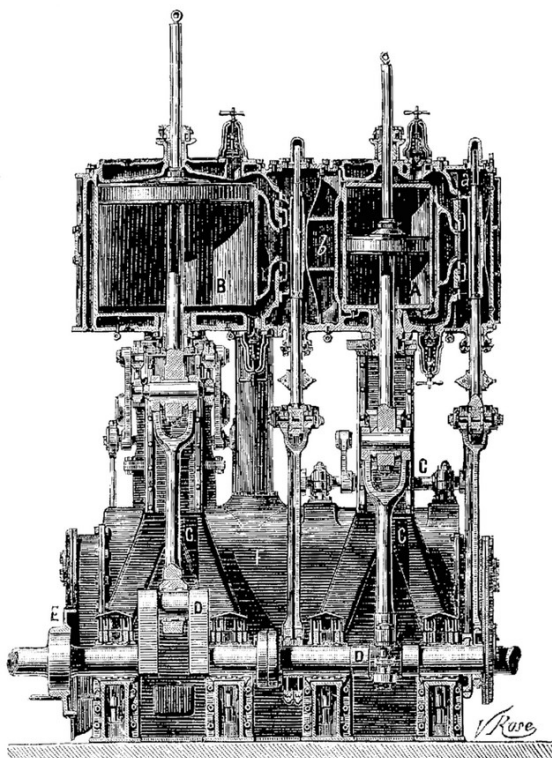


Le développement des machines à expansion multiple dans la marine

Table des matières

Définitions	2
De 1781 à 1860, 80 ans de recherches.....	2
La machine de James Watt :.....	2
Les recherches de Hornblower :.....	2
Recherches de Arthur Woolf	3
Le développement pour la marine.....	5
Travaux de Randolph et Elder	7
1860 : l'introduction définitive de la double expansion.	7
Le bilan de 80 ans de recherches	7
La démonstration pour l'amirauté anglaise	9
L'introduction en France : les travaux de Benjamin Normand	10
La pression de vapeur.....	11
Les autres constructeurs en France.....	12
Bibliographie.....	14



Coupe d'un moteur compound deux cylindres ayant équipé le *Ville de Nantes* (Louis Figuier, les merveilles de la science 1891)

Il est communément constaté que les machines à vapeur que l'on retrouve dans les épaves sont des machines à expansion multiple, et plus précisément des triples expansions.

Cependant, lorsqu'il nous est amené à enquêter sur une épave inconnue, qui semble dater de la seconde moitié du 19^e siècle et ne disposant que de deux cylindres, il apparaît nécessaire de connaître les périodes d'apparition de ces machines.

Bien sûr, il ne s'agit en aucun cas de donner une date précise de la transition technologique qui a fait passer les constructeurs de bateau de la détente simple à la détente multiple. Nous allons voir que cette évolution s'est faite sur plusieurs décennies, depuis l'idée originale jusqu'à la généralisation dans la construction navale.

Définitions

La définition du terme « machine à expansion multiple » est donnée par A. Mallet¹. Cette désignation comprend toutes les machines dans lesquelles la vapeur agit successivement sur plusieurs pistons.

Le terme « Compound » signifie de manière littérale « machine composée ». Ce terme ne s'est généralisé en France qu'en 1870, et sous-entend que cette technologie est d'origine anglaise. Cependant le mot a été employé dès le début du 19^e siècle.

Il ne faut cependant pas confondre moteur à expansion multiple et cylindre à simple ou double détente². Ce qui est communément appelé « cylindre » est constitué d'un tube en acier dans lequel coulisse un piston dans un mouvement de va et vient. De manière générale, c'est la vapeur qui vient pousser ce piston. Dans un cylindre à simple détente, le piston est poussé dans un sens puis revient à sa position initiale par un mécanisme extérieur. Dans un cylindre à double détente, la vapeur est introduite alternativement de chaque côté du cylindre, ce qui génère le mouvement alternatif du piston. Ainsi, dans le cas d'un cylindre à simple détente, le piston ne produit son effort que lors d'une seule course et a besoin d'un système extérieur pour revenir en place. Dans le cas d'un cylindre à double détente, le piston exerce son effort pendant les deux courses et ne nécessite pas d'intervention extérieure pour revenir à sa position initiale.

De 1781 à 1860, 80 ans de recherches

La machine de James Watt :

James Watt a posé les principes de l'utilisation de la détente pour faire se mouvoir un piston. La partie supérieure du piston était en liaison permanente avec la chaudière, tandis que la partie inférieure du piston était alternativement remplie de vapeur puis mise à l'air libre. La pression de vapeur de la chaudière provoquait ainsi le mouvement du piston. On le voit, il ne s'agit pas encore d'utiliser la détente de la vapeur directement, mais plus d'équilibrer le piston par la vapeur.

Dans une deuxième version de sa machine, James Watt a en quelque sorte inversé le fonctionnement en laissant la partie haute du piston sous une pression constante, puis en utilisant la vapeur dans la partie basse, découvrant ainsi l'effet de détente de la vapeur. Nous sommes alors en 1769.

