

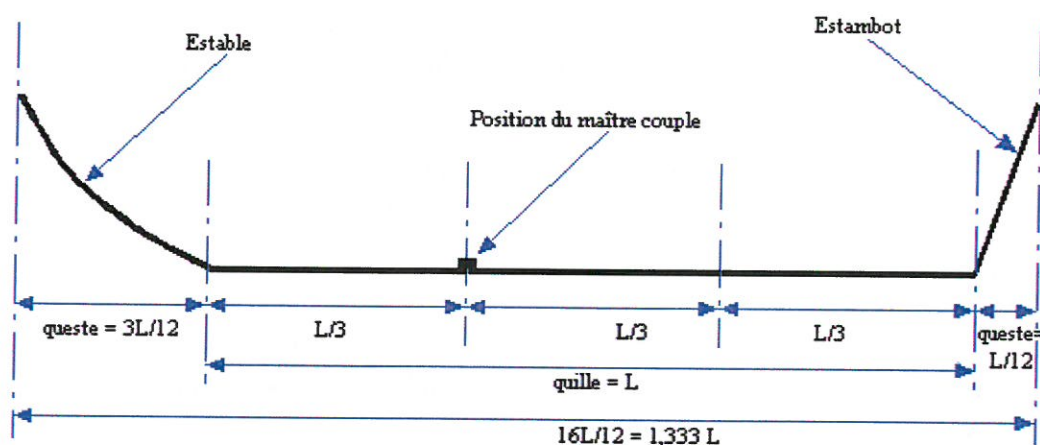
Le tracé des couples au début du XVII^e siècle selon l'Hydrographie du Père Fournier

Pour un descriptif de l'ouvrage "Hydrographie..." du Père Fournier, [cliquez sur ce lien](#).

Pour expliquer la forme très particulière des navires de l'époque, je veux parler ici du fait que la coque est rentrante au fur et à mesure que l'on s'élève au dessus du **fort** (partie la plus large du navire) et qu'on appelait alors une construction en **glacis** à angles rentrants, Fournier donne les raisons suivantes:

- Cela facilite l'écoulement des flots le long de la coque et évite les entrées d'eau par le pont.
- Cela évite qu'en cas d'accostage avec l'ennemi, les ponts des navires ne soient côte à côte, ce qui rend donc plus difficile les prises à l'abordage.
- Cela réduit les effets de destruction des boulets de canon qui sont plus importants quand ils frappent perpendiculairement le bordage de la coque.
- Cela rend plus aisé et plus rapide le travail des marins qui ont moins de distance à parcourir d'un bord à l'autre sur le pont supérieur.
- Cela réduit les efforts et les effets que subit le navire quand on tire avec les canons. Les canons supérieurs étant plus près du centre de gravité du navire car situés plus près du plan de la quille.
- Cela facilite l'ascension du bordé pour les marins qui ont à travailler sur la coque.

1. Quille et longueur du navire



Quille et longueur du navire

Quille

C'est la partie la plus importante du navire car non seulement elle a le premier rôle dans la structure et la solidité de l'ensemble du navire, mais aussi, c'est à partir de ses dimensions que l'on va proportionner toutes les autres pièces de la charpente. Elle est généralement courte et trapue dans les régions où le navire doit s'échouer à marée basse car de ce fait, elle peut mieux supporter les irrégularités du sol sans se déformer.

L'Echine

Ce terme désigne l'ensemble formé par la quille, l'estable (étrave) et l'estambot (étambot)

L'Estable (ou capion de proue au

Il est généralement composé de 2 pièces mises bout à bout: le **brion** et l'**estable** proprement dite. De sa forme, on déduit la quête de l'avant ou élanement de l'étrave qui est la longueur prise depuis l'extrémité de la quille jusqu'à la perpendiculaire abaissée depuis le bout de l'estable. En France, on a tendance à augmenter sensiblement la quête de l'étrave par rapport aux autres nations

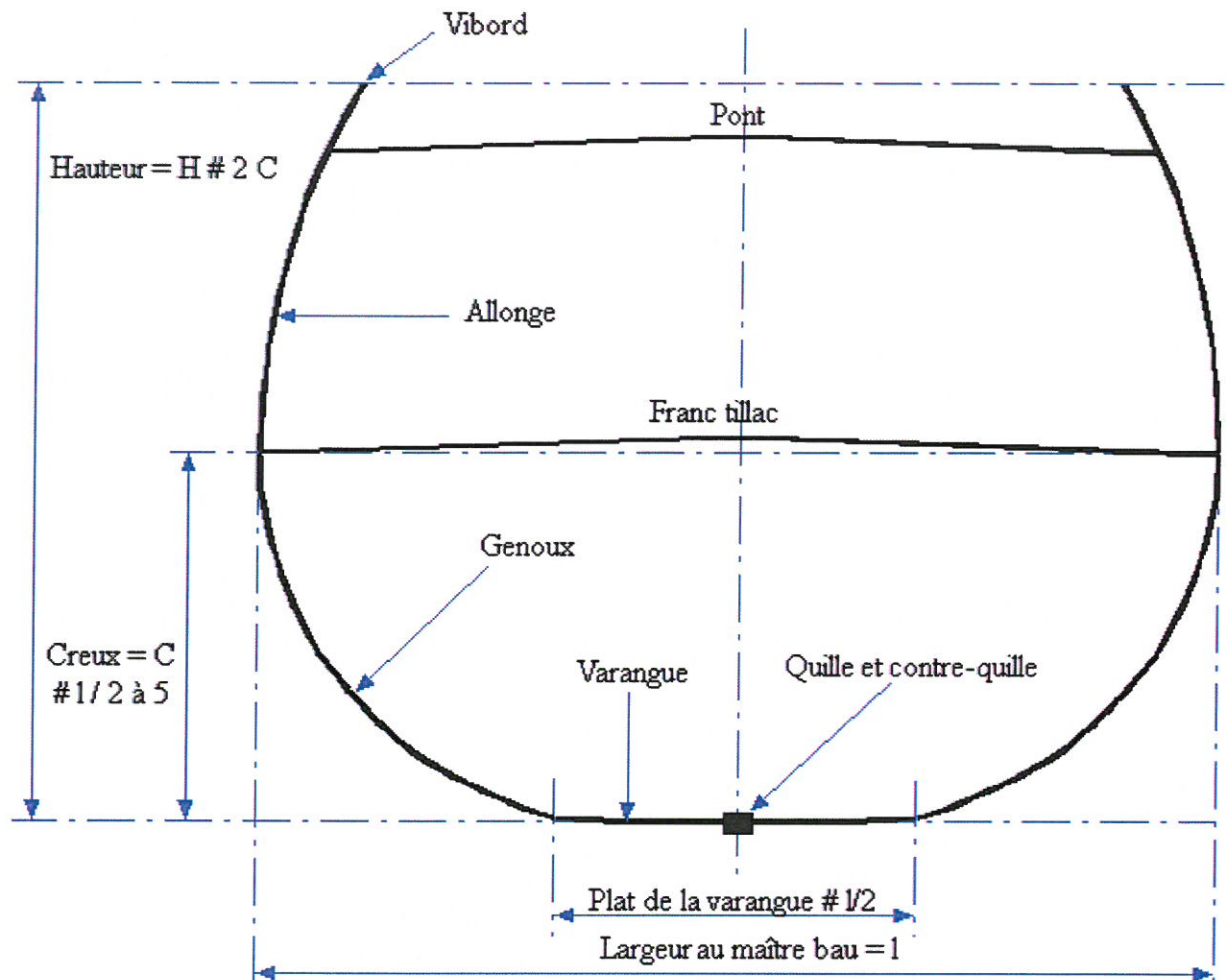
levant) (notamment l'Italie) et il n'est pas rare de faire démarrer l'étrave presque depuis le **bouchin** (emplacement de la quille où l'on place le maître [couple](#)) qui est la partie la plus large du navire, pour la terminer dans le prolongement du [franc tillac](#).

