbuilding design and techniques in the mid-16<sup>th</sup> century, *International Symposium on Archaeology of Medieval and Modern ships of Iberian-Atlantic Tradition*, Lisbonne, Instituto portugues de arqueologia, 2001.
- FENNIS Jan, éd., *Un manuel de construction des galères 1691*, Amsterdam, Holland university press, 1983.

- LANE Frederic C., Venitian naval architecture about 1550, *Mariner's Mirror* n° 20, 1934, p. 24-49.
- LANE Frederic C., *Navires et constructeurs à Venise pendant la Renaissance*, Paris SEVPEN, 1965.
- LOEWEN Brad, Le baleinier basque de Red Bay, Labrador (xvi<sup>e</sup> siècle). Étude du clouage dans les murailles de la coque, dans *L'aventure maritime, du golfe de Gascogne à Terre-Neuve*, Paris, CTHS, 1995, p. 145-157.
- OLIVEIRA Fernando, *O livro da fabrica das Naos*, fac-similé, Lisbonne, Academia de marinha, 1991.
- PALACIO Diego Garcia de, *Nautical Instruction, 1587*, translation by J. Bankston, Bisbee, 1986.
- RIETH Éric, *Le maître gabarit, la tablette et le trébuchet*, Paris, CTHS, 1996.
- SALISBURY W. et ANDERSON R. C., éd., *A treatise on shipbuilding and a treatise on rigging written about 1620-1625*, Londres, Society for nautical research, occasional publications n° 6, 1958.
- SARFIELD John Patrick, Survival of pre-sixteenth century mediterranean lofting techniques in Bahia, Brasil, dans *Local boats. Fourth International Symposium on Boat and Ship Archaeology*, Oxford, BAR International series, 1988.
- SARFIELD John Patrick, Master frame and ribbands. A Brazilian case study with an overview of this widespread traditional carvel design and building system, dans *Carvel Construction Technique. Fifth International Symposium on Boat and Ship Archaeology*, Oxford, Oxbow books, 1991.
- STEFFY John. Richard, *Wooden shipbuilding and the interpretation of shipwrecks*, College Station, Texas A&M University press, 1994.
- VILLIÉ Pierre, L'épave *Calvi I*, *Cahier d'Archéologie Subaquatique* n° VIII, 1989, p. 19-56.
- VILLIÉ Pierre, L'épave *Calvi I*, *Cahier d'Archéologie Subaquatique* n° IX, 1990, p. 83-130.
- VILLIÉ Pierre, L'épave *Calvi I*, *Cahier d'Archéologie Subaquatique* n° X, 1991, p. 69-108.
- WILSON Garth, Computer documentation and analysis of historic ship design, dans *Crossroads in ancient shipbuilding*, Oxford, Oxbow books, 1994, p. 267-268.