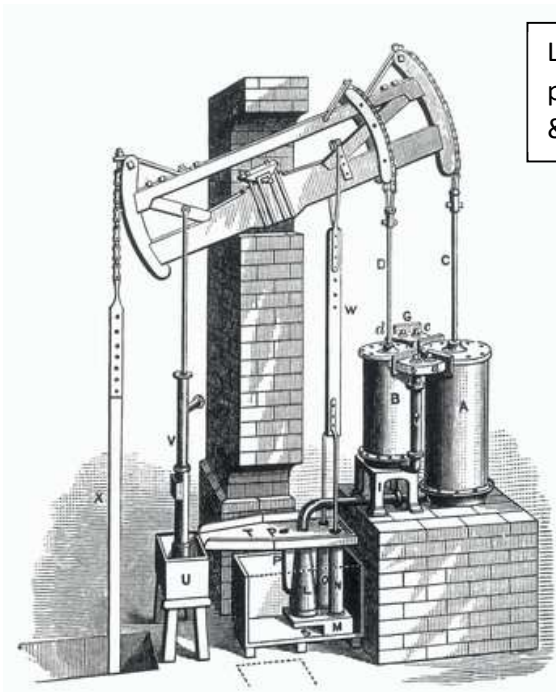
Les recherches de Hornblower :

En 1781, Joseph Hornblower, qui était entrepreneur spécialisé dans l'installation de machines à vapeur, prit une patente pour exploiter le phénomène de détente découvert par Watt. Avec ses fils Jonathan et Jethro, il mit au point une machine sur le principe de Watt, mais dont la vapeur résiduelle

¹ Evolution pratique de la machine à vapeur, par A. Mallet, Société des Ingénieurs Civils de France, 1910

² Un autre terme est utilisé, celui de « simple effet » ou « double effet »

sortie d'un premier piston était réutilisée dans un deuxième piston plus volumineux. Cette avancée permettait de mieux uniformiser les efforts tout au long des différentes étapes de fonctionnement du moteur. Cette machine, on le voit est donc une double expansion avec deux cylindres à simple détente.



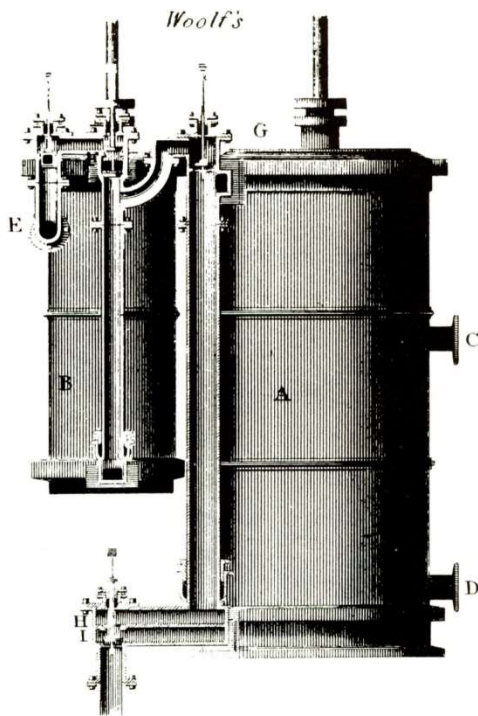
La machine de Jonathan Hornblower ci-contre et portrait de l'ingénieur ci-dessous (documents Science & Society)



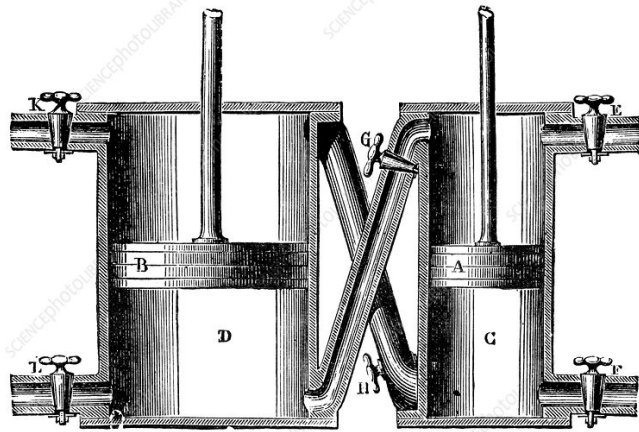
Recherches de Arthur Woolf

Arthur Woolf dépose un brevet en juin 1804 et y indique les spécificités suivantes : « *La machine, d'après la disposition que je propose, doit avoir deux vases à vapeur³ de dimensions différentes suivant la température et la force expansive de la vapeur qu'on doit employer. Chacun de ces vases possède un piston et le petit cylindre communique haut et bas avec la chaudière au moyen de robinets de n'importe quelle disposition convenable. Le haut du petit cylindre communique avec le bas du grand et le bas du petit avec le haut du grand au moyen d'obturateurs destinés à ouvrir et à fermer les passages, robinets, soupapes, etc. Enfin le haut et le bas du grand cylindre peuvent être mis en communication à volonté avec un condenseur à injection ou d'autre système. Les choses ainsi établies, lorsque la machine fonctionne, la vapeur à haute température est admise sur le petit piston tandis que celle qui a agi au-dessous de ce piston dans le coup précédent est envoyé dans le piston du grand cylindre, la vapeur sous ce dernier allant au condenseur. Lorsque les deux pistons sont arrivés au bas de leur course, la vapeur, supposée à une pression de 40 livres, agissant sous le petit le poussera vers le haut et la vapeur qui est au-dessus ira agir sous le grand piston, tandis que celle qui est au-dessus de celui-ci sera dirigée vers le condenseur et ainsi de suite ».*