L'Estambot
(**etambot** ou **capion de poupe** au levant)
C'est la pièce de bois rectiligne qui se fixe sur la partie arrière de la quille avec un angle obtus et dont la partie supérieure se termine à la **lisse de hourdy** qui est un bau (poutre reliant les deux côtés du navire et supportant un pont) un peu particulier puisqu'il ne repose pas sur un [couple](#) proprement dit, mais sur l'estambot. L'inclinaison de l'estambot donne la mesure de la quête ou élancement de poupe.

Queste
La quête que l'on donne à l'estable et à l'estambot varie selon le type de navire et le pays de construction. En France, les galères ont généralement autant de quête à l'avant qu'à l'arrière alors que pour les vaisseaux on donne une quête à l'étrave de $3L/12$ (où L est la longueur de la quille) et une quête à l'estambot de $L/12$. Plus le navire est grand, plus la quête totale est importante. en Italie, la quête de l'étrave d'un galion ou d'un navire de guerre est égale à la plus grande largeur du vaisseau.

2. Membres et largeur d'un navire

A la façon des poissons les plus rapides, on donne au navire une forme analogue, c'est à dire une petite largeur à l'avant et à l'arrière et une grande largeur vers son milieu. Au [bouchin](#), on place le **maître couple** (ou **premier membre**) et compte tenu du fait que la [quête de l'estable](#) prolonge sensiblement la quille, on place ce couple au premier tiers depuis l'avant de la quille, ce qui le positionne en fait à $L/3 + 3L/12 = 7L/12$ (où L = longueur de la quille) de la longueur hors tout du navire depuis son étrave, c'est à dire un peu sur l'avant du milieu (voir graphique). Quelquefois, on avance même d'un ou deux pieds l'emplacement du maître couple pour donner plus de volume au navire, mais au détriment de sa finesse.



Coupe au maître couple

Les couples ne sont pas faits d'une seule pièce de bois, mais de 3 parties:

La Varangue (madier au Levant) Qui est droite en son milieu et que l'on fixe perpendiculairement entre la quille et la **contre quille** (cette contre quille ou **carlingue** se fixe perpendiculairement à la quille, sur les varangues). La varangue est courbée et empâtée à ses deux extrémités pour recevoir les genoux. cette partie où l'on fixe les genoux s'appelle **scoue**.

Le genoux (stamenay au levant) Qui est une pièce courbe fixée à la fois sur la varangue et sur l'allonge. Il sert de renfort à cette liaison et donne la forme transversale de la coque.

L'allonge (scalme au levant) Qui prolonge le genoux jusqu'au pont supérieur.

La poutre qui relie les deux côtés du navire au niveau du maître couple se nomme le **maître bau**. Il repose sur les genoux et soutient le pont principal ou **franc tillac** qui est toujours le pont le plus large par opposition au premier, second ou troisième tillac et au pont (ou tillac d'en haut, exposé aux intempéries) qui sont situés à des niveaux supérieurs et qui sont soutenus par leurs propres baux. Le maître bau indique donc la plus grande largeur du navire et c'est par rapport à lui que l'on proportionne tous les autres baux secondaires.

L'ensemble varangue-genoux-allonge s'appelle **couple, membre** ou **côte**. Tous les couples, à leurs proportions près, sont faits de la même façon et cela jusqu'au dernier vers l'arrière qui supporte le **bau de dale**. A delà de ce premier couple, la forme du navire est si étroite que la varangue se résume à une simple pièce de bois triangulaire fixée sur la

quille en son sommet. Elle prend alors le nom de **fourc**. A cette pièce, se fixe toujours un genoux qui prend ici le nom de **revers** car sa courbure est tournée, tout comme pour le fourc.

Toutes ces varangues et les fourcs sont percés transversalement à la partie inférieure par une ou plusieurs ouvertures de 3 pouces de diamètre qui servent à l'écoulement des eaux de cale. Ce canal ou lumière est traversé par un cordage sur lequel on exerce un mouvement de va et vient, ce qui permet d'éviter son colmatage.

Selon la tradition de l'époque, on estime que sur un bon navire, **l'épaisseur cumulée de tous les couples doit être égale au cumul des distances entre chaque couple**.

Chaque couple est caractérisé par trois dimensions:

- Son **ouverture** qui correspond à la longueur du bau qui lui est destiné.
- Sa largeur par en bas qui est la longueur du **plat de la varangue** (partie horizontale).
- Sa hauteur ou **creux (pontal au levant)** qui est la distance verticale entre le bau et la varangue. A noter que lorsqu'on parle du **creux** d'un navire, il s'agit de cette hauteur prise au **maître couple**.

Pour les navires qui doivent être rapides, on leur donne un rapport L / l (où L = longueur de la quille et l = largeur du maître bau) égal à 6, 7, ou voir même 9 et parfois plus. **Pour les navires de charge, plus lents et plus larges, le rapport Longueur / largeur est ramené à une valeur comprise entre 2,8 et 4.**

La longueur du plat des varangues est très variable et dépend essentiellement de l'utilisation du navire. Sur les mers à marées, on a tendance à donner plus de plat aux varangues pour réduire les tirants d'eau et permettre de reposer sans risque sur le fond en cas d'échouement. Au levant, le plat des navires est plus faible, ce qui à l'avantage de faciliter les carénages quand on les couche sur le flanc. Les navires à large plat du ponant ont aussi un château arrière beaucoup plus important (en largeur et en hauteur), ce qui les rend plus ardent et augmente leur dérive.

Généralement, on donne au plat de la varangue du maître couple la moitié de la longueur du bau, mais cela dépend essentiellement du creux que l'on veut donner. Un navire à creux important (franc tillac situé très haut), aura donc beaucoup moins de plat que le navire dont la plus grande largeur sera située très basse (faible creux).

3. Le Creux

Le creux d'un navire doit s'entendre comme étant la distance entre le **franc tillac** et la **carlingue**. En Italie où le franc tillac est presque toujours au niveau le plus large du navire (à Marseille, depuis le début du XVII^e siècle, on a tendance à surélever le franc tillac pour augmenter la capacité des cales), on adopte un creux égal à la moitié du maître bau.

En France, on utilise plutôt un rapport de 2 à 5 entre la longueur du maître bau et le creux, suivant l'importance que l'on veut donner aux plats des varangues. **Généralement, la hauteur d'un navire** (entre la **carlingue** et le **vibord** qui est la lisse la plus haute, située sur l'extrémité des **allonges**) **est égale au double du creux**. En Italie, un navire marchand est donc aussi haut que large.

4. Table des proportions

A l'époque de Fournier, très rares sont les navires de plus de 500 tonneaux. Un recensement de 1664 nous dit même que sur un total de 2.400 navires français de plus de 10 tonneaux, seulement 19 dépassent les 300 tonneaux, la moyenne étant de 55 tonneaux. le vaisseau la "Couronne", mis en chantier en 1629 et lancé en 1638 qui faisait 1.800 tonneaux ainsi que le "Royal Louis" ne doivent pas faire illusion, il s'agissait de navires d'exception. Ce ne fut qu'à partir de 1660 que le tonnage moyen de nos navires augmenta sensiblement.

Dans le tableau ci-dessous, la jauge est exprimée en tonneaux de poids de 2.000 livres (979 Kg) et indique le poids maximum que peut transporter le navire (**port en lourd**). Les mesures de longueur sont indiquées en pieds et dixièmes et centièmes de pieds.

Tonneaux (tonnes)	L = Quille en pieds (en mètres)	l = Maître bau en pieds (en mètres)	C = Creux en pieds (en mètres)	Rapport L/l	Rapport l/C	Prix en livres
50 (49)	42,00 (13,64)	15,00 (4,87)	6,00 (1,95)	2,8	2,5	
100 (98)	52,25 (16,97)	18,66 (6,06)	7,50 (2,44)	2,8	2,5	9.000
200 (196)	66,00 (21,44)	24,00 (7,80)	9,50 (3,09)	2,7	2,5	23.000
300 (294)	76,00 (24,69)	27,33 (8,88)	10,50 (3,41)	2,8	2,6	28.000
400 (392)	84,00 (27,29)	30,00 (9,75)	12,00 (3,90)	2,8	2,5	40.000
500 (490)	92,00 (29,89)	33,00 (10,72)	13,00 (4,22)	2,8	2,5	50.500
600 (587)	98,00 (31,83)	35,00 (11,37)	14,25 (4,63)	2,8	2,5	

700 (685)	102,00 (33,13)	36,25 (11,78)	14,50 (4,71)	2,8	2,5	
800 (783)	104,00 (33,78)	37,33 (12,13)	15,00 (4,87)	2,8	2,5	
900 (881)	107,50 (34,92)	38,50 (12,51)	15,25 (4,95)	2,8	2,5	
1.000 (979)	109,00 (35,40)	39,20 (12,73)	15,33 (4,98)	2,8	2,6	
1.100 (1.077)	110,00 (35,73)	40,00 (12,99)	15,50 (5,04)	2,8	2,6	
1.400 (1.370)	120,00 (38,98)	44,00 (14,29)	16,00 (5,20)	2,7	2,7	
1.600 (1.566)	132,00 (42,88)	48,00 (15,59)	16,00 (5,20)	2,8	3,0	

5. Tracé des couples

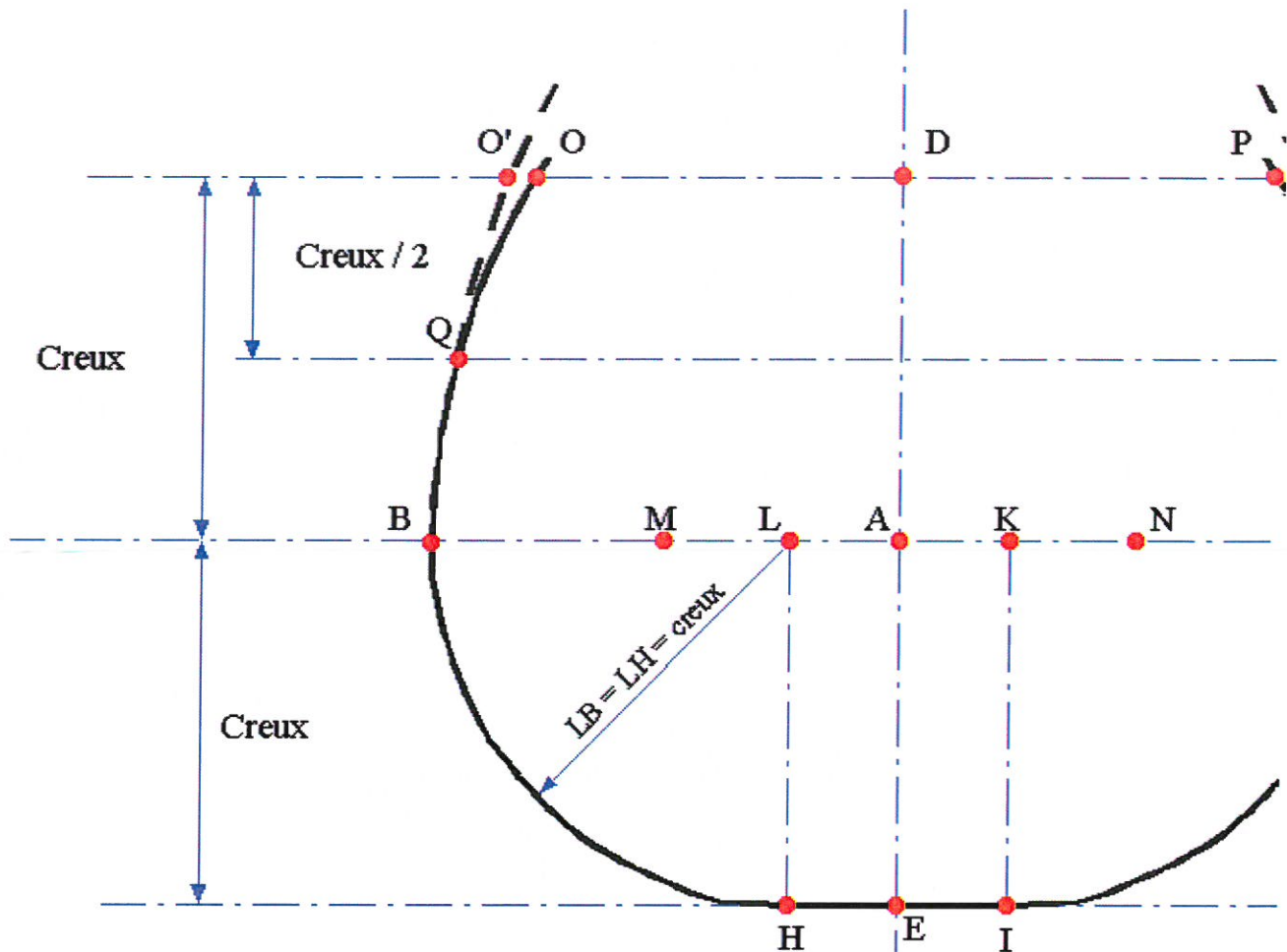
■ Tracé du maître couple

C'est à partir du tracé du maître couple que le charpentier constructeur va en déduire les dimensions et formes des autres couples secondaires. Fournier nous donne deux méthodes de tracé: "l'ancienne", qui ne semble plus guère appliquée au début du XVII^e siècle, et "la nouvelle". Entre les deux, les différences les plus notables portent sur la longueur du [plat des varangues](#) et sur la largeur au niveau du [vibord](#).

Dans les deux cas, nous prendrons l'exemple d'un navire de 300 tonneaux et nous adopterons les proportions indiquées dans le [tableau ci-dessus](#).

Dans tous les calculs qui suivent, comme dans le tableau des proportions, les unités de distance de l'époque sont exprimées en pieds et dixièmes et centièmes de pieds.