³ Autrement dit : deux cylindres



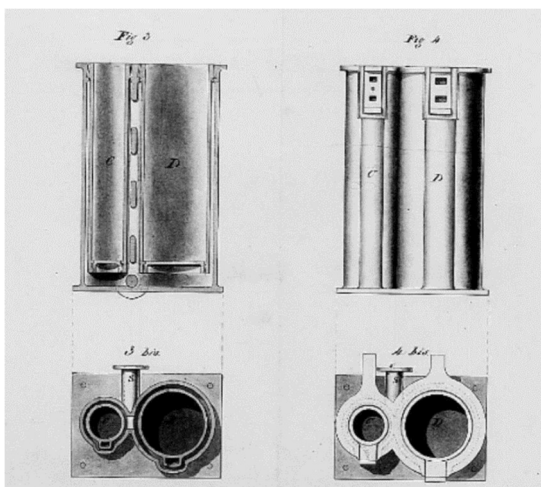
Principe de la machine de Woolf



En résumé, Arthur Woolf vient de déposer un brevet pour un moteur à double expansion et à cylindres à double détente. On notera cependant que les cylindres agissent de la même manière en même temps, et que la bielle n'est pas encore intégrée dans le fonctionnement. Par voie de conséquence, cette machine est construite pour un balancier.

A noter que pour une utilisation identique⁴, une machine de Watt utilisait 84 boisseaux de charbon, alors qu'une machine de Woolf en utilisait 36.

A noter qu'en 1806, Woolf s'associa à un certain Humphrey Edwards, lequel se désengagea pour aller s'installer en 1814, la paix revenue, à Paris, rue des Marais, pour y construire des machines à double expansion. On peut donc noter que c'est à cette date que ces machines furent produites en France, même s'il ne s'agissait pas encore de moteurs pour la marine.



Brevet déposé en 1815 par H. Edwards pour une pompe (Brevet 1BA656 base des brevets INPI)

Le fabricant et lui obéissant serviteur
H Edwards

⁴Comparaison faite sur des machines de scierie déployant 36 chevaux.

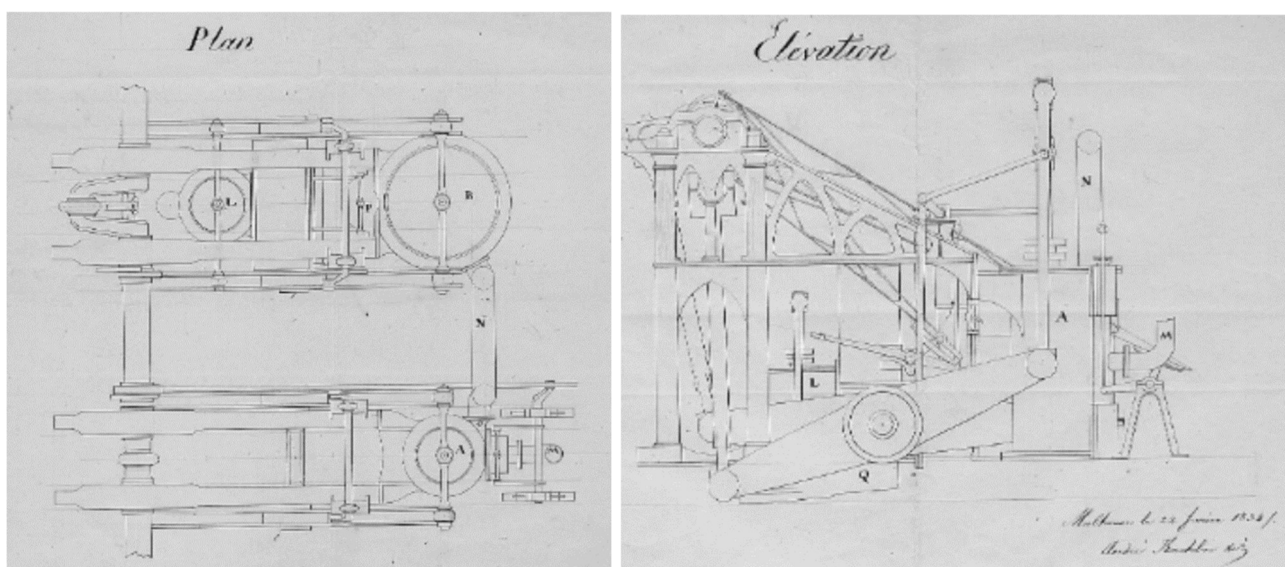
Le développement pour la marine.

Le premier navire équipé de machine à double expansion, fut le *James Watt* en 1829. Il était doté de deux cylindres et l'un de ceux-ci fut remplacé par un cylindre à basse pression.

La même année, le *Hercules*, reçut une machine à deux cylindres identiques. Il y fut adjoint un troisième cylindre basse pression qui recevait la pression des deux premiers.

Il fut remarqué que pour l'adaptation des machines à vapeur aux moyens de transport, que ce soit pour les bateaux, ou pour les trains, il fallait des moteurs capables de déployer leur effort de manière constante tout au long des courses des pistons. Oublier cet élément essentiel revenait à construire des machines qui tôt ou tard finiraient par avoir des casses moteur. Ce constat était d'autant plus à propos, que les constructeurs imaginaient plusieurs moteurs actionnant le même arbre de transmission.