○ Ancienne méthode



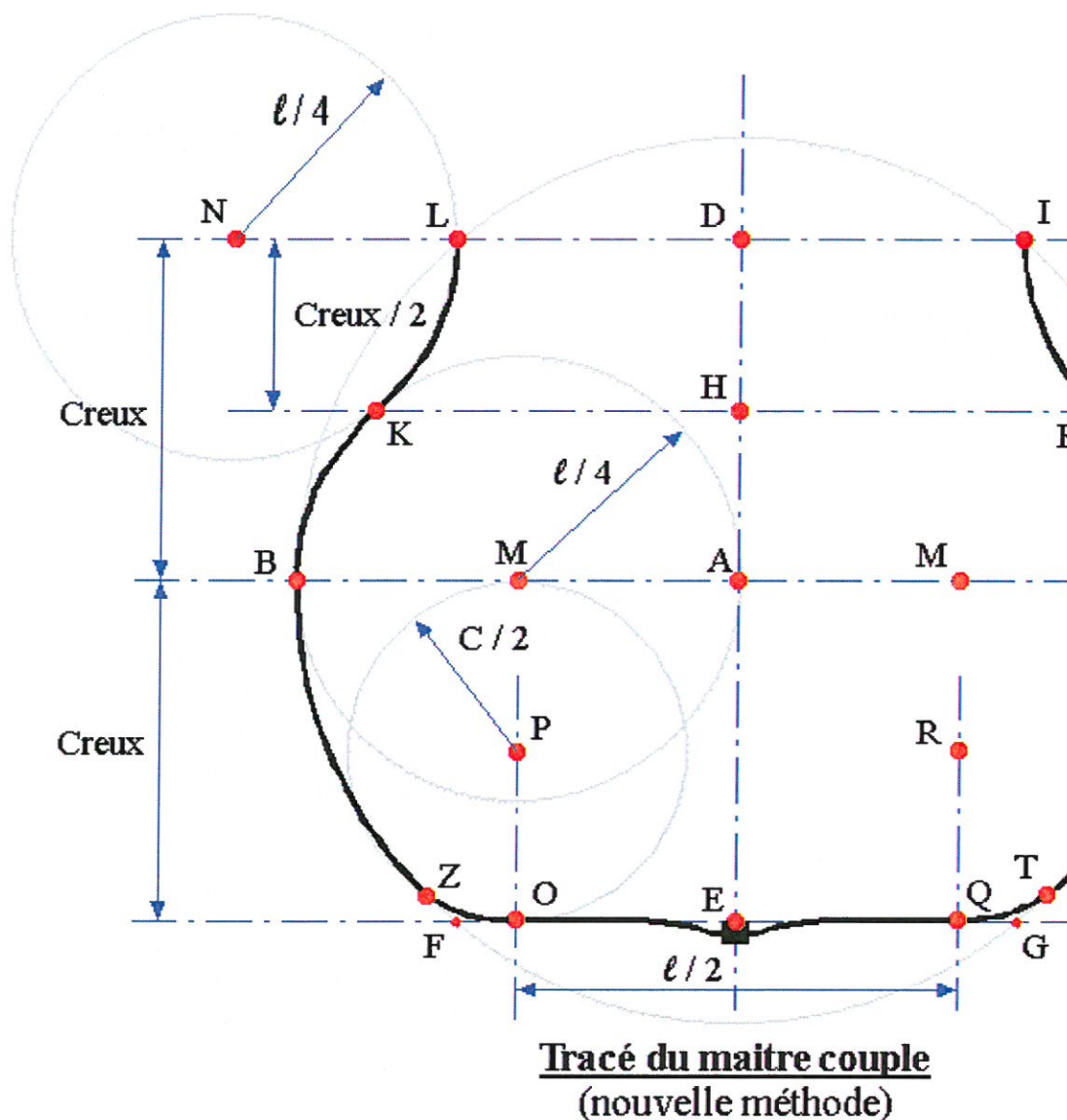
Tracé du maître couple (ancienne méthode)

Si l'on veut tracer le maître couple d'un navire de 300 tonneaux selon l'ancienne méthode comme cela a été fait dans la figure ci dessus, on procède comme suit:

- Tracer la largeur $BC = 1$ = longueur du maître bau = 27,33 pieds qui correspond à la largeur du [franc tillac](#).
- Tracer le [creux](#) $AE = AD = 10,5$ pieds.
- Sur le segment BC, porter les points L et K tel que $BL = CK =$ le creux AE.
- Avec un compas, depuis les points L et K, tracer les arcs de cercles de rayon $LB = KC$. On obtient les points H et I dont l'espacement donne le [plat de la varangue](#). Ici, le plat $HI = LK = 1 - 2 \times$ creux.
- Sur le segment BC, tracer les points M et N tel que $BM = MA = AN = NC = 1/4$.
- Avec un compas, à partir des points M et N, tracer les arcs de cercles de rayon MC et $NB = 3/4$. A l'intersection de ces arcs de cercles et de l'horizontale menée en D, on obtient les points O et P ([vibord](#)). Si l'on veut un pont un peu plus ouvert, on porte les points O' et P' avec un compas placé en B et C avec une ouverture égale à $BC = 1$ (largeur du maître bau).
- A mi hauteur le franc tillac et le vibord (environ 5 pieds), on place le premier tillac QR.

○ Nouvelle méthode

Les navires tels que dessinés de la manière précédente sont presque ronds et sont donc très sensibles au roulis et d'autre part, ils ont un plat de varangue assez faible, ce qui limite le volume de charge et les désavantage donc s'ils vont dans les ports à marée ou de faible hauteur d'eau car ils ont alors un fort tirant d'eau. Pour palier à cet inconvénient majeur, on utilise une nouvelle méthode de tracé du maître couple comme cela est représenté sur la figure ci-dessous.



- Tracer la largeur $BC = l$ au maître bau.
- Porter les points D et E tel que $AD = AE = \text{creux} = C$
- A partir de A, tracer un cercle BLICGF de diamètre égal au maître bau l .
- Porter les points O et Q tel que $OE = l/4$, ce qui donne un plat de varangue OQ égal à $l/2$.
- A partir de O et Q, lever deux perpendiculaires sur lesquelles on place les points P et R pris à une distance arbitraire de la ligne de quille, selon la forme que l'on veut donner aux genoux du couple. Dans la figure ci-dessus on a pris $OP = QR = \text{creux} / 2$.
- Tracer une horizontale passant par H tel que $AH = \text{creux} / 2$
- A partir des points M ($AM = l/4$), on trace les arcs de cercles BK et

CK.

- Porter les points N tel que $LN = IN = AM = 1/4$ et à partir de N, tracer les arcs de cercles KL et LI. La position des points N étant également prise arbitrairement, selon l'importance que l'on veut donner à l'ouverture du pont.

Pour une question d'esthétique, il est toujours possible d'améliorer la **coulée** (adoucissement des formes depuis le genoux jusqu'à la quille par un rétrécissement "insensible" du plat de la varangue). Cela se traduit par un abaissement de la quille par rapport à la droite FG et donc par une augmentation du creux initial.

■ Calcul des autres couples secondaires

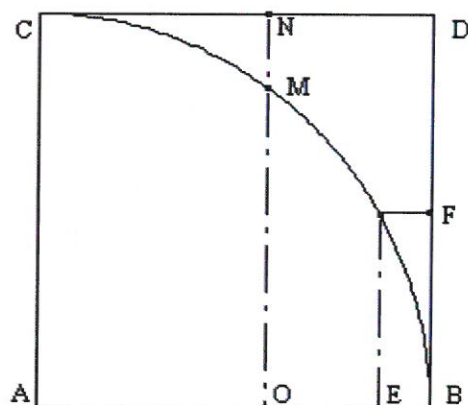
A partir des dimensions du maître couple, on peut déterminer la forme des autres couples et la longueur des autres baux.

○ Calcul des longueurs des baux secondaires

La détermination de la longueur des baux secondaires par rapport au maître bau se fait graphiquement ou mathématiquement. Quelque soit la méthode utilisée, on se fixe au départ certains critères:

- La longueur de lisse de Hourdy (qui donne la plus grande largeur de l'arcaste) **auquel on donne généralement la demi longueur du maître bau** (cas de l'exemple étudié) pour les vaisseaux longs et les 2/3 de cette longueur pour les autres navires.
- Le nombre total de couples que l'on veut mettre et leur répartition par rapport au maître couple (dans notre exemple on prend 19 couples sur l'arrière du maître couple et 10 couples sur l'avant, soit un total de 30 couples).
- La position du **maître couple sur la quille (généralement au 1/3 de la quille depuis l'avant)**.
- La longueur du beau de l'extrémité avant de la quille (**beau de l'équerre ou bau de lof**). **On la prend généralement égale à 2/3 de la longueur du maître bau**. Dans notre exemple, on a supposé que les 10 couples de l'avant étaient strictement identiques aux 10 couples situés à l'arrière du maître couple donc, ce qui n'est pas forcément vrai (voir remarques un peu plus bas) puisque notre exemple ne respecte pas cette proportion des 2/3 donnée par Fournier.

Méthode graphique



Détermination de la longueur des baux

D'après le petit graphique ci-contre, on procède comme ceci:

- Tracer un carré ABCD et un arc de cercle centré sur A tel que $AC = 1/2$.
- Rechercher sur l'arc de cercle à partir du côté AB la longueur choisie pour la lisse de Hourdy (ici $= 1/2$) et en déduire les points E et F.
- Sachant que l'on veut mettre 30 couples secondaires et que l'on place le maître couple au 1/3 de la quille, on divise le segment AE en 20 parties qui correspondent aux 19 couples arrière + le maître couple.
- Au couple "x" correspondra un bau de longueur OM tandis que la distance MN correspond à l'acculement (strella au levant) qui est la surélévation verticale de l'extrémité du couple considéré au dessus du plan défini par les extrémités du maître couple. Le **bau de lof**, au dixième bau à partir du maître bau aura la longueur déterminée par la dixième division du segment AE à partir du point A, ce qui suppose que l'on a

choisi de donner aux 10 couples de l'avant les mêmes dimensions qu'aux 10 couples de l'arrière qui leur sont symétriques.

Méthode mathématique

A cette méthode graphique, on peut substituer une méthode mathématique, toujours basée sur le même petit dessin précédent. Les hypothèses de départ étant les mêmes, la seule différence de résultat que l'on pourra observer entre les deux méthodes pourra s'expliquer par le manque de précision de la méthode graphique employée à l'époque.

Il s'agit de calculer la longueur "x" qui représente la demi longueur du bau situé à une distance b du maître couple.

On a:

$$1) \quad \sin \alpha = \frac{2x}{\ell} \quad \text{soit } x = \frac{(\ell * \sin \alpha)}{2}$$

$$2) \quad \cos \alpha = \frac{2 * b}{\ell}$$

ou:

a = distance entre le maître couple et la lisse de hourdy.

n = numéro du couple étudié (numéroté de 0 à 19 depuis l'arrière).

i = le nombre d'intervalles entre le premier couple et le maître couple (= nombre de couples arrière, maître couple inclus, -1).

$$3) \quad b = a * \left(\frac{1-n}{i} \right)$$

de 2) et 3), on en déduit:

$$\cos \alpha = \left(\frac{2 * a}{\ell} \right) * \left(1 - \frac{n}{i} \right)$$

et avec 1):

$$x = \frac{\ell}{2} * \sin \left\{ \arccos \left[\left(\frac{2 * a}{\ell} \right) * \left(1 - \frac{n}{i} \right) \right] \right\}$$

Compte tenu des hypothèses de départ, on en déduit:

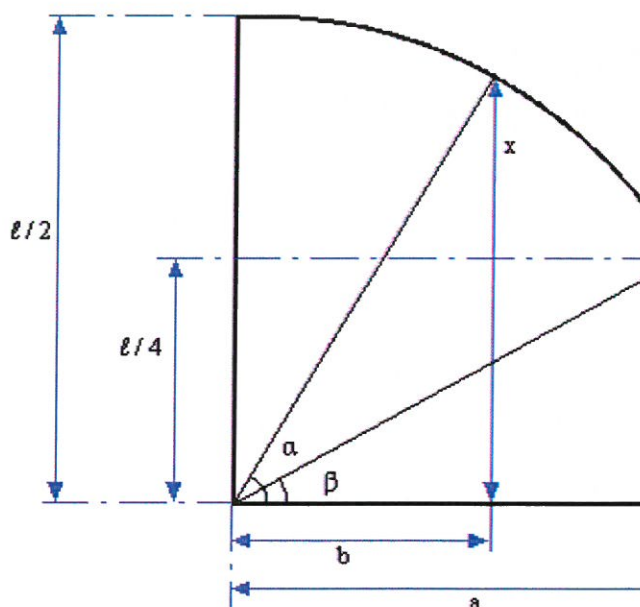
L'angle β tel que: $\sin \beta = 2 * \frac{\ell'}{\ell}$ où ℓ' est la longueur de la [lisse de hourdy](#).

La valeur de $a = \frac{(\ell * \cos \beta)}{2}$

La valeur de i qui est égale au nombre de couples situés vers l'arrière du maître couple moins 1 (si on a 20 couples arrière, y compris le maître couple, alors i = 19).

On a alors: $x = \frac{\ell}{2} * \sin \left\{ \arccos \left[\cos \beta * \left(1 - \frac{n}{i} \right) \right] \right\}$

Soit par exemple un navire de 300 tonnes ayant les proportions déterminées par la [table citée plus haut](#), à savoir:



Détermination de la longueur des l
(méthode mathématique)

- L quille = 76 pieds
- l au maître bau = 27,33 pieds
- Creux = 10,5 pieds

et à qui l'on fixe à 30 le nombre de couples (dont 10 sur l'avant du maître couple) et à 1/2 la longueur de la lisse de hourdy, on a donc:

$$1) \quad l' = 1/4$$

$$2) \quad \sin \beta = \frac{2 * l'}{l} = \frac{1}{2} \qquad \cos \beta = \frac{\sqrt{3}}{2} = 2 * \frac{\alpha}{l}$$