En 1834, la compagnie A. Koechlin et Cie de Mulhouse déposa un brevet intitulé « machine à vapeur expansive, à cylindres indépendants et combinés ».



Vos très honorables et très obligeants Secrétaires
André Koechlin & Cie

Brevet déposé en 1834 par A. Koechlin (Brevet 1BA4524 base des brevets INPI)

Le brevet consiste à utiliser un réservoir intermédiaire stockant la vapeur entre les cylindres haute et basse pression et une répartition des efforts des pistons sur la bielle. L'introduction de vapeur provenant directement de la chaudière dans le réservoir intermédiaire pour aider au démarrage était également prévue dans le brevet.

Sur la même base furent développées les machines à triple et même quadruple expansion qui furent très largement utilisées sur les navires.

Le brevet est rédigé ainsi :

« Les difficultés que présente l'exécution des machines à vapeur, système Woolf, à deux cylindres ont fréquemment fait renoncer à leur emploi dans les centres manufacturiers et industriels ; pour la navigation à la vapeur qui demande des machines encore plus perfectionnées et plus commodes, le système de Woolf, malgré tous les efforts que l'on a faits pour l'appliquer, n'a pas même pu concourir avec les machines à haute ou basse pression qui servent ordinairement aux bateaux à vapeur et l'on a pour ainsi dire renoncé à son emploi, pour la raison que les pistons des deux cylindres sont obligés de faire leur course ensemble dans le même temps et qu'un bateau à vapeur qui, toujours, porte deux machines se trouverait ainsi posséder quatre cylindres et quatre pistons qu'il faut entretenir et régulariser

La nouvelle machine expansive à cylindres indépendants et combinés ne présente aucune de ces inconvénients et semble être exclusivement propre à la navigation à la vapeur et pour les chemins de fer. En effet, s'il est reconnu qu'un bateau à vapeur a toujours besoin de deux machines, tant pour obtenir un mouvement régulier que pour faire marcher le bateau en tout temps et instantanément dans chaque position des manivelles, dans un sens ou dans l'autre, les deux cylindres indépendants alimentés par une seule et même chaudière et agissant par l'expansion de la vapeur du petit au grand ont chacun leurs pistons indépendants et leur mouvement se trouve réglé de façon que, lorsque l'un a terminé sa course, l'autre se trouve au milieu, ce que l'on a pu atteindre jusqu'à présent par le système de Woolf qu'en plaçant deux machines composées de quatre cylindres, quatre pistons, deux condenseurs. »⁵.

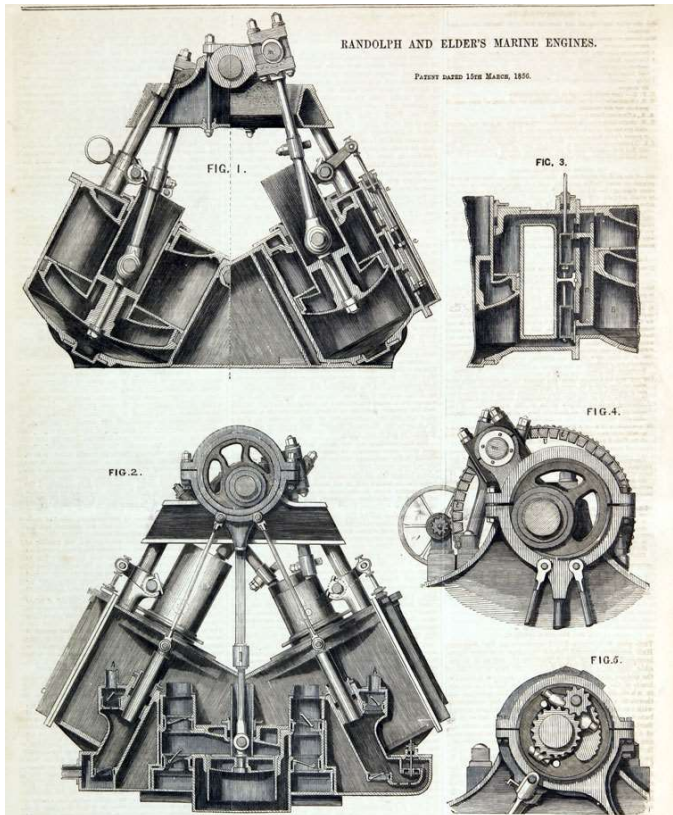


André Koechlin (1789 – 1875) a créé une société éponyme ainsi que les Fonderies de Mulhouse, ce qui deviendra plus tard la SACM. Son neveu fut Maurice Koechlin, concepteur de la tour Eiffel (document Wikipédia)

⁵ A noter que si ce brevet est enregistré en tant que brevet d'invention, il aurait dû l'être en tant que brevet d'importation, puisque son véritable inventeur est un certain Ernst Wolff dont le nom du brevet est intitulé « Improvements in steam engines ».

Travaux de Randolph et Elder

En 1854, les constructeurs Randolph et Elder eurent l'idée qui consistait à disposer le grand et le petit cylindre sur la même manivelle mais de manière opposée. Les manivelles de chaque paire de piston étaient à 180 degrés. Le tout était alimenté avec une pression de 2,8kg.



Principe du moteur Randolph et Elder (document Grace's Guide to British Industrial History)

1860 : l'introduction définitive de la double expansion.