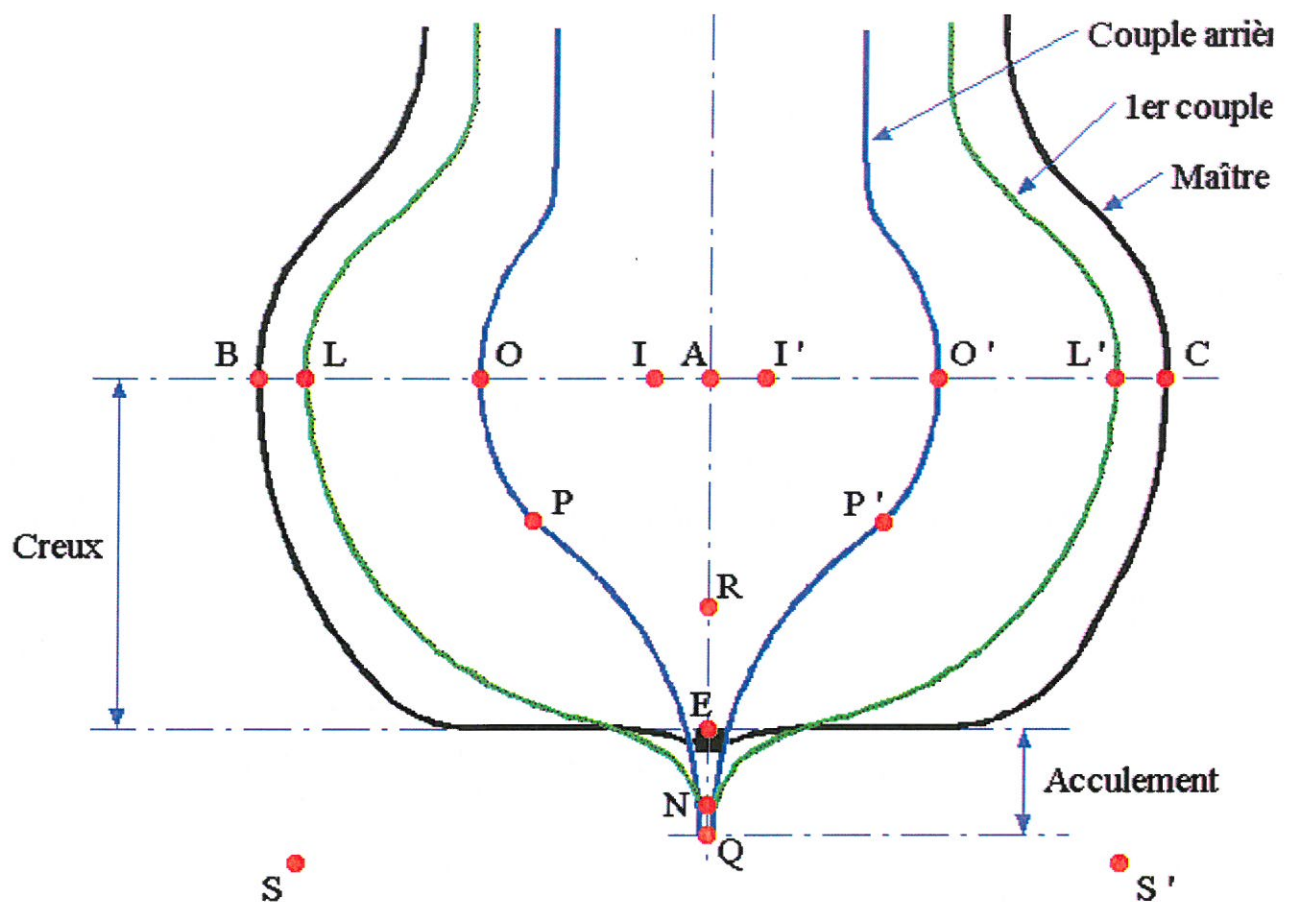
$$3) \quad i=19 \text{ (20 couples sur l'arrière y compris le maître couple donc 19 intervalles)}$$

$$\text{donc} \quad x = \frac{l}{2} * \sin \left\{ \arccos \left[\left(\frac{\sqrt{3}}{2} \right) * \left(1 - \frac{n}{19} \right) \right] \right\}$$

A partir de cette formule, on peut dresser le tableau suivant qui nous donne toutes les dimensions des différents baux secondaires de l'arrière. Ici, l'acculement est aussi la différence entre la demi longueur du maître bau et la demi longueur du bau secondaire considéré.

<i>n</i>	<i>Bau</i> (pieds)	<i>Acculement</i> (pieds)
0	13,67	6,83
1	15,63	5,85
2	17,28	5,03
3	18,70	4,32
4	19,94	3,69
5	21,04	3,14
6	22,02	2,66
7	22,88	2,23
8	23,65	1,84
9	24,33	1,50
10	24,92	1,20
11	25,45	0,94
12	25,90	0,71
13	26,29	0,52
14	26,61	0,36
15	26,87	0,23
16	27,07	0,13
17	27,22	0,06
18	27,30	0,01
19	27,33	0,00

- Tracé des couples secondaires



Tracé des couples secondaires

Le calcul des baux secondaires étant fait, on peut tracer la forme des couples selon la méthode suivante qui a été appliquée sur la figure ci-dessus.

- Tracer le maître couple selon la [nouvelle méthode décrite plus haut](#).
- Sur le segment BC, positionner les points L et L' tel que $LL' =$ longueur du bau du couple étudié.
- A partir des points L et L', positionner les points I et I' tels que $LI = L'I' = AE =$ creux.
- A partir de I et I', tracer les arcs de cercles LE et L'E
- Rapporter de E en N la valeur de l'[acculement](#) du couple étudié et à la main, donner une forme aussi esthétique que douce aux [genoux](#) et à la varangue du couple pour rejoindre l'arc de cercle précédemment tracé.
- Pour tracer l'[allonge](#), diviser les segments LA et L'A en 2 et à partir de ces milieux, tracer des arcs de cercles depuis L et L'. La terminaison des allonges se fait à main levée ou selon la méthode décrite pour le tracé du maître couple avec la méthode dite "nouvelle".

Pour la lisse de hourdy, on procède comme ceci:

- Tracer les points O et O' tels que $OO' =$ longueur de la lisse de hourdy (ici $l/2$).
- A partir de A, tracer le demi cercle ORO' de rayon AO.
- Reporter en R la valeur de l'[acculement](#). On obtient le point Q. A partir des points O et O', reporter également la valeur de l'[acculement](#) jusqu'en P et P' (intersection de ces segments avec le demi cercle tracé précédemment) tels que $OP = RQ$.
- Tracer les points S et S' qui sont les sommets des triangles isocèles PQS et P'QS'. S et S' sont pris sur la perpendiculaire milieu de PQ et P'Q à une distance arbitraire et suffisante pour avoir une belle courbe. ici, on a pris les points S et S' à environ 11 pieds de P et P'.
- Depuis S et S', tracer les arcs de cercle PQ et P'Q. Le tracé final proche de Q se fait à main levée afin d'adoucir les courbes (coulée).

Dans cet exemple de tracé des couples, on a admis que les 10 couples situés sur l'avant du maître couple étaient strictement identiques aux 10 premiers couples situés à l'arrière du maître couple. Il peut arriver que ce ne soit pas vrai. Ainsi, on trouve fréquemment des baux avants plus longs que leurs symétriques de l'arrière. Tout cela n'est qu'une question d'expérience et d'habitude suivant les lieux de constructions et l'expérience des architectes.

■ Tracé du bouge des baux

Le **bouge** (**besson** au levant) est la courbure transversale d'un pont ou d'un bau. Généralement, le bouge est de 10 pouces pour 20 pieds de bau. Ici, on peut le tracer (il n'est pas représenté sur la figure ci-dessus) par un arc de cercle centré sur un point situé sur la verticale de A à une distance égale à 2 fois la longueur du bau.