Le bilan de 80 ans de recherches

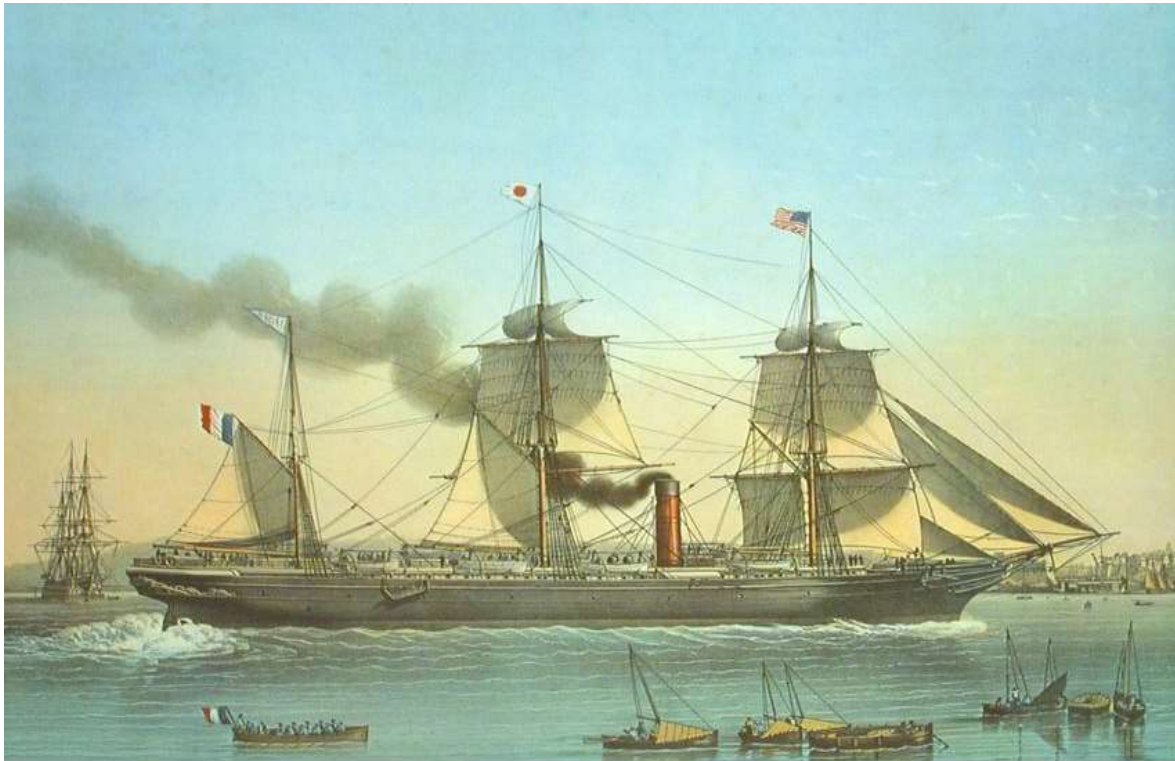
Selon A. Mallet⁶, « on reconnaîtra qu'à la fin de la dernière période, c'est-à-dire aux environs de 1860, toutes les solutions ou à peu près relatives à l'emploi de la double expansion dans les machines à vapeur avaient été proposées et quelques-unes même appliquées sur une échelle plus ou moins importante. Il ne restait pas grand-chose à inventer ; il n'y avait plus qu'à opérer une sélection entre ces solutions et à en réaliser l'emploi d'une manière générale. »

Il est admis à cette époque que cette technique permet une économie substantielle de combustible. Pour chiffrer cette information, on peut se référer à l'exemple du paquebot Pereire, de la Compagnie Générale Transatlantique. Construit en 1865, il était mu par une machine à expansion simple de 3500ch, et engloutissait 1,60kg de charbon par cheval-heure. Sa vitesse était alors de 13 nœuds permettant une traversée de 2500 milles en huit jours pour un poids total de charbon consommé de 1075 tonnes.

Ayant remplacé cette motorisation par un moteur compound à pression plus élevée fournissant la même puissance, la consommation de charbon s'établissait alors à 1kg par cheval heure et la traversée

⁶ Evolution pratique de la machine à vapeur, par A. Mallet, Société des Ingénieurs Civils de France, 1910.

citée précédemment ne nécessitait plus que 672 tonnes, tout en conservant la même vitesse. En outre, le moteur étant plus léger et nécessitant moins de charbon, le poids total moteur + charbon au départ était de 1460 tonnes au lieu de 1950 avec le moteur précédent, soit une économie de charbon de 10 000 francs à quoi il faut ajouter le bénéfice représenté par l'accroissement de chargement payant.



Le paquebot Pereire de la Compagnie Générale Transatlantique

Voilà des arguments propres à convaincre les armateurs !

Cependant, si les données pouvaient séduire pour les navires destinés aux longs parcours, propriétés d'armateurs capables de leur financement ainsi que de leur maintenance⁷, il n'en était pas de même pour les navires plus petits tels que des caboteurs.

Comme on vient de le voir, ces derniers étaient alors dotés de machines à moyenne pression, et à simple expansion. De fait, la pression n'était pas suffisante pour justifier des machines à double expansion. Le manque de pression venait principalement du fait que les systèmes à haute pression étaient encore fragiles, trop chers et demandaient une maintenance trop honoreuse.

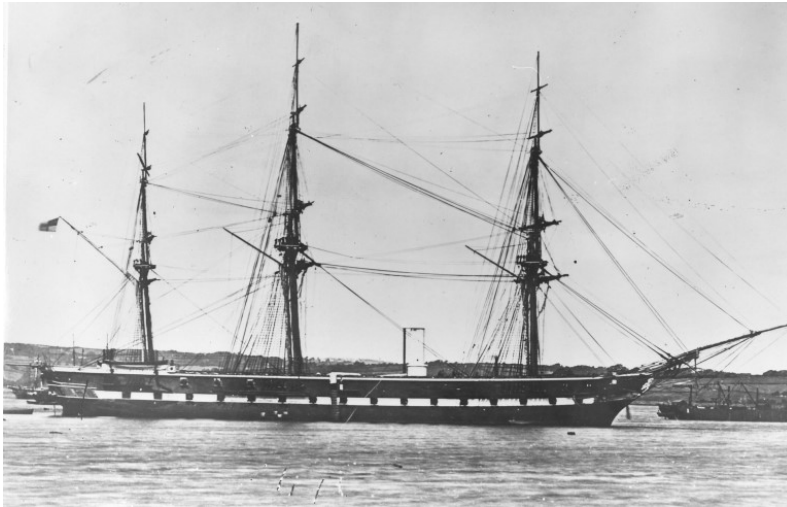
Le fait était qu'avec une pression moyenne en entrée du premier cylindre, la pression en sortie était trop faible pour pouvoir être utilisée dans un deuxième cylindre.

La question se posait donc de savoir comment adapter la double expansion à des systèmes dont la pression ne peut être augmentée.

⁷ Il n'est pas fait référence aux navires militaires dont les besoins et les utilisations étaient tout autre.

La démonstration pour l'amirauté anglaise :

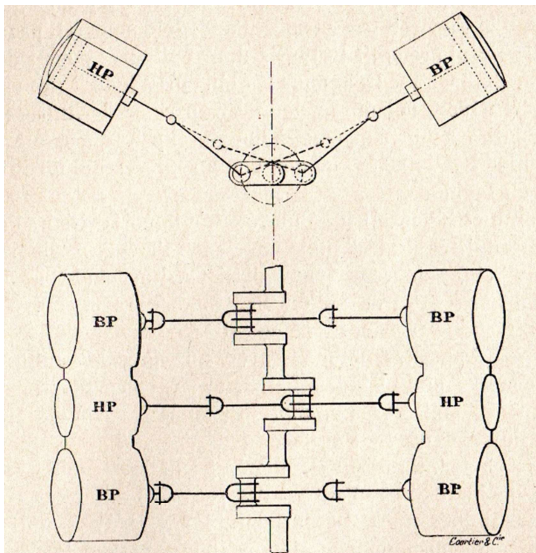
On a pu constater que les amirautés n'avaient pas, jusque là, manifesté d'intérêt pour les motorisations compound.



Le HMS Constance après qu'il ait reçu sa motorisation (photo www.esquimalt.ca)

Le HMS Constance, une frégate à voile de 1846, fut le premier navire militaire à recevoir un moteur Randolph et Elder, à l'occasion de sa motorisation en 1862⁸. Montant des machines à détente simple de même puissance sur des navires identiques (le HMS Octavia et le HMS Arethusa) l'amirauté anglaise cherchait alors à se faire sa propre idée de la question.

La machine du HMS Constance était constituée de deux moteurs identiques agissant sur le même vilebrequin. Chaque moteur était constitué d'un cylindre haute pression et de deux cylindres basse pression.



Ci-contre, la machine qui a équipé le HMS Constance. Ci-dessous portrait de John Elder (documents extraits du livre de A. Mallet)



Si les résultats en terme de consommation de charbon ont donné satisfaction, ce genre de dispositif a vite montré ses limites en terme de complexité et d'encombrement.

Cela dit, l'entreprise Randolph et Elder avait réussi à démontrer que le compound était la voie de l'avenir.

⁸ Il était courant alors pour les amirautés européennes de conserver des navires existants et de les motoriser ; Le cas le plus célèbre en France fut celui du Ville de Paris, un vaisseau de 120 canons qui fut motorisé en 1858.

Benjamin Normand, dont il sera question ci-après, en a rendu cet hommage : « *on leur doit cet immense service d'avoir démontré que les conditions excellentes d'expansion de la vapeur pouvaient être obtenues avec une pression initiale ne dépassant pas 3atm et même 2.5atm et par conséquent par des moyens très simples sans emploi de chaudières compliquées et souvent de condenseurs de surface* ». ⁹

Le fait est que de 1852 à 1868, l'entreprise produisit cent onze machines à double expansion.

L'introduction en France : les travaux de Benjamin Normand

Benjamin Normand était le fils du constructeur havrais Augustin Normand et le frère de Jacques-Augustin Normand, qui succéda à son père.

S'il dépose son premier brevet en 1856, sa première réalisation majeure fut la machine du *Furet* en 1860. Ce bateau était destiné à assurer un service de transport de passagers entre Paris, Rouen et Le Havre. Le moteur était situé à proximité d'une boîte à feu d'une chaudière. La vapeur sortant du cylindre haute pression n'allait pas directement dans un cylindre basse pression, mais passait dans un réchauffeur alimenté par les fumées sortant de la boîte à feu..