La navire étant ainsi tracé, il est intéressant maintenant de pouvoir calculer son volume, donc sa capacité de chargement selon les méthode de Fournier. Cela fait l'objet de la [seconde partie de cette étude](#).

Calcul du volume, du déplacement et du port en lourd des navires au XVII^e siècle selon l'Hydrographie du Père Fournier

Pour un descriptif de l'ouvrage "Hydrographie..." du Père Fournier, [cliquez sur ce lien](#).

Le Père Fournier parle plutôt de "Charge qu'un navire peut porter".

Cette notion de charge maximum transportable suit le principe d'Archimède. C'est ainsi que quand on parle d'un navire de 100 tonneaux, cela signifie à la fois qu'il a la capacité nécessaire pour contenir 100 tonneaux de $0,913\text{m}^3$ environ et que sa charge maximum ne peut dépasser le poids de 100 tonneaux d'eau de mer, soit 200.000 livres (98 tonnes). Il est bien évident qu'avant de charger ce navire, on doit tenir compte de la densité de l'eau de mer qui va influencer sur les tirants d'eau.

Fournier estime lui même le poids d'un pied cube d'eau de mer à environ 74 livres. Avec 1 pied cube = 34,277 litres et 1 livre = 0,48951 Kg, on trouve une densité d'eau de mer égale à 1,057 alors que la densité moyenne réelle est de 1,025.

Il est très difficile de déterminer le volume et la charge que peut prendre un navire et cela pour 3 raisons:

- La complexité des formes très changeantes de la coque.
- Le manque de rigueur dans la construction. En effet, chaque navire, quoique conçu d'après un même plan, était toujours différent de son jumeau du fait qu'au fur et à mesure de la construction, le maître charpentier rencontre toutes sortes de difficultés inédites qui vont le contraindre à modifier des courbes et des coulées.
- L'impossibilité de connaître avec exactitude le poids lège du navire qui peut varier sensiblement au cours de sa vie.

A ces difficultés techniques, s'ajoutent d'autres problèmes pratiques tels que la saison et le lieu où l'on veut faire naviguer le navire. La réglementation sur les limites de charges (marques de franc bord) n'existe pas encore et la notion de charge maximum est donc très élastique selon les pays et les utilisateurs.

Néanmoins, il est indispensable pour un navire de déterminer sa charge maximum transportable, ne serait-ce qu'en se limitant au volume au dessous du franc tillac car on admet généralement qu'un navire ne doit pas s'enfoncer plus qu'à son franc tillac.

Ceci étant, il faut encore se mettre d'accord sur le terme "**un tel vaisseau est de 300 tonneaux**". Pour Fournier, cela signifie que ce vaisseau peut charger 300 tonneaux remplis d'eau de mer au dessous ou au dessus de son franc tillac et non pas 300 tonneaux de n'importe quelle marchandise car un navire de 300 tonneaux de 2.000 livres chacun a un volume de charge bien supérieur à 300 tonneaux de $0,913\text{m}^3$.

Calcul de la capacité de charge d'un navire.

Dans l'exemple de calcul qui suit, on a utilisé un navire type dont les dimensions sont les même que celles utilisées dans l'étude sur le [calcul et tracé des couples](#) qui contient également une explication des termes maritimes de l'époque que l'on retrouve ici.

Les longueurs de l'époque sont exprimées en pieds, dixièmes et centièmes de pieds.

Fournier utilise une méthode très empirique et très approximative dont je donnerai des remarques en conclusion.

Comme annoncé ci-dessus, plaçons nous dans le même cas de navire qu'étudié pour le [tracé des couples](#), c'est à dire ayant les caractéristiques suivantes:

- Longueur de quille (L): 76 pieds
- longueur du maître bau (l): 27,33 pieds
- Creux (C): 10,5 pieds

et construit selon "l'ancienne méthode" (fin du XVI^e siècle selon Fournier), c'est à dire avec un plat de varangue égal à la longueur du bau moins deux fois le creux. La longueur des baux étant calculée de la manière prescrite à [l'étude sur les](#)

couples.

Autres hypothèses de départ importantes:

- On se limite à calculer le volume disponible sous le franc tillac et on ne tient pas compte de l'espace gagné grâce au bouge des baux.
- Le vaisseau possède 30 couples. 10 sur l'avant du maître couple et 19 sur l'arrière du maître couple.
- On suppose que les 10 couples de l'avant sont de mêmes dimensions que leurs symétriques de l'arrière.

Dans la figure ci-contre qui représente le maître couple, la surface

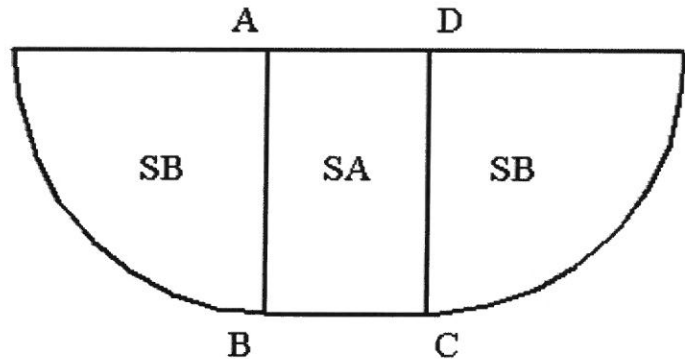
$SA = AB * BC = \text{Creux} * \text{plat de la varangue}$.

Pour notre vaisseau exemple, on a donc:

$SA = 10,5 * 6,33 = 66,47$ pieds carrés.

Chaque surface SB est assimilée au quart de la surface d'un cercle de centre A et de rayon égal au creux, soit:

$$SB = \left(\frac{\pi * \text{Creux}^2}{4} \right) = 86,5 \text{ pieds carrés}$$



Maître couple

ce qui donne une surface totale du maître couple:

$S1 = SA + 2 * SB = 239,47$ pieds carrés.

En calculant les surfaces S_n de tous les couples secondaires, on peut déduire la somme des différences de surfaces entre le maître couple $S1$ et les couples S_n . Cela est représenté mathématiquement par la formule:

$$\sum_{n=30}^{n-1} (S1 - S_n) \text{ que l'on multiplie par le rapport}$$

$$\frac{L}{(n-1)}$$

où $L =$ longueur de la quille

$n =$ nombre total d'intervalles entre les couples
= nombre de couples - 1.