Affiche pour les voyages à bord du *Furet*
(document BNF)

La consommation de charbon s'en trouva alors réduite. Il fut estimé que pour un cheval vapeur, il fallait une consommation horaire de 6.52kg de charbon, contre une consommation alors estimée entre 10 et 11kg pour des machines à moteur à simple détente.

En 1867, après d'autres projets mettant en œuvre là aussi des formes de machines compound depuis abandonnées, Benjamin Normand travailla sur une machine de 350ch pour le navire *Morlaix*. Les deux cylindres étaient alors verticaux et actionnaient un vilebrequin. Comme pour le *Furet*, la vapeur du

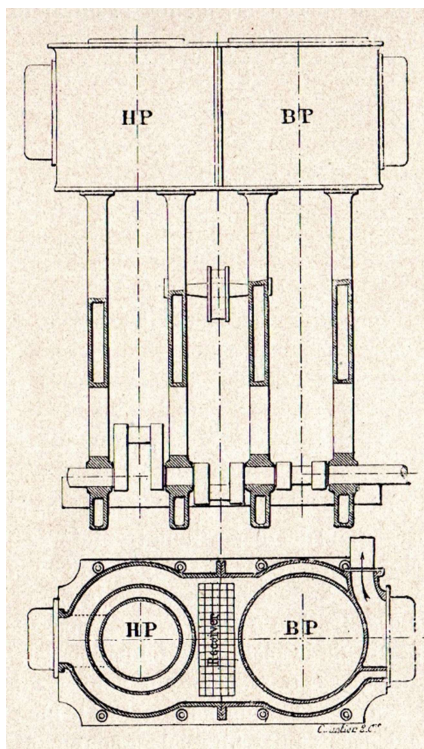
⁹ Séance du 6 novembre 1868 de la Société des Ingénieurs Civils

premier cylindre passait dans un réchauffeur, appelé alors « Reciever » avant d'entrer dans un deuxième cylindre.

Ce principe possédait de nombreux avantages. Il permettait une bonne répartition des efforts tout au long des diverses phases de la course des deux pistons, il permettait un gain de place considérable tout en conservant les gains de consommation de charbon constatés sur le Furet.

Benjamin Normand avait alors posé le principe des moteurs compound qui allait plus tard être adopté de manière définitive sur les moteurs compound.

Le mérite de ce brillant ingénieur fut d'adopter des principes simples, sans chercher à utiliser de trop fortes pressions, ni de systèmes trop complexes. Malheureusement, son caractère exécrable fut fatal à son entreprise et il mourut ruiné en 1888.



Ci-contre, le moteur du *Morlaix* imaginé par Benjamin Normand en 1867. Le Reciever est situé entre les deux cylindres. Ci-dessous, photographie de Benjamin Normand (extraits du livre de A. Mallet)



La pression de vapeur

Il est ici intéressant de constater que Benjamin Normand venait de trouver un moyen robuste de palier au manque de pression.

Par ailleurs, on ne peut évoquer l'apparition du compound sans parler de la pression des chaudières.

Il est vrai que dans les années 1860 – 1870, les chaudières dites « moyenne pression » délivraient 2 à 3 atm. La marine impériale avait une norme de 2.75 atm¹⁰. Les chaudières dites « à haute pression » délivraient jusqu'à 6 voire 8 atm.

Les avantages des chaudières à haute pression étaient multiples. Elles nécessitent moins de combustible, elles sont plus petites, donc plus légères et paradoxalement, moins coûteuses. Elles offrent en outre la possibilité de plus grandes détente dans les cylindres.

¹⁰ Source : « Etude sur les machines à vapeur marines et leurs perfectionnement » par Victor Delacour

Cependant, elles avaient aussi des inconvénients qui ont freiné leur utilisation. Elles exigeaient une surveillance constante afin d'éviter les risques d'explosions, d'autant qu'elles étaient placées dans des espaces restreints où travaillaient une grande quantité de marins.

En outre, en augmentant la pression, on augmentait les dépôts salins. Au-delà de 5 bars de pression, il devient donc nécessaire de séparer les sels de l'eau avant l'introduction dans les chaudières. Il faut en effet préciser que l'eau du circuit de vapeur est directement puisée dans la mer.

Henri Ortolan¹¹ l'explique ainsi : « *Les dépôts salins se forment sur les parois des chaudières avant que l'eau soit complètement saturée ; ils s'y accumulent au point de former des couches assez épaisses pour que le métal soit surchauffé, et pour l'exposer à être brûlé ou déchiré.* »

Ces dépôts sont aussi la cause d'une perte notable de chaleur, parce qu'ils sont très mauvais conducteurs du calorique, et que, par leur interposition entre l'eau et la tôle, ils empêchent la tôle de transmettre à l'eau la chaleur dégagée pendant la combustion »

Eugène Armengaud¹² explique ainsi qu'au-delà d'une température de 150 degrés, ces dépôts se forment et nécessitent un entretien scrupuleux. Il devient nécessaire d'opérer une séparation du sel de l'eau, par l'utilisation de condenseurs à surface.

Ce n'est que plus tard que le cycle de la vapeur fonctionnera en circuit fermé, par l'utilisation de pompes.

Aussi, l'invention de Benjamin Normand, appelée « receiver » mais aussi « surchauffeur » palie à ce manque de pression

Les autres constructeurs en France

Si dans son livre, Anatole Mallet évoque longuement le nom de Benjamin Normand¹³, il n'oublie pas de rappeler que d'autres industriels ont participé en France à répandre la motorisation compound.

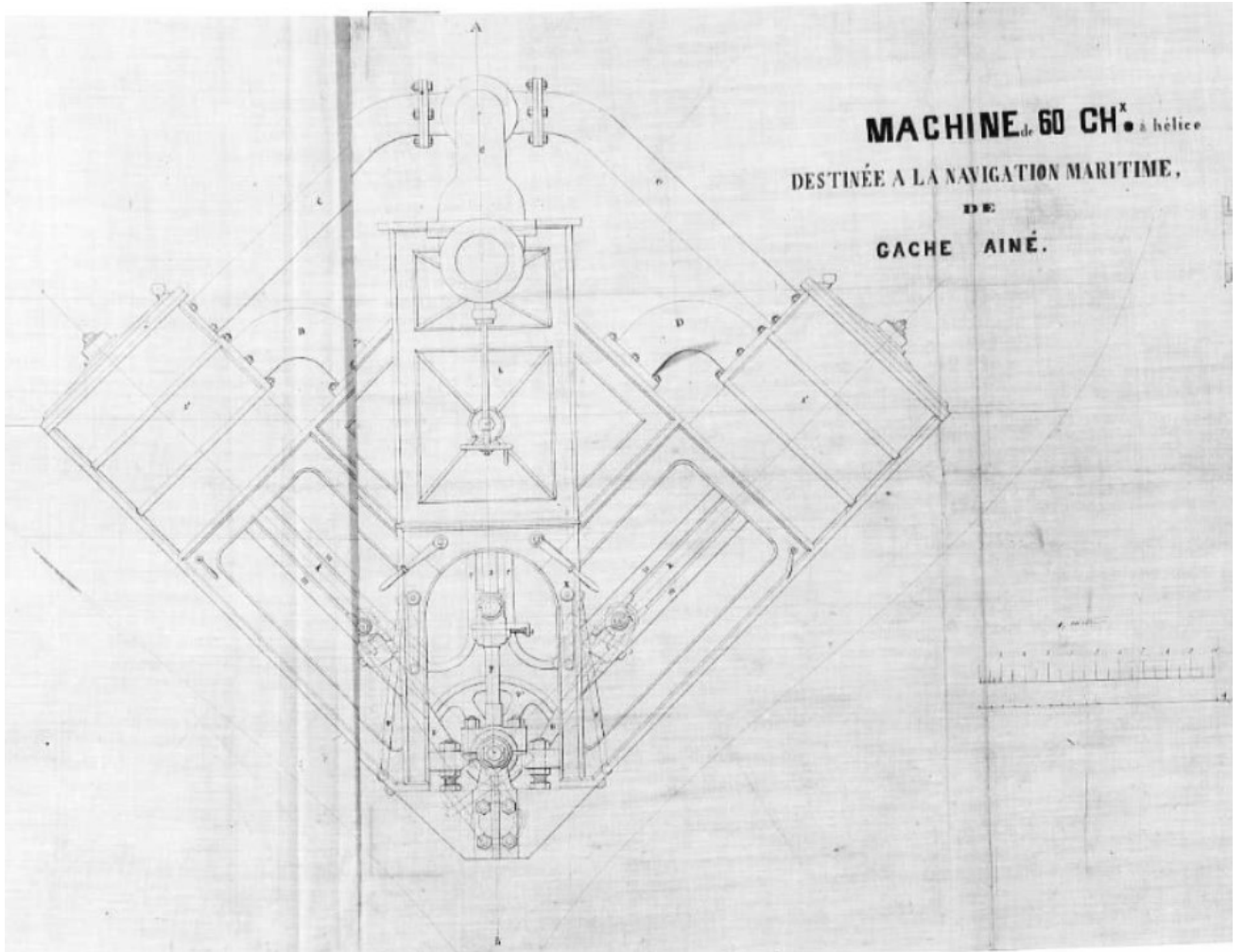
Nous pourrions ainsi citer Vincent Gache qui a déposé de nombreux brevets pour l'utilisation des machines compound et qui a posé une machine complexe sur le vapeur *Comtesse-Luba* en 1862.

Il est aussi possible de citer Pierre Verrier, originaire de Lyon. Il a déposé un brevet en 1860 pour un moteur compound, puis s'est associé avec Benjamin Normand pour fabriquer des machines « Système Normand et Verrier ». Mais son intervention la plus notable fut la machine du vapeur *Coromandel* en 1876. Il y plaça une chaudière timbrée à 10kg. Prenant un brevet pour des machines à triple et à quadruple expansion, Pierre Verrier ouvrait alors une autre voie.

¹¹ Henri Ortolan : « Traité élémentaire des machines à vapeur marines », 1859

¹² Eugène Armengaud : « Traité théorique et pratique des moteurs à vapeur » 1862

¹³ Anatole Mallet rappelle qu'il a été l'élève de Benjamin Normand, ceci explique cela.



Brevet de 1855 déposé par Vincent Gache (document : base brevets INPI)

Bibliographie

Anatole Mallet : « Evolution pratique de la machine à vapeur », 1910

Henri Ortolan : « Traité élémentaire des machines à vapeur marines », 1859

Eugène Armengaud : « Traité théorique et pratique des moteurs à vapeur » 1862

Victor Delacour : « Etude sur les machines à vapeur marines et leurs perfectionnement » 1863

Louis Figuier : « les merveilles de la science ou description populaire des inventions modernes » 1891