Le tableau suivant donne pour les 19 couples arrière + le maître couple, leur surface $S_n = \text{Creux} * \text{plat de la varangue}$ ainsi que la différence $S1 - S_n$. Pour les 10 couples de l'avant, il suffit de reprendre la même surface que les 10 premiers couples de l'arrière à partir du maître couple ($n = 18$ à $n = 9$).

n (N° couple)	longueur du bau (pieds)	plat de la varangue (pieds)	S_n	$S1 - S_n$
0	13,67	0,00	173,18	66,47
1	15,63	0,00	173,18	66,47
2	17,28	0,00	173,18	66,47
3	18,70	0,00	173,18	66,47
4	19,94	0,00	173,18	66,47
5	21,04	0,04	173,62	66,02
6	22,02	1,02	183,84	55,80
7	22,88	1,88	192,91	46,73
8	23,65	2,65	200,97	38,68
9	24,33	3,33	208,10	31,54
10	24,92	3,92	214,39	25,26
11	25,45	4,45	219,89	19,76
12	25,90	4,90	224,65	15,00
13	26,29	5,29	228,71	10,94
14	26,61	5,61	232,09	7,55

15	26,87	5,87	234,84	4,81
16	27,07	6,07	236,95	2,70
17	27,22	6,22	238,45	1,19
18	27,30	6,30	239,35	0,30
19	27,33	6,33	239,65	0,00

Ici, on a :

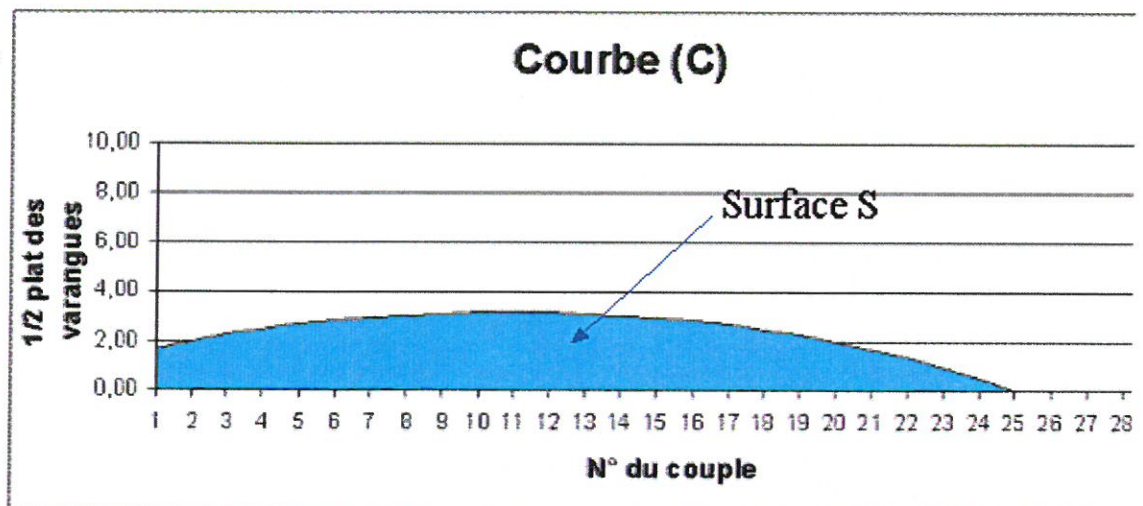
$$\sum_{n=30}^{n-1} (S_1 - S_n) = 777,65 \text{ pieds carrés}$$

et le volume $V_1 = \frac{777,65 * 76}{29} = 2.038 \text{ pieds cubes}$

qui représente ce qui est à retrancher du volume V qui serait celui du navire si tous les couples étaient identiques ($V = \text{surface au maître couple} * \text{Longueur de la quille}$), soit $V = 239,47 * 76 = 18.200 \text{ pieds cubes}$.

On a donc le volume du navire égal à $18.200 - 2.038 = 16.162 \text{ pieds cubes}$.

D'une façon plus rigoureuse, ce calcul se résume à chercher la surface S du franc tillac situé sous la courbe C (ci-contre) qui est le tracé de l'équation mathématique de la variation du plat des varangues. Pour cela, on utilise une intégration numérique selon la règle de Simpson ou celle des trapèzes. Le tableau ci-dessus donne pour chaque couple de l'arrière la longueur du plat de la varangue. L'intervalle entre deux couples étant égal à $L / (n-1)$ soit $76 / 29 = 2,62 \text{ pieds}$.



On trouve selon cette méthode une surface S égale à 150 pieds carrés pour une demi coque, soit:

Volume $V1 = 150 * 2 * 10,5 = 3.150$ pieds cubes auquel il faut ajouter le volume $V2 = SB$ (au maître couple) $* 2 * \text{Longueur de la quille}$ (puisque les 2 surfaces SB du maître couple sont supposées égales pour tous les couples étant donné qu'on a fait intervenir la variation de surface de chaque couple sur SA). On a donc: $V2 = 86,5 * 2 * 76 = 13.148$ pieds cubes.

soit un volume total du navire $= 13.148 + 3.150 = 16.298$ **pieds cubes**.

Entre les deux méthodes, on a une différence de 136 pieds cubes, soit moins de 5 tonneaux de volume, ce qui est négligeable quand on fait la liste des principales approximations que l'on a supposé et qui sont les suivantes:

- On a supposé les couples de l'avant égaux à leurs symétriques de l'arrière.
- On a supposé la surface SB identique pour tous les couples, ce qui est faux car à l'extrémité arrière du navire, les genoux ont une forme convexe et non plus concave.
- On a négligé les surface SA pour les couples qui n'ont pas de plat de varangue
- On a négligé le volume situé sur l'avant de la quille (étrave).
- etc...

En prenant pour exact le chiffre de 16.298 pieds cubes, on en déduit le volume approximatif du navire sous le franc tillac égal à

$(16.298 * 74) / 2.000 = 603$ **tonneaux** en prenant le poids en livres d'un pied cube d'eau de mer égal à 74 et le poids en livre d'un tonneau d'eau de mer égal à 2.000.

Le navire de notre exemple peut donc théoriquement charger 603 tonneaux de 2.000 livres, c'est son déplacement (poids du volume d'eau déplacé) si l'on considère que son franc tillac est au niveau de la surface de l'eau. Compte tenu de la règle traditionnellement admise disant qu'**un navire a un poids léger égal à la charge maximum qu'il peut transporter** (port en lourd), on en déduit que ce port en lourd est égal à la moitié du déplacement, soit 301,5 tonneaux et que son poids léger fait aussi 301,5 tonneaux. Ce chiffre se rapproche effectivement des 300 tonneaux que Fournier donne pour un navire ayant les caractéristiques principales de notre exemple (voir le [tableau des proportions](#) dans l'étude sur les [couples du navire](#)).

Si on effectue ce même calcul pour un navire dit de 1.000 tonneaux, avec à priori un nombre de couples proportionnel à la longueur de la quille, soit 45 couples dont 15 sur l'avant du maître couple, on arrive à une jauge de 905 tonneaux.

Cette méthode de calcul de Fournier n'a donc rien de farfelu pour l'époque. Il faut dire qu'à cette période, on construisait les navires beaucoup plus en fonction de l'expérience acquise (on savait par la pratique qu'un navire de telles dimensions pouvait charger environ tant de marchandises) que selon des plans et des calculs très rarement effectués.

Si on effectue le même calcul que précédemment pour un navire de même type construit selon la nouvelle méthode de Fournier (voir l'étude sur les [couples du navire](#)) avec un plat de varangue égal à la demi longueur du bau, on s'aperçoit que l'on aboutit à des chiffres aberrants (volume 6 fois plus important). Ceci est dû au fait que la variation du plat des varangues ne suit plus du tout celle de la longueur des baux (au dernier couple arrière, on aurait un plat de près de 7 pieds alors qu'il est en réalité nul). Il faut alors tracer tous les couples et en déduire graphiquement les plats après avoir donné à l'ensemble une coulée harmonieuse. Plus simplement, on peut utiliser la méthode précédente en sachant qu'il faut modifier le résultat d'un certain coefficient multiplicateur.